

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Застосування методів машинного навчання
в системах розумного освітлення**

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-63

спеціальності 141 Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Киянчук Т.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Костик Л.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Медвідь В.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)	Вадим КОВАЛЬ (прізвище та ініціали)
« »	2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електроенергетика
(шифр і назва спеціальності)

студенту Киянчуку Тарасу Любомировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування методів машинного навчання в системах розумного освітлення

Керівник роботи Костик Любов Миколаївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від 10 жовтня 2024 року №4/7-983.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Тип об'єкта для освітлення – приміщення із змінними даними природного освітлення, зайнятості, типом зорових робіт.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналіз схем інтелектуального керування освітленням; аналіз методів машинного навчання для їх застосування в системах інтелектуального освітлення; алгоритм методу керування внутрішнім освітленням для точного регулювання рівня затемнення світильників, адаптований до нелінійної зміни природної освітленості.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Блок-схеми систем інтелектуального керування освітленням; методи машинного навчання та особливості їх застосування в системах інтелектуального освітлення; блок-схема інтелектуальної системи керування освітленням із можливістю навчання; математична модель розрахунку освітленості з врахуванням показів датчиків освітленості та присутності; алгоритм машинного навчання мережі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та БНС	К.т.н., доц. Гурик О.Я.		
	Ст.викл. Клепчик В.М.		
Нормоконтроль	К.т.н., зав.каф.ЕІ Коваль В.П.		

7. Дата видачі завдання 10.10.2024 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літератури по тематиці кваліфікаційної роботи		
2.	Дослідження різних схем інтелектуального керування освітленням		
3.	Дослідження методів машинного навчання		
4.	Дослідження практики впровадження методів машинного навчання для освітлення		
5.	Опис схеми керування освітленням із можливістю навчання		
6.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент

(підпис)

Киянчук Т.Л.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Костик Л.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-63.- Тернопіль : ТНТУ, 2024.

Стор. 78 ; рис.10; табл.8; джерел – 14.

Кваліфікаційна робота виконана на підставі завдання на тему «Застосування методів машинного навчання в системах розумного освітлення».

Мета роботи: дослідити застосування машинного навчання в інтелектуальних системах керування освітленням, розробити алгоритм системи керування освітленням приміщення з врахуванням природного освітлення.

Ключові слова: ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ШТУЧНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА, ФОТОДЕТЕКТОР.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Технології керування освітленням у будівлях	9
1.1.1 Схеми контролю присутності	13
1.1.1.1 Економія електроспоживання при використанні методів контролю присутності	19
1.1.1.2 Фактори, що впливають на якість контролю на основі присутності	20
1.1.2 Керування освітленням з врахуванням природнього світла	22
1.1.2.1 Способи контролю освітленості з врахуванням денного світла	24
1.1.2.2 Економія електроспоживання при використанні системи керування освітленням з врахуванням денного світла	26
1.1.2.3 Фактори, що впливають на продуктивність елементів керування, які враховують природнє освітлення	27
1.1.2.4 Налаштування контрольних параметрів	29
1.1.3 Управління освітленням за розкладом	31
1.1.4 Змішана система управління	32
1.1.5 Тенденції розвитку технологій керування освітленням	33
1.2 Висновки до розділу 1	35
2 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	36
2.1 Машинне навчання в розумному освітленні	36
2.1.1 Методи машинного навчання	36
2.1.1.1 Контрольоване навчання	38
2.1.1.2 Неконтрольоване навчання	41
2.1.1.3 Навчання з підкріпленням	43
2.1.1.4 Ансамблеве навчання	44
2.1.1.5 Глибоке навчання	45
2.2 Застосування машинного навчання в розумному освітленні	47
2.3 Висновки до розділу 2	54

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	55
3.1 Структура інтелектуальної системи керування освітленням із можливістю навчання	55
3.2 Енергоефективна інтелектуальна система керування освітленням із врахуванням денного освітлення і можливістю навчання	56
3.2.1 Ініціатор	58
3.2.2 Препроцесор	60
3.2.3 Блок прийняття рішень	65
3.2.4 Зміни природного освітлення в робочому режимі	69
3.2.5 Видалення фотодетекторів при зміні природної освітленості	70
3.3 Висновки до розділу 3	71
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	72
4.1 Вимоги електробезпеки до освітлювальних установок	72
4.2 Правила техніки безпеки при експлуатації освітлювального обладнання	74
4.3 Робота з освітлювальними установками при надзвичайних ситуаціях	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	78

ВСТУП

Актуальність теми. З прискореним розвитком сучасних технологій збільшується кількість і екологічна якість різноманітних будівель, а їх споживання енергії продовжує зростати, що створює велике навантаження на природне середовище. Близько 20% загального світового споживання електроенергії зараз використовується для освітлення промислових та побутових споживачів. В офісних будівлях штучне освітлення може споживати до 40% загального енергоспоживання. Одночасно зростає попит на зручність та інтелект у приміщенні. Інтелектуальні системи освітлення, які орієнтовані на людину, є невід’ємною частиною будь-якої сучасної будівлі і прямо впливають на вартість електроенергії, комфорт, здоров’я та безпеку користувачів.

Інтелектуальні системи керування освітленням повинні враховувати багато факторів середовища: наявність природного світла, зайнятість окремих зон, тривалість перебування користувачів у зоні, типи зорових задач, які виконуються у кожній зоні, тощо. Більшість факторів є нелінійними і непрогнозованими, що вимагає оперативної зміни у роботі освітлювальної системи для забезпечення її енергоефективності. Тому застосування методів машинного навчання для керування джерелами світла та датчиками для моніторингу неконтрольованих джерел світла дозволяє отримати швидкий час відгуку та менше обчислювальне навантаження порівняно з методами, які використовують контури керування без залучення штучних нейронних мереж.

Мета роботи: дослідити застосування машинного навчання в інтелектуальних системах керування освітленням, розробити алгоритм системи керування освітленням приміщення з врахуванням природного освітлення.

Для досягнення мети у роботі були поставлені і вирішені наступні **завдання:**

- проаналізовано технології розумного керування системами освітлення, встановлено фактори, від яких залежить вибір схеми керування освітлювальною установкою;

- встановлено переваги та недоліки методів машинного навчання для їх застосування для систем інтелектуального освітлення;
- представлено енергоефективний інтелектуальний метод керування внутрішнім освітленням для точного регулювання рівня затемнення світильників, який адаптований до нелінійної зміни природної освітленості.

Об'єкт дослідження: методи машинного навчання у системах інтелектуального керування освітленням.

Предмет дослідження: схеми керування освітленням, алгоритми машинного навчання.

Наукова новизна:

- дістала подальший розвиток методика керування світловим потоком світильників для приміщення, розділеного на окремі зони із різними пріоритетами, з врахуванням нелінійної зміни природного освітлення та зайнятості окремих зон;
- представлено метод оптимізації потужності освітлювальної установки та використання комбінації нейронної мережі з лінійною оптимізацією для керування джерелами світла та датчиками моніторингу неконтрольованих джерел світла для швидкої реакції на умови освітлення або зміни попиту користувачів.

Практична цінність: Запропонований метод дозволяє використовувати різну кількість фотодетекторів, яка не залежить від кількості світильників, і змінювати режими роботи джерел світла з меншим часом відгуку та обчислювальним навантаженням.

Апробація результатів роботи. Отримані під час виконання кваліфікаційної роботи результати представлено на VII Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи» (29-31 травня 2024 року. Тернопіль: ТНТУ) [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Технології керування освітленням у будівлях

Енергоефективність є одним з головних напрямків досліджень в електротехніці на даний час. Підвищена увага та дослідження з метою виявлення ефективніших і розумніших способів використання електричної енергії базуються на зростаючій потребі зберегти глобальні ресурси, які постійно скорочуються, а також на стурбованості щодо впливу звичайних джерел енергії на навколишнє середовище. Зменшення споживання енергії означає зниження оплати за електроенергію, зменшення навантаження на мережу та менший вплив на навколишнє середовище. Освітлення є найпоширенішим і, відповідно, найбільш постійним видом навантаження. Воно становить значну частину загального споживання електроенергії всіма типами будівель. Наприклад, європейські дослідження показують, що у середніх і великих будівлях близько 40% загальної електроенергії використовується для внутрішнього освітлення.

Освітлення є затратною частиною для різних типів будівель – промислових, житлових, комунальних, комерційних. Якщо окремо розглядати офісні будівлі, то на освітлення використовується 25-35% від загального енергоспоживання. Таким чином, зменшення освітлювального навантаження в комерційних будівлях може мати значний позитивний вплив на зниження попиту на електроенергію, що, у свою чергу, допомагає зменшити вуглецеві викиди, що є важливим напрямком для енергетиків у даний час. Розглядаючи енергетичний вплив систем освітлення в перспективі, різні міжнародні та регіональні організації просувають спеціальні рекомендації щодо енергозбереження для систем освітлення. Тому дослідники постійно прагнуть досягти кращої ефективності освітлення, що означає підтримку оптимальних умов освітлення, використовуючи якомога менше енергії.

Дослідження показують значну економію від різних типів схем керування освітленням. Керування освітленням вручну залежить здебільшого від поведінки

мешканців, працівників чи відвідувачів, режиму перебування та загальної обізнаності щодо енергозбереження. На рівні користувача освітлювальними установками можна керувати різними типами комутаційних систем.

Основні звичайні системи перемикання забезпечують прості варіанти ввімкнення та вимкнення.

Регулятори затемнення надають користувачам можливість зменшувати інтенсивність ламп, але в цьому випадку лампи повинні керуватися баластами з можливістю затемнення.

Досконаліші електронні перемикачі можна запрограмувати на роботу різними способами, наприклад, покрокове перемикання або зміна інтенсивності. Удосконалені системи автоматизації будівель забезпечують більшу гнучкість у керуванні користувачем, оскільки вони пропонують можливість впровадження систем освітлення з комп'ютерним керуванням. У таких випадках користувачі можуть контролювати рівень яскравості та інші параметри прямо з екранів комп'ютера. Крім того, зараз на ринок присутні продукти, які дозволяють контролювати інтернет-спілкування за допомогою додатків для смартфонів. Ці технології пропонують нові гнучкі способи керування сценаріями освітлення для користувача. Але коли справа доходить до автоматизації процесу перемикання або затемнення світла, існує кілька різних технологій, які працюють не лише для користувача. Ці технології відрізняються залежно від параметрів, які вони враховують для керування лампами.

Автоматичні схеми дуже різноманітні за технологією та складністю. На базовому рівні автоматичне керування можна використовувати для ввімкнення або вимкнення світла, а на більш точному рівні вони можуть контролювати рівень освітлення на основі заданих вимог. Будь-яка схема керування може не підійти для застосування для будь-якого типу завдань. Різні робочі приміщення мають різні вимоги до освітлення та дуже різну поведінку споживачів. Вибір ламп, світильників і схем керування повинен здійснюватися відповідно до цих вимог, щоб забезпечити задоволення та продуктивність працівників. Щоб успішно

вибрати правильну технологію освітлення, необхідно вивчити поведінку споживачів кожного типу приміщення чи будівлі залежно від виду діяльності.

Включно зі схемою використання освітлення працівниками, є кілька інших факторів, які впливають на продуктивність систем керування, і ці фактори можуть бути характерними для певного типу системи керування. Наприклад, для датчиків присутності налаштування часу затримки є ключовим питанням, яке може вплинути на їх продуктивність; у той час як для систем, пов'язаних із денним світлом, вибір між перемиканням і затемненням або між алгоритмом відкритого та замкнутого циклу може мати вирішальне значення для успіху реалізації. Оскільки кожна система керування використовує різні параметри для керування освітленням, фактори впливу цих технологій також різні. Неможливість належного розуміння цих впливаючих параметрів може призвести до неправильного введення в експлуатацію систем керування освітленням і, отже, до незадовільної ефективності енергозбереження та незадоволеності користувачів. Таким чином, необхідно дослідити фактори, що впливають на кожну з цих стратегій керування, щоб визначити вплив зміни цих факторів на ефективність енергозбереження систем керування освітленням.

Фактори, які впливають на загальне енергоспоживання системи освітлення, можна визначити з основного рівняння споживання електричної енергії:

$$W = Pt,$$

де P - встановлена потужність освітлення, Вт;

t - час роботи, год.

Очевидно, що споживання енергії W можна зменшити шляхом зменшення одного або обох факторів P і t .

Встановлену потужність освітлення можна зменшити за допомогою ефективніших ламп. Ефективна лампа виробляє достатню кількість світлового потоку, використовуючи якомога менше споживаної потужності. Чим вища світлова віддача лампи (відношення світлового потоку до споживаної потужності джерела світла), тим ефективніше вона використовує вхідну потужність. Використовуючи лампи з більш високою світловіддачею, загальне освітлювальне

навантаження можна значно зменшити. Освітлювальне навантаження також можна зменшити за допомогою правильного проектування освітлення. Метод робочого освітлення в дизайні освітлення забезпечує необхідні рівні освітлення там, де виконуються завдання, зберігаючи при цьому нижчий рівень освітлення в інших зонах.

Системи керування, пов'язані з денним світлом, відіграють роль у зменшенні потужності освітлення, використовуючи рівень доступного денного світла в кімнаті. Залежно від рівня денного світла, що надходить у кімнату чи зону, системи керування освітленням, пов'язані з денним світлом, перемикають або приглушують освітлювальні прилади, щоб підтримувати достатній рівень освітлення, необхідний для виконання завдання в кімнаті. У приміщеннях, де є значне потрапляння денного світла, освітлювальне навантаження можна значно зменшити застосовуючи системи керування за допомогою перемикання або затемнення.

Коли мова йде про скорочення годин роботи, то корисною може бути система планування, наприклад застосування таймерів ввімкнення/вимкнення світлових приладів. Датчики присутності виявляють присутність людей у кімнаті та можуть вимикати світло, коли в контрольній зоні немає людей. Таким чином можна скоротити години роботи, спричиняючи зменшення споживання енергії освітлення.

В сучасних приміщеннях при виборі технології автоматизації, застосування датчиків присутності є перспективнішим, ніж застосування таймерів і датчиків освітленості. Для цілей планування зазвичай використовуються системи управління енергією в будівлях і таймери. Але системам керування будівлями віддають перевагу для великих будівель, особливо для нових будівельних проектів, оскільки початкова вартість у цьому випадку набагато вища, а процес введення в експлуатацію є складнішим. Таким чином, для невеликих будівель і проектів модернізації таймери часто використовуються для планування через порівняно нижчу вартість і простішу реалізацію. Користувачів надають перевагу системам планування, таким як автоматизація будівель і панелі керування, ніж

датчикам присутності та освітленості, з точки зору досягнення очікуваної економії енергії, а також надійності технології.

Системи керування забезпечують більш просунуту та інтелектуальну продуктивність, коли вони інтегровані з системами автоматизації будівель. Системи автоматизації будівель забезпечують підвищену гнучкість для включення схем керування освітлювальними приладами, а також даних про енергію в реальному часі для кращого управління енергією.

1.1.1 Схеми контролю присутності

Серед схем керування, які використовуються для автоматизації освітлення, широко використовуються технології використання датчиків присутності. Датчики присутності використовують певну техніку визначення руху, щоб виявити присутність людей у певному діапазоні простору, тому освітлення вмикається, коли вони виявляють будь-яку людину, і вимикається, коли нікого немає протягом заздалегідь встановленого періоду затримки. Технологія датчика може бути різного виду та вартості. Пасивні інфрачервоні (PIR), ультразвукові, акустичні, мікрохвильові та інші види, всі вони мають свої плюси і мінуси. Деякі більш сприйнятливі до «False-Ons», тобто вони викликані хибним рухом від об'єкта, відмінного від фактичної людини. Інші мають зворотний ефект, і вони, як правило, вимикаються навіть за наявності людей. Дослідники виявили, що замість того, щоб покладатися тільки на датчик заповненості для кімнати чи зони, відсоток таких помилок можна значно зменшити, використовуючи декілька датчиків разом. Вони можуть бути одного типу або різних типів. Незважаючи на різницю в технології, що використовується для виявлення руху, основний алгоритм роботи системи залишається практично незмінним. Якщо руху від людей не виявлено, запускається таймер, встановлений під час введення в експлуатацію системи освітлення. У кінці таймера, якщо датчик не виявляє руху, встановлюється незайнятий стан і надсилаються відповідні сигнали для вимкнення світла. Якщо протягом цього періоду виявлено будь-який рух, лічильник скидається. Алгоритм роботи датчика присутності подано на рис. 1.1.

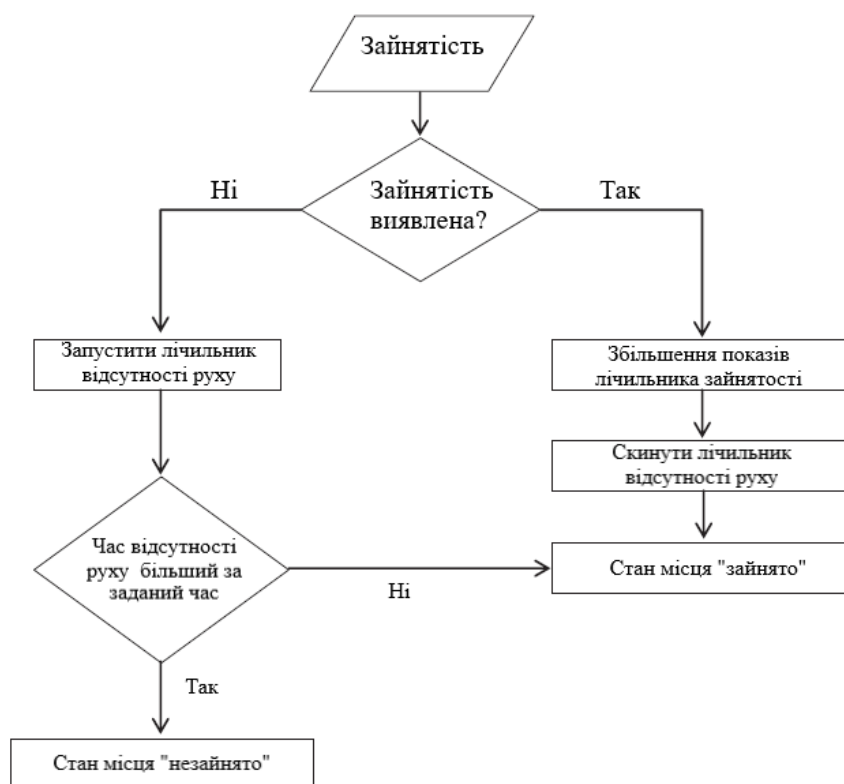


Рисунок 1.1 – Алгоритм роботи датчика присутності

Залежно від типу дій, які виконують контролери, схема контролю присутності може бути двох видів:

1) Перемикання на основі руху – залежно від руху, виявленого датчиком присутності, ця система перемикає увімкнення або вимкнення світла. Коли зона, охоплена датчиком, є незайнятою протягом заздалегідь визначеного інтервалу часу, світильники є вимкненими. Вони вмикаються, коли виявляється присутність датчиком. Цілком природно, що чим менше налаштування затримки, тим можна досягти більшої економії. Але в деяких випадках, зокрема в кімнатах, де регулярно входять і виходять люди, нерегулярні короткі затримки можуть викликати невдоволення користувачів кімнати, оскільки вони часто потрапляють в повністю темні робочі місця. З іншого боку, більша затримка зменшує потенціал енергозбереження від керування система. Тож очевидно, що перед впровадженням системи контролю, необхідно добре вивчити модель поведінки зайнятості кімнати або зони, для того, щоб отримати оптимальний баланс між

економією енергії та задоволеністю користувачів. Цей тип схеми кращий для окремих офісних приміщень.

2) Затемнення на основі руху – ця система може затемнювати світло, коли за встановлений проміжок часу не виявлено зайнятості. Рівень освітлення, до якого буде приглушене світло у разі відсутності людей, можна попередньо встановити. Це більш корисно для офісів, де користувачі не задоволені поверненням на неосвітлене робоче місце, коли і світло вмикається, коли вони заходять в офіс. Ця схема, хоча економить менше енергії, ніж попередня, може бути прийнятнішою для користувачів, оскільки перехід від незайнятого до зайнятого стану набагато плавніший, ніж різка зміна стану ввімкнено/вимкнено. У порівнянні з перемиканням, ця система вимагає вищих витрат на встановлення через необхідність застосовувати електронні диммовані баласти для контролю світлового потоку лампи.

Цей тип керування освітленням може бути особливо корисним у багатозонних відкритих офісах. Якщо кімната розбита на багатомісні контрольовані зони, можна підтримувати загальний рівень освітленості на всьому поверсі офісу, де робочі місця не зайняті, і належний рівень забезпечується для присутніх працівників. Це забезпечує більш плавний контраст між зайнятими та незайнятими просторами, замість повністю світлих і темних просторів, які можуть викликати зоровий і психологічний дискомфорт.

Виходячи з техніки виявлення присутності, може бути кілька типів сенсорної системи. Пасивні інфрачервоні (PIR) та ультразвукові датчики широко використовуються для систем виявлення. Нові технології, такі як радіочастотна ідентифікація (RFID) і цифрові зображення також розвиваються та заслуговують уваги.

Пасивні інфрачервоні (PIR – Passive Infrared) датчики. Пасивні інфрачервоні (PIR) системи виявлення базуються на виявленні зміни температурної картини в робочій зоні датчика. Виявлення в цьому випадку здійснюється піроелектричним детектором. Оскільки сам датчик не випромінює ніякої енергії, він називається «пасивним». Чутливість цих типів датчиків

залежить від відстані від датчика до об'єкта – чим далі предмет або рухоме тепле тіло, тим менш точне його виявлення датчиком. Поширений недолік цього типу датчиків полягає в тому, що вони схильний до помилок «хибного вимкнення», тобто світловий прилад вимкнений, незважаючи на присутність людей. Це може статися внаслідок принципу роботи датчиків PIR. У зоні чутливості датчиків PIR є розриви, які можуть бути досить широкими, коли при великій відстані від датчика до об'єкта. Рух всередині цих проміжків може і не бути належним чином виявлений датчиками.

Ультразвукові датчики. Другою за популярністю технологією визначення присутності є ультразвукові датчики присутності. Ці пристрої працюють на основі ефекту Доплера. Вони генерують ультразвукові хвилі і порівнюють їх з відбитими сигналами. Коли ультразвукова хвиля відбивається від статичного об'єкта, сигнал матиме ту саму довжину хвилі, що й випромінюваний сигнал. Але коли об'єкт рухається, довжина хвилі відбитого сигналу буде інша. Цей принцип ефекту Доплера є основним принципом виявлення руху ультразвуковими датчиками присутності. Ключовою перевагою цієї методики є те, що ультразвукові хвилі відбиваються поверхнями кімнати, тому ультразвукові датчики присутності не вимагають робочого поля виявлення порівняно з датчиками PIR. Ультразвукові датчики набагато ефективніші у виявленні руху людей, що може бути особливо корисне у внутрішніх приміщеннях.

Висока чутливість таких датчиків також може спричинити помилки. Наприклад, датчики спрацьовують при наявності рухів, пов'язаних з іншими видами діяльності в кімнаті, крім переміщення людини. Таким чином, є помилки «False-on». У деяких випадках датчики можуть бути настільки чутливі, що вловлюють рухи листя за вікном і навіть турбулентність повітря від офісних кондиціонерів. Іншим недоліком ультразвукових датчиків, як і датчиків PIR, є те, що точність виявлення є тим нижчою, чим далі об'єкти знаходяться від датчиків, через поступову ослаблення відбитих ультразвукових хвиль.

Радіочастотна ідентифікація (RFID – Radio Frequency Identification). Керування освітленням за допомогою радіочастотної ідентифікації (RFID)

набуває актуальності в дослідженнях. Мітки RFID зазвичай використовуються для ідентифікації персоналу в офісах. Завдяки невеликим розмірам і доступній вартості тегів, вони встановлюються всередині ідентифікаційних карток для відстеження входу та часу виходу офісних працівників, студентів тощо. Дослідження показують, що використання цієї технології покращує існуючий у приміщенні метод виявлення присутності, тобто пропонується використовувати RFID як допоміжну технологію для існуючої схеми. За допомогою додаткової інформації від системи RFID, недоліки існуючої системи можуть бути зведені до мінімуму.

Системи PIR є сприйнятливі до помилок «False-off», тому їх доцільно використовувати разом із даних системи RFID. Крім того, доцільно мінімізувати параметри затримки часу таймера освітлення для подальшого підвищення енергозбереження.

Потужність міток RFID залежить від зчитувачів RFID, тому у цьому випадку дослідники розробили «шлюз» RFID, який записує щільність заповнення та шаблон на основі статусів міток, які змінюються, коли користувачі входять і виходять із контрольної зони. Враховуючи те, що мітки RFID є індивідуальними, система виявлення RFID забезпечує не лише щільність присутніх, але й профіль користувачів, тобто відомо, хто саме використовує зону в даний момент. Коли інформація про призначену робочу область кожного користувача запрограмована у системі, схема керування може керувати світильниками, які стосуються користувачів, що входять або виходять з кімнати. Але цей простий підхід шлюзу іноді може не зареєструвати мітку через ненадійну природу пасивних сигналів RFID, таким чином зона буде вважатися незайнятою навіть тоді, коли вона зайнята або навпаки.

Недоліки пасивної системи RFID можна подолати за допомогою активного RFID. Активні RFID-мітки мають своє мініатюрне джерело потужності, що забезпечує краще виявлення локалізації присутніх. Крім спільних переваг з пасивною RFID таких як щільність перебування та профілювання, активна RFID також може бути використана для визначення локалізації присутніх на основі

показника рівня отриманого сигналу (RSSI – Received Signal Strength Indication), який змінюється на основі відстані від присутніх (міток) до зчитувача.

Проте активний RFID також має свої проблеми. На отримуваний сигнал RSSI можуть впливають численні фактори, такі як відбивання, дифракція та перенесення радіохвиль, що відомо як ефект багатопроменевого поширення. Активні сигнали також можуть бути неправильно ідентифіковані за рахунок розташування меблів, дверей і вікон, використання кімнати мешканцями тощо.

Щоб усунути такі недоліки доцільно використовувати кілька зчитувачів, таким чином зменшуючи ймовірність помилки при локалізації одним зчитувачем. Також замість точкової локалізації користувачів можна використовувати більш гнучке зональне позиціонування.

Виявлення присутності за допомогою зображень. Попередньо розглянуті методи виявлення присутності мають велику ймовірність появи помилок, тому для мінімізації помилкового виявлення та невиявлення в системах освітлення з контрольованим перебуванням застосовують техніки візуалізації.

Використання камер як датчиків для виявлення присутності людей у приміщенні запропоновано встановлювати в офісних приміщеннях відкритого типу. Такі системи можуть бути реалізовані такими способами:

- алгоритм програми використовує кадри зображення зі статичної камери спостереження планування та виявляє наявність людських голів. Система, яка за допомогою машинного навчання заповнена численними зображеннями, які містять і не містять людські голови, здатна виявляти присутні людські голови у приміщенні.
- система, яка приймає відеоінформацію з камери, забирає фон і розробляє фонову модель. За допомогою цієї моделі відстеження і можна розпізнати присутніх у відеокадрі. Алгоритм такої програми подано на рис.1.2.
- система керування на основі зображення, отриманого з використанням камери на основі CMOS, яка подає інформацію про яскравість. Така система може забезпечити більшу гнучкість використання, окрім просто виявлення зайнятості, як-от надання інформації про освітленість простору для

належного збирання денного світла та контроль затінення. Інформація з однієї камери може бути далі використовується в цілях безпеки та виявлення пожежі, що може зробити застосування системи виявлення більш доцільним з фінансової точки зору. Таким чином одна камера може поєднувати ефективне застосування кількох окремих датчиків.

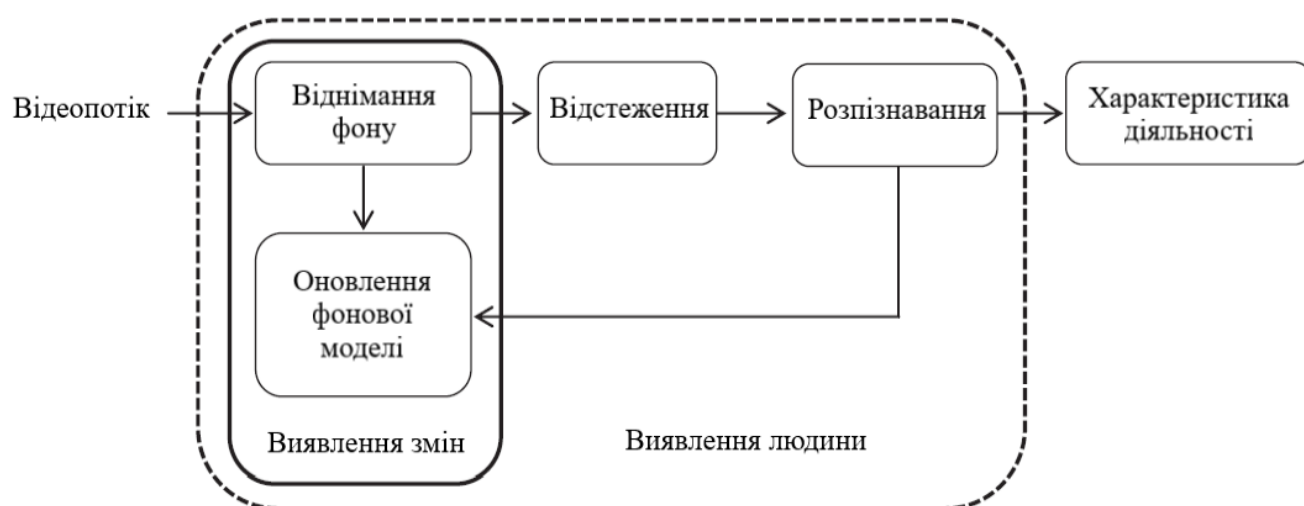


Рисунок 1.2 – Алгоритм виявлення присутності на основі відеозображень

1.1.1.1 Економія електроспоживання при використанні методів контролю присутності

Оцінка економії електроспоживання при використанні методів контролю присутності може відрізнятися залежно від типу розміщення, кількості працівників, схем контролю.

В табл.1.1 подано значення економії електроенергії для різних типів приміщень

Таблиця 1.1 - Значення економії електроенергії для різних типів приміщень

Тип приміщення	Тривалість затримки відключення, хв	Зменшення енергоспоживання на освітлення, %
Офісне приміщення	5-20	38-28
Навчальна аудиторія	5-20	58-52
Приміщення з малою інтенсивністю відвідування	5-20	50-17

1.1.1.2 Фактори, що впливають на якість контролю на основі присутності

До введення в експлуатацію датчиків присутності потрібно підходити уважно, щоб отримати від них хорошу продуктивність.

Перш за все, має бути правильне розуміння щодо моделі зайнятості кімнати/зони перед встановленням датчиків присутності. Потрібно враховувати, що не всі приміщення можуть підійти для виявлення присутності. Якщо кімната постійно зайнята людьми без значних перерв протягом всього періоду активності, простий перемикач таймера може бути більш доречним ніж датчики присутності. Виявлення присутності є найбільш корисним для приміщень, які люди відвідуються рідко та/або нерегулярно. Тоді, якщо приміщення визнане придатним для впровадження датчика присутності, повинні бути вивчені моделі використання кімнати, розмір приміщення, зони діяльності тощо. На основі цих досліджень повинні бути налаштовані затримка часу, чутливість датчика та його розташування і зона покриття. Вплив затримки часу, чутливості та зони покриття на загальну продуктивність керування освітленням на основі присутності наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Вплив різних параметрів на використання датчиків присутності

Параметр	Дуже високий	Дуже низький
Тривалість затримки відключення	Немає економії електроенергії	Зменшується тривалість роботи ламп. Можливе незадоволення користувачів
Чутливість	«False-on» - виявлення надходження помилкових рухів з джерел, відмінних від користувачів	«False-off» – неможливість виявлення мешканців, тому вимикає світло, незважаючи на присутність
Зона покриття	Дуже велика. Виявлення руху із суміжного простору через двері/вікна, таким чином залишаючи світильники ввімкненими без потреби	Дуже мала. Призводить до невиявлення зон у робочому просторі, де знаходяться користувачі, незважаючи на їх присутність

Вплив затримки часу відключення. Основний фактор, який впливає на досягнуту економію енергії завдяки застосуванню датчиків присутності – це налаштування затримки часу відключення. Така затримка зроблено для мінімізації частого вмикання світла у випадку, коли користувачі залишають приміщення лише на короткий період часу. Часте перемикавання в цих випадках також може викликати незадоволення споживачів. Очевидно, що чим коротша затримка часу відключення, тим більша можливість економії електроенергії за рахунок зменшення час використання світильника. Але з іншого боку часте перемикавання світла може зменшувати довговічність джерел світла. Тому необхідно досягти балансу між енергоспоживанням, надійністю світлового приладу та комфортом користувачів.

У табл.1.3 показано залежність економії електроенергії від часу затримки

Таблиця 1.3 - Залежність економії електроенергії від часу затримки

Тип приміщення	Економія електроенергії, % при затримці часу:	
	20 хв	5 хв
Навчальна аудиторія	52	58
Офісне приміщення	28	38
Конференц-зал	39	50
Кімната відпочинку	17	29
Санвузол	47	60

Вплив шаблону зайнятості. Окрім значного ефекту від зменшення налаштування часу затримки на енергозбереження, ще один фактор полягає в тому, що різниця в економії електроенергії буде залежати від заповнюваності приміщень. Для приміщень з малою інтенсивністю відвідування або з нерегулярною зайнятістю кімнати більша економія досягається при зменшенні часу затримки.

Також вплив часу затримки залежить від тривалості зайнятих і незайнятих періодів. Чим довший незайнятий період - тим меншим є вплив часу затримки на економію електроспоживання.

1.1.2 Керування освітленням з врахуванням природнього світла

Для будівель або приміщень, які можуть отримувати денне світло, схеми керування освітленням можуть забезпечити максимальну економію електроенергії, враховуючи, такі фактори як орієнтація віконних отворів, перешкоди на шляху випромінювання тощо. Приміщення з достатнім потраплянням денного світла можуть мати економію електроенергії, використовуючи денне світло і лише доповнюючи його штучними джерелами світла для забезпечення належного рівня освітлення. Керування освітленням з використанням денного світла також може бути використано для вмикання або вимикання світла приладів зовнішнього і загального освітлення або бути

використане в поєднанні з диммованим електронним баластом для забезпечення необхідного рівня штучного освітлення при наявності денного світла.

У випадку відкритих місць загального користування, таких як спортивні споруди, коридори, стоянки можуть бути використані прості контролери налаштування вмикання/вимикання денного світла. Це не тільки забезпечить вимкнення світла протягом світлового дня, але також зробить непотрібним ручне керування освітленням та забезпечить економію робочого часу.

Вплив денного світла на працівника є важливим фактором, який слід враховувати при проєктуванні систем освітлення. Візуальний комфорт є ключовим фактором підвищення загальної якості життя людини в будь-якій будівлі. Окрім економії енергії за рахунок зменшення електроспоживання на освітлення, доведено, що наявність денного світла підвищує продуктивність і візуальний комфорт працівника. Природне світло вважається додатковим до штучного освітлення і його використання дозволяє зменшити споживану потужність світильників.

Але пряме потрапляння або відбивання сонячного світла від поверхонь може створювати блиск, викликаючи дискомфорт і напруженість очей. Блиск - це відчуття засліпленості, яке відбувається тоді, коли рівень яскравості поля зору вищий ніж рівень яскравості, до якого пристосовані людські очі.

Щоб протидіяти цій проблемі, деякі системи контролю денного світла містять автоматизовані жалюзі для підтримки відповідної кількості природнього світла, яке потрапляє у приміщення для забезпечення нормованого рівня освітлення та візуального комфорту. Надмірне надходження денного світла може також збільшити нагрівання приміщення, таким чином збільшивши навантаження на охолодження для кондиціонерів.

Також великі площі вікон спричиняють більші втрати тепла в холодну погоду. У літературі запропоновано ідеальну площу вікон для забезпечення оптимального входу денного світла, що дозволяє досягнути баланс між енергозбереженням освітлення та зменшення тепла від денного світла. Щоб досягти максимального використання доступного денного світла для

забезпечення візуального комфорту припускають, що денне світло і електричне освітлення не можна розглядати окремо. Натомість необхідно врахувати, що проникнення денного світла, затінення, керування електричним освітленням та дизайн повинні бути частинами системи освітлення в цілому від початку проєктування системи освітлення.

1.1.2.1 Способи контролю освітленості з врахуванням денного світла

Управління денним освітленням можна розділити на два типи залежно від того, як вони керують системою освітлення:

- 1) перемикання освітлення з врахуванням денного світла;
- 2) димінгування (затемнення) освітлення з врахуванням денного світла.

Перемикання освітлення може керувати освітленням за допомогою перемикання між станами «Увімкнено» та «Вимкнено» залежно від доступного денного світла. Також може бути застосована багаторівнева комутація. Наприклад, за рівнем доступного денного світла в певній контрольній зоні, що дорівнює 33%, 50%, 66%, штучне освітлення цієї зони можна вимкнути. Ці стани знаходяться між 100% увімкнено та 100% вимкнено.

Системи затемнення контролюють безперервне зменшення струму лампи з використанням диммованих електронних баластів.

Димінгування потребує баластів для підтримки заданого рівня освітленості, тому цей метод є дорожчим, ніж система комутації.

Системи з врахуванням денного світла також можна розділити на дві групи на основі алгоритму керування: 1) системи із замкнутим циклом і 2) системи з відкритим контуром.

Система замкнутого циклу безперервно визначає рівень освітленості контрольної зони, яка визначається сумарною освітленістю, створюваною джерелами природнього і штучного світла. Зміна рівня освітленості за рахунок наявності денного світла постійно надходить до системи керування, і вона може внести необхідні корективи до режиму роботи штучних джерел світла. Таким

чином, створюється замкнутий цикл. Блок-схема алгоритму замкнутого циклу показана на рис.1.3.



Рисунок 1.3 – Алгоритм замкнутого циклу системи з природнім освітленням

З іншого боку, системи з відкритим контуром не отримують жодного зворотнього зв'язку від рівня електричного освітлення, він виявляє тільки наявні рівні денного світла. Виходячи з рівня доступного денного світла, він надсилає відповідний сигнал до контролера, щоб забезпечити роботу відповідного світильника.

Блок-схема системи керування з відкритим контуром показана на рис.1.4.



Рисунок 1.4 – Блок-схема системи керування з відкритим контуром

Інженери з освітлення постійно створюють нові алгоритми, які б забезпечили найкраще використання денного світла для економії енергії. Деякі дослідники також включають керування віконними шторами в загальний алгоритм керування, щоб забезпечити як економію енергії, так і візуальний комфорт користувачів.

1.1.2.2 Економія електроспоживання при використанні системи керування освітленням з врахуванням денного світла

Дослідження для визначення потенціалу енергозбереження відрізняються залежно від типу приміщення, де реалізований контроль, способу керування освітленням, методикою дослідження.

В табл.1.4 показано значення економії електроенергії залежно від методів керування освітленням.

Таблиця 1.4 - Економія електроенергії залежно від методів керування освітленням

Тип приміщення	Метод керування освітленням	Економія електроенергії, %
Офіс	Димінгування	9-31
Аудиторія	Перемикавання	23-65
	Димінгування	20-65
	Перемикавання+димінгування	50
Зовнішня відкрита територія	Перемикавання	11-17
	Димінгування	46

Оцінка та узгодженість енергозбереження на основі розрахунків, моделювання та експериментальних досліджень можуть сильно відрізнятися, оскільки системи керування освітленням з врахуванням денного світла залежать від багатьох факторів, які може бути складно змодельовати з високою точністю.

Похибки між змодельованими системами та експериментальними даними можуть бути спричинені кількома факторами, наприклад, поведінкою споживачів, зміною природньої освітленості, неточним моделюванням схеми замкнутого керування тощо.

1.1.2.3 Фактори, що впливають на продуктивність елементів керування, які враховують природне освітлення

Незважаючи на високу початкову вартість у порівнянні з елементами керування на основі планування чи присутності, керування освітленням з врахуванням денного світла може бути економічно виправданим завдяки високому потенціалу енергозбереження. Успішне впровадження такої схеми керування залежить від кількох факторів: параметрів приміщення або зони, поведінки споживачів, особливостей різних технологій контролю.

Наявність денного світла. Загальна доступність денного світла для будь-якої окремої кімнати буде залежати від таких умов:

1) *Стан неба:* різні умови неба будуть по-різному впливати на потрапляння денного світла і, отже, економію штучного світла. Оскільки умови неба змінюються залежно від пори року чи сезону, то зміну енергоспоживання можна спостерігати протягом року. Хмарне небо вважається найбільш несприятливим для використання денного освітлення. А оскільки умови неба залежать від місцевого клімату, який, у свою чергу, змінюється залежно від географічного місця розташування, для оцінки енергоспоживання також необхідно враховувати положення будівлі.

2) *Властивості вікон:* незважаючи на сприятливе географічне розташування та орієнтацію будівлі, неправильне розташування вікон може зменшити проникнення денного світла у приміщення. Правильне розташування вікон забезпечує хороший потенціал енергозбереження на етапі архітектурного проектування нових будівель. Орієнтація, площа та тип віконного скла може безпосередньо впливати на доступ денного світла у приміщення.

3) *Перешкоди:* дерева, прилеглі будівлі, рекламні щити тощо – це об'єкти, які можуть перешкоджати проникненню денного світла через вікна.

Виходячи з багатьох факторів, інженери повинні зробити вибір кращого метод керування для забезпечення оптимальної продуктивності схеми керування освітленням з врахуванням денного світла. Вибір між перемиканням і

димінгуванням, а також між алгоритмами відкритого та замкнутого циклує важливими кроками для успішної реалізації проєкту.

Декілька факторів визначають, який із методів – перемикання чи димінгування - підходить для застосування:

- вартість монтажу системи керування;
- наявності денного світла в приміщенні протягом доби;
- поведінка споживачів у приміщенні – переміщення, типи зорових робіт, частота входу/виходу.

У табл.1.5 подано порівняння методів керування освітленням за допомогою перемикання та димінгування.

Таблиця 1.5 - Порівняння методів керування освітленням за допомогою перемикання та димінгування

Параметр	Перемикання	Димінгування
Денний режим	Частка денного світла значна, світловий режим постійний протягом доби	Частка денного світла змінюється протягом дня
Поведінка споживача	Перебування споживачів не є стаціонарним. Застосовується у зонах циркуляції або загальних приміщеннях. Виконувані завдання не є критичними. Приклад приміщення – коридори	Споживачі, які виконують важливі завдання. Застосовується у важливих зонах приміщення, наприклад офісах
Переваги	Значне енергозбереження у відповідних зонах. Низька початкова вартість. Відносно легкий монтаж	Значне енергозбереження при змінному денному світлі Поступова зміна рівнів

		освітлення, візуальний комфорт споживачів Більша точність управління
Недоліки	Менша точність контролю. Значна зміна стану освітлення викликає візуальний дискомфорт. Скорочення терміну служби ламп	Вища початкова вартість. Вимагає точного налаштування для оптимальної роботи

Вибір системи з відкритим або закритим контуром та відповідне розміщення датчиків має важливе значення для успішного введення освітлювальної установки в експлуатацію. Коли датчик використовується для керування однією контрольною зоною або порівняно невеликими зонами (наприклад, приватні кабінети), системи замкнутого циклу можуть бути дуже ефективними.

Коли мета полягає в тому, щоб контролювати освітлення кількох зон за допомогою одного датчика, система з відкритим контуром є кращою. Офісні приміщення відкритого планування є прикладом для реалізації системи денного освітлення з відкритим контуром.

1.1.2.4 Налаштування контрольних параметрів

Схеми керування освітленням з врахуванням денного світла можуть вийти з ладу через неправильне налаштування система контролю. Правильне налаштування залежить від наступного:

1) *Відповідні рівні освітленості та налаштування затримки:* схеми керування будуть підтримувати заданий рівень інтенсивності світла від ламп на заданому рівні за наявним денним світлом в контрольній зоні. Необхідно правильно встановити рівень освітленості, щоб він забезпечувався у будь-який час, незалежно від наявності природнього світла. Необхідно звернути увагу на

встановлення рівня освітленості для «мертвих зон», через які лампи не будуть перемикатися, щоб переконатися, що перемикання не є надто частим або заважає користувачам.

Є два різні налаштування затримки для перемикання денного світла. Один для ввімкнення світла, який зазвичай короткий, а інший - для вимкнення світла, який є довший. Це робиться для того, щоб користувачі контрольної зони завжди отримували достатнє освітлення, а також зменшити часте перемикання світла, яке може негативно впливають на термін служби лампи.

2) *Розміщення датчика*: неправильне розміщення фотодатчиків може призвести до хибної роботи системи керування освітленням. Ідеальним розташуванням фотодатчика є робоча поверхня, але таке розміщення не є практичним. Зазвичай фотодатчики встановлюється на стіни або стелю. У деяких випадках вони вбудовані в лампи. Важливою умовою вдалого розміщення є те, що він сприймає зразок денного світла, який потрапляє на робочу поверхню в зоні контролю. При такому розміщенні фотодатчики виявлятимуть денне світло так, ніби він розміщений на робочій поверхні. Датчики повинні бути розміщені таким чином, щоб на них не потрапляло пряме сонячне світло або будь-яке джерело зовнішнього блиску. У цьому випадку рівень виміряного денного світла не буде відповідати реальному денному світлу на робочій поверхні. Так само розміщення датчиків занадто глибоко в приміщенні, де потрапляння денного світла значно менше, ніж в інші ділянки контрольної зони є нераціональним.

Розміщення фотодатчиків також залежить від того, чи система керування розімкнута або замкнута. Оскільки в замкнутій системі датчик повинен виявляти комбіновані рівні освітлення на робочій поверхні, то він повинен бути таким, що може виявляти вплив як денного, так і штучного світла.

З іншого боку, оскільки система з відкритим контуром сприймає лише денне світло, то датчики слід розміщувати в такому місці, де на них буде впливати лише природне світло.

1.1.3 Управління освітленням за розкладом

Системи керування освітленням на основі диспетчеризації працюють за дуже простим принципом, заснованим на фіксуванні часу роботи освітлювальних приладів. Освітлення, якими керує система керування, вмикаються та вимикаються за попередньо встановленим розкладом. Системи планування засновані на часі, тому це корисно в областях, де модель зайнятості точно передбачувана. Кімнати або приміщення, де події відбуваються в дуже конкретні періоди часу, ідеально підходять для застосування планування. До таких приміщень відносяться, наприклад, навчальні аудиторії. У такому приміщенні можна використовувати простий таймер для ввімкнення системи освітлення у час, коли заплановано проведення занять, та вимикати світло під час перерви та після занять.

Планування можна здійснювати за допомогою простих пристроїв управління, які називаються таймери або годинники. Таймери можуть бути ручними механічними пристроями, але також доступні більш складні цифрові версії. Деякі цифрові часові перемикачі можна запрограмувати за допомогою інтерфейсу персонального комп'ютера для щоденного, тижневого, місячного або навіть річного циклу. Так, наприклад, окрім підтримки щоденних розкладів, їх можна запрограмувати на повне вимкнення світла під час вихідних та святкових днів. Для застосування у внутрішніх приміщеннях або зонах користувачам зазвичай надається можливість переназначення у разі нестандартного використання світильників. Завдяки цій гнучкості і їх відносно доступній вартості, таймери є привабливими варіантами енергоменеджменту в густозаселених місцях, особливо поза будівлями.

Контролери планування можуть бути автономними або вбудованими в панель керування освітленням. Пультами керування освітленням є центральні панелі системи управління автоматизацією освітлення кожної кімнати або поверху. Ці панелі містять реле для багатьох навантажень, які контролюються панеллю. Через пульт керування освітленням, зони контролю можна легко

позначити для регулювання за допомогою планування, виявлення зайнятості або інших систем контролю. Пульти управління мають можливість внутрішнього планування, яке можна запрограмувати через підключений комп'ютер. Панелі керування можуть бути особливо корисними для підтримки різних розкладів для різних частин будівлі.

При використанні планування часу роботи освітлювальною установкою має бути забезпечено можливість переназначення (перепланування) панелі керування, щоб користувачі могли використовувати світло поза запланованими періодами, якщо виникне така необхідність.

Також слід використовувати багаторівневу комутацію, щоб уникнути раптової повної темряви.

В удосконалених годинниках використовується миготлива індикація, яка попереджає користувачів про заплановане відключення, і надається можливість для перепланування. У випадку перепланування перемикач часу повинен автоматично повернутися до запланованого режиму через заданий час.

Правильно введені в експлуатацію системи контролю за часом можуть забезпечити суттєву економію електроенергії. Наприклад, в офісних будівлях досягається економія електроенергії в межах 10-40% при застосуванні системи планування. Такі системи зазвичай використовуються в поєднанні з іншими засобами керування – датчиками присутності або фотодатчиками.

1.1.4 Змішана система управління

Різні схем керування освітленням, які зараз використовуються, мають свої унікальні характеристики. Певна схема керування може забезпечувати кращу продуктивність у певному сценарії порівняно з іншими схемами, але вона може не давати подібної продуктивності в інших ситуаціях. Ці технології часто не забезпечують задовільну продуктивність через недоліки, пов'язані з цією конкретною технологією. Щоб подолати ці недоліки та забезпечити максимальне енергозбереження доцільно поєднувати різні схеми в одному проєкті освітлення.

У табл.1.6 подано значення економії енергоспоживання при комбінуванні різних схем керування освітленням.

Таблиця 1.6 - Економія енергоспоживання при комбінуванні різних схем керування освітленням

Тип приміщення	Комбінація схем керування освітленням	Економія електроенергії, %
Офіс	Контроль присутності + врахування денного світла	46-68
Офіс	За розкладом + врахування денного світла	38-61
Навчальна аудиторія	За розкладом + контроль присутності + врахування денного світла	35-42

1.1.5 Тенденції розвитку технологій керування освітленням

Актуальні дослідження в області керування освітленням дозволяють збільшити енергоефективність освітлення та комфорту користувача. Сучасні розробки в цій галузі можна розглядати з двох точок зору: індивідуальна розробка технологій керування освітленням та розробка комбінованих екосистем керування.

У дослідженнях на даний час застосовують не тільки класичні методи виявлення присутності, такі як PIR та ультразвук, але й застосовують вдосконаленні методи з використанням системи візуалізації та RFID.

Бездротові мережі набувають все більшої уваги в стратегіях керування освітленням. У цих випадках замість того, щоб покладатися на дані одного датчика для виявлення присутності, кілька датчиків надають сукупну інформацію про виявлення присутності, таким чином покращуючи як енергоефективність, так і комфорт користувачів. Замість того, щоб встановлювати один дорогий датчик, можна використати кілька недорогих датчиків, які у мережі можуть забезпечити значно покращену точність виявлення, що, у свою чергу, дозволяє встановлювати коротші параметри затримки та, відповідно, додаткову економію енергії.

Також перспективним напрямком вдосконалення систем керування освітлення є гібридизація систем контролю. Однією з таких схем є комбінована система, яка контролює як рівень внутрішнього освітлення, так і рівень проникнення денного світла за допомогою автоматизованих жалюзі. Як уже згадувалося, надмірне денне світло може викликати дискомфорт, пов'язаний із блиском, незважаючи на те, що більше денного світла може призвести до більшої економії електроенергії, що споживають штучні джерела світла. Ці системи контролю можуть забезпечити достатню кількість денного світла, що потрапляє в кімнату, не створюючи відблисків, а також одночасно контролювати рівень затемнення внутрішнього світла. Алгоритм роботи такої системи показано на рис.1.5.



Рисунок 1.5 – Система контролю для штучного та природного освітлення

Із зростанням популярності платформ автоматизації будівель стає все легше досягти комбінації між кількома стратегіями керування. Всесвітня автоматизація будівель була стандартизована завдяки формуванню стандарту KNX. Це дозволяє виробникам електротехніки розробляти свої продукти автоматизації з використанням однакових стандартів, що робить їх сумісними один з одним. Це робить поєднання різних типів технологій керування легким для комбінування за допомогою комп'ютерного програмування без необхідності фізичного переналаштування електричної схеми.

Системи керування освітленням можуть значно підвищити енергоефективність систем освітлення, що, в свою чергу, приведе до зниження витрат на електроенергію. Зменшення попиту на електроенергію також позитивно впливає на навколишнє середовище через зменшення викидів вуглекислого газу.

Кожна з технологій керування має різні властивості, які впливають на її продуктивність. Зразок поведінки споживачів, геометричні параметри приміщення чи будівлі, денний вхід, тип виконуваної роботи тощо мають значний вплив на системи керування освітленням. Лише належним чином вивчивши ці фактори, можна спроектувати таку систему освітлення, яка забезпечить значну економію енергії та створить комфортні умови для споживачів.

1.2 Висновки до розділу 1

1. На основі аналізу інтелектуальних систем керування освітленням встановлено фактори раціонального вибору схем керування для різних типів приміщень та сценаріїв перебування у них користувачів.
2. Встановлено перспективні тенденції розвитку інтелектуальних систем керування освітленням.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Машинне навчання в розумному освітленні

При розвитку розумних технологій керування пристроями збільшується кількість пристроїв і, відповідно, з'являється вулика кількість даних, пов'язаних із датчиками. Розроблено багато додатків для встановлення кореляції між даними та прийнятими рішеннями. Це в свою чергу призвело до появи штучного інтелекту та машинного навчання в розумному освітленні. У машинному навчанні існує багато методів, кожен з яких має різну мету, проведено багато досліджень розумного освітлення, у яких застосовувалися різні методи машинного навчання.

2.1.1 Методи машинного навчання

Існує чотири основних типи машинного навчання: класичне навчання, навчання з підкріпленням, ансамблеве навчання та глибоке навчання (рис.2.1).

Глибоке навчання — це метод підмножини машинного навчання, де модель уже включає виділення та вибір ознак. Підкатегорії глибокого навчання включають глибоку нейронну мережу (DNN), згорткову нейронну мережу (CNN) і рекурентну нейронну мережу (RNN). Одним із методів RNN є довготривала короткочасна пам'ять (LSTM).

Класичне навчання — це всі методи поза підмножиною глибокого навчання, яке поділяється на дві великі групи: контрольоване навчання та неконтрольоване навчання. Метод навчання під наглядом поділяється на класифікацію та регресію, де методи класифікації включають метод Байєса, опорну векторну машину (SVM), CNN, логістичну регресію та дерево рішень. Тоді методи регресії включають лінійну регресію, регресію опорного вектора (SVR) і регресію штучної нейронної мережі (ANN). Неконтрольоване навчання використовується, серед іншого, для кластеризації та зменшення розмірності.

МАШИННЕ НАВЧАННЯ:

- **КЛАСИЧНЕ НАВЧАННЯ:**
 - **Контрольоване навчання:**
 - **Класифікація:**
 - ШНМ-класифікація
 - Нечітка логіка
 - Дерево рішень
 - Метод опорних векторів (класифікація)
 - K -найближчі сусіди
 - Наївний Байєс
 - Логістична регресія
 - **Регресія:**
 - Метод опорних векторів (регресія)
 - ШНМ-регресія
 - Лінійна регресія
 - **Неконтрольоване навчання:**
 - **Кластеризація:**
 - K -середнє
 - Просторова кластеризація додатків із шумом на основі щільності
 - **Зменшення розмірності**
 - Аналіз головних компонент
- **НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ:**
 - Q -навчання
 - Глибоке Q -навчання
 - **Еволюційні обчислення:**
 - Оптимізація рою частинок
 - **Розумний рій:**
 - Алгоритм світлячок
 - Генетичний алгоритм
- **ГЛИБОКЕ НАВЧАННЯ:**
 - Глибока нейронна мережа
 - Згортова нейронна мережа
 - **Рекурентна нейронна мережа:**
 - Довготривала короткочасна пам'ять
- **АНСАМБЛЕВЕ НАВЧАННЯ:**
 - **Пакування:**
 - Випадковий ліс
 - ШНМ-пакування
 - **Посилення:**
 - Адаптивне посилення
 - Екстремальне градієнтне посилення

Рисунок 2.1 – Типи машинного навчання

Методи кластеризації включають k-середні та просторову кластеризацію додатків із шумом на основі щільності (DBSCAN).

Для порівняння методи зменшення розмірності включають аналіз головних компонентів (PCA). Методи навчання з підкріпленням включають Q-навчання, мережу глибокого Q-навчання (DQN), генетичний алгоритм (GA) і оптимізацію роєм частинок (PSO). Ансамблеве навчання можна розділити на початкове агрегування (пакет) і посилення. Методи пакетування включають випадковий ліс, тоді як методи підвищення включають адаптивне підвищення (AdaBoost) і XGBoost.

2.1.1.1 Контрольоване навчання

Контрольоване навчання – це модель навчання, де очікуваний результат кожного входу має свій термін. Позначений результат зазвичай називають міткою або класом. Клас може бути категоріальним або числовим, далі розподіляючи контрольований метод на класифікаційний і регресійний.

У контрольованому навчанні **метод класифікації** - це метод класифікації набору даних за кількома класами. Прикладами методів класифікації в керованому навчанні є класифікація ANN, дерево рішень, SVM, KNN, наївний метод Байєса та логістична регресія.

ANN емулює структурні, біологічні та функціональні особливості біологічної нейронної мережі. ANN складається з різних нейронів, які оптимально з'єднують входи та виходи в наборі даних за допомогою кількох обчислень. Кожен нейронний вузол має вхідний і вихідний процес. Процеси введення та виведення діють за такою формулою. Модель ANN, що містить серію штучних нейронів, є результатом процесу навчання. Навчання ANN регулює вагу кожного нейрона в моделі ANN ітераційно, доки модель не стане оптимальною. Формула ваги для кожної ітерації навчання записується так:

$$W_{ji}(n+1) = W_{ji}(n) + \delta W_{ji}(n),$$

де W - вага, i - індекс вихідного нейрона, j - індекс нейрона призначення, n - номер ітерації.

Спосіб вимірювання оптимального рівня моделі ANN полягає в обчисленні різниці між прогнозованими та фактичними значеннями (похибки). Похибка на кожній ітерації n :

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M e_j(n)^2$$

де $E(n)$ - помилка в n -ій ітерації, M – кількість вихідних нейронів, $e_j(n)$ - різниця між вихідним і фактичним значеннями.

У процесі навчання необхідно враховувати кілька показників, а саме епоху, швидкість навчання та імпульс. Крім того, кількість нейронів у вхідному шарі, кількість прихованих шарів і кількість нейронів у кожному прихованому шарі також можуть змінюватися для отримання оптимальної моделі.

Для прийняття рішень у розумному управлінні освітленням можна застосовувати метод ANN з нечіткою логікою. У результаті досліджень збирають дані за допомогою датчиків світла, руху та PIR. При застосуванні такого методу некорисне освітлення може зменшитися на 34%, а отримана економія електроспоживання становить 13,5%.

Дерево рішень - це модель прийняття рішень, яка нагадує дерево, яке формується за результатом навчання. Для побудови дерева рішень доступно декілька методів, включаючи ітераційний дихотомізатор 3 (ID3) і дерево класифікації та регресії (CART). ID3 можна використовувати лише для класифікації, тоді як CART також можна використовувати для регресії. В ID3 формування дерева проходить кілька етапів, деякі з яких обчислюють ентропію та приріст інформації. Формула для отримання ентропії:

$$E(S) = \sum_{j=1}^k -p_j \log_2 p_j,$$

де S - набір даних, k – кількість класів, p_j – ймовірність появи класу j . Тоді формула посилення має вигляд:

$$Gain(A) = E(S) - \sum_{i=1}^k \frac{|S_i|}{|S|} \cdot E(S_i)$$

де A - клас, k - кількість категорій у класі, S_i - ймовірність появи категорії i в класі.

Метод опорних векторів SVM полягає в тому, щоб навчити гіперплощину, яка може розділяти дані. У створенні гіперплощини кілька доступних ядер включають радіальну базисну функцію (RBF), поліноміальну, сигмоподібну та лінійну. У ядерному многочлені ступеня d формула має вигляд:

$$K(x, x_i) = (x_i x + 1)^d,$$

де x і x_i - вектори у вхідному просторі. Тоді функція класифікації $f(x)$ знаходиться за формулою:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i y_i K(x, x_i) + b,$$

де a_i - значення множника Лагранжа, p_i - у значення x_i , b - перехоплення.

Метод k-найближчих сусідів KNN - це алгоритм, який виконує класифікацію, розглядаючи подібність даних, наприклад, з евклідовою відстанню. Подібність розглянутих даних обчислює відстань від даних до інших наборів даних у базі даних. Відстань розраховується за формулою:

$$Distance(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - y_k)^2},$$

де x - класифікаційна ознака, y - це навчальні дані, n - кількість вимірів або характеристик.

Наївний Байєсівський класифікатор - це класифікація, заснована на теоремі Байєса. Це теорема, яка розглядає ймовірність гіпотези нової події. Метод є ефективний, оскільки приймає припущення, що події незалежні. Наївна класифікаційна формула Байєса наступна:

$$P(c|x) = \frac{P(x|c)P(c)}{p(x)},$$

де x - дані невідомого класу, c - гіпотетичні дані певного класу, $P(c|x)$ - апостеріорна ймовірність c на основі x .

Дослідження SVM і наївного Байєса застосовують в розумному освітленні. Можна використовувати та порівнювати SVM та наївний метод Байєса для

класифікації умов вуличного освітлення за допомогою люксметра або датчика освітлення на смартфоні.

На додаток до вже згаданих методів, **логістична регресія** також є методом, доступним для класифікації. Логістична регресія є типом методу регресії, але вона зручна для аналізу бінарного або категоріального зв'язку між декількома факторами, які впливають один на одного.

Регресія - це метод машинного навчання, який можна застосувати для прогнозування постійного зв'язку залежної змінної з незалежною цільовою змінною. Серед існуючих методів регресійного аналізу найпростішим і найпоширенішим способом є лінійна регресія:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_i,$$

$$\beta_0 = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2},$$

$$\beta_i = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2},$$

де Y_i - залежна величина, X_i - незалежна величина, β_0 - перехоплення, β_1 - нахил, i - член незалежної змінної, n - розмір набору даних.

Модифікації методів класифікації також можуть застосовуватися для регресії. Замість того, щоб використовувати голосування для вибору відповідного класу, регресія KNN використовує розрахунки локального середнього. Тоді назва методу регресії SVM – SVR. Регресія ANN схожа на класифікацію ANN, але замість категоріального результат залежить від числа.

Регресія часто застосовується в дослідженнях розумного освітлення.

2.1.1.2 Неконтрольоване навчання

Основна відмінність між неконтрольованим навчанням і його аналогом полягає в тому, що воно не вимагає жодних попередньо визначених позначок у навчанні. З цими відмінностями завдання неконтрольованого навчання відрізняється від класифікації та регресії. Оскільки воно не робить прогнозів

щодо міток чи виходів, неконтрольоване навчання більше спрямоване на пошук закономірностей між навчальними даними. Отже, навчальні завдання без контролю включають кластеризацію та зменшення розмірності.

Кластеризація - це пошук природного групування в наборі даних. Кластеризацію також можна назвати автоматичною класифікацією. Якщо в класичній класифікації мітка повинна бути присутня, то в кластеризації мітка може бути створена сама. K-means і DBSCAN є двома прикладами методів кластеризації.

k-means - це метод кластеризації на основі відстані. Метою використання відстані для кластеризації є зменшення дисперсії даних. Перед початком процесу кластеризації необхідно спочатку визначити значення k або кількість кластерів. Потім центроїди випадковим чином призначаються відповідно до значення k . Наступним процесом є обчислення відстані іншої точки до кожної точки центроїда за допомогою рівняння для KNN. Кластеризація збере точки до найближчого центроїда. Процес безперервно повторюється з новим центроїдом, отриманим шляхом обчислення середнього кожного кластера. Повторення припиниться після зближення. Тобто середнє значення не змінюється. Весь процес повторюється з ініціацією нового центроїда. Потім кожен процес порівнюється. Вибраний процес - це процес із найменшою дисперсією. Дисперсія процесу визначається за формулою:

$$Variance = \frac{1}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} \|x_i - \mu_k\|^2,$$

де k - індекс кластера, m_k - кількість даних у кластері k , x_i - i -ті дані в кластері, μ_k - середнє значення k кластеру.

Як і k-means, **DBSCAN** також є методом кластеризації на основі відстані. Різниця полягає в тому, що k-means чутливий до шуму в даних, тоді як DBSCAN має спосіб виявлення шуму. DBSCAN використовується в сучасних дослідженнях розумного освітлення, наприклад для кластеризації значень пікселів камери, щоб отримати значення освітленості кожного кластера.

Розмірність є проблемою, коли набір даних має занадто багато функцій (велику розмірність).

Зменшення розмірності - це метод зменшення кількості розмірностей або кількості характеристик даних із високою розмірністю, який при цьому зберігає важливі властивості вихідних даних. Одним із методів зменшення розмірності є **аналіз головних компонент PCA**.

Припустимо, що є таблиця даних із розміром $n \times p$, де n – кількість рядків, p - кількість стовпців. Тоді PCA розглядає її як матрицю X . Далі PCA створює нову функцію з позначеннями t шляхом множення прямої $x_{(i)}$ з X за вагою w_i і розміром l , де l є меншим числом, ніж p . Формула PCA виглядає наступним чином:

$$t_{k(i)} = x_i w_k,$$

де $i=1, \dots, n$, $k=1, \dots, l$. Значення w встановлюється таким чином, щоб результати PCA мали дисперсію, не віддалену від X матриці.

2.1.1.3 Навчання з підкріпленням

Якщо навчання під контролем і навчання без контролю аналогічні «навчанню шляхом читання», тоді навчання з підкріпленням еквівалентно «навчанню шляхом виконання». П'ятьма основними компонентами навчання з підкріпленням є агент, середовище, дія, винагорода та стан, де агент взаємодіє з середовищем, виконуючи дії. Дія змінює стан навколишнього середовища, винагорода вимірює якість зміни стану і визначає наступну дію агента.

Однією із реалізацій навчання з підкріпленням є **Q-навчання**, яка виконує дії на основі використання марковський процес прийняття рішень (MDP). MDP є розширенням ланцюга Маркова, де різниця полягає в тому, що в MDP є дії, і їхній стан змінюється функцією політики, яка визначає, яка дія буде обрана станом при переході до наступного стану. У той час як функція політики зміниться на основі винагороди за перехід стану. Оптимальна функція політики полягає в наступному:

$$\pi_*(a|s) = \begin{cases} 1, & \text{if } a = \arg \max_{a \in A} q_*(s, a), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

де $\pi_*(a|s)$ - оптимальна функція політики, a - дія, A - набір дій, s - стан, $q_*(s, a)$ - оптимальна функція дії-цінності. Формула оптимальної функції дії-цінності має вигляд:

$$q_*(s, a) = \max_{\pi} q_{\pi}(s, a),$$

$$q_{\pi}(s, a) = R_a^s + \sum_{s' \in S} P_{ss'}^a \sum_{a' \in A} \pi(a'|s') q_{\pi}(s', a'),$$

де $q_{\pi}(s, a)$ - функція значення дії, R_a^s - винагорода за станом s і дією a , s' - наступний стан, $P_{ss'}^a$ - матриця ймовірності переходу стану, a' - наступна дія.

2.1.1.4 Ансамблеве навчання

Ансамблеве навчання поєднує кілька методів машинного навчання в один, де зазвичай результати продуктивності будуть кращими, ніж будь-який із членів ансамблю, який використовується окремо. Цей метод вважається найсучаснішим методом у сфері машинного навчання. Однак недоліком ансамблевого навчання є те, що при поєднанні кількох методів алгоритм буде складнішим для обчислень. Дві основні підкатегорії в ансамблевому навчанні – це пакетування та посилення.

Bagging - означає початкове агрегування, яке є двома основними етапами самого пакетування. Прикладом методу, який використовує пакетування, є випадковий ліс. Bootstrap - це метод копіювання кількох наборів даних із основного набору даних за допомогою методу вибірки. Крім того, метод створює слабкий метод класифікації для кожного набору даних. Процес, подібний до голосування за остаточну класифікацію, виконується на кількох слабких моделях, а саме методі агрегування.

Випадковий ліс - це метод ансамблевого навчання, який використовує багато слабких дерев рішень із методом пакетування. Випадковий ліс може вирішити проблему дерева рішень, а саме переобладнання. Переобладнання зазвичай відбувається, якщо отримане дерево має занадто велику глибину, яка традиційно характеризується значною дисперсією. У методі випадкового лісу,

зберігаючи невелику глибину, але збільшуючи кількість дерев, можна зменшити дисперсію при збереженні зміщення.

Метод випадкового лісу часто застосовують в дослідженнях розумного освітлення, використовуючи великі дані з системи, які є характеристиками для процесу класифікації. Це можуть бути геопросторові дані, параметри будівництва, системи опалення, температури, дані про характери зорової роботи споживачів. Прогнозованим виходом є оцінка споживання енергії.

Якщо пакетування може зменшити дисперсію, то **посилення** є комплексним навчанням, яке може зменшити зміщення. У той час як пакетування є паралельним, оскільки воно створює багато класифікаторів одночасно, посилення є послідовним, оскільки на кожен слабкий класифікатор впливатиме попередній слабкий класифікатор. Підвищення працює шляхом збільшення ваги помилково класифікованих даних у попередньому класифікаторі до наступного класифікатора, а потім перекласифікації даних. Остаточний класифікатор є лінійною комбінацією попередніх класифікаторів.

Одним із методів посилення є **AdaBoost**. AdaBoost також є методом ансамблевого навчання, який можна застосувати до дерева рішень і використовується для подолання дисбалансу класів у дереві рішень за допомогою концепції посилення. Формула AdaBoost має вигляд:

$$F_T(x) = \sum_{t=1}^T f_t(x),$$

де x - вхідні дані, $F_T(x)$ - остаточний класифікатор, T - кількість оцінювачів або кількість слабких класифікаторів, $f_t(x)$ – t -те дерево рішень.

2.1.1.5 Глибоке навчання

У класичному навчанні для виконання класифікації набори даних зазвичай стикаються з проблемами розмірності. Вони повинні спочатку пройти етапи виділення ознак і вибору ознак. Різниця з глибоким навчанням полягає в тому, що воно вже проводить ці етапи у своїй моделі. Етап називається вивченням ознак, або навчанням репрезентації. Підкатегорії глибокого навчання, які існують в

останніх дослідженнях інтелектуального освітлення, це глибока нейронна мережа (DNN), згорткова нейронна мережа (CNN) і рекурентна нейронна мережа (RNN).

DNN - це штучна нейронна мережа, яка має більше одного прихованого рівня. DNN можна використовувати для прогнозування складних нелінійних функцій краще, ніж традиційні методи та техніки. Якщо порівнювати глибоку і штучну нейронні мережі, то продуктивність DNN, тим краща, чим більше даних виористовується. ANN ж досягне точки насичення швидше з меншою кількістю даних.

CNN - це метод глибокого навчання, який часто використовується для виявлення об'єктів у комп'ютерному зорі. Під час навчання моделі CNN для зображення, градієнтний спуск застосовний для знаходження локального мінімуму функції втрат. Функції згортки та буферизації в CNN – це те, що робить CNN кращим в обробці зображень, оскільки він звертає увагу на локальність еталонних проблем, чого не роблять інші методи нейронної мережі. Таким чином, інші методи нейронної мережі стикаються з проблемою розмірності.

RNN - це глибоке навчання, яке може працювати з часовими послідовностями, оскільки RNN має внутрішній стан (пам'ять), який може зберігати інформацію з поточного введення для рекурсивної обробки майбутніх вхідних даних. Завдяки часовій природі послідовності RNN підходить для розпізнавання рукописного тексту або розпізнавання мовлення.. Двома прикладами методів RNN є довготривала короткочасна пам'ять (LSTM) і стробовані рекурентні одиниці (GRU).

Що робить **LSTM** відмінним від інших методів RNN, це те, що цей метод має спеціальні одиниці. Спеціальними блоками є комірка, вхідний вентиль, вихідний вентиль і пропускний(забувальний) вентиль. Три цих вентиля можуть контролювати вміст комірки, щоб забути якусь інформацію, додати нову інформацію та вивести якусь інформацію. Таким чином, LSTM не просто використовує пам'ять для запам'ятовування попереднього стану, як стандартний RNN.

2.2 Застосування машинного навчання в розумному освітленні

Деякі програми машинного навчання в розумному освітленні є більш поширеними, ніж інші. В табл.2.1 наведено аналіз застосування програм машинного навчання в інтелектуальному освітленні.

Таблиця 2.1 - Застосування програм машинного навчання в інтелектуальному освітленні

Завдання	Метод машинного навчання	Характеристика	Результат застосування
1	2	3	4
Прогнозний контроль	Штучна нейронна мережа	Класифікація та прогнозування на основі часових рядів	Підвищення енергоефективності
Інтелектуальне керування	Метод опорних векторів, штучна нейронна мережа	Інтелектуальне керування замкнутим контуром	Підвищення енергоефективності
Розпізнавання жестів	Метод опорних векторів, штучна нейронна мережа, випадковий ліс	Розумне керування освітленням за допомогою жестів та датчиків IMU	Набуття досвіду користувачем
Кластеризація	Просторова кластеризація додатків із шумом на основі щільності, k-середнє	Кластеризація ознак із діаграмою розсіювання	Кластеризація кольорів, ефективність сенсора
Виявлення аномалій	Штучна нейронна мережа	Класифікація аномальних даних мережі інтелектуального освітлення	Покращення безпеки
Калібрування вимірювань	Довготривала короткочасна пам'ять, випадковий ліс	Навчання на основі регресії для покращення вимірювання освітленості	Підвищення точності вимірювань

Продовження табл.1.1

1	2	3	4
Оптимізація	Оптимізація рою частинок, генетичний алгоритм	Використання еволюційних обчислень в оптимізації	Отримання оптимального співвідношення комфорту та енергоефективності
Комп'ютерне бачення	Згорткова нейронна мережа, глибока нейронна мережа	Інтелектуальне керування освітленням на основі камери	Підвищення енергоефективності
Розпізнавання діяльності	Штучна нейронна мережа	Інтелектуальне керування освітленням на основі руху користувача	Підвищення енергоефективності та комфорту споживачів

Розглянемо деякі методи, що використовуються для інтелектуального освітлення.

Прогнозний контроль. Прогнозне керування є одним із методів керування, що застосовуються в промисловій інженерії. Прогнозне керування або модель прогнозного керування (MPC) - це складний контроль, який може передбачити продуктивність процесу на основі майбутнього горизонту. Горизонт передбачення - це ступінь, до якого модель може передбачити майбутнє. Модель використовується для прогнозування майбутнього на основі навчальних даних, а потім для контролю над прогнозованими майбутніми подіями. Методами, які застосовуються в прогнозованому контролі, є авторегресійне інтегроване ковзне середнє (ARIMA) і LSTM.

Прогнозне керування є одним із додатків машинного навчання, які використовують для інтегрованого управління розумним освітленням, кондиціонуванням повітря, вентиляцією, затіненням тощо. У такій системі можна передбачити характеристики освітлення такі як, наприклад, візуальний комфорт, рівень освітленості.

Інтелектуальне керування - це використання методів штучного інтелекту або машинного навчання в традиційних системах керування для вирішення більш

складних проблем. Наприклад, система керування має такі входи: датчики температури, вологості, рівня освітлення та рівня вуглекислого газу. Потім вони з'єднуються з виходами вентиляторів, охолоджувачів, обігрівачів і освітлення. Такі методи, як штучна нейронна мережа, можна застосовувати для прогнозування належного керування для кожного приводу на основі різних значень вхідних датчиків.

Інтелектуальне керування є одним із додатків машинного навчання, які присутні в дослідженнях розумного освітлення. Наприклад, інтелектуальне керування може використовувати датчики освітлення, датчики руху та датчики інтенсивності руху для керування вуличним освітленням.

Розпізнавання жестів для керування - це метод інформатики для виявлення людських жестів за допомогою математичних алгоритмів. Розпізнавання жестів включає розпізнавання емоцій за участю розпізнавання обличчя та рук. Для розпізнавання жестів зазвичай використовується переносний датчик. Застосовується датчик вимірювання інерції (IMU), оскільки він виконує функції акселерометра та гіроскопа. Розпізнавання жестів рукою можна використовувати як розширене керування в нетактильному інтерфейсі людина-машина (НМІ), де користувачам не потрібно використовувати перемикачі чи звичайні пульти дистанційного керування.

Розпізнавання жестів рук є одним із додатків машинного навчання, які застосовуються до розумного освітлення. Для керування освітленням можливо використовувати датчики, розміщені в руці чи на одязі користувача, або використовувати камеру для виявлення жестів.

Кластеризація – це неконтрольований метод навчання для формування класів на основі суміжних даних. Ця програма машинного навчання використовується в дослідженнях розумного освітлення.

Розпізнавання активності. Основним процесом розпізнавання активності є виявлення активності користувача високого рівня за допомогою датчиків. Реалізація розпізнавання активності різноманітна, в тому числі в сферах розумного дому, спорту, автоматизації виставлення рахунків, моніторингу людей

похилого віку, безпеки та ігор тощо.. Наприклад, у сфері охорони здоров'я розпізнавання активності використовується для догляду за людьми похилого віку або утримання пацієнтів з фізичними вадами. У сфері безпеки розпізнавання активності застосовується для визначення бажаного рівня домашньої безпеки.

Розпізнавання активності є одним із додатків машинного навчання, що застосовується в розумному освітленні. Розумне освітлення керується розташуванням користувача в кімнаті. Вбудована система може контролювати інтенсивність світла та тип кольору на основі уподобань користувача.

Виявлення аномалій - це виявлення рідкісних даних, наявність яких викликає підозру, оскільки дані сильно відрізняються від звичайних. Виявлення аномалій можна реалізувати в системах виявлення вторгнень, виявленні шахрайства, медичних аномалій, промислових аномалій або даних часових рядів аномалій. Деякі типи машинного навчання можна використовувати для виявлення аномалій. Неконтрольоване навчання використовується шляхом кластеризації всіх звичайних даних в один кластер. Дані, які не знаходяться всередині кластера, позначаються як аномалія. Виявлення аномалій за допомогою навчання під наглядом розглядає проблеми аномалій як двійкову класифікацію, де перший клас – це звичайні дані, а другий клас – дані аномалій.

При роботі з нелінійними цільовими функціями необхідно застосовувати передові методи. **Оптимізація** - це метод пошуку найкращих результатів на основі цільової функції та кількох обмежень для отримання дійсних результатів. Програми оптимізації включають інтелектуальні мережі, логістику та бездротові мережі датчиків. Кілька методів машинного навчання, які можна використовувати як методи оптимізації, це байєсовська мережа, навчання з підкріпленням і Q-навчання.

Даний метод можна використовувати для оптимізації між отриманням максимальної інтенсивності світла з різним спектральним складом та отриманням максимальної економії електроенергії.

Комп'ютерне бачення - це техніка для отримання високого рівня розуміння зображення чи відео. Перевага використання комп'ютерного зору в

інтелектуальному освітленні полягає в тому, що розширене керування інтелектуальним освітленням може використовувати переваги камер відеоспостереження, які зазвичай уже встановлені на території. Етапи комп'ютерного зору можуть включати отримання об'єктів, виділення ознак, класифікацію та аналіз, а також поширення результатів. Кілька методів виділення ознак, які можна застосувати, включають фільтр Гауса та виділення кольору RGB.

Комп'ютерне бачення – це одна із реалізованих програм машинного навчання в розумному освітленні. Наприклад, можна використовувати розпізнавання обличчя для ідентифікації в розумному освітленні для вибору сценарію освітлення під конкретного споживача.

Управління освітленням для людей з обмеженими можливостями. Для догляду людей з обмеженими можливостями чи похилого віку потрібно застосовувати більше технологій, які застосовуються для виявлення падінь, локалізація та моніторинг стану здоров'я. Роль розумного освітлення полягає в тому, щоб полегшити життя таким людям. Так, застосування методу опорних векторів дозволяє налаштовувати колір та інтенсивність світла на основі виявленої активності людини. Використання підлогових та PIR датчиків дозволяє розпізнати розміщення та активність людини.

Кожен метод машинного навчання має свої переваги та недоліки. Тому кожна техніка має різну область реалізації. Порівняння переваг і недоліків методів машинного навчання показано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Переваги і недоліки методів машинного навчання для інтелектуального освітлення

Категорія	Підкатегорія	Метод	Сильні сторони	Слабкі сторони
1	2	3	4	5
Контрольоване навчання	Класифікація	Штучна нейронна мережа класифікація	Універсальний	Модель чорного ящика
		Нечітка логіка	Прозора модель	Регулюється вручну
		Дерево рішень	Прозора модель	Має переваги
		Опорна векторна машина	Добре підходить до даних з окремими класами	Гірше підходить до даних з шумами
		Метод K найближчих сусідів	Немає часу на навчання	Проблеми розмірності
		Наївний Байєс	Добре підходить для невеликих наборів даних з логічною передумовою	Проблема нульової частоти
		Логістична регресія	Здатний класифікувати залежні дані	Поганий для даних без лінійної кореляції
	Регресія	Опорний вектор регресія	Добре підходить для даних з окремими класами	Поганий для даних із шумом
		Штучна нейронна мережа регресія	Універсальний	Модель чорного ящика
		Лінійна регресія	Легко реалізувати	Припускається лінійність

Продовження табл.2.2

1	2	3	4	5
Неконтрольоване навчання	Кластеризація	k -середнє	Проста кластеризація	Поганий для даних з шумом
		Просторова кластеризація додатків із шумом на основі щільності	Стійкий до шуму	Велика розмірність
	Редукція зменшення	Аналіз основних компонентів	Покращує функції	Низька інтерпретабельність
Ансамблеве навчання	Пакування	Випадковий ліс	Вирішує надмірне оснащення	Висока складність
		Штучна нейронна мережа-пакування	Зменшує дисперсію	Висока складність
	Посилення	Адаптивне пакування	Вирішує проблему дисбалансу даних	Поганий для даних з шумом
		Екстремальне градієнтне посилення	Добре працює з малими даними	Поганий для розріджених даних
Навчання з підкріпленням	Без моделей	Q-навчання	Адаптивний метод	Погано з рідкісною винагородою
		Глибоке Q-навчання	Швидке навчання	Завищені Q-значення
	Розумний рій	Оптимізація рою частинок	Проста концепція	Легко потрапити в локальний оптимум
		Алгоритм Firefly	Мала кількість ітерацій	Легко потрапити в локальний оптимум
	Еволюційне обчислення	Генетичний алгоритм	Добре підходить для оптимізації	Обчислювально затратно

Продовження табл.1.2

1	2	3	4	5
Глибоке навчання	Штучна нейронна мережа		Автоматично налаштовані функції	Висока складність
	Згорткова нейронна мережа		Добре підходить для обробки зображень	Потрібно багато навчальних даних
	Рекурентна нейронна мережа	Довготривала короткочасна пам'ять	Добре підходить для послідовностей даних	Тренування займає багато часу

2.3 Висновки до розділу 2

1. Проведено аналіз існуючих методів машинного навчання.
2. Досліджено, які методи мають можливість практичної реалізації в технологіях розумного освітлення.
3. Встановлено переваги та недоліки методів машинного навчання для їх застосування для систем інтелектуального освітлення.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Структура інтелектуальної системи керування освітленням із можливістю навчання

Розумна система освітлення є невід’ємною частиною будь-якої сучасної будівлі і прямо впливає на вартість електроенергії, комфорт, здоров’я та безпеку користувачів. Основні компоненти інтелектуальної системи освітлення містять світлодіодні джерела випромінювання, фотодетектори, датчики присутності, контролери. Протокол зв’язку між окремими компонентами може бути дротовий або бездротовий. Основою типової інтелектуальної системи освітлення є блок контролера, який регулює рівень затемнення світильників відповідно до даних фотодетекторів, умов перебування та типу зорових завдань, які виконуються в кожній зоні. Розробка ефективних алгоритмів і механізмів управління інтелектуальними системами внутрішнього освітлення є завданням сучасних досліджень. Складність таких конструкцій пов’язана з тим, що системи освітлення є нелінійними та непостійними, оскільки на рівень внутрішнього освітлення впливає природнє та інші види освітлення, яке надходить від сторонніх джерел, а також необхідно враховувати відбите світло від різних поверхонь.

Для визначення рівня затемнення світильників більшість існуючих досліджень використовують два різні підходи, а саме лінійний і нелінійний. Перший припускає, що існує лінійна залежність між виходами фотодетекторів і рівнем затемнення світильника (або коливаннями денного світла). Таким чином, вихід фотодетекторів моделюється як суперпозиція інтенсивності денного світла в місці розташування датчика та освітленості, утвореної світильниками. У таких методах вплив кожного світильника на фотодетектори моделюється на основі діаграми спрямованості, просторового розташування датчика та відбивання світла об’єктами навколишнього середовища. Ці параметри складно змоделювати та розрахувати безпосередньо через складність залежних параметрів багаторазового

відбивання світла об'єктами навколишнього середовища. Таким чином, вихідний сигнал фотодетектор в виділяється за допомогою лінійної апроксимації, контур керування потрібен для регулювання рівня затемнення світильника в кілька кроків таким чином, щоб значення, яке реєструється фотодетектором, наближалось до необхідного значення. Основними недоліками такого методу є складність та тривалість обчислень, часова затримка через необхідність для повторення циклу кожного разу відповідно до потреб користувача або зміни денного світла.

Згідно другого підходу дослідження базуються на нелінійній та змінній у час системі освітлення для керування вихідним світловим потоком світильників за допомогою різних моделей затемнення. Такі схеми керування можуть бути розроблені методами розімкнутого або замкнутого циклу. Методи керування з відкритим контуром оцінюють освітленість від денного світла в навколишньому середовищі, в систем немає фотодетектора, а відсутність зворотного зв'язку може призвести до обмеженої продуктивності таких систем. Оскільки зміна світлового дня є нерегулярною, методи динамічного контролю зі зворотним зв'язком можуть бути більш ефективними.

3.2 Енергоефективна інтелектуальна система керування освітленням із врахуванням денного освітлення і можливістю навчання

Метод інтелектуального керування внутрішнім освітленням (ІКВС) підходить для нелінійних у часі внутрішніх систем штучного освітлення, які складаються із кількох робочих зон. Метод є енергоефективним, використовує лінійну оптимізацію та базується на нейронній мережі. ІКВС є замкнутим циклом, що робить його здатним контролювати нерегулярні зміни денного світла. Поєднання методу лінійної оптимізації з використанням визначеного користувачем значення освітленості та нейронної мережі для визначення рівня затемнення світильників є перевагою дослідженого методу.

У приміщенні, що містить m зон, q фотодетекторів і r світильників входами ІКВС є:

- бажаний рівень підтримуваної освітленості й рівномірності освітленості $D = [ds_1, ds_2, \dots, ds_m]$;
- пріоритет зони, визначений користувачем, $P = [Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_m]$;
- умова зайнятості зони $O = [o_1, o_2, \dots, o_m]$;
- вимірне значення освітленості $MLI = [ML_1, ML_2, \dots, ML_q]$.

ІКВС визначає рівень затемнення кожного світильника dl_r відповідно до вхідних даних. Точність зміни денного світла контролюється за допомогою вимірювань, отриманих від фотодетекторів MLI , які передаються в ІКВС. Така схема моніторингу підвищує точність, дозволяє враховувати нерегулярні та неконтрольовані зміни природного світла. Процедура керування ІКВС складається з трьох послідовних кроків, які на рис.3.1 один показано окремими блоками.

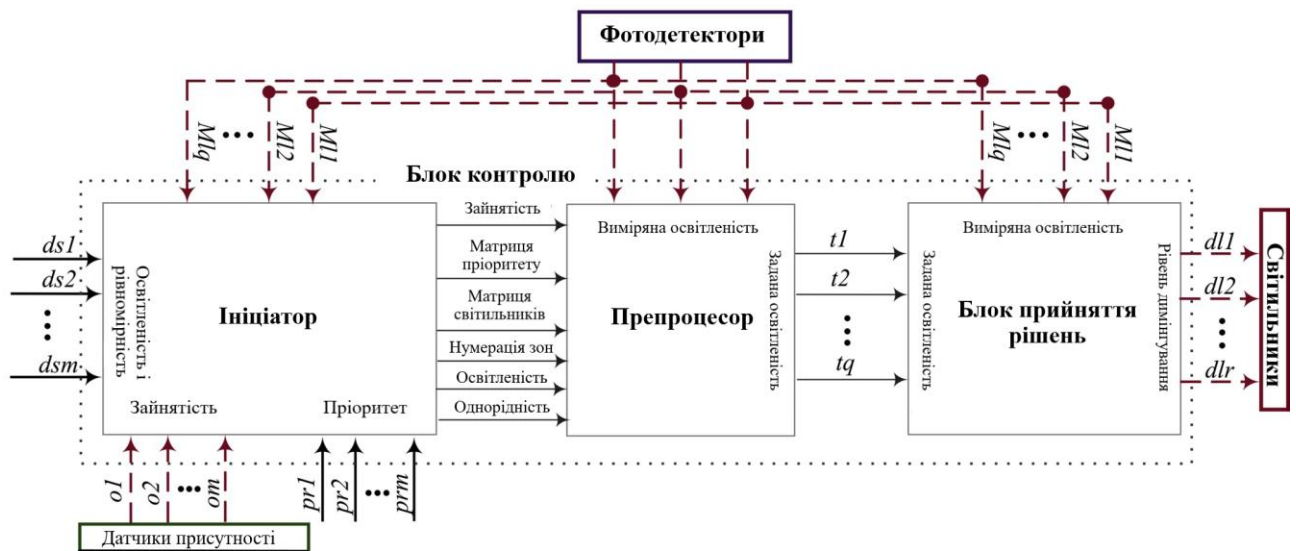


Рисунок 3.1 – Блок-схема системи інтелектуального керування внутрішнім освітленням.

Пунктирні лінії – передача даних через протокол зв'язку, суцільні лінії – задані користувачем дані через інтерфейс користувача.

Блок ініціатор збирає дані системи і доставляє їх до блоку препроцесора. Блок препроцесора використовує метод лінійної оптимізації для розрахунку цільової освітленості TLI фотодетекторів. Завданням цього кроку є оптимізація функції витрат, яка складається з цільових значень освітленості та енергоспоживання світильника P_{LED} . Для цієї оптимізаційної задачі використовується підхід з встановленням користувачем пріоритетів. Блок прийняття рішень моделює нелінійну в часі систему внутрішнього освітлення, яка реагує на природне світло. Рівень затемнення світильників визначається в блоці прийняття рішень, який працює як з керованими штучними, та і з неконтрольованими джерелами зовнішнього світла. Цей блок використовує штучну нейронну мережу для моделювання впливу рівня затемнення світильника на вихід кожного фотодетектора, щоб забезпечити бажаний рівень підтримуваної освітленості та рівномірність освітленості для кожної зони. Блок прийняття рішень працює у двох режимах: навчальному і робочому. В робочому режимі враховується денне світло як потенційний вхід для оптимізації енергоспоживання. Вихід для цього процесу досягається шляхом розрахунку зсуву для фотодетекторів. Оскільки фотодетектори не завжди можна обслуговувати на поверхнях зон, усі фотодетектори, крім одного еталонного в кожній зоні, будуть переміщені. Один фотодетектор зберігається для вимірювання коливань денного світла на поверхні зони та забезпечує зворотній зв'язок із системою для відстеження нерегулярних коливань навколишнього освітлення.

3.2.1 Ініціатор

Метод інтелектуального керування внутрішнім освітленням реалізований як частина більшої системи Central Coordinator, яка спілкується з пристроями в системі через дротову чи бездротову мережу на основі маркерів.

Кількість зон і фотодетекторів, розташування фотодетектора в кожній зоні, бажана підтримувана освітленість і рівномірність освітленості кожної зони, виміряне значення фотодетекторів і пріоритет кожної зони є входами ініціатора.

Відповідно до входів показані виходи, які доставляються інформацію до наступного блоку.

Щоб виконувати ефективні та точні зорові завдання, необхідно забезпечити відповідне освітлення. Ступінь видимості та бажаного комфорту в робочих зонах визначаються видом і тривалістю діяльності. Точність по зонах визначається підтримуваною освітленістю і рівномірністю освітлення. На додаток до підтримуваної освітленості та рівномірності освітленості зони, яка встановлюється на основі стандарту або запиту користувача, кожна зона має пов'язане значення пріоритету, яке вказує на максимально допустиму варіацію запитаних підтримуваних обмежень освітленості зон пропорційно. Таким чином, пріоритет зони є визначеним користувачем показником, який відображає важливість зони в системі освітлення. Можна попередньо встановити визначені значення пріоритету, або їх можна встановити за допомогою розумної онлайн-процедури, яка приймає деякі параметри, такі як присутність людей, кількість людей у зоні, тривалість перебування в зоні, тип зони (наприклад, коридор, де люди просто проходять, менш важливий, ніж робочий стіл) і т.д., щоб встановити пріоритет. Таким чином, оптимізація може бути досягнута в зонах, де точність менш важлива. Значення пріоритету, яке визначає важливість кожної зони, визначає користувач. Найвище та найнижче значення пріоритету визначено як 1 та m (тобто кількість зон), відповідно. Якщо система не отримує значення пріоритету від користувача, тоді вважається, що це значення дорівнює 1.

Значення пріоритету 1 вказує на те, що зона дуже важлива (бажана підтримувана освітленість і рівномірність освітленості повинні бути забезпечені точно). Збільшуючи значення пріоритету до більше одиниці, важливість зони зменшується, що дозволяє ефективно оптимізувати енергоспоживання в таких зонах. Блок ініціатора створює і доставляє матрицю пріоритетів препроцесору, де розмір матриці залежить від кількості фотоприймачів. Значення пріоритету кожного фотоприймача дорівнює пріоритету його зони, визначеному користувачем

$$priority_m = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_q], \quad (3.1)$$

де матриця пріоритетів розміром $1 \times q$ складається з пріоритетів для всіх фотодетекторів, а p_i позначає пріоритет i -го фотодетектора.

Значення пріоритету p_{1-q} використовуються для процесу оптимізації в блоці препроцесора.

Матриця зайнятості розміром $1 \times q$ також надсилається до блоку препроцесора блоком ініціатора, де стан зайнятості (активний або неактивний) кожного фотоприймача дорівнює стану зайнятості його зони, визначеному датчиками присутності

$$occupancy_m = [o_1 \ o_2 \ \cdots \ o_q], \quad (3.2)$$

де умова зайнятості i -го фотодетектора позначається o_i в матриці зайнятості.

o_i має двійковий характер, тобто коли зона є занята, то o_i встановлюється на 1, а коли не зайнята – на 0. Ініціатор також забезпечує бажані значення підтримуваної освітленості та однорідність освітленості кожної зони, які на рис.3.1 позначені матрицями E та U .

У робочому режимі методу ІКВС, що реагує на денне світло, за будь-яких змін у стані зайнятості зон вихід датчика присутності повторно надсилається до блоку ініціатора та генерується оновлена матриця зайнятості.

3.2.2 Препроцесор

Освітленість внутрішнього приміщення може бути забезпечена поєднанням природнього і штучного освітлення. Визначається цільова освітленість кожного фотодетектора відповідно до необхідного значення підтримуваної освітленості та рівномірності освітленості заданої зони, пріоритету зони та доступного денного світла. Цільова освітленість кожного фотоприймача визначається в блоці препроцесора за допомогою оптимізації. Цей пристрій має на меті зменшити споживання енергії шляхом регулювання підтримуваної освітленості кожної зони

до нижчого значення (близько бажаного) щодо пріоритету зони та стану зайнятості. Відповідно до зорового завдання, умов зайнятості та пріоритету кожної зони в цьому блоці розраховується цільове значення для кожного виходу фотоприймача t_i . Стандартні вимоги та попит користувача (пріоритет і зайнятість) поєднуються для розрахунку оптимальних цільових значень освітленості, і, таким чином, споживання електроенергії також оптимізується. Для цього функція виражається як

$$\min \left(\sum_{i=1}^q ga(1,i)(t_i - E_i) + \sum_{j=1}^r gb(1,j)P_{LEDj} \right), \quad (3.3)$$

де t_i - розрахована цільова освітленість на i -му датчику, лк, яка потім надсилається до блоку прийняття рішень;

E_i - бажана підтримувана освітленість, яка визначається стандартом ДБН В.2.5-28:2018 відповідно до типу приміщення і зорового завдання;

P_{LEDj} - споживана потужність j -го світильника;

ga, gb - вагові коефіцієнти підсилення точності підтримуваної освітленості та зменшення споживання електроенергії.

Процедура розрахунку вагових коефіцієнтів підсилення ga і gb наступна:

for $k = 1:q$

if $o_k = 1$ if $p_k = 1 \rightarrow ga(1,k) = 1, gb(1,k) = 0;$
 else $ga(1,k) = (m - p_k + 1) / m; gb(1,k) = p_k / m; end$;
 else $ga(1,k) = 0, gb(1,k) = 1; end end$

m - кількість зон.

Приріст точності ga для фотоприймача з пріоритетом $p_k = 1$ визначається на максимальному рівні. Збільшуючи значення p_k ga зменшується, а gb збільшується. Іншими словами, важливість енергоспоживання gb у процесі оптимізації зростає, коли значення пріоритету збільшується. Приймачі в зоні з нульовою зайнятістю ($o_k = 0$) видаляються з визначеної функції вартості, оскільки ga вважається нульовим. Прибуток визначається відповідно до онлайн-значень зайнятості та пріоритету, наданих ініціатором. Цільові значення фотодетекторів

залежать від споживаної потужності світильників. Крім того, змінні, що використовуються у функції вартості, повинні бути незалежними одна від одної, таким чином, слід застосувати метод перезапису процедури.

Залежно від просторової відстані між світильником і фотодетектором, світильник може мати певний вплив на фотодетектор, коли він затемнюється. Ефекти світильників можна моделювати та інтегрувати в матрицю LED_eff :

$$LED_Eff_{r \times q} = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{r1} & \cdots & e_{rq} \end{bmatrix}_{r \times q} \quad (3.4)$$

Розмірність матриці LED_Eff дорівнює $r \times q$, де r – кількість світильників, а q – кількість датчиків. Будь-який елемент у цій матриці e_{ij} розглядається як окреме значення кута нахилу прямої для вимірюної освітленості на j -му фотодетекторі та рівня затемнення для i -го світильника (рис. 3.2)

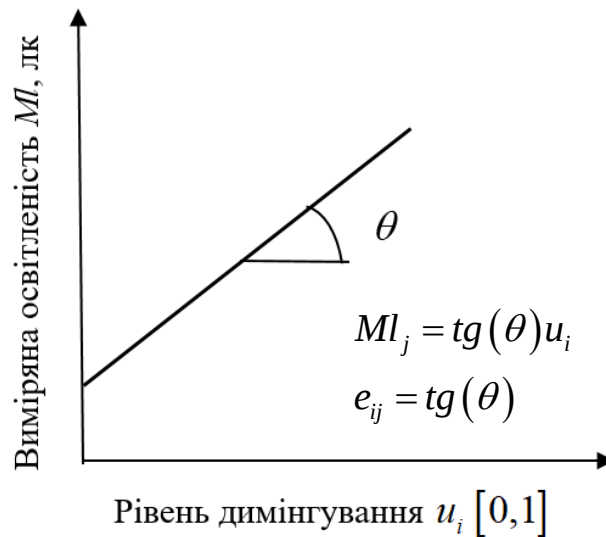


Рисунок 3.2 – Залежність вимірюної освітленості та рівня затемнення світильників для виділення елемента e_{ij} , u - нормоване значення рівня затемнення світильників

Поєднання матриць LED_Eff , $occupancy_m$ і $priority_m$ інтегровано в матрицю $Budget$:

$$Budget = \begin{bmatrix} e_{11}O_1 \frac{1}{P_1} & \cdots & e_{1q}O_q \frac{1}{P_q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{r1}O_1 \frac{1}{P_1} & \cdots & e_{rq}O_q \frac{1}{P_q} \end{bmatrix}_{r \times q} \quad (3.5)$$

де ефект фотодетектора дорівнює нулю, коли умова зайнятості деактивована. Споживана потужність кожного світильника може бути записана як вихідний сигнал конкретного фотодетектора з максимальним значенням у матриці *Budget*. Такий підхід є лише показником енергоспоживання світильника і не є точним еквівалентом. Однак точність достатньо висока для значення пріоритету 1.

Нехай *l*-й стовпець в *j*-му рядку матриці має найбільше значення. Тоді P_{LEDj} можна записати як ціль *l*-го фотодетектора t_l , якщо *l*-й фотодетектор отримує максимальний ефект від *j*-го світильника:

$$P_{LEDj} = \frac{P_{j\max}}{\max(Budget(j,:))} t_l \quad (3.6)$$

Такий вираз потрібно отримати для всіх *r* світильників у системі освітлення. Обмеження в (3.3) можуть бути визначені підтримуваною освітленістю та рівномірністю освітлення, необхідними для кожної зони:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \frac{c_{ij} t_j}{f_i} \geq E_i, \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^q \frac{d_{ij} t_j}{avgzone_i} \geq u_i, \quad (3.8)$$

$$avgzone_i = \sum_{j=1}^q \frac{c_{ij} t_j}{f_i}, \quad (3.9)$$

де параметри c_{ij} і d_{ij} є двійковими. Якщо датчик належить до *i*-ої зони, то $c_{ij} = d_{ij} = 1$, інакше 0;

f_i - кількістю датчиків в *i*-й зоні;

u_i - бажана рівномірність освітленості *i*-ї зони;

m і *q* - кількість зон і кількість фотоприймачів відповідно.

Споживана потужність кожного світильника переписується відповідно до виходів фотодетектора, які вибираються за допомогою матриці (3.5). Щоб сформулювати стандартне лінійне рівняння оптимізації, генеруються нові параметри згідно (3.10)–(3.12).

$$gt(1,k) = ga(1,k) + f_{i\max}(gb(1,k)), \quad (3.10)$$

$$b_i = ga(1,i) \cdot E_i, \quad (3.11)$$

$$x_i = gt(1,i) \cdot t_i - b_i, \quad a_i = ga(1,i) \quad (3.12)$$

Тоді функція (3.3) і постійні в (3.7) й (3.8) запишуться:

$$cost_function = \min \left(\sum_{i=1}^q x_i \right) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} AX &> B \\ CX &> D' \end{aligned} \quad (3.14)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} \frac{1-u_1}{a_1} & -c_{12} \frac{u_1}{a_2} & \dots & -c_{1q} \frac{u_1}{a_q} \\ -c_{21} \frac{u_2}{a_1} & c_{22} \frac{1-u_2}{a_2} & \dots & -c_{2q} \frac{u_2}{a_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{q1} \frac{u_q}{a_1} & c_{q2} \frac{1-u_q}{a_2} & \dots & c_{qq} \frac{1-u_q}{a_q} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_q]^t \quad (3.16)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{b_1}{a_1}(1-u_1) - \frac{u_1 b_2}{a_2} - \dots \\ \frac{b_2}{a_2}(1-u_2) - \frac{u_2 b_2}{a_2} - \dots \\ \vdots \\ \frac{b_q}{a_q}(1-u_q) - \frac{u_q b_q}{a_q} - \dots \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{d_{11}}{f_1 a_1} & \dots & \frac{d_{1q}}{f_1 a_q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d_{m1}}{f_m a_1} & \dots & \frac{d_{mq}}{f_m a_q} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$D = \begin{bmatrix} E_1 - \left(\frac{d_{11} b_1}{f_1 a_1} + \dots + \frac{d_{1q} b_q}{f_1 a_q} \right) \\ \vdots \\ E_m - \left(\frac{d_{m1} b_1}{f_m a_1} + \dots + \frac{d_{mq} b_q}{f_m a_q} \right) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Слід зазначити, що у формулі (3.10), якщо дія денного світла на i -му датчику перевищує E_i , то дія денного світла використовується замість E_i . Проблема розглядається як задача лінійної оптимізації, і тому її можна розв'язати лінійними методами, такими як симплекс-алгоритм. Таким чином, TLI остаточно обчислюється та розглядається як вхідні дані для блоку прийняття рішень. У випадку разі будь-яких змін умов зайнятості, пріоритету будь-якої зони та бажаних значень користувачів проблема оптимізації запускається повторно та обчислюються нові цільові значення.

3.2.3 Блок прийняття рішень

Для відповідного визначення рівня затемнення світильників на етапі прийняття рішення використовуються різні параметри. Метод штучної нейронної мережі (ШНМ) може забезпечити вирішення нелінійних систем, таких як складні проблеми освітлення. ШНМ використовується для розрахунку виходів блоку прийняття рішень (рівень затемнення всіх світильників) для заданого входу TLI . Щоб застосувати варіацію неконтрольованих джерел світла, таких як природне світло, зміщення додається до TLI кожного разу, коли викликається ШНМ. Завдання, які виконує блок прийняття рішень, подано в табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Основні задачі навчального та робочого режимів блоку прийняття рішень

Завдання	Опис
Збір даних	Дані необхідні для навчання нейронної мережі та вивчення впливу кожного світильника
Навчання мережі	Нейронна мережа налаштована, навчена та оцінено вплив помилки
Моніторинг природного освітлення	Вплив природного освітлення додано до системи для підвищення точності
Виявлення помилок	помилка може виникнути внаслідок зміни рівня природної освітленості, відмови світильника, зміни об'єкта освітлення

Блок може працювати в двох режимах: навчальному та робочому (рис.3.3).

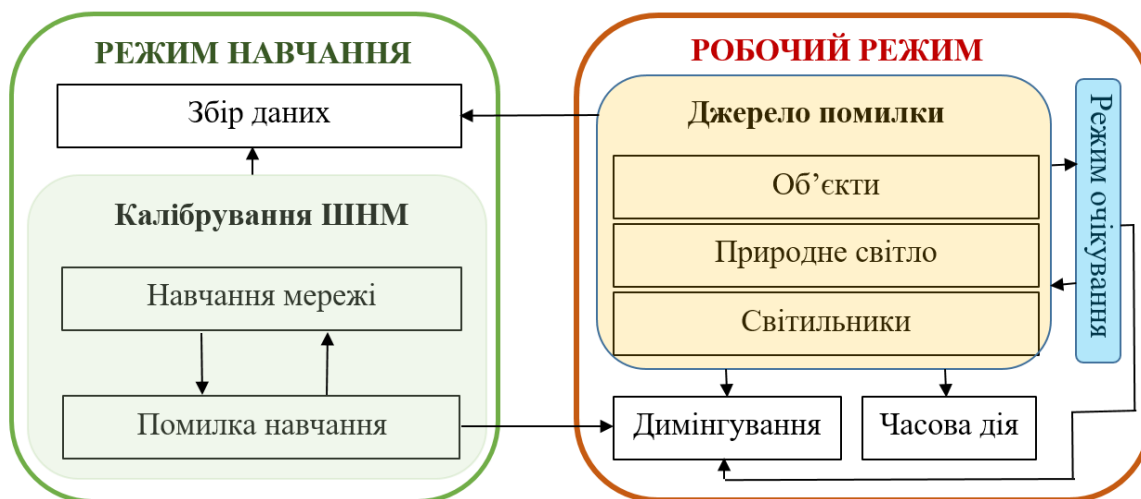


Рисунок 3.3 – Завдання навчального та робочого режимів блоку контролю.

Збір даних полягає у наданні достатніх навчальних даних для ШНМ. Оскільки завданням ШНМ є встановлення рівня затемнення світильників для заданих умов освітлення, він повинен вивчати вплив кожного світильника на вихід фотодетекторів. На цьому етапі система *Central Coordinator* передає команди затемнення (димінгування) на світильники в одноадресному та

багатоадресному режимі. Вихід фотодетекторів на різних рівнях затемнення світильників, який можна зменшити кроками n , потім повідомляється в систему (рис.3.4). Значення n контролюється користувачем, і відповідне значення вибирається на основі часових обмежень і необхідної точності. Потім збирається набір навчальних даних, який містить виміряну освітленість, отриману фотодетекторами на кожному кроці затемнення. Дані використовуються для навчання ШНМ у такому режимі.

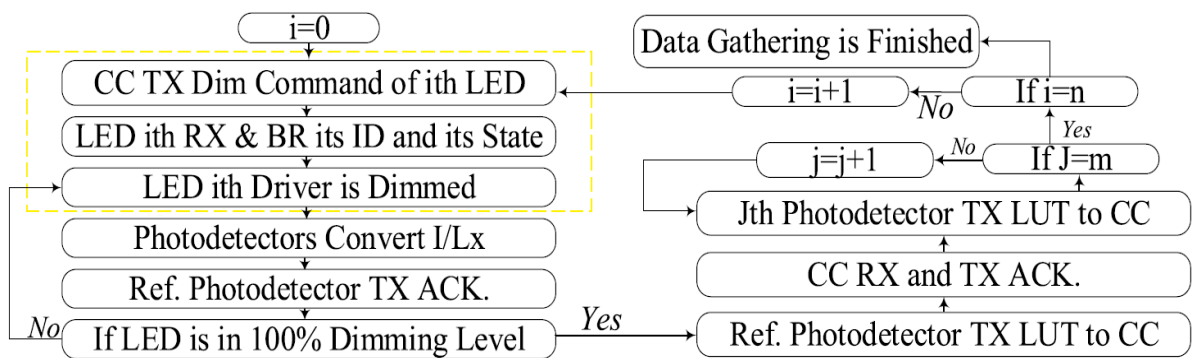


Рисунок 3.4 – Блок-схема процесу збору даних для режиму навчання

Навчання мережі. *Central Coordinator* починає налаштування мережі з моделювання впливу керованих джерел світла на фотодетектори. Вхідними даними для ШНМ є цільова освітленість фотодетектора TLI , а виходами є рівні затемнення світильників, які генеруються одним прихованим шаром H :

$$TLI = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_q]^T \quad (3.20)$$

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_n]^T \quad (3.21)$$

$$DL = [dl_1 \quad dl_2 \quad \dots \quad dl_r]^T, \quad (3.22)$$

де вхід мережі є q -вимірним, прихований нейрон і вихід є n - і r -вимірними відповідно. Вагові вектори W^1 у прихованому шарі та W^2 у вихідному шарі мають розмір $n \times q$ і $r \times n$, відповідно. i -ий нейрон у прихованому шарі та j -ий нейрон на вхідному рівні з'єднані через w_{ij}^1 . Так само w_{ij}^2 визначає вагу, що з'єднує j -ий вихідний нейрон з j -им прихованим нейроном. Вагові вектори W^1 і

W^2 , а також вектори зсуву для прихованого шару b^1 і вихідного шару b^2 визначаються за формулами:

$$W^1 = \begin{bmatrix} w_{11}^1 & w_{12}^1 & \cdots & w_{1q}^1 \\ w_{21}^1 & w_{22}^1 & \cdots & w_{2q}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1}^1 & w_{n2}^1 & \cdots & w_{nq}^1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$W^2 = \begin{bmatrix} w_{11}^2 & w_{12}^2 & \cdots & w_{1q}^2 \\ w_{21}^2 & w_{22}^2 & \cdots & w_{2q}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1}^2 & w_{n2}^2 & \cdots & w_{nq}^2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$b^1 = [b_1^1 \quad b_2^1 \quad \dots \quad b_n^1]^T \quad (3.25)$$

$$b^2 = [b_1^2 \quad b_2^2 \quad \dots \quad b_n^2]^T \quad (3.26)$$

Вхідні дані для функції передачі мережі є сумою зважених входів і векторів зсуву для прихованого шару b^1 . Оскільки вхідний діапазон не може бути обмежений, передатна функція *tansig* використовується для обмеження вихідного діапазону від -1 до +1. Кількість прихованих нейронів спочатку дорівнює 2 і збільшується, доки помилка не потрапить у допустимий діапазон, визначений користувачем. Більший розмір мережі дає вищу точність, але за рахунок збільшення складності та обчислювальної потужності. Тому доцільно використовувати мережу з мінімальним розміром, яка забезпечує необхідну точність. У дослідженні 70% зібраних даних використовуються для навчання мережі, а решта використовуються для оцінки помилки в мережі.

Помилка навчання. У цьому режимі оцінюється середньоквадратична помилка навченої мережі. Для оцінки продуктивності мережі використовують рівень затемнення dlc , розрахований навченою мережею, і рівень затемнення dl з таблиці пошуку:

$$MSE_{nn} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (dl_i - dlc_i)^2 \quad (3.27)$$

Якщо виявлена помилка в деяких зонах при поточних рівнях затемнення перевищує бажані значення, кінцевий автомат змінює свій стан на навчання мережі, і, отже, розмір прихованого шару збільшується (на один нейрон). Цей цикл повторюватиметься до тих пір, поки помилка буде в неприйнятному діапазоні. Гіперпараметри нейронної мережі, такі як кількість прихованих шарів і нейронів на кожен шар визначаються офлайн-процедурою та фіксуються протягом тривалості роботи системи. Повторне навчання мережі у відповідь на зміну параметрів зовнішнього середовища коригує лише ваги, а не структуру.

Встановлення затемнення та джерела помилки. У робочому режимі рівні затемнення світильників визначаються навченими ШНМ відповідно до цільових значень освітленості *TLI*. Виміряні значення освітленості *MLI* періодично порівнюються з цільовими значеннями, які доставляються препроцесором через певні проміжки часу. Потім перевіряється різниця між виміряною та цільовою освітленістю зон, і якщо ця різниця перевищує бажаний поріг, контролер адаптується до зміни освітленості.

3.2.4 Зміни природного освітлення в робочому режимі

В інтегрованій системі штучного контролю денного світла існують деякі джерела помилок, а саме несправності в елементах системи (світильниках і датчиках), рух об'єктів і зміни в навколишньому середовищі, а також зміни природного світла. Про такі несправності система сповіщає користувача, а зміна об'єкта та рух у навколишньому середовищі вимагають повторного навчання ШНМ, оскільки це може змінити схему поширення світла і, таким чином, змінити залежності між світильниками та фотодетекторами. Проте зміна природного світла вимірюється фотодетекторами та враховується як похибка. Щоб контролювати такі варіації та впоратися з ними, зміщення обчислюється та додається до вхідних даних ШНМ.

Метод має три етапи: вимірювання виходу фотодетекторів MLI_q , обчислення відхилення рівня освітленості та додавання зміщення до цільової освітленості TLI для оновлення системи.

$$bias_i = t_i - MLI_i, i = 1, \dots, q \quad (3.28)$$

$$t_{i_{new}} = t_i + bias_i, i = 1, \dots, q \quad (3.29)$$

Зміщення у формулі (3.28) є різницею між цільовою t_i і виміряною MLI_i освітленістю i -го фотодетектора. У формулі (3.29) ця сума потім додається до цільового значення, яке розглядається як оновлений вхід до ШНМ. Таким чином, неконтрольовані зміни освітленості враховуються без додаткового навчання. Наприклад, якщо початкове природне світло, отримане фотодетектором, становило X одиниць, а бажана освітленість становить Y одиниць ($Y > X$), то ШНМ регулює випромінювання світильників так, щоб досягти значення освітленості, створюваної світильниками, рівним $(Y - X)$. Якщо природна освітленість збільшилась на Z одиниць, штучна нейронна мережа корегує роботу світильника так, щоб він створював $(Y - X - Z)$ одиниць освітленості.

3.2.5 Видалення фотодетекторів при зміні природної освітленості

Для отримання підтримуваної освітленості та рівномірності освітленості згідно норм ДБН в робочих зонах розміщують фотодетектори. Однак розміщення фотодетекторів у різних місцях робочих зон може негативно вплинути на рівень комфорту користувачів. Іноді фотодетектори розміщують біля світильників, проте таке розміщення підвищує виникнення помилки системи. Зміни денного світла є нерегулярними, і моніторинг коливань освітленості в динамічних системах є обов'язковим для підтримки ефективності. Методи керування з відкритим контуром, які оцінюють доступне освітлення в робочих зонах, неефективні. Таким чином, фотоприймачі повинні залишатися адаптованими до контролю денного світла.

У запропонованому методі фотодетектори спочатку розміщуються в робочих зонах, але всі датчики, крім одного контрольного в кожній зоні, зрештою

видаляються після калібрування ШНМ. Припускається, що вплив природного світла, який сприймає контрольний фотодетектор, приблизно однаковий для всіх датчиків у кожній робочій зоні.

При будь-якій зміні виміряної освітленості MLI , виміряній еталонним фотодетектором під час робочого режиму, розраховане зміщення на еталонному датчику враховується для всіх вилучених датчиків. Еталонний датчик слід вибирати так, щоб зменшити похибку. Доцільно вибирати фотодетектор із більшою варіацією зміщення, що дозволяє зменшити похибку вимірювань.

3.3 Висновки до розділу 3

1. Представлено енергоефективний інтелектуальний метод керування внутрішнім освітленням для точного регулювання рівня затемнення світильників, який адаптований до нелінійної зміни природної освітленості.
2. Подано схему керування інтелектуальною системою освітлення, яка складається з трьох основних блоків: ініціатора, препроцесора і блоку прийняття рішень.
3. Представлено алгоритм для розрахунку необхідного рівня освітленості від керованих штучних джерел світла для приміщення, розділеного на окремі зони із різними пріоритетами, з врахуванням природного освітлення та зайнятості окремих зон.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Вимоги електробезпеки до освітлювальних установок

Електробезпека - система організаційних і технічних засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики.

Вимоги електробезпеки викладені в міжгалузевих правилах з охорони праці при експлуатації електроустановок, правилах технічної експлуатації електроустановок споживачів, ДСТУ та інших нормативних правових актах.

Вимоги, що містяться в цих актах, поширюються на всіх споживачів, працівників усіх організацій, незалежно від форм власності та організаційно-правових форм, а також на фізичних осіб, зайнятих технічним обслуговуванням електроустановок, що проводять в них оперативні перемикання, які організовують і виконують в електроустановках монтажні, налагоджувальні, ремонтні та будівельні роботи, випробування та вимірювання (електротехнічний персонал).

Працівники, що приймаються для виконання робіт в електроустановках, мають професійну підготовку, що відповідає характеру роботи. Електротехнічний (електротехнологічний) персонал зобов'язаний пройти перевірку знань норм і правил роботи в електроустановках в межах вимог, що пред'являються до відповідної посади або професії, і мати відповідну групу з електробезпеки. Працівнику, який пройшов перевірку знань з охорони праці при експлуатації електроустановок, видається посвідчення, в якому внесені результати перевірки знань.

Присвоєння групи з електробезпеки є необхідною умовою для отримання допуску до обслуговування і експлуатації діючих електроустановок. Ця вимога стосується й осіб неелектротехнічного персоналу, що працює в електроустановках.

Електротехнічний персонал в організації поділяється на наступні категорії: адміністративно-технічний, оперативний, ремонтний, оперативно-ремонтний і електротехнологічний персонал виробничих цехів і дільниць.

Електротехнічного персоналу, який пройшов медичний огляд, спеціальне навчання та перевірку знань, присвоюється група з електробезпеки (від II до V) в залежності від стажу роботи в електроустановках, освіти, теоретичних знань і практичних навичок роботи.

Вимоги до персоналу щодо електробезпеки наведені в МПОТ (ПБ) ЕЕУ, Додаток 1. Наведені в Правилах вимоги є мінімальними можуть бути доповнені за рішенням керівника організації.

Спочатку особі електротехнічного персоналу може бути присвоєна група II. Привласнювати групи з електробезпеки можна тільки послідовно, «перескакувати» через групу можна.

Особам віком до 18 років не дозволяється присвоювати групу вище II.

При надходженні на роботу (переведення на іншу ділянку, заміщення відсутнього працівника) персонал повинен пройти перевірку знань і підтвердити наявну групу стосовно до обладнання електроустановок на новій ділянці.

При переведенні працівника, зайнятого обслуговуванням електроустановок напругою нижче 1000 В, на роботу з обслуговування електроустановок напругою вище 1000 В, йому, як правило, не може бути присвоєно початковий група вище III.

Неелектротехнічний персонал, який виконує роботи, при яких може виникнути небезпека ураження електричним струмом, присвоюється група I з електробезпеки. Перелік посад і професій, що вимагають присвоєння персоналу I групи з електробезпеки, визначає керівник Споживача.

Група I присвоюється персоналу, засвоївши вимоги з електробезпеки, що відносяться до його виробничої діяльності, з оформленням в журналі встановленої форми, посвідчення при цьому не видається.

Присвоєння групи I проводиться шляхом проведення інструктажу, який, як правило, повинен завершуватися перевіркою знань у формі усного опитування і

перевіркою придбаних навичок безпечних способів роботи або надання першої допомоги при ураженні електричним струмом.

Присвоєння групи I з електробезпеки проводить працівник з числа електротехнічного персоналу даного Споживача з групою з електробезпеки не нижче III, призначений розпорядженням керівника організації.

Присвоєння I групи з електробезпеки проводиться з періодичністю не рідше 1 разу на рік.

4.2 Правила техніки безпеки при експлуатації освітлювального обладнання

Робота щодо забезпечення безпечної експлуатації ЕУ здійснюється згідно з обов'язковими, для всіх споживачів електроенергії, незалежно від їх відомчої приналежності, правилами технічної експлуатації ЕУ споживачів та правилами техніки безпеки при експлуатації ЕУ споживачів. Обслуговування діючих ЕУ, проведення в них оперативних переключень, організація та виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і випробувань здійснюються 59 спеціально підготовленим електротехнічним персоналом.

Роботи в діючих ЕУ з врахуванням заходів безпеки поділяються на виконувани: зі зняттям напруги, без зняття напруги на струмоведучих частинах і поблизу них, без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, котрі знаходяться під напругою. До робіт, виконуваних зі зняттям напруги, відносяться роботи, котрі виконуються в ЕУ, в котрій зі всіх струмоведучих частин знята напруга. До робіт, виконуваних без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них, відносяться роботи, котрі проводяться безпосередньо на цих частинах.

Роботою без зняття напруги на віддалі від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, вважається робота, при котрій виключається випадкове наближення працюючих людей та використовуваного ними ремонтного обладнання і інструменту до струмоведучих частин на віддаль менше

встановленої і не вимагається вживання технічних або організаційних заходів (безперервного нагляду) для запобігання такому наближенню.

При виконанні робіт зі зняттям напруги та без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них повинні виконуватись організаційні та технічні заходи.

До організаційних заходів відносяться:

- оформлення роботи по наряді-допуску, розпорядженню або за переліком робіт, виконуваних в порядку поточної експлуатації;
- допуск до роботи;
- нагляд під час роботи;
- оформлення перерви під час роботи;
- переводи на інше робоче місце.

4.3 Робота з освітлювальними установками при надзвичайних ситуаціях

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях є дуже важливими аспектами при роботі зі світлом. Це особливо стосується роботи з електричними лампами і освітлювальними приладами, оскільки вони можуть бути потенційно небезпечними для здоров'я і безпеки людей, які з ними працюють.

Основні правила безпеки при роботі зі світлом передбачають переконатися, що електричний струм вимкнений перед початком роботи з електричними лампами, не дозволяти дітям гратися з лампами або розетками, не торкатися ламп, якщо вони працюють, не використовувати пошкоджені лампи або проводи, переконуватися, що лампи не перегріваються, оскільки це може призвести до пожежі.

При роботі з освітлювальними приладами важливо дотримуватися інструкцій виробника, а у разі надзвичайної ситуації (пожежа, затоплення, землетрус) діяти згідно з інструкціями цивільної оборони. Завжди варто мати

пожежний вогнегасник та детектор диму поблизу, не залишати лампи без нагляду і завжди дотримуватися правил безпеки та охорони праці при роботі зі світлом.

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях є дуже важливими аспектами при роботі зі світлом. Особливо це стосується роботи з електричними лампами і освітлювальними приладами.

Основні правила безпеки при роботі з освітлювальною установкою:

1. Перед початком роботи з електричними лампами переконайтеся, що електричний струм вимкнений.
2. Не дозволяйте дітям гратися з лампами або розетками.
3. Не торкайтеся ламп, якщо вони працюють.
4. Не використовуйте пошкоджені лампи або проводи.
5. Переконайтеся, що лампи не перегріваються, оскільки це може призвести до пожежі.
6. При роботі з освітлювальними приладами дотримуйтеся інструкцій виробника.
7. У разі надзвичайної ситуації (пожежа, затоплення, землетрус) дійте згідно з інструкціями цивільної оборони.
8. Завжди майте пожежний вогнегасник та детектор диму поблизу.
9. Не залишайте лампи без нагляду.
10. При роботі зі світлом завжди дотримуйтеся правил безпеки та охорони праці.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу інтелектуальних систем керування освітленням встановлено фактори раціонального вибору схем керування для різних типів приміщень та сценаріїв перебування у них користувачів.
2. На основі аналізу існуючих методів машинного навчання визначено, які методи мають можливість практичної реалізації в технологіях розумного освітлення, встановлено особливості їх застосування для систем інтелектуального освітлення.
3. Представлено енергоефективний інтелектуальний метод керування внутрішнім освітленням для точного регулювання рівня затемнення світильників, який адаптований до нелінійної зміни природної освітленості.
4. Подано схему керування інтелектуальною системою освітлення, яка складається з трьох основних блоків: ініціатора, препроцесора і блоку прийняття рішень.
5. Представлено алгоритм для розрахунку необхідного рівня освітленості від керованих штучних джерел світла для приміщення, розділеного на окремі зони із різними пріоритетами, з врахуванням природного освітлення та зайнятості окремих зон.
6. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Киянчук Т. // Налаштування контролю інтелектуальної системи керування освітленням / Т.Киянчук, Л.Костик / Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 29-31 травня 2024 року. Тернопіль: ТНТУ, 2024. С.41-42.
2. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
3. Martirano L. A Smart Lighting Control to Save Energy. In: Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems; 2011. P. 132–138.
4. Von Neida B, Maniccia D, Tweed A. Ananalysis of the Energy and Cost Savings Potential of Occupancy Sensors for Commercial Lighting Systems. J Illum Eng Soc 2001; 30:111–25.
5. Ghisi E, Tinker JA. An Ideal Window Area Concept for Energy Efficient Integration of Daylight and Artificial Light in Buildings. Build Environ 2005;40: 51–61.
6. KNX Association. KNX Association (Official website). URL: <http://www.knx.org/knx-standard/introduction/>
7. The Future of Illumination: AI and Machine Learning in Custom Lighting Design. URL: <https://www.sonnyee-lighting.com/the-future-of-illumination-ai-and-machine-learning-in-custom-lighting-design/>
8. Putrada A.G., Abdurohman M., Perdana D., Nuha H.H. Machine Learning Methods in Smart Lighting Towards Achieving User Comfort: A survey / IEEE Access (2022), 10.1109/ACCESS.2022.3169765.

9. X.Chen, M.Liao, and X.-F.Feng, Real-time Affine Invariant Gesture Recognition for LED Smart Lighting Control / Proc. SPIE, vol. 9399, Mar. 2015, Art. no. 939906.
- 10.A.Seyedolhosseini, N.Masoumi, M.Modarressi, and N.Karimian, Daylight Adaptive Smart Indoor Lighting Control Method Using Artificial Neural Networks / J. Building Eng., vol. 29, May 2020, Art. no. 101141.
- 11.Дослідження перехідних процесів в електричному колі з світлодіодами / Володимир Андрійчук, Любов Костик, Ярослав Філюк, Мирослав Наконечний // Технічна електродинаміка, 2024. № 2. С. 87–93.
- 12.The Temperature Dependence of the Parameters of LED Light Source Control Devices Powered by Pulsed Voltage / Iryna Beliakova, Liubov Kostyk, Pavlo Maruschak, Volodymyr Medvid, Vadim Piscio, Oleksandr Shovkun, Roman Mykhailyshyn // Applied Sciences (Switzerland), 2024. №14(13). P.5678.
- 13.Microprocessor Control of the Electric Drive of Variable Radiation Installation and Ensuring of Operation Reliability // Andriychuk V., Kostyk, L., Filiuk Ya., Nakonechnyi M., Babiuk S. (2024). Science and Innovation, 2024. 20(5). Pp.62–70.
- 14.Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.