

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АЛЕКСОВ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК: 004.9 : 004.3 : 004.048

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ І ЗАСОБИ РОЗПІЗНАВАННЯ СИТУАЦІЇ ТА ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

123 Комп'ютерна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

12 Інформаційні технології
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Подані до захисту наукові положення є власним напрацюванням. Всі використані ідеї, наукові результати, цитати супроводжуються належними посиланнями на їх авторів та джерела опублікування. Всі частини тексту дисертації, під час написання яких використовувались технології штучного інтелекту, перевірені та відредаговані особисто.


підпис

Алексов Сергій Вікторович

Наукові керівники:

Говорущенко Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, професор;

Коробчинський Максим Володимирович, доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Алексов С. В. Методи і засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія. – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2026.

Дослідження відомих методів та засобів показало, що і розпізнавання ситуацій, і підтримка прийняття рішень зазвичай реалізуються лише для однієї групи керованих функцій житла, або ж взагалі відсутні у деяких системах. Виходячи з цього, виникає нагальна потреба у розробленні нових методів і засобів, здатних виконувати як розпізнавання ситуацій, так і підтримку прийняття рішень для всіх трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа). Ключовим завданням для подальшого розвитку цієї сфери є забезпечення повноцінного автоматичного прийняття рішень системою «Розумний будинок» без участі людини. Це вимагає від системи здатності самостійно визначати ситуації, вибирати найоптимальніше рішення з набору альтернатив та виконувати необхідні дії.

На даний момент часу спостерігається суперечність між потребою в розпізнаванні ситуації та автоматичному прийнятті рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для всіх трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа), з одного боку, і недосконалістю методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок», з іншого боку. Відтак, забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» є актуальною науково-прикладною задачею, одним із шляхів розв'язання якої є розроблення методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Зазначена науково-прикладна задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 – Комп’ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, зокрема, такому об’єкту вивчення та діяльності, як «інформаційні процеси, технології, методи, способи, інструментальні засоби та системи для дослідження, проектування, налагодження, виробництва й експлуатації ... кіберфізичних систем, Інтернету речей, ...».

Об’єкт дослідження – процес автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок».

Предмет дослідження – методи і засоби автоматичного прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Метою дисертаційного дослідження є оптимізація розпізнавання ситуацій та автоматичне прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа) шляхом розроблення методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Для досягнення поставленої мети були розв’язані такі задачі:

- проаналізовані відомі методи та засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- розроблено концепцію розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- проведено сценарне моделювання керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- розроблено методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- виконано вибір компонентів для підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;

– спроектовано архітектуру та реалізовано підсистему розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

У дисертаційній роботі вперше розроблено деталізовану сценарну модель керування мікрокліматом (температурою та вологістю), освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано або лише за бінарними умовами, забезпечує комплексне та узгоджене прийняття автоматичних рішень одразу за всіма трьома групами функцій, інтегруючи при цьому розрахунок необхідної кількості ламп для досягнення цільової освітленості. Така сценарна модель забезпечує автоматичне генерування узгоджених рішень для приміщень різного типу на основі розпізнаної ситуації та первинних параметрів ініціалізації.

У дисертаційній роботі також вперше розроблено методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», які, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано, комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання оптимального житлового середовища. Вони гарантують гнучке регулювання світлового потоку (з урахуванням затінення), підтримку оптимальних теплових параметрів та концентрації вологи, а також автоматичне недопущення перевищення санітарних норм гучності, що загалом підвищує комфорт, безпеку та автономність мешканців відповідно до будівельних і санітарно-гігієнічних вимог.

В дисертації удосконалено метод ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» як комплексної процедури первинної ініціалізації підсистеми, який, на відміну від відомих рішень, що обмежуються лише налаштуванням часових або порогових параметрів, забезпечує систему комплексною, багатofакторною базою знань – від синхронізації soft real-time часових даних і семантичного маркування приміщення до інтеграції технічних характеристик обладнання (типу ламп, засобів затінення) та цільових пріоритетів (стартового режиму освітлення). Такий метод є

передумовою для подальшого ситуаційного аналізу та автономного прийняття узгоджених рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа, дозволяючи системі розпочати роботу з передбачуваних потреб мешканців.

В роботі набула подальшого розвитку архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, що керують лише однією групою функцій, забезпечує комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа). Така архітектура гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази сценаріїв, переводячи систему від простого контролю до ситуаційного прийняття автоматичних рішень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в доведенні теоретичних результатів дисертаційної роботи до реалізації та у безпосередньому використанні їх на підприємствах. Практичне значення розробленої підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа для кіберфізичної системи «Розумний будинок» полягає у створенні адаптивного та висококомфортного житлового середовища, орієнтованого на користувача. Підсистема виводить кіберфізичну систему «Розумний будинок» за межі простого контролю, створюючи адаптивні сценарії комфорту. Вона самостійно ініціює дії без прямої команди, наприклад, автоматично додає світло, підвищує температуру або вмикає зволожувач. Таке ситуаційне прийняття рішень забезпечує, що параметри мікроклімату, освітлення та мультимедіа взаємопов'язано коригуються для досягнення цілісного стану комфорту, що підвищує якість життя мешканців, створюючи персоналізоване та саморегульоване середовище. Таким чином, розроблена підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа для кіберфізичної системи «Розумний будинок» підвищує якість життя та комфорт мешканців, забезпечуючи дотримання санітарних норм.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у (Додаток Б): ТОВ «Деймос» (акт впровадження від 12.09.2025 р.); ГО «ІТ Кластер м. Хмельницького» (акт впровадження від 15.10.2025 р.); у навчальному процесі Хмельницького національного університету (акт впровадження від 6.11.2025 р.); у навчальному процесі Воєнної академії імені Євгенія Березняка (акт впровадження від 18.12.2025 р.); при виконанні держбюджетної теми Хмельницького національного університету «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (ДР № 0124U000980).

Основні результати дисертації опубліковані у 9 наукових працях, серед яких 6 статей у фахових наукових журналах України, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б; 3 публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (статті в матеріалах конференцій, що індексуються в наукометричній базі Scopus).

Ключові слова: кіберфізична система «Розумний будинок», Інтернет речей (IoT), розпізнавання ситуації, підтримка прийняття рішень, автоматичне керування та прийняття рішень, групи керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа).

ANNOTATION

Aleksov S.V. Methods and tools of situation recognition and decision support in the cyber-physical system "Smart Home". – Manuscript copyright.

Thesis on competition of scientific degree of Doctor of Philosophy by specialty 123 – Computer Engineering. – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2026.

Research of the known methods and tools has shown that both situation recognition and decision support are usually implemented for only one group of controlled housing functions, or are completely absent in some systems. Based on this, there is an urgent need to develop new methods and tools capable of performing both situation recognition and decision support for all three groups of controlled housing functions (microclimate, lighting, and multimedia). The key task for the further development of this area is to

ensure full-fledged automatic decision-making by the Smart Home system without human intervention. This requires the system to be able to independently determine situations, select the most optimal solution from a set of alternatives, and perform the necessary actions.

At present, there is a contradiction between the need for situation recognition and automatic decision-making by the “Smart Home” cyber-physical system for all three groups of controlled housing functions (microclimate, lighting, and multimedia), on the one hand, and the imperfection of methods and means of situation recognition and decision support in the cyber-physical system “Smart Home” on the other. Therefore, ensuring situation recognition and automatic decision-making by the cyber-physical system “Smart Home” is a relevant scientific and applied task, one of the ways to solve which is to develop methods and means of situation recognition and decision support in the cyber-physical system “Smart Home”.

This scientific and applied task corresponds to the subject area of the Ukrainian Higher Education Standard for specialty 123 – Computer Engineering for the third (educational and scientific) level of higher education, in particular, such a subject of study and activity as “information processes, technologies, methods, means, tools, and systems for research, design, debugging, production, and operation ... of cyber-physical systems, the Internet of Things, ...”.

The object of the study is the process of automatic decision-making by the cyber-physical system “Smart Home”.

The subject of the study is methods and means of automatic decision-making in the cyber-physical system “Smart Home”.

The purpose of the dissertation research is optimization of the situations recognizing and making the automatic decisions by the cyber-physical system “Smart Home” for three groups of controlled housing functions (microclimate, lighting, and multimedia) by developing methods and means of situation recognition and decision support in the cyber-physical system “Smart Home”.

To achieve the set goal, the following tasks were solved:

- known methods and tools of situation recognition and decision support in the cyber-physical system “Smart Home” were analyzed;
- a concept for situation recognition and decision-making regarding microclimate, lighting, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home” was developed;
- scenario modeling of microclimate, lighting, and multimedia control in the cyber-physical system “Smart Home” was carried out;
- developed methods for decision-making regarding microclimate, lighting, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home”;
- components selected for the subsystem of situation recognition and decision-making regarding lighting, microclimate, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home”;
- architecture has been designed and subsystem for situation recognition and decision-making regarding lighting, microclimate, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home” has been implemented.

The dissertation is the first to develop a detailed scenario model for controlling the microclimate (temperature and humidity), lighting, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home”, which, unlike known solutions that control these functions in isolation or only under binary conditions, ensures comprehensive and coordinated automatic decision-making for all three groups of functions at once, while integrating the calculation of the required number of lamps to achieve the target illuminance. Such a scenario model provides automatic generation of coordinated decisions for different types of premises based on the recognized situation and initial initialization parameters.

The dissertation also develops, for the first time, methods for making decisions regarding microclimate, lighting, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home”, which, unlike known solutions that control these functions in isolation, comprehensively and consistently ensure the automatic creation and maintenance of an optimal living environment. They guarantee flexible regulation of light flow (taking into account shading), maintenance of optimal thermal parameters and moisture concentration, as well as automatic prevention of exceeding sanitary noise standards, which generally

increases the comfort, safety, and autonomy of residents in accordance with construction and sanitary-hygienic requirements.

The dissertation improves the method of initializing the subsystem for recognizing situations and supporting decision-making regarding microclimate, lighting, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home” as a complex procedure for the initial initialization of the subsystem, which, unlike known solutions, which are limited only to setting time or threshold parameters, provides the system with a comprehensive, multi-factor knowledge base – from soft real-time synchronization of time data and semantic labeling of rooms to the integration of technical characteristics of equipment (such as lamps, shading devices) and target priorities (start-up lighting mode). This method is a prerequisite for further situational analysis and autonomous decision-making regarding lighting, microclimate, and multimedia, allowing the system to start working based on the anticipated needs of residents.

The thesis further developed the architecture of the subsystem for recognizing situations and making decisions regarding lighting, microclimate, and multimedia in the cyber-physical system “Smart Home” cyber-physical system was further developed in this work, which, unlike narrowly specialized known solutions that control only one group of functions, provides comprehensive and coordinated control of three key comfort functions (lighting, microclimate, and multimedia). This architecture guarantees the automatic creation and maintenance of an optimal environment through simultaneous analysis and interrelated adjustment of all parameters based on a single scenario database, transforming the system from simple control to situational automatic decision-making.

The practical significance of the results obtained lies in the implementation of the theoretical results of the dissertation and their direct application in enterprises. The practical significance of the developed subsystem for recognizing situations and making decisions regarding lighting, microclimate, and multimedia for the cyber-physical system “Smart Home” lies in the creation of an adaptive and highly comfortable user-oriented living environment. The subsystem takes the cyber-physical system “Smart Home” beyond simple control, creating adaptive comfort scenarios. It independently initiates actions without a direct command, for example, automatically adds light, increases the temperature, or turns

on the humidifier. Such situational decision-making ensures that microclimate, lighting, and multimedia parameters are adjusted in an interconnected manner to achieve a holistic state of comfort, which improves the quality of life of residents by creating a personalized and self-regulating environment.

Thus, the developed subsystem for recognizing situations and making decisions regarding lighting, microclimate, and multimedia for the cyber-physical system “Smart Home” improves the quality of life and comfort of residents, ensuring compliance with sanitary standards.

The results of the dissertation are implemented in (Appendix B): LLC “Deymos” (implementation act of 12.09.2025); NGO “IT Cluster of Khmelnytskyi” (implementation act of 15.10.2025); in the educational process of Khmelnytskyi National University (implementation act of 06.11.2025); in the educational process of Yevhenii Bereznyak Military Academy (implementation act of 18.12.2025); in the implementation of state budget topic of Khmelnytskyi National University “System for detecting malware and computer attacks in corporate networks using false attack objects and traps” (State Research Project No. 0124U000980).

The main results of the dissertation are published in 9 scientific works, including 6 articles in professional scientific journals of Ukraine, included in the list of scientific professional publications of Ukraine of category B at the date of publication; 3 publications confirming the approval of the dissertation materials (articles in conference proceedings indexed in the Scopus scientometric database).

Key words: cyber-physical system “Smart Home”, Internet of Things (IoT), situation recognition, decision-making support, automatic control and decision-making, groups of controlled housing functions (microclimate, lighting, and multimedia).

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1. T. O. Hovorushchenko, S. V. Aleksov, S. I. Talapchuk, O. V. Shpylyuk, V. V. Magdin. Overview of the Methods and Tools for Situation Identification and Decision-Making Support in the Cyberphysical System "Smart House". Computer Systems & Information Technologies. 2022. №4. Pp. 20-26. <https://doi.org/10.31891/csit-2022-4-3>
2. T. Hovorushchenko, S. Aleksov, Yu. Popov, V. Bachuk. Decision-Making Method for Temperature Control in the Smart Home. Computer systems and information technologies. 2023. №3. Pp. 6-11. <https://doi.org/10.31891/csit-2023-3-1>
3. С. Алексов, Т. Говорущенко, О. Войчур, Ю. Войчур. Метод керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний дім». Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2024. №4. С. 108-114. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-4>
4. С. Алексов, Т. Говорущенко, Ю. Войчур, А. Боярчук. Метод керування вологістю в кіберфізичній системі «Розумний дім». Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». 2024. №6. С. 125-128. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-345-6-19>
5. Алексов С.В., Коробчинський М.В. Метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». 2025. №6. Том 1. С. 323-328. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-44>
6. Говорущенко Т.О., Алексов С.В. Підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2025. №4. С. 23-34. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-3>

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. T. Hovorushchenko, S. Aleksov, E. Ishtvan, O. Voichur, P. Popov. Recognizing the Situations and Supporting the Decision-Making in the Residential Luminosity Control Subsystem of «Smart House» Cyber-Physical System. CEUR-WS. 2023. Vol. 3373. Pp. 566-588. *(індексована в наукометричній базі Scopus)* <https://ceur-ws.org/Vol-3373/paper39.pdf>

8. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for the Humidity Control Subsystem of the Cyber-Physical System “Smart House”. 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 13–15 October 2023. 2023. *(індексована в наукометричній базі Scopus)* <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416435>

9. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for Sound Volume Control in the “Smart House” System. 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 16–19 October 2024. 2024. P. 1–4. *(індексована в наукометричній базі Scopus)* <https://doi.org/10.1109/CSIT65290.2024.10982549>

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РОЗПІЗНАВАННЯ СИТУАЦІЇ ТА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»	25
1.1. Кіберфізична система «Розумний будинок»	25
1.2. Аналіз відомих рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок»	31
1.3. Аналіз методів та засобів щодо керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	41
1.4. Висновки. Постановка задачі	48
РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ТА СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ, ОСВІТЛЕННЯМ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»	50
2.1. Концепція розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	50
2.2. Формування вимог предметної галузі керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	57
2.3. Сценарна модель керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	67
2.4. Висновки	102
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО МІКРОКЛІМАТУ, ОСВІТЛЕННЯ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»	104
3.1. Метод прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	104
3.2. Метод прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	110

3.3. Метод прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	115
3.4. Метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	124
3.5. Висновки	129
 РОЗДІЛ 4. ПІДСИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ СИТУАЦІЙ ТА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОСВІТЛЕННЯ, МІКРОКЛІМАТУ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»	132
4.1. Вибір компонентів для підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	132
4.2. Архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»	152
4.3. Результати експериментальних досліджень	157
4.4. Висновки	165
 ВИСНОВКИ	167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	171
 ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача	186
ДОДАТОК Б. Акти впровадження	188

ВСТУП

Актуальність теми. «Розумний будинок» є сучасним житловим середовищем, організованим за допомогою автоматизації та високотехнологічних пристроїв, що об'єднуються в єдину інтелектуальну систему управління. Суть цієї системи полягає у забезпеченні узгодженої, автоматичної роботи інженерних мереж будинку, створюючи комфортні умови проживання [1]. Будинок називається «розумним», якщо в ньому наявна певна комп'ютерна чи контролююча система для управління інженерним оснащенням [2].

Кіберфізична система «Розумний будинок» має бути спроектована таким чином, щоб усі сервіси могли легко інтегруватися між собою з мінімальними фінансовими, часовими та трудовими витратами, а їх обслуговування було оптимально організовано [3]. Кіберфізична система грамотно розподіляє ресурси, знижує експлуатаційні витрати та забезпечує зрозумілий інтерфейс контролю і управління, а також повинна вміти розпізнавати конкретні заплановані та надзвичайні ситуації у помешканні та реагувати на них згідно із заданою програмою, причому одна підсистема може керувати поведінкою інших. Важливою відмінною особливістю «Розумного будинку» є те, що це найбільш прогресивна концепція взаємодії людини з житловим простором – мешканець обирає один із запрограмованих сценаріїв, а автоматизована (або й автоматична) система відповідно до зовнішніх і внутрішніх умов задає параметри і відстежує режими роботи всіх інженерних систем і електроприладів. Система керування функцій житла, як правило, складається з керування мікрокліматом, керування освітленням і керування системами мультимедіа. Незважаючи на широкий спектр функціональних призначень та численні операції, для управління цією потужною системою власнику житла не потрібні глибокі знання з програмування, оскільки усі сценарії наперед налаштовуються, а власникам залишається лише управляти функціями через пристрої з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом [4].

У сфері контролю мікроклімату та комфорту часто застосовуються інтелектуальні алгоритми. Наприклад, робота [2] використовує алгоритми нечіткої

логіки для обчислення та коригування комфортних температур, визначаючи необхідні дії на основі оцінювання внутрішньої та зовнішньої температури за допомогою терм-множин (наприклад, «холодно», «тепло») і продукційних правил. Аналогічно, дослідження [5] підтвердило ефективність нечіткої логіки в поєднанні з багатокласовою машиною опорних векторів (SVM) для вибору правил управління температурою і вологістю. Впровадження системи моніторингу навколишнього середовища на базі Інтернету речей (IoT), розробленої в [6], використовує покращену оптимізацію роєм частинок (IPSO) для створення ідеального та комфортного середовища, включаючи модулі сенсорів температури, вологості та освітленості. Дослідження [7] зосереджене на методі керування з повним зворотним зв'язком і керуванням з випередженням для визначення найкращої теорії управління серводвигуном у системах розумних вікон, що покращує циркуляцію повітря. Крім того, робота [8] присвячена IoT-системі для управління опаленням та охолодженням, яка точно визначає необхідність корекції, запобігаючи втратам енергії.

Значна увага приділяється управлінню енергією та оптимізації витрат. Модель, запропонована у [9], використовує оптимізацію з рухомим горизонтом з прогнозуванням на основі рекурентної нейронної мережі для ітеративного прогнозування невизначеності та оптимізації роботи акумуляторних накопичувачів енергії в житлових розумних будинках, зокрема для ефективного використання сонячної енергії. Для управління енергоспоживанням у розумних будинках використовується стратегія [10] оптимізації домашнього енергоспоживання (ОНЕМ-алгоритм), заснована на покращеній бінарній оптимізації роєм частинок, що має на меті оптимізацію задоволеності клієнтів і вартості електроенергії. Дослідження [11] пропонує модель розумного багатоквартирного будинку, де множинні розподілені джерела живлення є спільними для кількох споживачів, що знижує експлуатаційні витрати та викиди вуглецю. Метод оптимального планування роботи побутових приладів для оптимального споживання енергії з урахуванням управління попитом і техніко-економічних показників в електромережах був запропонований у [12].

У сфері IoT-інтеграції та безпеки роботи зосереджуються на вдосконаленні інфраструктури та функціоналу. Дослідження [13] акцентує увагу на додаванні вузлів у IoT-інфраструктуру розумного будинку та реалізації системи на базі ESP-Mesh з різними типами вузлів (механічні замки, сенсори, вимикачі). Робота [14] представляє IoT-систему «розумної кухні» на базі Arduino, яка автоматично виявляє температуру, вологість і витік газу, а також надає можливість віддаленого керування приладами через мобільний телефон. Щодо безпеки, робота [15] розробила систему відмикання дверей на основі одноразового пароля (OTP) за допомогою Arduino та GSM, що пропонує безпечнішу альтернативу традиційним ключам. Виявлення присутності/відсутності мешканців, важливе, наприклад, для догляду за літніми людьми, досліджувалося у [16] за допомогою кількох алгоритмів машинного навчання на основі аналізу використання електроприладів.

На додаток, дослідження пропонують методики для оцінки ефективності та спрощення розробки. Методологічний підхід, заснований на Emergy-аналізі, представлений у [17], призначений для оцінювання ефективності інтеграції IoT-сенсорних систем у розумні будівлі з метою зменшення впливу на довкілля та енергоспоживання. Робота [18] пропонує метод розробки на основі TOPPERS Embedded-Component System для пристроїв з метою підвищення ефективності розробки електрообладнання, збільшення його масштабованості та зменшення складності. У сфері голосового керування [19] досліджується розробка системи домашньої автоматизації, що активується голосом і інтегрує штучний інтелект, IoT, обробку природної мови та блокчейн для ефективної та економічної взаємодії з побутовим обладнанням. Нарешті, в роботі [20] запропоновано новий метод на основі даних для точного непрямого обліку тепла в багатоквартирних будинках, що зменшує похибку рахунків за опалення.

Питанням проектування ефективного «Розумного будинку» присвячено ряд досліджень як українських, так і іноземних вчених: І. Юрчак [2, 21-23], С. Кукуніна [3, 24], С. Цирульника [25-27], В. Теслюка [28-30], В. Яцківа [31], Г. Вардакіса (G. Vardakis) [32-34], В. Сунга (W.-T.Sung) [6, 35-37], В. Яїчі (W. Yaïci) [8, 38-40], А. Мохаммада (A. Mohammad) [10, 41-43] тощо. Українські та іноземні вчені

працюють також і над проєктуванням та розробленням кіберфізичних систем: Д. Зубов [44-47], С. Баловсяк [48-50], О. Савенко [51, 52], Т. Говорущенко [53-55], В. Ковтун [56, 57], Р. Сабінян (R. Sabeenian) [15, 58-60], Т. Кумар (T. Kumar) [17, 61], Ф. Саба (F. Saba) [20, 62, 63] тощо. Проблеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень у різних галузях присвячені дослідження таких українських та іноземних вчених: Є. Гнатчук [64-66], М. Коробчинського [67, 68], А. Олійника [69, 70], Е. Зайцевої (E. Zaitseva) [71], В. Левашенка (V. Levashenko) [72], К. Гудмана (K. Goodman) [73], К. Варостоса (C. Varotsos) [74], П. Родрігеса-Гарсії (P. Rodriguez-Garcia) [75] тощо.

Дослідження відомих методів та засобів показало, що і розпізнавання ситуацій, і підтримка прийняття рішень зазвичай реалізуються лише для однієї групи керованих функцій житла, або ж взагалі відсутні у деяких системах. Виходячи з цього, виникає нагальна потреба у розробленні нових методів і засобів, здатних виконувати як розпізнавання ситуацій, так і підтримку прийняття рішень для всіх трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа). Ключовим завданням для подальшого розвитку цієї сфери є забезпечення повноцінного автоматичного прийняття рішень системою «Розумний будинок» без участі людини. Це вимагає від системи здатності самостійно визначати ситуації, вибирати найоптимальніше рішення з набору альтернатив та виконувати необхідні дії.

Отже, на даний момент часу спостерігається суперечність між потребою в розпізнаванні ситуації та автоматичному прийнятті рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для всіх трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа), з одного боку, і недосконалістю методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок», з іншого боку. Відтак, забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» є *актуальною науково-прикладною задачею*, одним із шляхів розв'язання якої є розроблення методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Зазначена науково-прикладна задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, зокрема, такому об'єкту вивчення та діяльності, як «інформаційні процеси, технології, методи, способи, інструментальні засоби та системи для дослідження, проектування, налагодження, виробництва й експлуатації ... кіберфізичних систем, Інтернету речей, ...».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладено в дисертації, виконано під час виконання науково-дослідних робіт за держбюджетною темою Хмельницького національного університету «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (ДР № 0124U000980), у якій автор був виконавцем і виконував апробацію напрацьованих методів та засобів виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Мета і задачі дослідження. *Об'єкт дослідження* – процес автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок».

Предмет дослідження – методи і засоби автоматичного прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Метою дисертаційного дослідження є оптимізація розпізнавання ситуацій та автоматичне прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа) шляхом розроблення методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі *задачі*:

- проаналізувати відомі методи та засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- розробити концепцію розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- провести сценарне моделювання керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;

- розробити методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- виконати вибір компонентів для підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- спроектувати архітектуру та реалізувати підсистему розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Методи дослідження. При розв’язанні поставленої науково-прикладної задачі використовувались аналіз та синтез, методи аналізу та моделювання процесів, принципи сценарного моделювання, теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, апарат модельно-орієнтованих підходів, принципи загальної теорії систем та системного аналізу, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку, загальні принципи створення кіберфізичних систем, методи емпіричного дослідження.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у одержанні таких наукових результатів:

вперше розроблено:

1) деталізовану сценарну модель керування мікрокліматом (температурою та вологістю), освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано або лише за бінарними умовами, забезпечує комплексне та узгоджене прийняття автоматичних рішень одразу за всіма трьома групами функцій, інтегруючи при цьому розрахунок необхідної кількості ламп для досягнення цільової освітленості. Така сценарна модель забезпечує автоматичне генерування узгоджених рішень для приміщень різного типу на основі розпізнаної ситуації та первинних параметрів ініціалізації;

2) методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» (метод прийняття рішень щодо керування температурою, метод прийняття рішень щодо керування вологістю,

метод прийняття рішень щодо керування освітленням, метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»), які, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано, комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання оптимального житлового середовища. Вони гарантують гнучке регулювання світлового потоку (з урахуванням затінення), підтримку оптимальних теплових параметрів та концентрації вологи, а також автоматичне недопущення перевищення санітарних норм гучності, що загалом підвищує комфорт, безпеку та автономність мешканців відповідно до будівельних і санітарно-гігієнічних вимог;

удосконалено:

3) метод ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» як комплексної процедури первинної ініціалізації підсистеми, який, на відміну від відомих рішень, що обмежуються лише налаштуванням часових або порогових параметрів, забезпечує систему комплексною, багатофакторною базою знань – від синхронізації soft real-time часових даних і семантичного маркування приміщення до інтеграції технічних характеристик обладнання (типу ламп, засобів затінення) та цільових пріоритетів (стартового режиму освітлення). Такий метод є передумовою для подальшого ситуаційного аналізу та автономного прийняття узгоджених рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа, дозволяючи системі розпочати роботу з передбачуваних потреб мешканців;

набула подальшого розвитку:

4) архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, що керують лише однією групою функцій, забезпечує комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа). Така архітектура гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного

коригування всіх параметрів на основі єдиної бази сценаріїв, переводячи систему від простого контролю до ситуаційного прийняття автоматичних рішень.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає в доведенні теоретичних результатів дисертаційної роботи до реалізації та у безпосередньому використанні їх на підприємствах.

Практичне значення розробленої підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа для кіберфізичної системи «Розумний будинок» полягає у створенні адаптивного та висококомфортного житлового середовища, орієнтованого на користувача. Підсистема виводить кіберфізичну систему «Розумний будинок» за межі простого контролю, створюючи адаптивні сценарії комфорту. Вона самостійно ініціює дії без прямої команди, наприклад, автоматично додає світло, підвищує температуру або вмикає зволожувач. Таке ситуаційне прийняття рішень забезпечує, що параметри мікроклімату, освітлення та мультимедіа взаємопов'язано коригуються для досягнення цілісного стану комфорту, що підвищує якість життя мешканців, створюючи персоналізоване та саморегульоване середовище.

Таким чином, розроблена підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа для кіберфізичної системи «Розумний будинок» підвищує якість життя та комфорт мешканців, забезпечуючи дотримання санітарних норм.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у (Додаток Б): ТОВ «Деймос» (акт впровадження від 12.09.2025 р.); ГО «ІТ Кластер м. Хмельницького» (акт впровадження від 15.10.2025 р.); у навчальному процесі Хмельницького національного університету (акт впровадження від 06.11.2025 р.); у навчальному процесі Воєнної академії імені Євгенія Березняка (акт впровадження від 18.12.2025 р.); при виконанні держбюджетної теми Хмельницького національного університету «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (ДР № 0124U000980).

Особистий внесок здобувача та внесок інших співавторів у спільних публікаціях. Усі наукові результати дисертаційного дослідження отримані

автором особисто. Список опублікованих праць за темою дисертації представлено в списку використаних джерел – [76-84]. У спільних публікаціях автору належать такі результати: аналіз методів та засобів розпізнавання ситуації та прийняття рішень в «Розумному будинку» [76], метод підтримки прийняття рішень щодо керування температурою в «Розумному будинку» [77], сценарна модель та метод керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [78, 82], метод керування вологістю в кіберфізичній системі «Розумний будинок» [79, 83], метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [80, 84], архітектура та вибір компонентів підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [81].

Особистий внесок інших співавторів у спільних публікаціях: у статті [76] Т. Говорущенко виконувала адміністрування та концептуалізацію дослідження, С. Талапчук, О. Шпилюк та В. Магдін сумісно з автором та під його керівництвом працювали над оглядом існуючих методів та рішень; у статті [77] Т. Говорущенко виконувала адміністрування та концептуалізацію дослідження, керувала постановкою експериментів, Ю. Попов і В. Бачук спільно із автором проводили експерименти; у статті [78] Т. Говорущенко виконувала адміністрування та концептуалізацію дослідження, Ю. Войчур керував постановкою експериментів, О. Войчур спільно із автором проводив експерименти; у статті [79] Т. Говорущенко виконувала адміністрування та концептуалізацію дослідження, Ю. Войчур та А. Борячук керували постановкою експериментів; у статті [80] М. Коробчинський виконував адміністрування та концептуалізацію дослідження, рецензування та коригування рукопису; у статті [81] Т. Говорущенко виконувала концептуалізацію дослідження, обговорення результатів дослідження, рецензування та коригування рукопису, керівництво проєктом; у статті [82] Т. Говорущенко виконувала адміністрування та концептуалізацію дослідження, рецензування та коригування рукопису, П. Попов керував постановкою експериментів, Є. Іштван та О. Войчур спільно з автором проводили експерименти; у статті [83] Т. Говорущенко та А. Борячук виконували концептуалізацію дослідження, обговорення результатів

дослідження, рецензування та коригування рукопису, керівництво проектом; у статті [84] Т. Говорущенко виконувала концептуалізацію дослідження, обговорення результатів дослідження, рецензування та коригування рукопису, керівництво проектом, А. Боярчук керував постановкою експериментів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались та обговорювались на 3 міжнародних науково-технічних та науково-практичних семінарах [82-84], а саме: 4th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security IntelITSIS-2023 (м. Хмельницький, Україна, 2023); 2023 IEEE 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (м. Афіни, Греція, 2023); 2024 IEEE International Scientific and Technical Conference “Computer Science and Information Technologies” (м. Львів, Україна, 2024).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 9 наукових працях ([76-84] та додаток А), серед яких 6 статей у фахових наукових журналах України [76-81], включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б; 3 публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (статті в матеріалах конференцій, що індексуються в наукометричній базі Scopus) [82-84].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 150 найменувань на 15 сторінках та 2 додатків на 9 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 194 сторінки друкованого тексту, з них 150 сторінок основного тексту. Дисертація містить 10 рисунків та 20 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РОЗПІЗНАВАННЯ СИТУАЦІЇ ТА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

1.1. Кіберфізична система «Розумний будинок»

Упродовж останніх десятиліть поняття «кіберфізична система» вийшло за межі суто інженерного терміну та набуло статусу фундаментальної категорії, що охоплює сфери автоматизації, штучного інтелекту, розподілених обчислень, енергетики, когнітивного моделювання та соціотехнічних систем [85, 86, 87]. Згідно з усталеною міжнародною термінологією, кіберфізична система розглядається як інтегрована сукупність обчислювальних процесів, фізичних пристроїв та комунікаційних каналів, що діють у тісному взаємозв'язку, утворюючи функціонально цілісний простір взаємодії між цифровим та матеріальним світами [88, 89]. Кіберфізична система – це система, яка поєднує в собі фізичні та цифрові елементи. Вона може включати різні компоненти, такі як датчики, мікроконтролери, програмне забезпечення, хмарні сервіси та інші технології. Такі системи можуть бути застосовані в різних галузях, включаючи промисловість, транспорт, медицину, сільське господарство та інші. Це наочний приклад концепції Інтернету речей [13].

Кіберфізична система «Розумний будинок» – це поєднання розумних об'єктів, які можуть полегшити обмін інформацією між об'єктами та мешканцями, щоб з'єднати розумний дім із зовнішнім світом Інтернету. «Розумний» будинок – це система, яка допомагає зробити житло комфортнішим і безпечнішим. Це система, яка об'єднує в собі технології Інтернету речей та інформаційних технологій для управління домашніми пристроями і системами, такими як освітлення, опалення, кондиціонування повітря, безпека тощо. Це дає змогу поліпшити зручність і безпеку життя в будинку [6, 12, 19].

«Розумний будинок» – це комплекс рішень, що дають змогу автоматизувати повсякденні дії, позбавляючи власника від рутинних справ. «Розумний будинок» – це не набір пристроїв, якими керують віддалено, це єдина система керування такими пристроями (екосистема), яка забезпечує конкретні переваги користувачу – наприклад, наочність контролю, зручність, економію сил і часу. Така екосистема має без участі людини виконувати певні дії у відповідь на конкретні ситуації [8].

Взагалі, «Розумний будинок» – це система пристроїв, до яких належить техніка, датчики та інші елементи, які здатні виконувати різні дії як без участі людини (за розробленими та запрограмованими сценаріями), так і за командою людини [94, 95].

Кіберфізична система «Розумний будинок» призначена для автоматизації та управління різними пристроями в будинку, такими як освітлення, опалення, температурний режим, безпека, тощо. Система складається з сенсорів, контролерів і керуючого програмного забезпечення, які працюють разом, щоб збирати дані, аналізувати їх і приймати рішення на основі заданих параметрів. У результаті, мешканці будинку отримують комфорт і безпеку, а також економлять енергію і знижують витрати на комунальні послуги [7, 96].

Кіберфізична система «Розумний будинок» – це керована адаптивна система, що функціонує у середовищі з високим рівнем невизначеності, неповноти даних та мультифакторності впливів [90, 91]. Така система є не лише носієм автоматизованого контролю, але й суб'єктом прийняття рішень – на основі сенсорного аналізу та інтерпретації контексту [92, 93].

«Розумний будинок» має без участі людини вміти розпізнавати ситуації, виконувати певні дії і приймати необхідні рішення в залежності від тієї чи іншої ситуації [97].

Ключовими ознаками кіберфізичних систем «Розумний будинок» є [98, 99]:

- вбудованість у фізичне середовище через мережу сенсорів і виконавчих пристроїв;
- здатність до автономного обчислення, виявлення ситуацій та активного управління;

- здатність до самонавчання та адаптації на основі накопичених даних і змін у поведінці користувача;

- стійкість до зовнішніх впливів і збоїв завдяки модульності та відмовостійким протоколам керування.

Класична триєдина структура кіберфізичної системи у контексті «Розумного будинку» включає фізичний рівень (сенсори, актуатори, контролери), кібернетичний рівень (аналітичні алгоритми, логіка прийняття рішень, бази знань) та комунікаційний рівень (локальні й глобальні мережі передачі даних) [100]. Між цими рівнями функціонують вертикальні і горизонтальні механізми зворотного зв'язку, що забезпечують рефлексивність системи – її здатність не лише реагувати на зовнішні стимули, але й переосмислювати власні дії у контексті минулого досвіду [101].

Варто відзначити, що у парадигмі сучасного «розумного» середовища, кіберфізична система не є лінійною послідовністю «сенсор → аналіз → дія», як це було притаманно класичним SCADA-системам, а виступає у якості когнітивної конструкції, яка веде постійний діалог із середовищем, користувачем та історією власного функціонування [102]. Це виводить кіберфізичну систему на якісно новий рівень: від запрограмованої автоматизації – до ситуаційної інтелектуалізації [103].

Таким чином, кіберфізична система «Розумний будинок» – це не просто технічна система, а саморефлексивний цифровий агент, здатний до сенсоутворення, пріоритетизації цілей, гнучкого реагування та контекстно-залежного прийняття рішень [104, 105]. Саме тому формалізація ситуацій та розробка відповідних моделей прийняття рішень у такій системі є не лише інженерним, але й методологічним викликом.

Ключовим аспектом сучасного тлумачення кіберфізичних систем у контексті інтелектуального середовища є принцип ситуаційної обумовленості реакцій, що відрізняє такі системи від традиційних автоматизованих установок. У системах, що реалізують концепцію «Розумного будинку», недостатньо лише наявності сенсорного контролю або ж жорстко запрограмованої логіки. Сучасна кіберфізична система повинна не лише отримувати значення температури, вологості чи рівня

освітлення – вона має усвідомлювати ситуацію як цілісний факт реальності [106, 107]. Це передбачає наявність у системи когнітивного рівня абстракції, здатного інтерпретувати сенсорні дані як фрагменти ширшого сценарію.

З технічної точки зору, це вимагає реалізації моделі подання знань про середовище у вигляді онтологій ситуацій, сценарних або контекстно орієнтованих моделей, що дозволяють здійснювати агрегування даних у семантично значущі структури.

Іншою особливістю сучасних кіберфізичних систем у контексті «Розумного будинку» є розподілений характер обробки даних. На відміну від централізованих систем минулих поколінь, сьогоденні архітектури побудовані на принципах edge computing, коли значна частина обробки виконується безпосередньо на периферії – у точках збору даних [108]. Це дозволяє мінімізувати затримки, зменшити навантаження на центральний обчислювальний вузол, а головне – забезпечити стійкість системи навіть за умов тимчасової втрати мережевого зв'язку. Таким чином, кожен сенсорний вузол або мікроконтролер, інтегрований у систему, виступає у ролі локального агента прийняття попередніх рішень на основі заданих локальних правил або моделей [109].

Особливу увагу в архітектурі кіберфізичної системи привертає модуль ситуаційного аналізу, який розглядається як ключовий функціональний компонент [110]. Його завдання полягає у формуванні цілісного уявлення про поточну ситуацію на основі множини гетерогенних сенсорних сигналів. При цьому важливим є не лише виявлення сигналів, що виходять за межі нормативу, але й розпізнавання шаблонів поведінки, послідовностей подій і навіть аномалій на тлі звичайного життєвого ритму домогосподарства.

У системах житлового типу подія часто набуває значення не за фактом настання, а за послідовністю та контекстом, у якому вона виникла. Це вимагає від системи розуміння сценарного тла, що робить її ближчою до когнітивних агентів, аніж до класичних автоматів.

Можна констатувати, що архітектура кіберфізичної системи «Розумний будинок» повинна включати принаймні такі структурні компоненти (рис. 1.1):

- сенсорний рівень – набір фізичних пристроїв (датчики температури, вологості, руху, освітлення, присутності, газу, диму тощо), які забезпечують первинне сприйняття зовнішнього середовища;
- обчислювальний рівень – програмно-апаратна інфраструктура, в якій здійснюється попередня обробка, фільтрація та передача даних до вищих рівнів системи;
- аналітичний рівень – реалізація моделей виявлення ситуацій, класифікації станів, навчання моделей на основі історичних даних, включаючи rule-based системи, нейронні мережі, байєсівські моделі, fuzzy-логіку та інші методи штучного інтелекту;
- виконавчий рівень – сукупність пристроїв, що реалізують управлінські дії (реле, серводвигуни, модулі керування освітленням, клімат-контролем, безпекою);
- когнітивно-комунікаційний рівень – модулі прийняття рішень, сценарного планування, візуалізації, а також інтерфейси користувача та інтеграції з хмарними або мобільними сервісами.

Отже, кіберфізична система «Розумний будинок» не лише реєструє сигнали і реагує на них, але й моделює середовище, оцінює ситуації, формулює гіпотези про поточний стан, і приймає рішення в умовах часткової інформації, динаміки зовнішнього середовища та індивідуалізованих потреб користувача.

Не менш важливою властивістю систем такого типу є онтологічна відкритість, тобто здатність до інтеграції нових пристроїв, сервісів, сценаріїв без потреби в глобальному перепроєктуванні. Це досягається за рахунок використання інтерфейсів типу MQTT, а також сервіс-орієнтованої архітектури, що дозволяє розширювати функціональність системи за рахунок додавання нових агентів.

На відміну від кіберфізичних систем у виробничій або транспортній сферах, де середовище є структуровано формалізованим, кіберфізична система «Розумний будинок» функціонує у середовищі людського фактору, позбавленому детермінізму [111, 112].

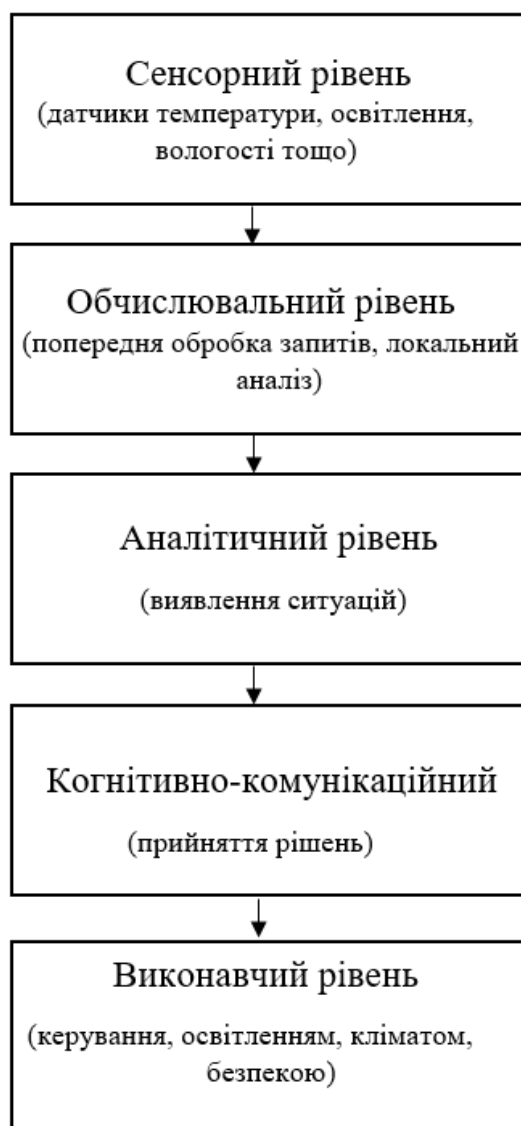


Рис. 1.1 – Схема кіберфізичної системи «Розумний будинок»

Особливу увагу слід приділити обігу інформації в кіберфізичній системі, що здійснюється за мережею прямого та зворотного зв'язку між її структурними рівнями. Потік даних у системі починається із сенсорного імпульсу, проходить стадії первинної обробки, фільтрації шумів, перетворення одиниць, нормалізації, а далі передається в аналітичне ядро, де здійснюється багаторівнева класифікація та агрегація інформації. Далі відбувається прийняття рішення, яке може бути як результатом чіткої логіки («IF-THEN»), так і наслідком навченої нейронної моделі, побудованої на основі історичних сценаріїв. Останнім етапом є формування команди для виконавчих механізмів або збереження ситуації як одиниці навчального досвіду в базі знань системи.

У кіберфізичній системі «Розумний будинок» затримка між виявленням ситуації та прийняттям рішення навіть у межах однієї секунди може спричинити неадекватну поведінку системи. Відтак, система має задовольняти вимоги до soft real-time систем, а у деяких критичних підсистемах – і до hard real-time систем [113, 114].

Кіберфізична система «Розумний будинок» є не просто технічним засобом, а інтелектуальним суб'єктом середовища, який функціонує на перетині інженерії, штучного інтелекту та соціальної поведінки. Саме тому її проєктування і дослідження потребує наукового підходу – як з боку комп'ютерної інженерії, так і в рамках системної теорії та когнітивної інформатики.

1.2. Аналіз відомих рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок» [76]

Розглянемо декілька топових рішень відомих «Розумних будинків» [15, 17, 20, 115-117]:

1) Amazon Alexa – простий в налаштуванні за допомогою мобільного застосунку; в якості способу передачі даних використовує Wi-Fi і Bluetooth; найзручнішим є голосове керування пристроями за допомогою простих голосових команд; підтримує лише англійську мову;

2) Google Home – екосистема з відомим та просунутим голосовим помічником Google Assistant; керувати підключеними до асистента пристроями різних виробників дозволяє мобільний застосунок Google Home за допомогою простих голосових команд; підтримує англійську та російську мову; можливості керування дещо обмежені в порівнянні з Alexa;

3) Apple HomeKit – для керування такою екосистемою достатньо мобільного застосунку Home, який дає змогу швидко інтегрувати різні пристрої і користуватися зручним інтерфейсом iOS-девайсів для налаштування роботи і створення різних сценаріїв; голосовим сервісом управління виступає глобальний сервіс Siri, який дозволяє керувати пристроями за допомогою простих голосових

команд; підтримує англійську та російську мову; відрізняється невеликою кількістю сумісних пристроїв та досить високою їх вартістю;

4) Xiaomi Smart Home – екосистема відкритого типу на основі протоколу ZigBee, що дозволяє доповнювати «Розумний будинок» сумісними зі стандартом гаджетами будь-яких виробників, в тому числі різними вимикачами, захисними датчиками, реле, замками, тощо; до складу екосистеми легко додаються пристрої з підтримкою Wi-Fi (розумні розетки, відеокамери, лампочки, побутові прилади, тощо); відрізняється демократичною вартістю; доступна модифікація та поступове нарощування; для керування використовується застосунок Mi Home, який дозволяє керувати пристроями за допомогою простих голосових команд; голосовий асистент підтримує лише китайську мову;

5) Ajax – закрита бездротова екосистема українського походження, призначена для забезпечення безпеки будинку; керується застосунком Ajax Security System, який є простим та інтуїтивно зрозумілим; автономне живлення до 15 годин без електропостачання; одночасне підключення до 100-150 пристроїв; підтримка керування сигналізацією декількома користувачами (до 50 облікових записів); датчики захищені від втрати зв'язку та є перешкодостійкими; забезпечує не тільки оповіщення господаря в разі порушення безпеки приміщень, а й автоматичне оповіщення пульта охорони спеціалізованих компаній;

6) Nero – широкопрофільна екосистема; працює на бездротових протоколах Z-Wave і Intro III; має обмежений вибір сумісних пристроїв; автоматизує налагодження мікроклімату приміщення (обігрів, кондиціонування), керування освітленням, керування воротами, захист від проникнень, тощо; все керування здійснюється за допомогою безкоштовного застосунку NeroHome, який дозволяє керувати пристроями за допомогою простих голосових команд; сумісність з більшістю відеокамер виробництва HiWatch і Hikvision; простий в налаштуванні; підтримує російську мову;

7) «Розумні» термостати Google Nest автоматично налаштовують температуру в залежності від виду діяльності людини та погодних умов, що дозволяє знижувати витрати на опалення та кондиціонування;

8) Сучасні системи освітлення LIFX і Nanoleaf не лише дозволяють регулювати яскравість і колір світла, але й можуть автоматично адаптувати освітлення в залежності від часу доби, наявності людей у кімнаті та діяльності людей; розумні освітлювальні системи Philips Hue, автоматично вимикають світло, коли воно не потрібне, що сприяє економії енергії;

9) «Розумні» системи вентиляції та кондиціонування Ecobee і Honeywell здатні регулювати якість повітря в будинку; вони можуть контролювати вологість, фільтрацію повітря і навіть виявляти присутність шкідливих часток, забезпечуючи комфортні умови проживання;

10) Сучасні «розумні» замки August Smart Lock і Yale Assure Lock дозволяють власникам контролювати доступ до своїх будинків через смартфон; вони можуть автоматично відкривати або закривати двері, а також надавати тимчасові або постійні коди доступу для гостей;

11) Системи безпеки нового покоління SimpliSafe або ADT пропонують інтеграцію із смарт-гаджетами, відеоспостереження в реальному часі та можливість дистанційного контролю через мобільні застосунки; вони можуть автоматично сповіщати про підозрілі дії та викликати служби охорони;

12) Нові кухонні пристрої, такі як «розумні» холодильники (наприклад, Samsung Family Hub) та індукційні плити з Wi-Fi підключенням, можуть автоматично налаштовувати режими роботи, відслідковувати запаси продуктів та навіть пропонувати рецепти на основі наявних інгредієнтів; це дозволяє не тільки економити час, але й робити процес приготування їжі більш зручним і інтуїтивним;

13) Системи автоматичного поливу Rachio або Eve Aqua здатні оптимізувати використання води, враховуючи погодні умови та потреби рослин; «розумні» газонокосарки Husqvarna Automower можуть автоматично косити траву, слідкуючи за заданим маршрутом і оминаючи перешкоди.

Всі ці рішення роблять життя в розумному будинку більш комфортним, безпечним, екологічним та енергоефективним, забезпечуючи інтеграцію різних пристроїв в єдину екосистему, що максимально відповідає потребам користувачів.

Дослідження топових рішень відомих «Розумних будинків» показало, що наявні рішення, як правило, не передбачають повністю автоматичного керування у «Розумному будинку», а орієнтовані або на автоматизоване керування спільно із ручним керуванням, або на кероване користувачем керування. Проте тенденція до автоматичності продовжує зростати з метою зробити технологію «Розумного будинку» більш зручною, доступною і привабливою для широкого кола користувачів.

Отже, кіберфізична система «Розумний будинок» повинна без участі людини вміти визначати та розпізнавати різні ситуації та події, приймати необхідні рішення в тій чи іншій ситуації (прийняття рішення в класичному розумінні зводиться до вибору найбільш оптимального рішення з множини альтернативних рішень залежно від ситуації, яка виникла в даний момент часу функціонування системи), а також виконувати певні дії в залежності від ситуації.

Система керованих функцій житла складається з таких основних груп: керування мікрокліматом житла; керування освітленням; керування системами мультимедіа [1].

Створення і підтримка оптимального мікроклімату житла – найважливіша умова високої працездатності, продуктивного відпочинку і здоров'я мешканців будинку або квартири. Система управління кліматом в приміщенні дає можливість встановлювати оптимальний рівень температури, вологості, величину притоку свіжого повітря, управляти роботою системи фільтрації повітря, створювати індивідуальну кліматичну систему для кожного члена сім'ї, зокрема, дитини [1].

Керування освітленням житлового середовища поділяється на керування трьома типами освітлення: природним, штучним та світлодинамікою (рис. 1.2). Для регулювання освітленості приміщень природним денним світлом та затінення вікон у вечірній час система «Розумний будинок» керує положеннями жалюзі та ролетів, а також механічним відкриттям і закриттям штор. Інтелектуальна система управління джерелами штучного освітлення регулює яскравість і кількість освітлювальних приладів для кожного окремого приміщення чи функціональної зони, в залежності від часу доби, погодних умов, виду діяльності мешканців у

конкретний час. Однією з важливих можливостей «Розумного будинку» є створення динамічних світлових сценаріїв, коли натискання на одну кнопку вмикає оптимальне освітлення для тієї чи іншої ситуації [1, 29, 30, 118].

Крім функції обслуговування, «Розумний будинок» також оснащений внутрішніми мультимедіа системами для розваги господарів будинку та їхніх гостей: мультирум (система багатозонного розподілу аудіо і відео), медіасервер, домашній кінотеатр (рис. 1.3) [1].

Системи інтелектуального керування середовищем житла мають широкий спектр функціональних призначень, виконують численні операції за багатьма сценаріями [1, 119].

Для управління такою системою власнику житла не потрібно мати глибокі знання з програмування, оскільки усі сценарії наперед програмуються та налаштовуються відповідно до потреб родини. Власникам житла достатньо управляти функціями «Розумного будинку» через пристрої керування з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом [1, 4, 120].

Отже, на сьогодні актуальним завданням є розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».



Рис. 1.2 – Типова реалізація системи управління освітленням

[<https://lampuse.com/uk/led-svitylnyky-do-systemy-rozumnyj-dim/>]



Рис. 1.3 – Типова реалізація системи «мультирум»

[<https://www.samsung.com/uk/audio-devices/soundbar/4-1-ch-soundbar-silver-hw-h751-xu/>]

Проведемо огляд відомих методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» із виділенням їхніх переваг та недоліків.

В роботі [2] для визначення комфортних умов перебування в системі «Розумного будинку», зокрема, для обчислення комфортних температур використовуються алгоритми нечіткої логіки. Для кожної лінгвістичної змінної формується базова терм-множина. Наприклад, для змінних «температура всередині приміщення», «температура повітря атмосфери» така множина складається із чотирьох термів: «холодно», «нейтрально», «тепло», «гаряче». Після вибору лінгвістичних змінних, формуються терм-множини та будуються функції належності, складаються продукційні правила для моделі. Ця методика дозволяє за допомогою оцінювання внутрішньої і зовнішньої температури повітря з використанням правил нечіткої логіки визначити, як потрібно скорегувати температуру до комфортних значень.

У дослідженні [9] було розроблено модель оптимізації з рухомим горизонтом та прогнозуванням на основі рекурентної нейронної мережі, яка призначена для

інтерактивного прогнозування невизначеності та оптимізації операцій зберігання енергії в акумуляторних батареях у житлових «Розумних будинках» в ітеративному режимі. Запропонована модель може бути використана для оптимізації операцій зберігання енергії в акумуляторних батареях у житлових «Розумних будинках» та для ефективного використання сонячної енергії.

У дослідженні [10] представлено стратегію управління енергоспоживанням у будинку (алгоритм ОНЕМ) на основі вдосконаленої бінарної оптимізації рою частинок, яка призначена для оптимізації задоволеності споживачів та вартості електроенергії, для отримання точних, оптимальних та бажаних рішень щодо енергоспоживання в «Розумних будинках», для зниження вартості електроенергії та задоволення потреб користувачів.

У статті [11] пропонується модель «Розумного багатоквартирного будинку», в якому декілька розподілених джерел енергії спільно використовуються декількома споживачами для зниження експлуатаційних витрат і викидів вуглецю за рахунок впровадження високоефективних методів експлуатації.

У статті [5] доведено, що нечітка логіка з методом опорних векторів (SVM), яка реалізується як нечітка трапецієподібна функція належності для кожного зразка в гіперсфері та як лінійна функція відстані обраного зразка в нелінійній гіперплощині SVM, є ефективною у виборі правил для прийняття рішень щодо контролю температури та вологості.

У статті [15] створено систему відкривання дверей на основі ОТР з використанням Arduino та GSM, яка генерує одноразовий пароль на мобільному телефоні для розблокування дверей і є набагато безпечнішою, ніж традиційна система на основі ключів.

У статті [6] розроблено систему моніторингу приміщень на основі Інтернету речей, яка забезпечує комфорт, екологічність та моніторинг у реальному часі для розумного будинку, що складається з модуля вимірювання температури та вологості і модуля освітленості. У цій системі для створення ідеального та комфортного середовища використовується вдосконалена оптимізація рою частинок (IPSO).

У статті [16] досліджено застосування електроспоживання як засобу виявлення присутності/відсутності мешканців (наприклад, людей, які страждають на деменцію, літніх людей, які живуть самотійно тощо) з використанням декількох алгоритмів машинного навчання.

Дослідження [7] присвячене методу повного зворотного зв'язку та прямого управління для визначення найкращої теорії управління сервомотором в системах «розумних» вікон, що використовується для поліпшення циркуляції повітря та кращої автоматизації циркуляції повітря.

У статті [14] представлена інтелектуальна кухонна система на основі Інтернету речей, яка автоматично визначає температуру, контролює рівень вологості, має вбудовані датчики виявлення газу для виявлення витоків газу на кухні, забезпечує дистанційне керування побутовими приладами (духовками, морозильними камерами та кондиціонерами) за допомогою мобільного телефону. Ця система реалізована на платі Arduino з підключенням до Інтернету. Метою системи є дистанційне керування пристроями (вимикачами, вентиляторами та освітленням) за допомогою будь-якого смартфона на базі Android.

У статті [17] представлено методологічний підхід на основі Emergy для оцінки ефективності інтеграції сенсорних систем на базі IoT у «Розумні будинки» з метою зменшення їхнього впливу на навколишнє середовище та споживання енергії.

Дослідження [13] було зосереджено на додаванні вузлів до інфраструктури «Розумного будинку» на основі IoT, на проектуванні, впровадженні та тестуванні апаратного та програмного забезпечення системи «Розумного будинку» на основі ESP-Mesh (з використанням ESP8266) з трьома різними вузлами – механічними (дверний замок), датчиками температури та вологості, електричними (вентилятор, загальний вимикач живлення або вилка живлення).

У статті [20] запропоновано новий метод на основі даних для точного непрямого обліку тепла в багатоквартирних будинках, який забезпечує вимірювання або оцінку різниці температур між внутрішнім середовищем і теплоносієм, завдяки чому похибка рахунків за опалення зменшується на 20–50 %.

У статті [121] запропоновано метод розробки та вбудовану компонентну систему TOPPERS на основі вбудованих компонентів для пристроїв з метою підвищення ефективності розробки електричного обладнання для «Розумних будинків», збільшення масштабованості електричного обладнання та зменшення складності розробки.

У статті [19] досліджується розробка системи домашньої автоматизації з голосовим управлінням, яка інтегрує штучний інтелект, Інтернет речей, обробку природної мови, блокчейн для економічно ефективної та ефективної взаємодії з побутовим обладнанням.

У статті [12] запропоновано метод оптимального енергоспоживання в розумних будинках на основі оптимального планування роботи побутової техніки з урахуванням управління попитом та техніко-економічних показників в електричних мережах.

Стаття [8] присвячена розробці системи на основі Інтернету речей для управління опаленням та охолодженням у житлових приміщеннях, яка точно визначає, чи потрібно охолоджувати або опалювати приміщення, щоб не витратити енергію неефективно.

Огляд відомих методів та засобів розпізнавання ситуацій і підтримки прийняття рішень у кіберфізичних системах «Розумний будинок» демонструє чіткий багатовекторний підхід до інтелектуалізації домашнього середовища, який можна розділити на кілька ключових напрямків.

По-перше, значна частина досліджень зосереджена на використанні когнітивних та оптимізаційних алгоритмів для обробки невизначеності та прийняття рішень. Це яскраво ілюструється застосуванням нечіткої логіки для визначення комфортних зон температури та вологості, що дозволяє системі працювати з лінгвістичними змінними та суб'єктивними оцінками, замінюючи жорсткі порогові значення гнучкими правилами. Також активно використовуються складні методи оптимізації, такі як вдосконалена бінарна оптимізація рою частинок (IPSO) та подібні підходи, призначені для балансування суперечливих цілей –

задоволеності користувачів та мінімізації вартості енергії. Це підтверджує перехід від простої автоматизації до ситуаційної інтелектуалізації.

По-друге, ключовим напрямком є енергетична ефективність та управління ресурсами. Методи, які включають оптимізацію з рухомим горизонтом на основі рекурентних нейронних мереж та стратегії, орієнтовані на спільне використання розподілених джерел енергії, свідчать про те, що кіберфізична система «Розумний будинок» виступає не лише як контролер комфорту, але і як активний учасник управління попитом та споживанням. Ці рішення вимагають високої точності прогнозування та контекстно-залежного планування.

По-третє, важливим елементом є технологічна база та інтеграція. Переважна більшість систем будується на архітектурі Інтернету речей з використанням мікроконтролерів Arduino та ESP-Mesh, що підтверджує тенденцію до розподіленої обробки даних на периферії (Edge Computing). Додатково досліджуються методи виявлення присутності/відсутності мешканців на основі машинного навчання та голосове управління з інтеграцією ШІ та обробки природної мови, що підкреслює орієнтацію на людиноцентричний інтерфейс та контекстну обізнаність.

Отже, проведений огляд методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» показав, що:

- 1) в наявних рішеннях розпізнавання ситуацій відбувається лише для однієї з груп системи керованих функцій житла або не відбувається взагалі;
- 2) наявні рішення передбачають підтримку прийняття рішень лише для однієї з груп системи керованих функцій житла або не передбачають її взагалі.

Отже, виходячи з критичного аналізу методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок», під час якого були виділені вищезазначені недоліки, виникає необхідність в розробленні таких методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок», які б: виконували розпізнавання ситуацій для 3-х груп системи керованих функцій житла; передбачали підтримку прийняття рішень для 3-х груп системи керованих функцій житла (рис. 1.4).

ВІДОМІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ		МАЙБУТНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ
Розпізнавання ситуацій тільки для однієї з груп керованих житлових функцій	Не розпізнають ситуацій взагалі	Виконуватимуть розпізнавання ситуацій для 3-х груп керованих житлових функцій – мікроклімат, мультимедіа, освітлення
Надають підтримку в прийнятті рішень тільки для однієї з груп керованих житлових функцій	Не надають підтримку в прийнятті рішень	Забезпечать підтримку прийняття рішень для 3-х груп керованих житлових функцій

Рис. 1.4 – Роль пропонованого підходу у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

1.3. Аналіз методів та засобів щодо керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

З позиції призначення та функцій кіберфізичної системи «Розумний будинок» нас цікавить, чи забезпечують відомі рішення розпізнавання ситуацій та підтримку прийняття рішень в процесі керування мікрокліматом житла; чи забезпечують відомі рішення розпізнавання ситуацій та підтримку прийняття рішень в процесі керування освітленням житла; чи забезпечують відомі рішення розпізнавання ситуацій та підтримку прийняття рішень в процесі керування мультимедіа.

Відомі системи керування мікрокліматом [2, 5, 6, 7, 8, 13, 14, 20] активно використовують складні алгоритми, такі як нечітка логіка [2], часто в поєднанні з методом опорних векторів (SVM) [5], для контролю температури та вологості, а також вдосконалену оптимізацію рою частинок (IPSO) для створення комфортного середовища та моніторингу в реальному часі [6]. Ці рішення, разом із використанням IoT для точного визначення потреб в опаленні/охолодженні [8] та управлінням «розумними» вікнами для циркуляції повітря [7], підкреслюють пріоритет енергоефективності та комфорту.

Стаття [122] розглядає систему рекомендацій для управління «Розумним будинком». Хоча вона прямо не фокусується винятково на температурі та вологості, її ключовою перевагою є забезпечення підтримки прийняття рішень на високому рівні, пропонуючи користувачеві оптимальні дії. Недоліком є те, що це рекомендаційна система, а не повністю автоматичне прийняття рішень без участі людини, що обмежує автономність системи. Розпізнавання ситуацій відбувається через аналіз контексту для формування рекомендацій.

Робота [123] зосереджена на розробці системи керування мікрокліматом виробничого приміщення, а не житлового будинку. Перевага полягає у створенні конкретної системи для керування мікрокліматичними параметрами. Однак, її застосування обмежується структурованим виробничим середовищем, яке є більш детермінованим порівняно з житловим середовищем, де домінує людський фактор і непередбачувана поведінка. Це може знизити ефективність її алгоритмів у контексті «Розумного будинку».

Стаття [124] прямо стосується автоматизації керування мікрокліматом у житлових приміщеннях. Перевагою є чітка орієнтація на середовище «Розумного будинку» та акцент на автоматичному контролі. Це забезпечує пряме прийняття рішень щодо параметрів, таких як температура і вологість, що загалом сприяє розвитку ситуаційної інтелектуалізації в житловій сфері.

Дослідження [125] займається моделюванням та алгоритмізацією системи регулювання мікроклімату з елементами штучного інтелекту. Ключова перевага полягає у використанні штучного інтелекту для розпізнавання ситуацій та прийняття рішень, що є переходом від жорсткої автоматики до ситуаційної інтелектуалізації. Недоліком є те, що це переважно моделювання та розрахунок параметрів, а не практична реалізація та тестування системи в реальних умовах, де домінує невизначеність.

Робота [126] описує розробку системи керування мікрокліматом на базі SCADA для приміщень торговельного центру. Хоча вона забезпечує високий рівень централізованого контролю, як і у випадку [123], середовище торговельного центру є більш формалізованим порівняно з «Розумним будинком». Класичні

SCADA-системи схильні до лінійної послідовності «сенсор → дія», що може не задовольняти вимоги ситуаційної обумовленості реакцій та адаптації до непередбачуваного людського фактору, характерного для житлових кіберфізичних систем.

Стаття [127] є дослідженням характеристик температури та вологості житлових будівель у Північному Китаї. Її перевага – надання реальних даних та моделей про теплові та вологісні режими приміщень, які є необхідною базою знань для розробки алгоритмів розпізнавання ситуацій та прийняття рішень. Однак, сама по собі ця робота не пропонує алгоритмів керування чи прийняття рішень, а лише надає вхідні дані для таких систем.

Дослідження [128] зосереджене на розробці моделі температури та вологості для прогнозного керування (predictive control) «Розумними будинками». Ключовою перевагою є перехід від реактивного контролю до прогнозного управління, що дозволяє системі приймати рішення заздалегідь, мінімізуючи відхилення від комфортних параметрів. Це сприяє підвищенню енергоефективності та якості регулювання. Розпізнавання ситуацій тут реалізується через прогнозування майбутнього стану мікроклімату.

Робота [129] пропонує інноваційний підхід до оптимізації керування на основі великих мовних моделей. Це є значною перевагою, оскільки великі мовні моделі можуть інтегрувати неструктуровані дані (наприклад, відгуки користувачів або текстові інструкції) у процес прийняття рішень, виводячи систему на рівень когнітивної конструкції та контекстно-залежного прийняття рішень. Однак, використання великих мовних моделей може бути обтяжене високими обчислювальними вимогами і потенційною затримкою (latency), що є критичним для soft real-time систем.

Стаття [130] є оглядом технологій контролю вологості у будівлях. Її перевага – систематизація існуючих методів та технологічних рішень для керування вологістю. Проте, це оглядова робота, яка не пропонує нових алгоритмів розпізнавання ситуацій чи прийняття рішень, а є лише джерелом для порівняльного аналізу.

Дослідження [131] зосереджене на швидкому прогнозуванні багатопараметрів (концентрація, температура та вологість) для онлайн-керування системою. Ключовою перевагою є акцент на швидкості (Fast prediction), що критично для задоволення вимог soft real-time систем. Швидке прогнозування дозволяє системі вчасно розпізнавати потенційні відхилення від комфорту та приймати упереджувальні рішення.

Робота [132] є аналітичним оглядом матеріалів, що регулюють вологість, і їхнього застосування. Вона стосується фізичного рівня кіберфізичних систем та способів пасивного контролю вологості. Незважаючи на важливість матеріалознавства для загальної системи, ця стаття не займається алгоритмами розпізнавання ситуацій чи прийняття рішень, а розглядає фізичні виконавчі пристрої та середовище.

Стаття [133] описує вдосконалення керування температурою та вологістю за допомогою нової системи кондиціонування з прямим розширенням. Її перевага полягає у вдосконаленні виконавчого пристрою (актуатора), що підвищує точність і ефективність фізичного контролю. Однак, як і у випадку [132], основний фокус зроблено на апаратному та фізичному рівні, а не на кібернетичному рівні розробки алгоритмів розпізнавання ситуацій та прийняття рішень.

Функція керування освітленням [6, 13, 14] переважно реалізована як допоміжний модуль моніторингу освітленості [6] або через загальну можливість дистанційного керування вимикачами за допомогою смартфона [14].

Стаття [134] аналізує економічну та енергетичну ефективність систем керування освітленням, але зосереджена вона на сходових клітках багатоквартирних будинків. Перевага полягає у фокусі на енергозбереженні. Проте, керування освітленням сходових кліток зазвичай ґрунтується на простій логіці «присутність/відсутність» або таймерах, що є жорстко запрограмованою автоматизацією і не вимагає складного ситуаційного аналізу чи контекстно-залежного прийняття рішень, як це необхідно у житлових кімнатах «Розумного будинку».

Робота [135] присвячена автоматичній системі керування освітленням у житлових будинках. Її перевага – пряма орієнтація на житловий сектор та

автоматизацію. Вона реалізує базові функції розпізнавання ситуацій (наприклад, визначення рівня освітленості та присутності).

Дослідження [136] використовує складні алгоритми машинного навчання (генетичний алгоритм, Random Forest, регресійні моделі) для оптимізації мікроклімату та освітленості. Ключова перевага полягає в інтеграції освітлення та мікроклімату та використанні штучного інтелекту для прогнозного керування та розпізнавання складних шаблонів поведінки. Це свідчить про перехід до ситуаційної інтелектуалізації та забезпечує гнучке прийняття рішень на основі аналізу даних, а не жорсткої логіки.

Стаття [137] пропонує систему на основі контекстних правил для управління енергією освітлення. Перевага полягає у фокусі на контекстній обумовленості та розпізнаванні ситуацій, де рішення приймаються не лише на основі рівня освітленості, а й на основі додаткового контексту (наприклад, час доби, присутність людини, її активність). Це забезпечує більш гнучке прийняття рішень і кращу енергоефективність порівняно з простими пороговими системами.

Дослідження [138] займається кількісною оцінкою та оптимізацією світлового середовища у робочих місцях, які сприяють сну. Перевага полягає у розгляді високорівневих цілей (сприяння сну) і необхідності тонкого налаштування освітлення. Це вимагає складного ситуаційного аналізу, що виходить за межі простої енергоефективності та включає фізіологічні аспекти, забезпечуючи контекстно-залежне прийняття рішень на основі цілей користувача.

Робота [139] зосереджена на оптимізації зовнішніх систем затінення для балансування ймовірності відблисків та денного освітлення. Її перевага – інтеграція пасивних елементів (затінення) з освітленням та управлінням комфортом. Розпізнавання ситуацій тут включає не лише вимірювання освітленості, але й розрахунок складної метрики (ймовірності відблисків). Однак, її фокус переважно на фізичному та конструктивному рівні, а не на інтелектуальних алгоритмах прийняття рішень.

Стаття [140] є оглядом літератури щодо модернізації електричного та денного освітлення для зниження енергоспоживання. Вона є цінним джерелом для

порівняння існуючих технологій. Проте вона не пропонує власних алгоритмів розпізнавання ситуацій чи автоматичного прийняття рішень, а лише систематизує існуючі підходи.

Дослідження [141] просуває «Розумне освітлення» через стратегії регулювання яскравості для підвищення енергоефективності. Ключовою перевагою є розробка конкретних стратегій, які виходять за рамки простого ввімкнення/вимкнення. Це вимагає розпізнавання ситуацій, коли потрібне точне керування яскравістю, а не бінарна дія, що сприяє гнучкому реагуванню системи у відповідь на зміни зовнішнього середовища.

Функція управління звуком та гучністю мультимедіа в «Розумному будинку» демонструє активний розвиток у кількох суміжних напрямках. Існуючі рішення сфокусовані переважно на виявленні та аналізі аудіосигналів, а також на розпізнаванні звукових подій, а не на повному автоматичному регулюванні гучності мультимедіа.

Стаття [142] описує систему керування домашньою автоматизацією на основі звуку. Її перевага полягає у фокусі на прямому керуванні пристроями за допомогою звукових команд. Також вона пропонує алгоритм для виявлення піків максимального шуму у вхідному аудіосигналі. Проте, ця робота більше зосереджується на голосовому керуванні (Voice Control) або простих звукових сигналах для запуску дії («сенсор → дія»), а не на автоматичному регулюванні гучності мультимедіа у відповідь на зміну зовнішнього шумового фону або контексту в рамках ситуаційного аналізу.

Дослідження [143] стосується активного керування гучністю на основі активності користувача та рівня навколишнього шуму. Ключова перевага полягає в інтеграції ситуаційного аналізу (Ambient Noise, User Activity) для автоматичного прийняття рішень щодо регулювання гучності. Це прямо відповідає вимозі до гнучкого реагування системи на контекст, що є суттю інтелектуального керування мультимедіа в «Розумному будинку». В дослідженні представлено також мобільний застосунок, який автоматично регулює гучність відповідно до навколишнього середовища для комфорту користувача.

Стаття [144] фокусується на модульних «розумних» динаміках та дизайні синтетичного голосу. Її перевага – у дослідженні взаємодії користувача та когнітивних аспектів «розумних» пристроїв. Однак, вона стосується виведення звуку та інтерфейсу, а не алгоритмів розпізнавання зовнішнього шуму та автоматичного прийняття рішень щодо регулювання гучності мультимедіа.

Дослідження [145] присвячене класифікації звуків навколишнього середовища з використанням глибинного навчання. Це є значною перевагою, оскільки розпізнавання ситуацій може включати не лише вимірювання гучності, а й ідентифікацію типу звуку (наприклад, крик, дверний дзвінок, розмова). Однак, ця робота більше зосереджена на аналізі звукового сигналу, а не на інтеграції цього аналізу у фінальний модуль автоматичного прийняття рішень для керування гучністю мультимедіа.

Стаття [146] описує алгоритм локалізації джерела звуку за допомогою мікрофонної решітки. Її перевага – у здатності визначити просторове розташування джерела шуму, що може бути корисним для контекстно-залежного прийняття рішень (наприклад, регулювати гучність лише в одній зоні приміщення). Проте, вона фокусується на розпізнаванні/виявленні джерела, а не на кінцевій логіці керування гучністю мультимедіа.

Дослідження [147] розглядає систему розпізнавання звуку в реальному часі для ідентифікації різних типів звуків у домашньому середовищі – для робота, що доглядає за людьми, з урахуванням користувацьких звукових подій. Перевага – використання розпізнавання звуку в реальному часі для розпізнавання специфічних ситуацій (наприклад, прохання про допомогу). Це може бути опосередковано застосовано для прийняття рішень (наприклад, заглушити мультимедіа, щоб розпізнати важливий звук), але основна увага приділяється догляду за людиною, а не безпосередньо автоматичному керуванню гучністю мультимедіа.

Робота [148] описує розробку системи керування «Розумним будинком» на основі бездротового голосового сенсора, що передбачає прямі команди від користувача, а не на автоматичному прийнятті рішень щодо регулювання гучності мультимедіа у відповідь на зміну зовнішнього контексту чи шумового фону.

У представлених дослідженнях відсутнє інтегроване розпізнавання комплексних ситуацій та прийняття автоматичних рішень одразу за всіма трьома функціями (мікроклімат, освітлення, мультимедіа) на основі єдиного контексту, а всі вони орієнтовані в основному на автоматизоване керування, кероване людиною. Відомі системи демонструють високу інтелектуалізацію у вузьких спеціалізованих областях, але бракує механізму, який би дозволяв тій чи іншій системі автономно, без прямої команди користувача, поєднувати ці функції. Більшість рішень зводяться до ручного дистанційного керування, а не до автономного ситуаційного лідерства. Проте тенденція до автоматичності «Розумного будинку» продовжує зростати з метою зробити цю кіберфізичну систему більш зручною, доступною і привабливою для широкого кола користувачів.

Отже, кіберфізична екосистема «Розумний будинок» має без участі людини вміти визначати та розпізнавати різні ситуації та події, приймати необхідні рішення в тій чи іншій ситуації, а також виконувати певні дії у відповідь на конкретні ситуації. Тоді, наразі актуальною задачею є забезпечення можливості розпізнавання ситуацій та автоматичної підтримки прийняття рішень за трьома функціями (мікроклімат, освітлення, мультимедіа) у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

1.4. Висновки. Постановка задачі

Проведений огляд існуючих методів розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень виявив їхній ключовий системний недолік – наявні рішення демонструють високу інтелектуалізацію у вузьких, спеціалізованих областях (наприклад, лише мікроклімат), але не забезпечують інтегрованого та комплексного аналізу. Зокрема, було встановлено, що розпізнавання ситуацій та підтримка прийняття рішень обмежується лише однією з груп керованих функцій житла або взагалі не передбачається. Це означає, що відсутній механізм, який дозволяв би системі автономно поєднувати та узгоджувати дії за трьома основними функціями (мікроклімат, освітлення та мультимедіа) на основі єдиного контексту.

Крім цього, більшість існуючих рішень зводяться до автоматизованого керування, керованого людиною, і їм бракує здатності до автономного ситуаційного лідерства.

Отже, на даний момент часу спостерігається суперечність між потребою в розпізнаванні ситуації та автоматичному прийнятті рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для всіх трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа), з одного боку, і недосконалістю методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок», з іншого боку. Відтак, забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» є *актуальною науково-прикладною задачею*, одним із шляхів розв'язання якої є розроблення методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Метою дисертаційного дослідження є оптимізація розпізнавання ситуацій та автоматичне прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа) шляхом розроблення методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Розв'язання окресленої науково-прикладної задачі потребує комплексних досліджень за наступними напрямками:

- розробити концепцію розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- провести сценарне моделювання керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- розробити методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»;
- виконати вибір компонентів, спроектувати та реалізувати підсистему розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

РОЗДІЛ 2.

КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ТА СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ, ОСВІТЛЕННЯМ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

2.1. Концепція розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Для розв’язуваної задачі забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» подамо *абстрактну модель* у вигляді:

$$M \rightarrow Sc \rightarrow Dn, \quad (2.1)$$

де M – дані з датчиків температури, вологості, освітлення, рівня шуму тощо, S – розпізнана ситуація, Dn – рішення (дії, які виконує кіберфізична система).

Задача полягає у наступному: для множини $M = \{m_1, \dots, m_n\}$ (значення температури, вологості, освітленості, рівня шуму тощо, зняті з відповідних датчиків) та множини рішень $Dn = y(M) = \{dn_1, \dots, dn_l\}$ (дії, які виконуються кіберфізичною системою) існує метод y (розв’язувальна функція, стратегія, тощо), що наближує Dn на всій множині об’єктів M , тобто $y: M \rightarrow Dn$.

Розпізнавання ситуацій – це процес, що включає аналіз та інтерпретацію гетерогенних сенсорних даних для формування цілісного уявлення про поточний стан реальності. Розпізнана ситуація є входним сигналом для прийняття рішення. Розпізнавання ситуацій (множина $Sc = \{sc_1, \dots, sc_h\}$) пов’язані відношенням «причина-наслідок» та «контекст-дія» зі сценаріями, що є ключовим механізмом перетворення автоматизованої системи на автоматичну кіберфізичну систему. Сценарій – це заздалегідь задана послідовність дій та команд, які виконуються виконавчими пристроями для переведення системи в бажаний стан. Сценарій активується виключно тоді, коли система розпізнала певний, заздалегідь визначений контекст

(ситуацію). Розпізнавання ситуацій дозволяє системі автономно обирати найбільш доречний сценарій із множини альтернатив без прямої команди користувача.

Для коректного розпізнавання ситуацій кіберфізичною системою «Розумний будинок» слід коректно виконати попередню ініціалізацію відповідної підсистеми кіберфізичної системи.

Метод ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»:

1) перевірка користувачем підсистеми коректності поточної дати (d): якщо дата некоректна, то налаштування стартової дати; надалі поточна дата оновлюється в розумному будинку автоматично;

2) перевірка користувачем підсистеми коректності поточного часу (tm): якщо час некоректний, то налаштування стартового часу; надалі поточний час оновлюється в розумному будинку автоматично;

3) вибір користувачем підсистеми типу приміщення (кухня; їдальня; вітальня; дитяча кімната/спальня; робочий кабінет; ванна кімната; коридор; гардеробна);

4) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «кухня», то $tr=1$;

5) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «вітальня», то $tr=2$;

6) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «дитяча кімната/спальня», то $tr=3$;

7) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «робочий кабінет», то $tr=4$;

8) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «ванна кімната», то $tr=5$;

9) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «їдальня», то $tr=6$;

10) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «коридор», то $tr=7$;

11) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «гардеробна», то $tr=8$;

12) якщо користувачем підсистеми обрано тип приміщення «кімната, де живе немовля(та)», то $tr=9$;

13) вибір користувачем підсистеми інтервалу висоти стелі приміщення (2.5-2.7 м; 2.7-3 м; 3-3.5 м; 3.5-4.5 м);

14) якщо користувачем підсистеми обрано інтервал висоти стелі приміщення «2.5-2.7 м», то $chi=1$;

15) якщо користувачем підсистеми обрано інтервал висоти стелі приміщення «2.7-3 м», то $chi=2$;

16) якщо користувачем підсистеми обрано інтервал висоти стелі приміщення «3-3.5 м», то $chi=3$;

17) якщо користувачем підсистеми обрано інтервал висоти стелі приміщення «3.5-4.5 м», то $chi=4$;

18) введення користувачем підсистеми значення площі приміщення (у m^2) – введене значення присвоюється у змінну S ;

19) вибір користувачем підсистеми типу використовуваних у приміщенні ламп (світлодіодні, енергозберігаючі, галогенні, лампи розжарювання);

20) якщо користувачем підсистеми обрано тип використовуваних у приміщенні ламп «світлодіодні», то $trl=1$;

21) якщо користувачем підсистеми обрано тип використовуваних у приміщенні ламп «енергозберігаючі», то $trl=2$;

22) якщо користувачем підсистеми обрано тип використовуваних у приміщенні ламп «галогенні», то $trl=3$;

23) якщо користувачем підсистеми обрано тип використовуваних у приміщенні ламп «лампи розжарювання», то $trl=4$;

24) введення користувачем підсистеми значення потужності однієї використовуваної лампи (у Вт) – введене значення присвоюється у змінну Pl ;

25) введення користувачем підсистеми кількості використовуваних у приміщенні ламп – введене значення присвоюється у змінну ak ;

26) вибір користувачем підсистеми наявних у приміщенні засобів затінення (жалюзі, ролети, штори; прийmemo, що використовується один із засобів затінення або не використовується жодного такого засобу)

27) якщо користувачем підсистеми не обрано наявних у приміщенні засобів затінення, то $asd=0$;

28) якщо користувачем підсистеми обрано наявні у приміщенні засобів затінення «жалюзі», то $asd=1$;

29) якщо користувачем підсистеми обрано наявні у приміщенні засобів затінення «ролети», то $asd=2$;

30) якщо користувачем підсистеми обрано наявні у приміщенні засобів затінення «штори», то $asd=3$;

31) вибір користувачем підсистеми стартового режиму освітлення приміщення (активність, релакс, сон) – користувач може змінити режим освітлення приміщення в будь-який момент часу;

32) якщо користувачем підсистеми обрано режим освітлення приміщення «активність», то $rlm=1$;

33) якщо користувачем підсистеми обрано режим освітлення приміщення «релакс», то $rlm=2$;

34) якщо користувачем підсистеми обрано режим освітлення приміщення «сон», то $rlm=3$;

35) якщо $asd=1$, то перевірити положення жалюзі: якщо жалюзі повністю відкриті, то у змінну bp присвоюється 0; якщо жалюзі повністю закриті, то у змінну bp присвоюється 1;

36) якщо $asd=2$, то перевірити положення ролет: якщо ролети повністю відкриті, то у змінну rsp присвоюється 0; якщо ролети повністю закриті, то у змінну rsp присвоюється 1;

37) якщо $asd=3$, то перевірити положення штор: якщо штори повністю відкриті, то у змінну sp присвоюється 0; якщо штори повністю закриті, то у змінну sp присвоюється 1.

Розроблений метод ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» дозволяє ввести необхідні параметри для кожного приміщення для подальшого автоматичного функціонування підсистеми у приміщеннях. Представлений метод є комплексною процедурою первинного налаштування, що забезпечує підсистему необхідним контекстом та базовими параметрами для подальшої автономної роботи та ситуаційного аналізу.

Метод забезпечує синхронізацію базових часових даних – поточної дати і часу, що є критично важливим для роботи soft real-time систем і для активації контекстно-залежних сценаріїв. Наступний етап полягає у семантичному маркуванні приміщення через вибір його типу та геометричних характеристик. Це маркування є основою для розпізнавання ситуацій, оскільки нормативні вимоги до освітленості, температури, вологості та шуму суттєво різняться для приміщень різних типів.

Крім того, метод забезпечує підсистему технічними характеристиками обладнання освітлення, що необхідно для розрахунку та калібрування рівня освітленості. Також вводиться інформація про наявні засоби затінення, що є ключовим фактором для керування денним світлом та узгодження дій між штучним і денним освітленням.

Нарешті, користувач обирає стартовий режим освітлення, що забезпечує пріоритетизацію цілей системи на момент запуску та надає початковий контекст поведінки користувача, що дозволяє системі розпочати роботу не з нульової точки, а з передбачуваних потреб мешканців.

Таким чином, цей метод ініціалізації забезпечує підсистему комплексною базою знань – від жорстких технічних параметрів до гнучкого контексту та цільових пріоритетів, що є критичною передумовою для подальшого ситуаційного аналізу та автономного прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа.

Узагальнений метод прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» ($y: M \rightarrow Dn$) складається з наступних кроків:

вхідні дані: дані з датчиків температури, вологості, освітлення, рівня шуму тощо (множина M);

1) аналіз та інтерпретація вхідних даних – елементів множини $M = \{m_1, \dots, m_n\}$ (значення температури, вологості, освітленості, рівня шуму тощо, зняті з відповідних датчиків) та параметрів ініціалізації підсистеми – дата d , час tm , тип приміщення tr , інтервал висоти стелі приміщення chi , площа приміщення S , тип використовуваних у приміщенні ламп trl , значення потужності однієї використовуваної лампи (у Вт) Pl , кількість використовуваних у приміщенні ламп ak , наявні у приміщенні засобів затінення asd , стартовий режим освітлення приміщення rlm тощо;

2) розпізнавання ситуації – пошук сценарію відповідно до розпізнаної ситуації на основі значень елементів множини M та параметрів ініціалізації підсистеми: нормальний (оптимальний) або аномальний;

3) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значень елементів множини M та параметрів ініціалізації підсистема визначила сценарій як нормальний (оптимальний), то підсистема не виконує жодних додаткових дій;

4) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значень елементів множини M та параметрів ініціалізації підсистема визначила сценарій як аномальний, то підсистема автоматично виконує певні дії – вимкнення/ввімкнення охолоджувальних приладів, вимкнення/ввімкнення обігрівальних приладів, вимкнення/ввімкнення зволожувача повітря, вимкнення/ввімкнення осушувача повітря, вимкнення/ввімкнення штучного освітлення, відкриття/закриття засобів затінення, попередження користувача, автоматичне зменшення гучності звуку мультимедіа тощо – залежно від розпізнаної ситуації;

5) оцінювання прийнятих рішень [149, 150] – даний етап застосовується лише за наявності множини прийнятих рішень:

5.1) наповнення даними матриці невідповідностей (confusion matrix) [149, 150] – рис. 2.1;

TP Сценарій визначено підсистемою як оптимальний (нормальний), і це правильно (коректна робота)	TN Сценарій визначено підсистемою як аномальний, і це правильно (коректна робота)
FP Сценарій визначено підсистемою як оптимальний (нормальний), але насправді сценарій є аномальним (некоректна робота)	FN Сценарій визначено підсистемою як аномальний, але насправді сценарій є оптимальним (нормальним) (некоректна робота)

Рис. 2.1. Матриця невідповідностей (confusion matrix)

5.2) визначення метрики $Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$ (2.2) – відношення

всіх правильних висновків до загальної кількості всіх висновків;

5.3) визначення метрики $Precision = \frac{TP}{TP + FP}$ (2.3) – частка коректно

визначених нормальних сценаріїв серед усіх сценаріїв, класифікованих підсистемою як нормальні (точність);

5.4) визначення метрики $Recall = \frac{TP}{TP + FN}$ (2.4) – частка коректно

визначених нормальних сценаріїв серед усіх реально нормальних сценаріїв (повнота); чим вищим є значення метрики $Recall$, тим менше коректних рішень пропущено при класифікації;

5.5) визначення метрики $Specificity = \frac{TN}{FP + TN}$ (2.5) – частка коректно

визначених аномальних сценаріїв серед усіх реально аномальних сценаріїв;

5.6) визначення метрики $F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$ (2.6) – об'єднує

інформацію про метрики $Precision$ і $Recall$ та є їх гармонійним середнім; високе значення метрики $F1$ доводить, що класифікатор не є примітивним;

5.7) формування висновку про якість методу $y: M \rightarrow Dn$ на основі значень метрик *Accuracy, Precision, Recall, Specificity, F1*;

результуючі дані: рішення – дії, які виконуються кіберфізичною системою, у відповідь на розпізнану ситуацію.

На основі запропонованого узагальненого методу прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» ($y: M \rightarrow Dn$) далі будуть розроблені деталізовані методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

2.2. Формування вимог предметної галузі керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [77, 80, 82, 83]

Самопочуття і працездатність людини залежать від умов середовища, в якому вона перебуває. Найважливішою умовою високої працездатності, відпочинку і здоров'я людини є створення і підтримка оптимального мікроклімату житла.

Одним із основних параметрів мікроклімату приміщень є температура. Порухення меж теплового режиму приміщення провокує погіршення здоров'я та загострення хронічних хвороб. При високій температурі повітря значна частина тепла втрачається випаровуванням. Разом з потом організм втрачає воду, вітаміни, мінеральні солі, внаслідок чого порушується обмін речовин. З часом це викликає підвищення температури тіла, почастищення пульсу, ослаблення серцево-судинної системи, зниження діяльності шлунково-кишкового тракту тощо. При цьому спостерігається головний біль, погане самопочуття, зниження уваги і координації рухів, знижується працездатність. Так, працездатність при 24° знижується на 15%, а при 28° – на 30%. В умовах низької температури у приміщеннях створюються всі умови для виникнення та загострення захворювань органів дихання (риніту, бронхіту, плевриту, пневмонії), м'язово-суглобового апарату та периферичної нервової системи (міозиту, ревматизму, невриту, радикуліту), а також загострення

інших хронічних хвороб. В умовах низької температури повітря виникає небезпека переохолодження організму внаслідок посиленої тепловіддачі. Тривалі і навіть короточасні впливи холоду викликають різноманітні рефлекторні реакції загального та місцевого характеру. Наприклад, охолодження ніг викликає зниження температури слизової оболонки носа і горла, що призводить до зниження місцевого імунітету і появи нежитю, кашлю, ангіни.

Нормативним документом з цього приводу є ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», де вказані температурні показники в залежності від типу приміщень.

Згідно із державними будівельними та санітарно-гігієнічними нормами рівень температури для приміщень, де живуть і працюють люди, повинен перебувати в допустимих межах від 16.5° до 26.5°, в залежності від типу приміщення – Таблиця 2.1.

Таблиця 2.1

Норми температури повітря в житлових приміщеннях різного типу

Тип приміщення	Оптимальна температура повітря в опалювальний період (15 жовтня – 14 квітня) t, °C	Оптимальна температура повітря в неопалювальний період (15 квітня – 14 жовтня) t, °C
Спальня ($tr=3$), дитяча кімната ($tr=3$), вітальня ($tr=2$), їдальня ($tr=6$), робочий кабінет ($tr=4$), кімната, де живе немовля(та) ($tr=9$)	20-24°	23-26°
Кухня ($tr=1$), коридор ($tr=7$), гардеробна ($tr=8$)	16.5-22.5°	16.5-22.5°
Ванна кімната ($tr=5$)	23.5-26.5°	23.5-26.5°

Роль води в життєдіяльності людей беззаперечно велика. Організм людини складається більш ніж на 60% з води, і баланс вологи в організмі та оточуючому його повітряному середовищі надзвичайно важливий. Пересушене або перезволожено повітря шкідливе для здоров'я людини, це призводить до порушення функцій систем дихання, обміну речовин, зниження імунітету та погіршення серцевої діяльності.

Концентрація вологи в повітряному середовищі характеризується терміном – вологість повітря. Розрізняють абсолютну та відносну вологість. Під абсолютною вологістю розуміють масу водяної пари, яка містяться в одному кубічному метрі повітряних мас при певній температурі повітря. Під відотною вологістю повітря розуміють відношення масової частки водяної пари в повітрі до максимально можливої при даній температурі. Максимальною концентрацією вологи/вологістю вважається кількість водяної пари, що є в одиниці об'єму газу (повітря) до початку утворення конденсату (точки роси) при заданій температурі повітряного середовища.

Згідно із будівельними та санітарно-гігієнічними нормами рівень відносної вологості для приміщень, де живуть люди, повинен перебувати в допустимих межах від 25 до 60%, в залежності від типу приміщення – Таблиця 2.2.

Таблиця 2.2

Норми відносної вологості повітря в житлових приміщеннях різного типу

Тип приміщення	Відносна вологість повітря ϕ , %
Дитяча кімната ($tr=3$), спальня ($tr=3$), коридор ($tr=7$)	30-50 %
Кімната, де живе немовля(та) ($tr=9$)	45-55%
Кухня ($tr=1$), їдальня ($tr=6$), ванна кімната ($tr=5$), гардеробна ($tr=8$)	25-40%
Робочий кабінет з комп'ютерами, телефонами і офісною технікою ($tr=4$)	25-50%
Вітальня ($tr=2$)	25-60%

Правильне освітлення є надзвичайно важливим, адже кількість світла може вплинути на атмосферу в приміщенні – створити настрій для роботи й активної мозкової діяльності чи, навпаки, налаштувати на релакс та сон. Навіть самопочуття залежить від рівня освітленості. Затишна атмосфера вдома чи добре освітлена робоча зона в офісі створюються за допомогою визначення коефіцієнту використання світлового потоку та правильного розрахунку освітлення приміщення. Саме на меті – створити якісні умови праці чи забезпечити затишок для релаксу – і варто сконцентрувати свою увагу перед тим, як перейти до організації освітлення приміщення.

Освітленістю називається фізико-оптична величина, що характеризує відношення світлового потоку до площі поверхні, на яку він поширюється. Усереднені значення норми освітленості для різних типів приміщень: норма освітленості кухні – 150 люксів, вітальні – 450 люксів, дитячої кімнати – 200 люксів, кабінету – 300 люксів, ванної кімнати – 50-75 люксів.

Розрахунок освітленості приміщення можна зробити за формулою:

$$E = \Phi / S, \quad (2.7)$$

де Φ – світловий потік, S – освітлювана площа.

Тоді світловий потік визначатиметься за формулою:

$$\Phi = E * S. \quad (2.8)$$

Для розрахунку світлового потоку важливо враховувати також висоту стелі в приміщенні, тоді світловий потік визначатиметься за формулою:

$$\Phi = E * S * K_c, \quad (2.9)$$

де K_c – коефіцієнт висоти стелі ($K_c=1$ для висоти стелі від 2.5 до 2.7 м; $K_c=1.2$ для висоти стелі від 2.7 до 3 м; $K_c=1.5$ для висоти стелі від 3 до 3.5 м; $K_c=2$ для висоти стелі від 3.5 до 4.5 м).

Нехай потрібно розрахувати необхідний світловий потік для кухні площею 12 м² з висотою стелі 2.5 м:

$$\Phi_k = 150 * 12 * 1 = 1800 \text{ (люменів)}.$$

Аналогічно розрахуємо значення необхідного (згідно з нормами) світлового потоку для приміщень різних типів з різною висотою стель – Таблиця 2.3.

Таблиця 2.3

Розрахунок нормального світлового потоку (Φ) для приміщень різних типів з різною висотою стель (люмен, Лм)

Тип приміщення	Висота стелі від 2.5 до 2.7 м ($chi=1$)	Висота стелі від 2.7 до 3 м ($chi=2$)	Висота стелі від 3 до 3.5 м ($chi=3$)	Висота стелі від 3.5 до 4.5 м ($chi=4$)
Кухня ($tr=1$), їдальня ($tr=6$)	$150 * S$ (Лм)	$180 * S$	$225 * S$	$300 * S$
Вітальня ($tr=2$)	$450 * S$	$540 * S$	$675 * S$	$900 * S$
Дитяча кімната ($tr=3$), спальня ($tr=3$), кімната немовляти ($tr=9$)	$200 * S$	$240 * S$	$300 * S$	$400 * S$
Робочий кабінет ($tr=4$)	$300 * S$	$360 * S$	$450 * S$	$600 * S$
Ванна кімната ($tr=5$), коридор ($tr=7$), гардеробна ($tr=8$)	$75 * S$	$90 * S$	$112.5 * S$	$150 * S$

Оскільки різні лампи випромінюють світло різної сили, їх потужність залежить від того, який тип ламп використовується – світлодіодні (75 люменів на 1 Вт), енергозберігаючі (47 люменів на 1 Вт), галогенні (15 люменів на 1 Вт) або лампи розжарювання (12 люменів на 1 Вт). Необхідна загальна потужність, що забезпечується лампами різного типу для приміщень різного типу з метою створення нормального світлового потоку представлена в Таблицях 2.4-2.7.

Таблиця 2.4

Розрахунок загальної потужності (P) світлодіодних ламп ($trl=1$) для створення нормального світлового потоку для приміщень різних типів з різною висотою стель

Тип приміщення	Висота стелі від 2.5 до 2.7 м ($chi=1$)	Висота стелі від 2.7 до 3 м ($chi=2$)	Висота стелі від 3 до 3.5 м ($chi=3$)	Висота стелі від 3.5 до 4.5 м ($chi=4$)
Кухня ($tr=1$), їдальня ($tr=6$)	$\frac{(150 * S)}{75} =$ $= 2 * S$ (Вт)	$2.4 * S$	$3 * S$	$4 * S$
Вітальня ($tr=2$)	$6 * S$	$7.2 * S$	$9 * S$	$12 * S$
Дитяча кімната ($tr=3$), спальня ($tr=3$), кімната немовляти ($tr=9$)	$2.67 * S$	$3.2 * S$	$4 * S$	$5.33 * S$
Робочий кабінет ($tr=4$)	$4 * S$	$4.8 * S$	$6 * S$	$8 * S$
Ванна кімната ($tr=5$), коридор ($tr=7$), гардеробна ($tr=8$)	S	$1.2 * S$	$1.5 * S$	$2 * S$

Таблиця 2.5

Розрахунок загальної потужності (P) енергозберігаючих ламп ($trl=2$) для створення нормального світлового потоку для приміщень різних типів з різною висотою стель

Тип приміщення	Висота стелі від 2.5 до 2.7 м ($chi=1$)	Висота стелі від 2.7 до 3 м ($chi=2$)	Висота стелі від 3 до 3.5 м ($chi=3$)	Висота стелі від 3.5 до 4.5 м ($chi=4$)
Кухня ($tr=1$), їдальня ($tr=6$)	$\frac{(150 * S)}{47} =$	$3.83 * S$	$4.79 * S$	$6.39 * S$

	$= 3.2 * S$ (Вт)			
Вітальня ($tr=2$)	$9.58 * S$	$11.49 * S$	$14.37 * S$	$19.15 * S$
Дитяча кімната ($tr=3$), спальня ($tr=3$), кімната немовляти ($tr=9$)	$4.26 * S$	$5.11 * S$	$6.39 * S$	$8.52 * S$
Робочий кабінет ($tr=4$)	$6.39 * S$	$7.66 * S$	$9.58 * S$	$12.77 * S$
Ванна кімната ($tr=5$), коридор ($tr=7$), гардеробна ($tr=8$)	$1.6 * S$	$1.92 * S$	$2.4 * S$	$3.2 * S$

Таблиця 2.6

Розрахунок загальної потужності (P) галогенних ламп ($trl=3$) для створення нормального світлового потоку для приміщень різних типів з різною висотою стель

Тип приміщення	Висота стелі від 2.5 до 2.7 м ($chi=1$)	Висота стелі від 2.7 до 3 м ($chi=2$)	Висота стелі від 3 до 3.5 м ($chi=3$)	Висота стелі від 3.5 до 4.5 м ($chi=4$)
Кухня ($tr=1$), їдальня ($tr=6$)	$\frac{(150 * S)}{15} =$ $= 10 * S$ (Вт)	$12 * S$	$15 * S$	$20 * S$
Вітальня ($tr=2$)	$30 * S$	$36 * S$	$45 * S$	$60 * S$
Дитяча кімната ($tr=3$), спальня ($tr=3$), кімната немовляти ($tr=9$)	$13.34 * S$	$16 * S$	$20 * S$	$26.67 * S$

Робочий кабінет ($tr=4$)	$20 * S$	$24 * S$	$30 * S$	$40 * S$
Ванна кімната ($tr=5$), коридор ($tr=7$), гардеробна ($tr=8$)	$5 * S$	$6 * S$	$7.5 * S$	$10 * S$

Таблиця 2.7

Розрахунок загальної потужності (P) ламп розжарювання ($trl=4$) для створення нормального світлового потоку для приміщень різних типів з різною висотою стель

Тип приміщення	Висота стелі від 2.5 до 2.7 м ($chi=1$)	Висота стелі від 2.7 до 3 м ($chi=2$)	Висота стелі від 3 до 3.5 м ($chi=3$)	Висота стелі від 3.5 до 4.5 м ($chi=4$)
Кухня ($tr=1$), їдальня ($tr=6$)	$\frac{(150 * S)}{12} =$ $= 12.5 * S$ (Вт)	$15 * S$	$18.75 * S$	$25 * S$
Вітальня ($tr=2$)	$37.5 * S$	$45 * S$	$56.25 * S$	$75 * S$
Дитяча кімната ($tr=3$), спальня ($tr=3$), кімната немовляти ($tr=9$)	$16.67 * S$	$20 * S$	$25 * S$	$33.34 * S$
Робочий кабінет ($tr=4$)	$25 * S$	$30 * S$	$37.5 * S$	$50 * S$
Ванна кімната ($tr=5$), коридор ($tr=7$), гардеробна ($tr=8$)	$6.25 * S$	$7.5 * S$	$9.38 * S$	$12.5 * S$

Шум несприятливо впливає на людину. У людей, які тривалий час проводять в шумному середовищі, виникають стійкі порушення слуху, що нерідко призводить до глухуватості і глухоти. Тривала дія шуму на організм людини призводить до розвитку хронічної перевтоми, зниження працездатності, виникнення таких симптомів як поганий сон, сонливість, зниження слуху, порушення терморегуляції. Короткочасний, навіть одноразовий вплив шуму високої інтенсивності може спричинити повну загибель спірального органу або розрив барабанної перетинки, що супроводжується почуттям закладеності та різким болем у вухах. Наслідком баротравми нерідко буває повна втрата слуху. Крім цього, шум впливає на систему травлення і кровообігу, серцево-судинну систему. У разі постійного шумового фону до 70 дБ виникає порушення ендокринної та нервової систем, до 90 дБ – порушення слуху, до 120 дБ – нестерпний фізичний біль. Шум не лише погіршує самопочуття людини, а й знижує продуктивність праці на 10-15 %.

Відповідно до Законів України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови», Державних санітарних правил планування і забудови населених пунктів та Державних будівельних норм України, допустимі та максимальні рівні музичних, мовних та інших біогенних шумів не повинні перевищувати показників наступних санітарних норм – Таблиця 2.8.

Розроблювана підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» використовуватиме ці нормативні показники як базові параметри комфорту, що дозволить підсистемі не лише автоматично реагувати на бажання користувача, але й гарантувати, що всі автоматичні рішення щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа прийматимуться в межах законодавчо встановлених санітарно-гігієнічних вимог.

Таблиця 2.8

Норми допустимого рівня шуму (гучності звуку мультимедіа) в житлових приміщеннях різного типу

Тип приміщення	Час доби, tm	Оптимальний рівень шуму τ , дБА (акустичний децибел, одиниця вимірювання рівня шуму з врахуванням сприйняття звуку людиною)	Максимальний рівень шуму τ_{max} , дБА
Спальня ($tr=3$), вітальня ($tr=2$), дитяча кімната ($tr=3$), кімнати немовляти ($tr=9$), їдальня ($tr=6$), кухня ($tr=1$), гардеробна ($tr=8$), коридор ($tr=7$), ванна кімната ($tr=5$)	День [08:00-22:00)	40 дБА	55 дБА
	Ніч [22:00-08:00)	30 дБА	45 дБА
Робочий кабінет ($tr=4$)	День [08:00-22:00)	40 дБА	55 дБА
	Ніч [22:00-08:00)	40 дБА	55 дБА

2.3. Сценарна модель керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [77, 80, 82, 83]

Множина можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою, побудована на основі таблиці 2.1, має наступний вигляд:

$$SCT = \{sct_1, \dots, sct_{54}\}, \quad (2.10)$$

де sct_1 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=3$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_2 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=2$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_3 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=6$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_4 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=4$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_5 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=9$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_6 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=3$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_7 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=2$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_8 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=6$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_9 – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=4$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{10} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=9$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{11} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 24$ та $tr=3$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{12} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 24$ та $tr=2$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{13} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 24$ та $tr=6$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{14} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 24$ та $tr=4$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{15} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 24$ та $tr=9$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{16} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $16.5 \leq t \leq 22.5$ та $tr=1$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{17} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $16.5 \leq t \leq 22.5$ та $tr=7$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{18} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $16.5 \leq t \leq 22.5$ та $tr=8$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{19} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 16.5$ та $tr=1$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{20} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 16.5$ та $tr=7$, то температура повітря в приміщенні є

низькою; sct_{21} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 16.5$ та $tr=8$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{22} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 22.5$ та $tr=1$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{23} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 22.5$ та $tr=7$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{24} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 22.5$ та $tr=8$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{25} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $23.5 \leq t \leq 26.5$ та $tr=5$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{26} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 23.5$ та $tr=5$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{27} – якщо $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t > 26.5$ та $tr=5$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{28} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $23 \leq t \leq 26$ та $tr=3$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{29} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $23 \leq t \leq 26$ та $tr=2$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{30} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $23 \leq t \leq 26$ та $tr=6$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{31} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $23 \leq t \leq 26$ та $tr=4$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{32} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $23 \leq t \leq 26$ та $tr=9$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{33} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 23$ та $tr=3$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{34} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 23$ та $tr=2$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{35} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 23$ та $tr=6$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{36} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 23$ та $tr=4$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{37} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 23$ та $tr=9$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{38} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 26$ та $tr=3$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{39} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 26$ та $tr=2$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{40} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 26$ та $tr=6$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{41} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 26$ та $tr=4$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{42} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 26$ та $tr=9$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{43} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $16.5 \leq t \leq 22.5$ та $tr=1$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{44} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $16.5 \leq t \leq 22.5$ та $tr=7$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{45} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $16.5 \leq t \leq 22.5$ та $tr=8$, то температура повітря в

приміщенні є оптимальною; sct_{46} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 16.5$ та $tr=1$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{47} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 16.5$ та $tr=7$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{48} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 16.5$ та $tr=8$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{49} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 22.5$ та $tr=1$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{50} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.104$ та $t > 22.5$ та $tr=7$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{51} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 22.5$ та $tr=8$, то температура повітря в приміщенні є високою; sct_{52} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $23.5 \leq t \leq 26.5$ та $tr=5$, то температура повітря в приміщенні є оптимальною; sct_{53} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t < 23.5$ та $tr=5$, то температура повітря в приміщенні є низькою; sct_{54} – якщо $15.04 \leq d \leq 14.10$ та $t > 26.5$ та $tr=5$, то температура повітря в приміщенні є високою.

Представлена формулою (2.10) множина можливих альтернатив (сценаріїв) складається з трьох підмножин:

$$SCT = \{SCTO, SCTL, SCTH\}, \quad (2.11)$$

де $SCTO = \{sct_1, sct_2, sct_3, sct_4, sct_5, sct_{16}, sct_{17}, sct_{18}, sct_{25}, sct_{28}, sct_{29}, sct_{30}, sct_{31}, sct_{32}, sct_{43}, sct_{44}, sct_{45}, sct_{52}\}$ – підмножина сценаріїв з оптимальним (нормальним) рівнем температури – нормальні сценарії; $SCTL = \{sct_6, sct_7, sct_8, sct_9, sct_{10}, sct_{19}, sct_{20}, sct_{21}, sct_{26}, sct_{33}, sct_{34}, sct_{35}, sct_{36}, sct_{37}, sct_{46}, sct_{47}, sct_{48}, sct_{53}\}$ – підмножина сценаріїв з низьким рівнем температури – аномальні сценарії; $SCTH = \{sct_{11}, sct_{12}, sct_{13}, sct_{14}, sct_{15}, sct_{22}, sct_{23}, sct_{24}, sct_{27}, sct_{38}, sct_{39}, sct_{40}, sct_{41}, sct_{42}, sct_{49}, sct_{50}, sct_{51}, sct_{54}\}$ – підмножина сценаріїв з високим рівнем температури – аномальні сценарії.

Множина можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю, побудована на основі таблиці 2.2, має наступний вигляд:

$$SCH = \{sch_1, \dots, sch_{27}\}, \quad (2.12)$$

де sch_1 – якщо $tr = 3$ та $30 \leq \varphi \leq 50$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_2 – якщо $tr = 7$ та $30 \leq \varphi \leq 50$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_3 – якщо $tr = 3$ та $\varphi > 50$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_4 – якщо $tr = 7$ та $\varphi > 50$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_5 – якщо $tr = 3$ та $\varphi < 30$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_6 – якщо $tr =$

7 та $\varphi < 30$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_7 – якщо $tr = 9$ та $45 \leq \varphi \leq 55$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_8 – якщо $tr = 9$ та $\varphi > 55$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_9 – якщо $tr = 9$ та $\varphi < 45$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_{10} – якщо $tr = 1$ та $25 \leq \varphi \leq 40$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_{11} – якщо $tr = 6$ та $25 \leq \varphi \leq 40$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_{12} – якщо $tr = 5$ та $25 \leq \varphi \leq 40$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_{13} – якщо $tr = 8$ та $25 \leq \varphi \leq 40$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_{14} – якщо $tr = 1$ та $\varphi > 40$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_{15} – якщо $tr = 6$ та $\varphi > 40$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_{16} – якщо $tr = 5$ та $\varphi > 40$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_{17} – якщо $tr = 8$ та $\varphi > 40$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_{18} – якщо $tr = 1$ та $\varphi < 25$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_{19} – якщо $tr = 6$ та $\varphi < 25$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_{20} – якщо $tr = 5$ та $\varphi < 25$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_{21} – якщо $tr = 8$ та $\varphi < 25$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_{22} – якщо $tr = 4$ та $25 \leq \varphi \leq 50$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_{23} – якщо $tr = 4$ та $\varphi > 50$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_{24} – якщо $tr = 4$ та $\varphi < 25$, то відносна вологість повітря є недостатньою; sch_{25} – якщо $tr = 5$ та $26 \leq \varphi \leq 60$, то відносна вологість повітря є нормальною; sch_{26} – якщо $tr = 5$ та $\varphi > 60$, то відносна вологість повітря є надлишковою; sch_{27} – якщо $tr = 5$ та $\varphi < 25$, то відносна вологість повітря є недостатньою.

Представлена формулою (2.12) множина можливих альтернатив (сценаріїв) складається з трьох підмножин:

$$SCH = \{SCHO, SCHE, SCHI\}, \quad (2.13)$$

де $SCHO = \{sch_1, sch_2, sch_7, sch_{10}, sch_{11}, sch_{12}, sch_{13}, sch_{22}, sch_{25}\}$ – підмножина сценаріїв з оптимальним (нормальним) рівнем вологості – нормальні сценарії; $SCHE = \{sch_3, sch_4, sch_8, sch_{14}, sch_{15}, sch_{16}, sch_{17}, sch_{23}, sch_{26}\}$ – підмножина сценаріїв з надлишковим рівнем вологості – аномальні сценарії; $SCHI = \{sch_5, sch_6, sch_9, sch_{18}, sch_{19}, sch_{20}, sch_{21},$

$sch_{24}, sch_{27}\}$ – підмножина сценаріїв з недостатнім рівнем вологості – аномальні сценарії.

Коли користувач обрав мету (необхідний режим освітлення – активність ($rlm=1$; при виборі користувачем такого режиму, підсистема повинна забезпечити нормальне значення світлового потоку у приміщенні, зазначене у таблиці 2.3), релакс ($rlm=2$; при виборі користувачем такого режиму, підсистема повинна забезпечити половину нормального значення світлового потоку у приміщенні, зазначеного у таблиці 2.3), сон ($rlm=3$; при виборі користувачем такого режиму, підсистема повинна забезпечити відсутність світлового потоку у приміщенні)), то підсистема повинна сформувати множину альтернатив (сценаріїв) з використанням природного та штучного освітлення, які передбачають оптимальне освітлення для тієї чи іншої ситуації.

Множина можливих альтернатив (сценаріїв) для керування освітленістю, побудована на основі таблиці 2.3, має наступний вигляд:

$$SCP = \{scp_1, \dots, scp_{252}\}, \quad (2.14)$$

де scp_1 – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi=150*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_2 – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=1$ та $\Phi=150*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_3 – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi>150*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_4 – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=1$ та $\Phi>150*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_5 – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi<150*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_6 – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=1$ та $\Phi<150*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_7 – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi=180*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_8 – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=2$ та $\Phi=180*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_9 – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi>180*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{10} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=2$ та $\Phi>180*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{11} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi<180*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{12} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=2$ та $\Phi<180*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{13} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=3$ та $\Phi=225*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{14} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=3$ та $\Phi=225*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{15} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=3$ та $\Phi>225*S$, то

наявне надлишкове освітлення; scp_{16} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=3$ та $\Phi>225*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{17} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=3$ та $\Phi<225*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{18} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=3$ та $\Phi<225*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{19} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=4$ та $\Phi=300*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{20} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=4$ та $\Phi=300*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{21} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=4$ та $\Phi>300*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{22} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=4$ та $\Phi>300*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{23} – якщо $rlm=1$ та $tr=1$ та $chi=4$ та $\Phi<300*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{24} – якщо $rlm=1$ та $tr=6$ та $chi=4$ та $\Phi<300*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{25} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $\Phi=450*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{26} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $\Phi>450*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{27} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $\Phi<450*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{28} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $\Phi=540*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{29} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $\Phi>540*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{30} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $\Phi<540*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{31} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $\Phi=675*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{32} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $\Phi>675*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{33} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $\Phi<675*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{34} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $\Phi=900*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{35} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $\Phi>900*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{36} – якщо $rlm=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $\Phi<900*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{37} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi=200*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{38} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=1$ та $\Phi=200*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{39} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi>200*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{40} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=1$ та $\Phi>200*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{41} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi<200*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{42} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=1$ та $\Phi<200*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{43} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=2$ та $\Phi=240*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{44} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi=240*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{45}

– якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=2$ та $\Phi>240*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{46} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi>240*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{47} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=2$ та $\Phi<240*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{48} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi<240*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{49} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=3$ та $\Phi=300*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{50} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi=300*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{51} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=3$ та $\Phi>300*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{52} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi>300*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{53} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=3$ та $\Phi<300*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{54} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi<300*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{55} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=4$ та $\Phi=400*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{56} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi=400*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{57} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=4$ та $\Phi>400*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{58} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi>400*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{59} – якщо $rlm=1$ та $tr=3$ та $chi=4$ та $\Phi<400*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{60} – якщо $rlm=1$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi<400*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{61} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi=300*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{62} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi>300*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{63} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi<300*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{64} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $\Phi=360*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{65} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $\Phi>360*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{66} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $\Phi<360*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{67} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $\Phi=450*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{68} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $\Phi>450*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{69} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $\Phi<450*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{70} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $\Phi=600*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{71} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $\Phi>600*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{72} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $\Phi<600*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{73} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=1$ та $\Phi=75*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{74} –

якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=1$ та $\Phi=75*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{75} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=1$ та $\Phi=75*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{76} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=1$ та $\Phi>75*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{77} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=1$ та $\Phi>75*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{78} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=1$ та $\Phi>75*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{79} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=1$ та $\Phi<75*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{80} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=1$ та $\Phi<75*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{81} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=1$ та $\Phi<75*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{82} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=2$ та $\Phi=90*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{83} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=2$ та $\Phi=90*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{84} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=2$ та $\Phi=90*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{85} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=2$ та $\Phi>90*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{86} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=2$ та $\Phi>90*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{87} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=2$ та $\Phi>90*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{88} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=2$ та $\Phi<90*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{89} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=2$ та $\Phi<90*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{90} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=2$ та $\Phi<90*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{91} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=3$ та $\Phi=112.5*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{92} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=3$ та $\Phi=112.5*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{93} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=3$ та $\Phi=112.5*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{94} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=3$ та $\Phi>112.5*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{95} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=3$ та $\Phi>112.5*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{96} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=3$ та $\Phi>112.5*S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{97} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=3$ та $\Phi<112.5*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{98} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=3$ та $\Phi<112.5*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{99} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=3$ та $\Phi<112.5*S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{100} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=4$ та $\Phi=150*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{101} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=4$ та $\Phi=150*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{102} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=4$ та $\Phi=150*S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{103} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=4$ та $\Phi>150*S$,

то наявне надлишкове освітлення; scp_{104} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=4$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{105} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=4$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{106} – якщо $rlm=1$ та $tr=5$ та $chi=4$ та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{107} – якщо $rlm=1$ та $tr=7$ та $chi=4$ та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{108} – якщо $rlm=1$ та $tr=8$ та $chi=4$ та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{109} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi = 75 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{110} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=1$ та $\Phi = 75 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{111} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi > 75 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{112} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=1$ та $\Phi > 75 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{113} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi < 75 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{114} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=1$ та $\Phi < 75 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{115} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi = 90 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{116} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=2$ та $\Phi = 90 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{117} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi > 90 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{118} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=2$ та $\Phi > 90 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{119} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi < 90 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{120} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=2$ та $\Phi < 90 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{121} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=3$ та $\Phi = 112.5 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{122} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=3$ та $\Phi = 112.5 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{123} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=3$ та $\Phi > 112.5 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{124} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=3$ та $\Phi > 112.5 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{125} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=3$ та $\Phi < 112.5 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{126} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=3$ та $\Phi < 112.5 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{127} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=4$ та $\Phi = 150 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{128} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=4$ та $\Phi = 150 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{129} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=4$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{130} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=4$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{131} – якщо $rlm=2$ та $tr=1$ та $chi=4$ та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{132} – якщо $rlm=2$ та $tr=6$ та $chi=4$ та

$\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{133} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $\Phi = 225 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{134} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $\Phi > 225 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{135} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $\Phi < 225 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{136} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $\Phi = 270 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{137} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $\Phi > 270 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{138} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $\Phi < 270 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{139} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $\Phi = 337.5 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{140} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $\Phi > 337.5 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{141} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $\Phi < 337.5 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{142} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $\Phi = 450 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{143} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $\Phi > 450 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{144} – якщо $rlm=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $\Phi < 450 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{145} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi = 100 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{146} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=1$ та $\Phi = 100 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{147} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi > 100 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{148} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=1$ та $\Phi > 100 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{149} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi < 100 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{150} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=1$ та $\Phi < 100 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{151} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=2$ та $\Phi = 120 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{152} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi = 120 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{153} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=2$ та $\Phi > 120 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{154} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi > 120 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{155} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=2$ та $\Phi < 120 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{156} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi < 120 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{157} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=3$ та $\Phi = 150 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{158} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi = 150 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{159} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=3$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{160} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{161} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=3$

та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{162} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{163} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=4$ та $\Phi = 200 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{164} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi = 200 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{165} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=4$ та $\Phi > 200 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{166} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi > 200 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{167} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=4$ та $\Phi < 200 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{168} – якщо $rlm=2$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi < 200 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{169} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi = 150 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{170} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi > 150 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{171} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi < 150 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{172} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $\Phi = 180 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{173} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $\Phi > 180 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{174} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $\Phi < 180 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{175} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $\Phi = 225 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{176} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $\Phi > 225 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{177} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $\Phi < 225 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{178} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $\Phi = 300 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{179} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $\Phi > 300 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{180} – якщо $rlm=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $\Phi < 300 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{181} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=1$ та $\Phi = 37.5 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{182} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=1$ та $\Phi = 37.5 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{183} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=1$ та $\Phi = 37.5 * S$, то наявного освітлення достатньо; scp_{184} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=1$ та $\Phi > 37.5 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{185} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=1$ та $\Phi > 37.5 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{186} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=1$ та $\Phi > 37.5 * S$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{187} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=1$ та $\Phi < 37.5 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{188} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=1$ та $\Phi < 37.5 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{189} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=1$ та $\Phi < 37.5 * S$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{190} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=2$

та $\Phi=45^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{191} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=2$
та $\Phi=45^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{192} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=2$
та $\Phi=45^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{193} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=2$
та $\Phi>45^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{194} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=2$
та $\Phi>45^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{195} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=2$
та $\Phi>45^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{196} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=2$
та $\Phi<45^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{197} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=2$
та $\Phi<45^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{198} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$
та $chi=2$ та $\Phi<45^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{199} – якщо $rlm=2$ та
 $tr=5$ та $chi=3$ та $\Phi=56.25^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{200} – якщо $rlm=2$
та $tr=7$ та $chi=3$ та $\Phi=56.25^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{201} – якщо
 $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=3$ та $\Phi=56.25^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{202} –
якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=3$ та $\Phi>56.25^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{203}
– якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=3$ та $\Phi>56.25^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення;
 scp_{204} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=3$ та $\Phi>56.25^{\circ}$, то наявне надлишкове
освітлення; scp_{205} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та $chi=3$ та $\Phi<56.25^{\circ}$, то наявного
освітлення недостатньо; scp_{206} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та $chi=3$ та $\Phi<56.25^{\circ}$, то
наявного освітлення недостатньо; scp_{207} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та $chi=3$ та
 $\Phi<56.25^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{208} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та
 $chi=4$ та $\Phi=75^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{209} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та
 $chi=4$ та $\Phi=75^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{210} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та
 $chi=4$ та $\Phi=75^{\circ}$, то наявного освітлення достатньо; scp_{211} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та
 $chi=4$ та $\Phi>75^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{212} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$ та
 $chi=4$ та $\Phi>75^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{213} – якщо $rlm=2$ та $tr=8$ та
 $chi=4$ та $\Phi>75^{\circ}$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{214} – якщо $rlm=2$ та $tr=5$ та
 $chi=4$ та $\Phi<75^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{215} – якщо $rlm=2$ та $tr=7$
та $chi=4$ та $\Phi<75^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{216} – якщо $rlm=2$ та
 $tr=8$ та $chi=4$ та $\Phi<75^{\circ}$, то наявного освітлення недостатньо; scp_{217} – якщо $rlm=3$
та $tr=1$ та $chi=1$ та $\Phi>0$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{218} – якщо $rlm=3$ та
 $tr=1$ та $chi=2$ та $\Phi>0$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{219} – якщо $rlm=3$ та $tr=1$

$chi=1$ та $\Phi>0$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{250} – якщо $rlm=3$ та $tr=9$ та $chi=2$ та $\Phi>0$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{251} – якщо $rlm=3$ та $tr=9$ та $chi=3$ та $\Phi>0$, то наявне надлишкове освітлення; scp_{252} – якщо $rlm=3$ та $tr=9$ та $chi=4$ та $\Phi>0$, то наявне надлишкове освітлення.

Представлена формулою (2.14) множина можливих альтернатив (сценаріїв) складається з трьох підмножин:

$$SCP = \{SCPO, SCPE, SCPIS\}, \quad (2.15)$$

де $SCPO = \{scp_1, scp_2, scp_7, scp_8, scp_{13}, scp_{14}, scp_{19}, scp_{20}, scp_{25}, scp_{28}, scp_{31}, scp_{34}, scp_{37}, scp_{38}, scp_{43}, scp_{44}, scp_{49}, scp_{50}, scp_{55}, scp_{56}, scp_{61}, scp_{64}, scp_{67}, scp_{70}, scp_{73}, scp_{74}, scp_{75}, scp_{82}, scp_{83}, scp_{84}, scp_{91}, scp_{92}, scp_{93}, scp_{100}, scp_{101}, scp_{102}, scp_{109}, scp_{110}, scp_{115}, scp_{116}, scp_{121}, scp_{122}, scp_{127}, scp_{128}, scp_{133}, scp_{136}, scp_{139}, scp_{142}, scp_{145}, scp_{146}, scp_{151}, scp_{152}, scp_{157}, scp_{158}, scp_{163}, scp_{164}, scp_{169}, scp_{172}, scp_{175}, scp_{178}, scp_{181}, scp_{182}, scp_{183}, scp_{190}, scp_{191}, scp_{192}, scp_{199}, scp_{200}, scp_{201}, scp_{208}, scp_{209}, scp_{210}\}$ – підмножина сценаріїв з достатнім рівнем освітлення – нормальні сценарії; $SCPE = \{scp_3, scp_4, scp_9, scp_{10}, scp_{15}, scp_{16}, scp_{21}, scp_{22}, scp_{26}, scp_{29}, scp_{32}, scp_{35}, scp_{39}, scp_{40}, scp_{45}, scp_{46}, scp_{51}, scp_{52}, scp_{57}, scp_{58}, scp_{62}, scp_{65}, scp_{68}, scp_{71}, scp_{76}, scp_{77}, scp_{78}, scp_{85}, scp_{86}, scp_{87}, scp_{94}, scp_{95}, scp_{96}, scp_{103}, scp_{104}, scp_{105}, scp_{111}, scp_{112}, scp_{117}, scp_{118}, scp_{123}, scp_{124}, scp_{129}, scp_{130}, scp_{134}, scp_{137}, scp_{140}, scp_{143}, scp_{147}, scp_{148}, scp_{153}, scp_{154}, scp_{159}, scp_{160}, scp_{165}, scp_{166}, scp_{170}, scp_{173}, scp_{176}, scp_{179}, scp_{184}, scp_{185}, scp_{186}, scp_{193}, scp_{194}, scp_{195}, scp_{202}, scp_{203}, scp_{204}, scp_{211}, scp_{212}, scp_{213}, scp_{217}, scp_{218}, scp_{219}, scp_{220}, scp_{221}, scp_{222}, scp_{223}, scp_{224}, scp_{225}, scp_{226}, scp_{227}, scp_{228}, scp_{229}, scp_{230}, scp_{231}, scp_{232}, scp_{233}, scp_{234}, scp_{235}, scp_{236}, scp_{237}, scp_{238}, scp_{239}, scp_{240}, scp_{241}, scp_{242}, scp_{243}, scp_{244}, scp_{245}, scp_{246}, scp_{247}, scp_{248}, scp_{249}, scp_{250}, scp_{251}, scp_{252}\}$ – підмножина сценаріїв з надлишковим рівнем освітлення – аномальні сценарії; $SCPIS = \{scp_5, scp_6, scp_{11}, scp_{12}, scp_{17}, scp_{18}, scp_{23}, scp_{24}, scp_{27}, scp_{30}, scp_{33}, scp_{36}, scp_{41}, scp_{42}, scp_{47}, scp_{48}, scp_{53}, scp_{54}, scp_{59}, scp_{60}, scp_{63}, scp_{66}, scp_{69}, scp_{72}, scp_{79}, scp_{80}, scp_{81}, scp_{88}, scp_{89}, scp_{90}, scp_{97}, scp_{98}, scp_{99}, scp_{106}, scp_{107}, scp_{108}, scp_{113}, scp_{114}, scp_{119}, scp_{120}, scp_{125}, scp_{126}, scp_{131}, scp_{132}, scp_{135}, scp_{138}, scp_{141}, scp_{144}, scp_{149}, scp_{150}, scp_{155}, scp_{156}, scp_{161}, scp_{162}, scp_{167}, scp_{168}, scp_{171}, scp_{174}, scp_{177}, scp_{180}, scp_{187}, scp_{188}, scp_{189}, scp_{196}, scp_{197}, scp_{198}, scp_{205}, scp_{206}, scp_{207}, scp_{214}, scp_{215}, scp_{216}\}$ – підмножина сценаріїв з недостатнім рівнем освітлення – аномальні сценарії.

Множина сценаріїв розрахунку кількості додаткових ламп, які треба ввімкнути для забезпечення необхідного рівня освітленості, формується за таблицями 2.4-2.7 і має наступний вигляд:

$$SCAL = \{scal_1, \dots, scal_{160}\}, \quad (2.16)$$

де $scal_1$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_2$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (2.4*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.4*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_3$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (3*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_4$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (4*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_5$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_6$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (7.2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_7$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (9*S)$, то $k = \left\lceil \frac{9*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_8$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (12*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_9$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (2.67*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.67*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{10}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (3.2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{11}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (4*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{12}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (5.33*S)$, то $k = \left\lceil \frac{5.33*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{13}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (4*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{14}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (4.8*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.8*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{15}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{16}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (8*S)$, то $k = \left\lceil \frac{8*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{17}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (S)$, то $k = \left\lceil \frac{S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{18}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (1.2*S)$,

то $k = \left\lceil \frac{1.2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{19}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (1.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.5*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{20}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{21}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (S)$, то $k = \left\lceil \frac{S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{22}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (1.2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{23}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (1.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.5*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{24}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{25}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (3*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{26}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (3.6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.6*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{27}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (4.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.5*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{28}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{29}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (1.335*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.335*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{30}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (1.6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.6*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{31}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{32}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (2.665*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.665*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{33}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{34}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (2.4*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.4*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{35}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/75) < (3*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{36}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/75) < (4*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{37}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (0.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{0.5*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{38}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/75) < (0.6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{0.6*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{39}$

– якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/75)<(0.75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{0.75*S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{40}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/75)<(S)$, то $k = \left\lceil \frac{S-\Phi/75}{Pl} \right\rceil$; $scal_{41}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/47)<(3.2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.2*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{42}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/47)<(3.83*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.83*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{43}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/47)<(4.79*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.79*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{44}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/47)<(6.39*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.39*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{45}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)<(9.58*S)$, то $k = \left\lceil \frac{9.58*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{46}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)<(11.49*S)$, то $k = \left\lceil \frac{11.49*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{47}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)<(14.37*S)$, то $k = \left\lceil \frac{14.37*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{48}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)<(19.15*S)$, то $k = \left\lceil \frac{19.15*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{49}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/47)<(4.26*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.26*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{50}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/47)<(5.11*S)$, то $k = \left\lceil \frac{5.11*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{51}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/47)<(6.39*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.39*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{52}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/47)<(8.52*S)$, то $k = \left\lceil \frac{8.52*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{53}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)<(6.39*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.39*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{54}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)<(7.66*S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.66*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{55}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)<(9.58*S)$, то $k = \left\lceil \frac{9.58*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{56}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)<(12.77*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12.77*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{57}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/47)<(1.6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.6*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{58}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$

та $(\Phi/47) < (1.92 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.92 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{59}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/47) < (2.4 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.4 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{60}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/47) < (3.2 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.2 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{61}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/47) < (1.6 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.6 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{62}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/47) < (1.915 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.915 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{63}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/47) < (2.395 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.395 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{64}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/47) < (3.195 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.195 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{65}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/47) < (4.79 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.79 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{66}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/47) < (5.745 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{5.745 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{67}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/47) < (7.185 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.185 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{68}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/47) < (9.575 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{9.575 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{69}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/47) < (2.13 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.13 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{70}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/47) < (2.555 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.555 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{71}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/47) < (3.195 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.195 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{72}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/47) < (4.26 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.26 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{73}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/47) < (3.195 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.195 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{74}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/47) < (3.83 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.83 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{75}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/47) < (4.79 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.79 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{76}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/47) < (6.385 * S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.385 * S - \Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{77}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/47) < (0.8 * S)$,

то $k = \left\lceil \frac{0.8*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{78}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/47) < (0.96*S)$, то $k = \left\lceil \frac{0.96*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{79}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/47) < (1.2*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.2*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{80}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/47) < (1.6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{1.6*S-\Phi/47}{Pl} \right\rceil$; $scal_{81}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (10*S)$, то $k = \left\lceil \frac{10*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{82}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (12*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{83}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (15*S)$, то $k = \left\lceil \frac{15*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{84}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (20*S)$, то $k = \left\lceil \frac{20*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{85}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (30*S)$, то $k = \left\lceil \frac{30*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{86}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (36*S)$, то $k = \left\lceil \frac{36*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{87}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (45*S)$, то $k = \left\lceil \frac{45*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{88}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (60*S)$, то $k = \left\lceil \frac{60*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{89}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (13.34*S)$, то $k = \left\lceil \frac{13.34*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{90}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (16*S)$, то $k = \left\lceil \frac{16*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{91}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (20*S)$, то $k = \left\lceil \frac{20*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{92}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (26.67*S)$, то $k = \left\lceil \frac{26.67*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{93}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (20*S)$, то $k = \left\lceil \frac{20*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{94}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (24*S)$, то $k = \left\lceil \frac{24*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{95}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (30*S)$, то $k = \left\lceil \frac{30*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{96}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (40*S)$, то $k = \left\lceil \frac{40*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{97}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та

$(\Phi/15) < (5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{5*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{98}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{99}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (7.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.5*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{100}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (10*S)$, то $k = \left\lceil \frac{10*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{101}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{5*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{102}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (6*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{103}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (7.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.5*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{104}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (10*S)$, то $k = \left\lceil \frac{10*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{105}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (15*S)$, то $k = \left\lceil \frac{15*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{106}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (18*S)$, то $k = \left\lceil \frac{18*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{107}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (22.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{22.5*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{108}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (30*S)$, то $k = \left\lceil \frac{30*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{109}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (6.67*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.67*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{110}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (8*S)$, то $k = \left\lceil \frac{8*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{111}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (10*S)$, то $k = \left\lceil \frac{10*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{112}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (13.335*S)$, то $k = \left\lceil \frac{13.335*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{113}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (10*S)$, то $k = \left\lceil \frac{10*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{114}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) < (12*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{115}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) < (15*S)$, то $k = \left\lceil \frac{15*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{116}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/15) < (20*S)$, то $k = \left\lceil \frac{20*S - \Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{117}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або

$tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/15)<(2.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{2.5*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{118}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/15)<(3*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{119}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/15)<(3.75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.75*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{120}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/15)<(5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{5*S-\Phi/15}{Pl} \right\rceil$; $scal_{121}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)<(12.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12.5*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{122}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)<(15*S)$, то $k = \left\lceil \frac{15*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{123}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)<(18.75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{18.75*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{124}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)<(25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{25*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{125}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/12)<(37.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{37.5*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{126}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/12)<(45*S)$, то $k = \left\lceil \frac{45*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{127}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/12)<(56.25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{56.25*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{128}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/12)<(75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{75*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{129}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)<(16.67*S)$, то $k = \left\lceil \frac{16.67*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{130}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)<(20*S)$, то $k = \left\lceil \frac{20*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{131}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)<(25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{25*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{132}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)<(33.34*S)$, то $k = \left\lceil \frac{33.34*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{133}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/12)<(25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{25*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{134}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/12)<(30*S)$, то $k = \left\lceil \frac{30*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{135}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/12)<(37.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{37.5*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{136}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/12)<(50*S)$, то $k = \left\lceil \frac{50*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$;

$scal_{137}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/12) < (6.25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.25*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{138}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/12) < (7.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{139}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/12) < (9.38*S)$, то $k = \left\lceil \frac{9.38*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{140}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/12) < (12.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{141}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/12) < (6.25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.25*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{142}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/12) < (7.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{7.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{143}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/12) < (9.375*S)$, то $k = \left\lceil \frac{9.375*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{144}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/12) < (12.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{145}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/12) < (18.75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{18.75*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{146}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/12) < (22.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{22.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{147}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/12) < (28.125*S)$, то $k = \left\lceil \frac{28.125*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{148}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/12) < (37.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{37.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{149}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/12) < (8.335*S)$, то $k = \left\lceil \frac{8.335*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{150}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/12) < (10*S)$, то $k = \left\lceil \frac{10*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{151}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/12) < (12.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{152}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/12) < (16.67*S)$, то $k = \left\lceil \frac{16.67*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{153}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/12) < (12.5*S)$, то $k = \left\lceil \frac{12.5*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{154}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/12) < (15*S)$, то $k = \left\lceil \frac{15*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{155}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/12) < (18.75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{18.75*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{156}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/12) < (25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{25*S - \Phi/12}{Pl} \right\rceil$;

$\left\lceil \frac{25*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{157}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)<(3.125*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.125*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{158}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)<(3.75*S)$, то $k = \left\lceil \frac{3.75*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{159}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)<(4.69*S)$, то $k = \left\lceil \frac{4.69*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$; $scal_{160}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)<(6.25*S)$, то $k = \left\lceil \frac{6.25*S-\Phi/12}{Pl} \right\rceil$.

Представлена формулою (2.16) множина сценаріїв розрахунку кількості додаткових ламп, які треба ввімкнути для забезпечення необхідного рівня освітленості, складається з чотирьох підмножин:

$$SCAL = \{SCALLED, SCALES, SCALH, SCALI\}, \quad (2.17)$$

де $SCALLED=\{scal_1...scal_{40}\}$ – підмножина сценаріїв щодо ввімкнення світлодіодних ламп; $SCALES=\{scal_{41}...scal_{80}\}$ – підмножина сценаріїв щодо ввімкнення енергозберігаючих ламп; $SCALH=\{scal_{81}...scal_{120}\}$ – підмножина сценаріїв щодо ввімкнення галогенних ламп; $SCALI=\{scal_{121}...scal_{160}\}$ – підмножина сценаріїв щодо ввімкнення ламп розжарювання.

Множина сценаріїв розрахунку кількості ламп, які треба вимкнути для забезпечення необхідного рівня освітленості, формується за таблицями 2.4-2.7 і має наступний вигляд:

$$SCOFFL = \{scoffl_1, ..., scoffl_{161}\}, \quad (2.18)$$

де $scoffl_1$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(2*S)$, то $k1 = \left\lceil \frac{\Phi/75-2*S}{Pl} \right\rceil$; $scoffl_2$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(2.4*S)$, то $k1 = \left\lceil \frac{\Phi/75-2.4*S}{Pl} \right\rceil$; $scoffl_3$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(3*S)$, то $k1 = \left\lceil \frac{\Phi/75-3*S}{Pl} \right\rceil$; $scoffl_4$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(4*S)$, то $k1 = \left\lceil \frac{\Phi/75-4*S}{Pl} \right\rceil$; $scoffl_5$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(6*S)$, то $k1 = \left\lceil \frac{\Phi/75-6*S}{Pl} \right\rceil$; $scoffl_6$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(7.2*S)$, то $k1 = \left\lceil \frac{\Phi/75-7.2*S}{Pl} \right\rceil$; $scoffl_7$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та

$chi=3$ та $(\Phi/75)>(9*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-9*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_8$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(12*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-12*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_9$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(2.67*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2.67*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{10}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(3.2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-3.2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{11}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(4*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-4*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{12}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(5.33*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-5.33*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{13}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(4*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-4*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{14}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(4.8*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-4.8*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{15}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{16}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(8*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-8*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{17}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{18}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(1.2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-1.2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{19}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(1.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-1.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{20}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{21}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{22}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(1.2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-1.2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{23}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(1.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-1.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{24}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{25}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(3*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-3*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{26}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(3.6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-3.6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{27}$ – якщо $rlm=2$

та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(4.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-4.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{28}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{29}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(1.335*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-1.335*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{30}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(1.6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-1.6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{31}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{32}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(2.665*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2.665*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{33}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{34}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(2.4*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-2.4*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{35}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(3*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-3*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{36}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(4*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-4*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{37}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=1$ та $(\Phi/75)>(0.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-0.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{38}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=2$ та $(\Phi/75)>(0.6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-0.6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{39}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=3$ та $(\Phi/75)>(0.75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-0.75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{40}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=4$ та $(\Phi/75)>(S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/75-S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{41}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(3.2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{42}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(3.83*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.83*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{43}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(4.79*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-4.79*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{44}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(6.39*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-6.39*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{45}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(9.58*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-9.58*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{46}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та

$chi=2$ та $(\Phi/47)>(11.49*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-11.49*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{47}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(14.37*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-14.37*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{48}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(19.15*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-19.15*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{49}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(4.26*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-4.26*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{50}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(5.11*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-5.11*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{51}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(6.39*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-6.39*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{52}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(8.52*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-8.52*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{53}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(6.39*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-6.39*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{54}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(7.66*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-7.66*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{55}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(9.58*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-9.58*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{56}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(12.77*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-12.77*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{57}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(1.6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-1.6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{58}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(1.92*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-1.92*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{59}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(2.4*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-2.4*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{60}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(3.2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{61}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(1.6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-1.6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{62}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(1.915*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-1.915*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{63}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(2.395*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-2.395*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{64}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(3.195*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.195*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{65}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(4.79*S)$, то $k1 =$

$\left\lfloor \frac{\Phi/47-4.79*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{66}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(5.745*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-5.745*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{67}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(7.185*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-7.185*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{68}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(9.575*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-9.575*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{69}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(2.13*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-2.13*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{70}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(2.555*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-2.555*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{71}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(3.195*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.195*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{72}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(4.26*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-4.26*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{73}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(3.195*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.195*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{74}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(3.83*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-3.83*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{75}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(4.79*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-4.79*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{76}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(6.385*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-6.385*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{77}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=1$ та $(\Phi/47)>(0.8*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-0.8*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{78}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=2$ та $(\Phi/47)>(0.96*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-0.96*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{79}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=3$ та $(\Phi/47)>(1.2*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-1.2*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{80}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=2$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=4$ та $(\Phi/47)>(1.6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/47-1.6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{81}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=1$ та $(\Phi/15)>(10*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-10*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{82}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=2$ та $(\Phi/15)>(12*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-12*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{83}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=3$ та $(\Phi/15)>(15*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-15*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{84}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=1$ або $tr=6)$

та $chi=4$ та $(\Phi/15) > (20*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-20*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{85}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$

та $chi=1$ та $(\Phi/15) > (30*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-30*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{86}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$

та $chi=2$ та $(\Phi/15) > (36*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-36*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{87}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$

та $chi=3$ та $(\Phi/15) > (45*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-45*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{88}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=2$

та $chi=4$ та $(\Phi/15) > (60*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-60*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{89}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=3$

або $tr=9)$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) > (13.34*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-13.34*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{90}$ – якщо $rlm=1$

та $trl=3$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) > (16*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-16*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{91}$ –

якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) > (20*S)$, то $k1 =$

$\left\lfloor \frac{\Phi/15-20*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{92}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=3$ або $tr=9)$ та $chi=4$ та

$(\Phi/15) > (26.67*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-26.67*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{93}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та

$chi=1$ та $(\Phi/15) > (20*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-20*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{94}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та

$chi=2$ та $(\Phi/15) > (24*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-24*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{95}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та

$chi=3$ та $(\Phi/15) > (30*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-30*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{96}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та

$chi=4$ та $(\Phi/15) > (40*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-40*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{97}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=5$

або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) > (5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{98}$ – якщо $rlm=1$

та $trl=3$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) > (6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-6*S}{Pl} \right\rfloor$;

$scoffl_{99}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) > (7.5*S)$,

то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-7.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{100}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $(tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8)$ та

$chi=4$ та $(\Phi/15) > (10*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-10*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{101}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $(tr=1$

або $tr=6)$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) > (5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{102}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$

та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=2$ та $(\Phi/15) > (6*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-6*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{103}$ – якщо $rlm=2$

та $trl=3$ та $(tr=1$ або $tr=6)$ та $chi=3$ та $(\Phi/15) > (7.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-7.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{104}$ –

якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/15)>(10*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-10*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{105}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/15)>(15*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-15*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{106}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/15)>(18*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-18*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{107}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/15)>(22.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-22.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{108}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/15)>(30*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-30*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{109}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/15)>(6.67*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-6.67*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{110}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/15)>(8*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-8*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{111}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/15)>(10*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-10*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{112}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/15)>(13.335*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-13.335*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{113}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/15)>(10*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-10*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{114}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/15)>(12*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-12*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{115}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/15)>(15*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-15*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{116}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/15)>(20*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-20*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{117}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/15)>(2.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-2.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{118}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/15)>(3*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-3*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{119}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/15)>(3.75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-3.75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{120}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=3$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/15)>(5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/15-5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{121}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(12.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-12.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{122}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(15*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-15*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{123}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$

та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(18.75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-18.75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{124}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{125}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(37.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-37.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{126}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(45*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-45*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{127}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(56.25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-56.25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{128}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{129}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(16.67*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-16.67*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{130}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(20*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-20*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{131}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{132}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(33.34*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-33.34*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{133}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{134}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(30*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-30*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{135}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(37.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-37.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{136}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(50*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-50*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{137}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(6.25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-6.25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{138}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(7.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-7.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{139}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(9.38*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-9.38*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{140}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(12.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-12.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{141}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(6.25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-6.25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{142}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(7.5*S)$, то $k1 =$

$\left\lfloor \frac{\Phi/12-7.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{143}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(9.375*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-9.375*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{144}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=1$ або $tr=6$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(12.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-12.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{145}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(18.75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-18.75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{146}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(22.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-22.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{147}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(28.125*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-28.125*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{148}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=2$ та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(37.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-37.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{149}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(8.335*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-8.335*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{150}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(10*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-10*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{151}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(12.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-12.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{152}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=3$ або $tr=9$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(16.67*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-16.67*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{153}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(12.5*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-12.5*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{154}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(15*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-15*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{155}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(18.75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-18.75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{156}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та $tr=4$ та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{157}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=1$ та $(\Phi/12)>(3.125*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-3.125*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{158}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=2$ та $(\Phi/12)>(3.75*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-3.75*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{159}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=3$ та $(\Phi/12)>(4.69*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-4.69*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{160}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=4$ та ($tr=5$ або $tr=7$ або $tr=8$) та $chi=4$ та $(\Phi/12)>(6.25*S)$, то $k1 = \left\lfloor \frac{\Phi/12-6.25*S}{Pl} \right\rfloor$; $scoffl_{161}$ – якщо $rlm=3$ та ($trl=1$ або $trl=2$ або $trl=3$ або $trl=4$) та ($tr=1$ або $tr=2$ або $tr=3$ або $tr=4$ або

$tr=5$ або $tr=6$ або $tr=7$ або $tr=8$ або $tr=9$) та ($chi=1$ або $chi=2$ або $chi=3$ або $chi=4$) та $(\Phi/75)>0$, то вимкнути всі ввімкнені лампи.

Представлена формулою (2.18) множина сценаріїв розрахунку кількості ламп, які треба вимкнути для забезпечення необхідного рівня освітленості, складається з чотирьох підмножин:

$$SCOFFL = \{SCOFFLLED, SCOFFLES, SCOFFLH, SCOFFLI\}, \quad (2.19)$$

де $SCOFFLLED = \{scoffl_1 \dots scoffl_{40}, scoffl_{161}\}$ – підмножина сценаріїв щодо вимкнення світлодіодних ламп; $SCOFFLES = \{scoffl_{41} \dots scoffl_{80}, scoffl_{161}\}$ – підмножина сценаріїв щодо вимкнення енергозберігаючих ламп; $SCOFFLH = \{scoffl_{81} \dots scoffl_{120}, scoffl_{161}\}$ – підмножина сценаріїв щодо вимкнення галогенних ламп; $SCOFFLI = \{scoffl_{121} \dots scoffl_{160}, scoffl_{161}\}$ – підмножина сценаріїв щодо вимкнення ламп розжарювання.

Множина можливих альтернатив (сценаріїв) керування гучністю мультимедіа, побудована на основі таблиці 2.8, має наступний вигляд:

$$SCV = \{scv_1, \dots, scv_{51}\}, \quad (2.20)$$

де scv_1 – якщо $tr=1$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_2 – якщо $tr=2$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_3 – якщо $tr=3$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_4 – якщо $tr=5$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_5 – якщо $tr=6$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_6 – якщо $tr=7$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_7 – якщо $tr=8$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_8 – якщо $tr=9$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_9 – якщо $tr=1$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $40 < \tau \leq 55$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{10} – якщо $tr=2$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $40 < \tau \leq 55$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{11} – якщо $tr=3$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $40 < \tau \leq 55$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{12} – якщо $tr=5$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $40 < \tau \leq 55$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{13} – якщо $tr=6$ та $8.00 \leq t < 22.00$ та $40 < \tau \leq 55$, то гучність звуку у приміщенні є

[illegible]

та $30 < \tau \leq 45$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{37} – якщо $tr=6$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $30 < \tau \leq 45$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{38} – якщо $tr=7$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $30 < \tau \leq 45$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{39} – якщо $tr=8$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $30 < \tau \leq 45$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{40} – якщо $tr=9$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $30 < \tau \leq 45$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{41} – якщо $tr=1$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{42} – якщо $tr=2$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{43} – якщо $tr=3$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{44} – якщо $tr=5$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{45} – якщо $tr=6$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{46} – якщо $tr=7$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{47} – якщо $tr=8$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{48} – якщо $tr=9$ та $22.00 \leq t < 24.00$ або $00.00 \leq t < 08.00$ та $\tau > 45$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою; scv_{49} – якщо $tr=4$ та $0 \leq \tau \leq 40$, то гучність звуку у приміщенні є оптимальною; scv_{50} – якщо $tr=2$ та $40 < \tau \leq 55$, то гучність звуку у приміщенні є високою; scv_{51} – якщо $tr=2$ та $\tau > 55$, то гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою.

Представлена формулою (2.20) множина можливих альтернатив (сценаріїв) складається з трьох підмножин:

$$SCV = \{SCVO, SCVH, SCVUAH\}, \quad (2.21)$$

де $SCVO = \{scv_1, scv_2, scv_3, scv_4, scv_5, scv_6, scv_7, scv_8, scv_{25}, scv_{26}, scv_{27}, scv_{28}, scv_{29}, scv_{30}, scv_{31}, scv_{32}, scv_{49}\}$ – підмножина сценаріїв з оптимальним рівнем гучності звуку – нормальні сценарії; $SCVH = \{scv_9, scv_{10}, scv_{11}, scv_{12}, scv_{13}, scv_{14}, scv_{15}, scv_{16}, scv_{33}, scv_{34}, scv_{35}, scv_{36}, scv_{37}, scv_{38}, scv_{39}, scv_{40}, scv_{50}\}$ – підмножина сценаріїв з високим рівнем гучності звуку – аномальні сценарії; $SCVUAH = \{scv_{17}, scv_{18}, scv_{19}, scv_{20}, scv_{21},$

$SCV_{22}, SCV_{23}, SCV_{24}, SCV_{41}, SCV_{42}, SCV_{43}, SCV_{44}, SCV_{45}, SCV_{46}, SCV_{47}, SCV_{48}, SCV_{51}$ – підмножина сценаріїв з неприпустимо високим рівнем гучності звуку – аномальні сценарії.

Розроблені сценарії керування температурою, вологістю, освітленості приміщення та гучністю мультимедіа дозволяють згенерувати рішення щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа для житлових приміщень різного типу залежно від розпізнаної ситуації на основі аналізу та інтерпретації вхідних даних та параметрів ініціалізації кіберфізичної системи «Розумний будинок».

Розроблені сценарії розрахунку кількості додаткових ламп, які треба ввімкнути для забезпечення необхідного рівня освітленості, а також сценарії розрахунку кількості ламп, які треба вимкнути для забезпечення необхідного рівня освітленості, дозволяють згенерувати рішення щодо штучного освітлення залежно від розпізнаної ситуації у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Загалом, розроблена сценарна модель керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» виступає ключовим інструментом трансформації звичайної автоматизації у систему з ситуаційною автоматичністю, де вибір дій базується на глибокому аналізі поточного контексту. Вона забезпечує перехід від лінійних алгоритмів до гнучкого ситуаційного прийняття рішень, де розпізнана ситуація стає вхідним сигналом для активації заздалегідь визначених сценаріїв, що дозволяє системі функціонувати автономно, без прямих вказівок користувача. Розроблені в межах моделі деталізовані сценарії, включаючи математично обґрунтовані розрахунки необхідної кількості активних ламп та рівнів гучності, гарантують комплексне та узгоджене керування всіма функціональними групами одночасно. Це дозволяє генерувати точні автоматичні рішення для приміщень різного типу на основі параметрів ініціалізації та даних у режимі *soft real-time*. Підсумкова ефективність сценарної моделі полягає у здатності системи підтримувати оптимальний баланс між комфортом мешканців, дотриманням суворих санітарно-гігієнічних норм та принципами енергозбереження, що робить її інтегрованим інтелектуальним ядром сучасної кіберфізичної системи.

2.4. Висновки

Ключовим завданням кіберфізичної системи «Розумний будинок» є розробка розв'язувальної функції $y: M \rightarrow Dn$, де множина вихідних даних M (сенсорні показники температури, вологості, освітленості, шуму) відображається у множину дій Dn (команди виконавчим пристроям). Цей процес вимагає переходу від автоматизації до ситуаційної автоматичності, де розпізнавання ситуацій є центральним механізмом. Розпізнана ситуація (множина Sc) формується через аналіз та інтерпретацію гетерогенних сенсорних даних, забезпечуючи цілісне уявлення про поточний контекст. Це є вхідним сигналом для сценаріїв – заздалегідь заданих послідовностей дій, що активуються виключно при розпізнаванні певного контексту, що забезпечує системі здатність автономно обирати найбільш доречні рішення без прямої команди користувача.

Розроблений метод ініціалізації підсистеми є критичною передумовою для її автономної роботи. Ця комплексна процедура забезпечує систему необхідною базою знань, починаючи від синхронізації часових даних (критично для soft real-time систем і контекстно-залежних сценаріїв) та семантичного маркування приміщення (тип, геометрія). Семантичне маркування є основою для ситуаційного аналізу, оскільки нормативні та комфортні вимоги суттєво різняться для приміщень різних типів. Крім того, метод інтегрує технічні характеристики освітлювального обладнання та засобів затінення, що дозволяє системі здійснювати точні розрахунки необхідної кількості ламп для ввімкнення/вимкнення, а також узгоджувати дії між штучним та денним освітленням. Завершальний вибір користувачем стартового режиму забезпечує початкову пріоритетизацію цілей для негайного автономного функціонування.

Узагальнений метод прийняття рішень ($y: M \rightarrow Dn$) та деталізовані сценарії були розроблені для забезпечення комплексного та узгодженого керування трьома функціональними групами – мікрокліматом, освітленням та мультимедіа. Сценарії керування, включаючи розрахунок необхідної кількості ламп для досягнення

цільової освітленості, дозволяють генерувати автоматичні рішення для житлових приміщень різного типу на основі розпізнаної ситуації та параметрів ініціалізації.

Ключовим досягненням є те, що розроблювана підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» використовує нормативні показники комфорту, встановлені Державними будівельними нормами та санітарними правилами. Це гарантує, що всі автоматичні рішення щодо мікроклімату, освітлення та гучності мультимедіа будуть прийматися в межах законодавчо встановлених санітарно-гігієнічних вимог, підвищуючи не лише комфорт, але й безпеку системи.

Таким чином, розроблені абстрактна модель, метод ініціалізації та узагальнений метод прийняття рішень, а також розроблена сценарна модель дозволяють системі автономно, без прямої участі людини, розпізнавати комплексні ситуації та приймати узгоджені рішення за всіма трьома функціями, що є актуальною задачею в контексті переходу від керованої людиною автоматизації до автономного ситуаційного лідерства в екосистемі «розумного» житла.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОСВІТЛЕННЯ, МІКРОКЛІМАТУ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

3.1. Метод прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [77]

Керування температурою є одним із найактуальніших і критично важливих завдань у кіберфізичній системі «Розумний будинок», що обумовлено як вимогами людського комфорту та здоров'я, так і необхідністю енергетичної ефективності. Комфортний температурний режим є не просто питанням зручності; він безпосередньо впливає на когнітивні функції, якість сну та загальне самопочуття мешканців, що підкреслює соціальну значущість інтелектуального клімат-контролю. Оскільки середовище «Розумного будинку» характеризується високою мультифакторністю впливів (зовнішня погода, інсоляція, теплові навантаження від приладів, рух людей) і недетермінованою поведінкою користувача, традиційні термостати та жорстка автоматика не здатні забезпечити ситуаційно обумовлене та гнучке реагування.

Актуальність керування температурою посилюється економічними та екологічними чинниками. Саме опалення, вентиляція та кондиціонування становлять найбільшу частку в загальному енергоспоживанні житлових будівель. Кіберфізична система «Розумний будинок» використовує ситуаційний аналіз для мінімізації цих витрат, що є неможливим без точного моніторингу та оперативного регулювання. Система повинна не лише підтримувати задану користувачем температуру, але й автономно приймати рішення про необхідність активації або деактивації обігрівальних або охолоджувальних приладів, виходячи з комплексного контексту. Неефективне керування, спричинене затримками або неадекватним реагуванням, призводить до значних фінансових втрат та нераціонального використання ресурсів.

Таким чином, розробка та впровадження методу прийняття рішень для керування температурою є актуальним науковим завданням у галузі кіберфізичних систем.

Метод прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок», розроблений на основі узагальненого методу прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», складається з таких кроків:

вхідні дані: температура t з датчика температури (елемент m_1), яка вимірюється кожні 30 хвилин;

1) аналіз та інтерпретація вхідних даних та параметрів ініціалізації підсистеми;

2) розпізнавання ситуації – пошук сценарію відповідно до розпізнаної ситуації на основі значення елементу $m_1=t$ та параметрів ініціалізації підсистеми: нормальний (оптимальний) або аномальний;

3) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_1=t$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині $SCTO$, тобто визначила сценарій як нормальний (оптимальний), то підсистема не виконує жодних додаткових дій;

4) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_1=t$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині $SCTL$, тобто визначила сценарій як аномальний (температура в приміщенні є низькою), то підсистема автоматично виконує підігрів повітря, для чого вона вмикає наявні обігрівальні прилади (котел, камін, кондиціонер в режимі обігріву, тощо); якщо відповідно до значення елементу $m_1=t$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині $SCTH$, тобто визначила сценарій як аномальний (температура в приміщенні є високою), то підсистема автоматично виконує охолодження повітря, для чого вона вмикає наявні охолоджувальні прилади (вентилятор, кондиціонер в режимі охолодження, тощо);

5) оцінювання прийнятих рішень – даний етап застосовується лише за наявності множини прийнятих рішень: наповнення даними матриці

невідповідностей (confusion matrix); визначення метрик *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificity*, *F1* за формулами (2.2)-(2.6) відповідно; формування висновку про якість методу у: $M \rightarrow Dn$ на основі отриманих значень метрик;

результуючі дані: рішення – дії, які виконуються кіберфізичною системою, у відповідь на розпізнану ситуацію: жодних додаткових дій за нормального сценарію; ввімкнення обігрівальних або охолоджувальних приладів за аномального сценарію.

Представлений метод забезпечує автономне, ситуаційно-залежне керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Ключова перевага методу полягає в його здатності до безперервного моніторингу температури приміщення t та дискретного розпізнавання ситуацій на основі комплексного контексту, що включає як поточне значення температури, так і параметри ініціалізації підсистеми (тип приміщення, поточна дата тощо). Це дозволяє системі класифікувати ситуацію як нормальну або аномальну.

Метод забезпечує гнучке та автоматичне прийняття рішень. У разі розпізнавання нормального сценарію, підсистема демонструє відмову від дії, не виконуючи жодних додаткових команд, що є оптимальним для енергозбереження та стабільності. При виявленні аномального сценарію, система автоматично генерує та імплементує рішення про ввімкнення відповідних обігрівальних або охолоджувальних приладів. Це дозволяє кіберфізичній системі швидко реагувати на відхилення від комфортних умов, задовольняючи вимоги до soft real-time систем.

Нарешті, метод інтегрує критично важливий цикл оцінювання прийнятих рішень, що є необхідним для саморефлексії та самовдосконалення системи. Отримані значення метрик *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificity* та *F1* дозволяють сформулювати об'єктивний висновок про якість розв'язувальної функції у. Таким чином, метод забезпечує не лише автономне керування, але й постійну верифікацію підсистеми.

Розглянемо приклад роботи розробленого методу прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Під час ініціалізації кіберфізичної системи «Розумний будинок» було виконання налаштування дати, поточна дата на момент розгляду – 20.11 ($d=20.11$), також користувачем задано тип приміщення «робочий кабінет» ($tr=4$).

Відбулось вимірювання температури повітря у приміщенні датчиком температури ($t=16^{\circ}$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою SCT . Оскільки $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=4$, то підсистема знайшла сценарій sct_9 , який належить підмножині $SCTL$, тобто визначила сценарій як аномальний (температура в приміщенні є низькою), після чого підсистема автоматично виконує підігрів повітря, для чого вона вмикає наявні обігрівальні прилади (котел та камін).

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання температури повітря у приміщенні датчиком температури ($t=19^{\circ}$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою SCT . Оскільки $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=4$, то підсистема знайшла сценарій sct_9 , який належить підмножині $SCTL$, тобто визначила сценарій як аномальний (температура в приміщенні є низькою), після чого слід виконати підігрів повітря, отже, наявні обігрівальні прилади (котел та камін) залишаються ввімкненими.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання температури повітря у приміщенні датчиком температури ($t=22^{\circ}$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою SCT . Оскільки $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=4$, то підсистема знайшла сценарій sct_4 , який належить підмножині $SCTO$, тобто визначила сценарій як нормальний (температура в приміщенні є оптимальною), отже, жодних додаткових дій (обігрів чи охолодження) на даний момент часу підсистема керування температурою виконувати не повинна, відтак відбувається вимкнення обігрівальних приладів.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання температури повітря у приміщенні датчиком температури ($t=21^{\circ}$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою SCT . Оскільки $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=4$, то підсистема знайшла сценарій sct_4 , який належить підмножині $SCTO$, тобто визначила сценарій як нормальний

(температура в приміщенні є оптимальною), отже, жодних додаткових дій (обігрів чи охолодження) на даний момент часу підсистема керування температурою виконувати не повинна.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання температури повітря у приміщенні датчиком температури ($t=20^{\circ}$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою *SCT*. Оскільки $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $20 \leq t \leq 24$ та $tr=4$, то підсистема знайшла сценарій sct_4 , який належить підмножині *SCTO*, тобто визначила сценарій як нормальний (температура в приміщенні є оптимальною), отже, жодних додаткових дій (обігрів чи охолодження) на даний момент часу підсистема керування температурою виконувати не повинна.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання температури повітря у приміщенні датчиком температури ($t=19^{\circ}$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування температурою *SCT*. Оскільки $15.10 \leq d \leq 14.04$ та $t < 20$ та $tr=4$, то підсистема знайшла сценарій sct_9 , який належить підмножині *SCTL*, тобто визначила сценарій як аномальний (температура в приміщенні є низькою), після чого підсистема автоматично виконує підігрів повітря, для чого вона вмикає наявні обігрівальні прилади (котел та камін).

Після того, як було зібрано статистику функціонування методу прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок» на 1000 вимірюваннях температури, було виконано оцінювання прийнятих рішень. Сформований масив із 1000 вимірювань є репрезентативною та збалансованою вибіркою, що охоплює різні експлуатаційні умови та часові періоди. Статистичні дані включають показники, зібрані протягом різних пір року (зимовий період для перевірки інтенсивного обігріву, літній – для кондиціонування, та перехідні сезони), що дозволило системі пройти апробацію в умовах широкого температурного діапазону та мінливої інсоляції. Окрім сезонної збалансованості, вибірка враховує динаміку добових циклів (день/ніч) та варіативність внутрішніх теплових навантажень, що виникають під час перебування мешканців у приміщенні.

Було наповнено даними матрицю невідповідностей (confusion matrix) – рис. 3.1.

<i>TP = 438</i>	<i>TN = 486</i>
<i>FP = 39</i>	<i>FN = 37</i>

Рис. 3.1. Матриця невідповідностей (confusion matrix) для методу прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

На основі отриманої матриці невідповідностей (confusion matrix) було визначено метрики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = \frac{438 + 486}{438 + 486 + 39 + 37} = 0.924;$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{438}{438 + 39} = 0.918;$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{438}{438 + 37} = 0.922;$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN} = \frac{486}{39 + 486} = 0.926;$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} = \frac{2 \cdot 0.918 \cdot 0.922}{0.918 + 0.922} = \frac{1.693}{1.84} = 0.92.$$

На основі отриманих значень метрик можна сформулювати висновок про достатню якість методу прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Результати функціонування методу прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок» довели, що розроблений метод передбачає розпізнавання ситуацій (оптимальна температура, низька температура, висока температура) та підтримку прийняття рішень щодо температурного режиму у житловому приміщенні певного типу (ввімкнення обігрівальних приладів, ввімкнення охолоджувальних приладів, жодних дій, тощо).

3.2. Метод прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [79, 83]

Керування відносною вологістю є другим за важливістю аспектом мікроклімату після температури і має критичну актуальність для кіберфізичної системи «Розумний будинок», оскільки безпосередньо впливає на здоров'я, довговічність конструкцій та енергоефективність. Вихід за межі оптимального діапазону вологості створює ризики: низька вологість спричиняє подразнення дихальних шляхів та слизових оболонок, тоді як надмірна вологість є ідеальним середовищем для розвитку плісняви, грибка та бактерій. На відміну від промислових систем, кіберфізична система «Розумний будинок» мусить оперувати в умовах високої невизначеності, спричиненої побутовою діяльністю людини (приготування їжі, прийняття душу) та постійними змінами зовнішнього середовища, що вимагає гнучкого, ситуаційно обумовленого реагування.

Актуальність керування вологістю також тісно пов'язана з енергоефективністю та запобіганням матеріальним збиткам. Неконтрольована висока вологість не тільки погіршує якість повітря, але й може призвести до руйнування оздоблювальних матеріалів та пошкодження електроніки.

Таким чином, розробка методів розпізнавання ситуацій для керування вологістю є актуальною задачею у сучасній комп'ютерній інженерії. Кіберфізична система повинна бути здатна до контекстно-залежного прийняття рішень у режимі *soft real-time*, щоб автоматично активувати осушувачі та зволожувачі, забезпечуючи постійне підтримання нормативного діапазону вологості без прямої команди користувача.

Метод прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок», розроблений на основі узагальненого методу прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», складається з таких кроків:

вхідні дані: вологість φ з датчика вологості (елемент m_2), яка вимірюється кожні 30 хвилин;

1) аналіз та інтерпретація вхідних даних та параметрів ініціалізації підсистеми;

2) розпізнавання ситуації – пошук сценарію відповідно до розпізнаної ситуації на основі значення елементу $m_2 = \varphi$ та параметрів ініціалізації підсистеми: нормальний (оптимальний) або аномальний;

3) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_2 = \varphi$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині *SCHO*, тобто визначила сценарій як нормальний (оптимальний), то підсистема не виконує жодних додаткових дій;

4) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_2 = \varphi$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині *SCHE*, тобто визначила сценарій як аномальний (відносна вологість в приміщенні є надлишковою), то підсистема автоматично виконує осушення повітря, для чого вона вмикає осушувач повітря; якщо відповідно до значення елементу $m_2 = \varphi$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині *SCHI*, тобто визначила сценарій як аномальний (відносна вологість в приміщенні є недостатньою), то підсистема автоматично виконує зволоження повітря, для чого вона вмикає зволожувач повітря;

5) оцінювання прийнятих рішень – даний етап застосовується лише за наявності множини прийнятих рішень: наповнення даними матриці невідповідностей (confusion matrix); визначення метрик *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificity*, *F1* за формулами (2.2)-(2.6) відповідно; формування висновку про якість методу $u: M \rightarrow Dn$ на основі отриманих значень метрик;

результуючі дані: рішення – дії, які виконуються кіберфізичною системою, у відповідь на розпізнану ситуацію: жодних додаткових дій за нормального сценарію; ввімкнення осушувача або зволожувача за аномального сценарію.

Представлений метод забезпечує автономне, ситуаційно-орієнтоване керування відносною вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок», реалізуючи ключовий аспект мікроклімату, що безпосередньо впливає на здоров'я та стан приміщення. Суть методу полягає у безперервному моніторингу вологості

та її контекстному аналізі з урахуванням параметрів ініціалізації підсистеми (тип приміщення тощо). Це дозволяє системі класифікувати поточний стан як нормальний або аномальний.

Метод забезпечує пряме та гнучке автоматичне прийняття рішень щодо активації відповідних актуаторів. У випадку нормального сценарію, підсистема зберігає відсутність дії, оптимізуючи енергоспоживання. При виявленні аномальної ситуації, система автоматично генерує та імплементує рішення про ввімкнення осушувача повітря (при надлишковій вологості) або зволожувача повітря (при недостатній вологості). Це забезпечує швидке та цілеспрямоване реагування на відхилення від комфортного діапазону, що є критично важливим для запобігання розвитку плісняви або дискомфорту дихальних шляхів.

Крім того, метод інтегрує необхідний цикл оцінювання прийнятих рішень, що є основою для саморефлексії та підвищення якості роботи системи. Шляхом наповнення матриці невідповідностей (*confusion matrix*) та розрахунку метрик *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificity* та *F1*, метод надає методологічну базу для об'єктивної верифікації якості розв'язувальної функції у. Таким чином, метод забезпечує не лише автономне коригування вологості в межах нормативних показників, але й постійне самовдосконалення у цій сфері мікроклімату.

Розглянемо приклади роботи розробленого методу прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Для прикладу¹ під час ініціалізації кіберфізичної системи «Розумний будинок» користувач задав тип приміщення «спальня» ($tr=3$).

Відбулось вимірювання відносної вологості повітря у приміщенні датчиком вологості ($\varphi=70\%$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю *SCH*. Оскільки $tr=3$ та $\varphi>50$, то підсистема знайшла сценарій sch_3 , який належить підмножині *SCHE*, тобто визначила сценарій як аномальний (відносна вологість повітря в приміщенні є надлишковою), після чого підсистема повинна виконати осушення повітря, для чого вона вмикає осушувач повітря.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання відносної вологості повітря у приміщенні датчиком вологості ($\varphi=62\%$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю SCH . Оскільки $tr=3$ та $\varphi>50$, то підсистема знайшла сценарій sch_3 , який належить підмножині $SCHE$, тобто визначила сценарій як аномальний (відносна вологість повітря в приміщенні є надлишковою), після чого підсистема повинна виконати осушення повітря, тому осушувач повітря залишається ввімкненим.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання відносної вологості повітря у приміщенні датчиком вологості ($\varphi=54\%$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю SCH . Оскільки $tr=3$ та $\varphi>50$, то підсистема знайшла сценарій sch_3 , який належить підмножині $SCHE$, тобто визначила сценарій як аномальний (відносна вологість повітря в приміщенні є надлишковою), після чого підсистема повинна виконати осушення повітря, тому осушувач повітря залишається ввімкненим.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання відносної вологості повітря у приміщенні датчиком вологості ($\varphi=46\%$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю SCH . Оскільки $tr=3$ та $30\leq\varphi\leq50$, то підсистема знайшла сценарій sch_1 , який належить підмножині $SCHO$, тобто визначила сценарій як нормальний (відносна вологість повітря в приміщенні є нормальною), відтак жодних додаткових дій на даний момент часу більше виконувати непотрібно, тому осушувач повітря вимикається.

Для прикладу2 під час ініціалізації кіберфізичної системи «Розумний будинок» користувач задав тип приміщення «кімната, де живе немовля» ($tr=9$).

Відбулось вимірювання відносної вологості повітря у приміщенні датчиком вологості ($\varphi=40\%$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю SCH . Оскільки $tr=9$ та $\varphi<45$, то підсистема знайшла сценарій sch_9 , який належить підмножині $SCHI$, тобто визначила сценарій як аномальний (відносна вологість повітря в приміщенні є недостатньою), після чого підсистема повинна виконати зволоження повітря, для чого вона вмикає зволожувач повітря.

Через 30 хвилин знову відбулось вимірювання відносної вологості повітря у приміщенні датчиком вологості ($\varphi=49\%$). Далі відбувся пошук сценарію в множині можливих альтернатив (сценаріїв) для керування вологістю SCH . Оскільки $tr=9$ та $45 \leq \varphi \leq 55$, то підсистема знайшла сценарій sch_7 , який належить підмножині $SCHO$, тобто визначила сценарій як нормальний (відносна вологість повітря в приміщенні є нормальною), відтак жодних додаткових дій на даний момент часу більше виконувати непотрібно, тому зволожувач повітря вимикається.

Після того, як було зібрано статистику функціонування методу прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок» на 1200 вимірюваннях вологості, було виконано оцінювання прийнятих рішень. Такий масив вимірювань є збалансованою вибіркою, що охоплює широкий спектр кліматичних сценаріїв та режимів експлуатації житла. Статистика включає дані, зібрані у різні пори року, що є критично важливим через суттєві відмінності у стані вологості повітря – від критично низької вологості взимку через роботу систем опалення до надлишкової вологості влітку та у дощові періоди. Крім сезонності, при формуванні вибірки враховувався різний час доби та специфіка побутової активності мешканців, яка є основним джерелом недетермінованих змін вологості. Масив даних містить показники, зафіксовані під час приготування їжі, гігієнічних процедур та нічного відпочинку.

Було наповнено даними матрицю невідповідностей (confusion matrix) – рис. 3.2.

$TP = 590$	$TN = 579$
$FP = 19$	$FN = 12$

Рис. 3.2. Матриця невідповідностей (confusion matrix) для методу прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

На основі отриманої матриці невідповідностей (confusion matrix) було визначено метрики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = \frac{590 + 579}{590 + 579 + 19 + 12} = 0.974;$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{590}{590 + 19} = 0.969;$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{590}{590 + 12} = 0.98;$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN} = \frac{579}{19 + 579} = 0.968;$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} = \frac{2 \cdot 0.969 \cdot 0.98}{0.969 + 0.98} = \frac{1.899}{1.949} = 0.974.$$

На основі отриманих значень метрик можна сформулювати висновок про достатню якість методу прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Виконані експерименти довели, що розроблений метод прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок» передбачає розпізнавання ситуацій (нормальна вологість повітря, недостатня вологість повітря, надлишкова вологість повітря) та прийняття рішень щодо концентрації вологи в повітряному середовищі житлового приміщення певного типу (ввімкнення осушувача, ввімкнення зволожувача, жодних дій тощо).

3.3. Метод прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [78, 82]

Керування освітленням є важливим аспектом кіберфізичної системи «Розумний будинок», оскільки безпосередньо впливає на енергоефективність, візуальний комфорт та біологічний ритм мешканців. Застарілі системи, що ґрунтуються на простих вимикачах чи датчиках руху, є неефективними і не здатні адаптуватися до комплексного контексту приміщення. Актуальність автоматичного керування зростає, оскільки система повинна не лише вмикати світло, але й забезпечувати узгодження між штучним та денним освітленням, автоматично регулюючи рівень яскравості залежно від інтенсивності природного світла, що

потрапляє через вікна. Такий ситуаційний аналіз запобігає надмірному споживанню електроенергії та забезпечує постійне підтримання нормативних рівнів освітленості, необхідних для комфортної діяльності.

Крім енергозбереження, автоматичне керування освітленням має прямий вплив на якість життя та когнітивні функції. Сучасна кіберфізична система має виходити за межі простої автоматизації, маючи здатність до контекстно-залежного прийняття рішень. Це вимагає, щоб система обробляла гетерогенні сенсорні дані (освітленість, час доби, режим активності користувача, тип приміщення), що неможливо реалізувати за допомогою жорстко запрограмованої логіки.

Отже, завдання керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок» є актуальним науковим викликом, що вимагає розробки методів, здатних до саморефлексії та пріоритетизації цілей. Система має працювати в soft real-time режимі, щоб оперативно реагувати на раптові зміни освітлення (наприклад, хмара закрила сонце), щоб стати ключовою ланкою в забезпеченні цілісного, адаптивного та енергоефективного житлового середовища.

Метод прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок», розроблений на основі узагальненого методу прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», складається з таких кроків (запускається на виконання або кожні 5 хвилин, якщо користувач не змінює режиму освітлення, оскільки підсистема повинна постійно реагувати на зміни в освітленні, або одразу при зміні режиму освітлення користувачем; для першої ітерації підсистема вимикає все штучне освітлення і вимірює світловий потік тільки для природного освітлення):

вхідні дані: світловий потік Φ з датчика освітленості (елемент m_3), яка вимірюється кожні 5 хвилин або одразу при зміні режиму освітлення користувачем;

1) аналіз та інтерпретація вхідних даних та параметрів ініціалізації підсистеми;

2) розпізнавання ситуації – пошук сценарію відповідно до розпізнаної ситуації на основі значення елементу $m_3 = \Phi$ та параметрів ініціалізації підсистеми: нормальний (оптимальний) або аномальний;

3) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_3=\Phi$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині *SCPO*, тобто визначила сценарій як нормальний (оптимальний), то підсистема не виконує жодних додаткових дій;

4) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_3=\Phi$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині *SCPIs*, тобто визначила сценарій як аномальний (освітлення в приміщенні є недостатнім), то:

4.1) в даний момент часу освітлення недостатньо, відтак підсистема повинна виконати додавання світлового потоку; якщо $asd=1$, то перевірити положення жалюзі (якщо жалюзі повністю відкриті, то у змінну *bp* присвоюється 0; якщо жалюзі повністю закриті, то у змінну *bp* присвоюється 1), інакше, якщо $asd=2$, то перевірити положення ролет (якщо ролети повністю відкриті, то у змінну *rsp* присвоюється 0; якщо ролети повністю закриті, то у змінну *rsp* присвоюється 1), інакше, якщо $asd=3$, то перевірити положення штор (якщо штори повністю відкриті, то у змінну *cp* присвоюється 0; якщо штори повністю закриті, то у змінну *cp* присвоюється 1);

4.2) якщо $asd=0$, то виконати перехід на крок 4.5;

4.3) якщо $asd=1$ та $bp=0$, то виконати перехід на крок 4.5, інакше, якщо $asd=2$ та $rsp=0$, то виконати перехід на крок 4.5, інакше, якщо $asd=3$ та $cp=0$, то виконати перехід на крок 4.5;

4.4) якщо $asd=1$ та $bp \neq 0$, то виконати поворот жалюзі на відкриття на 1 градус та виконати вимірювання світлового потоку і перейти на крок 1, інакше, якщо $asd=2$ та $rsp \neq 0$, то виконати підняття ролет на відкриття на 1 см та виконати вимірювання світлового потоку і перейти на крок 1, інакше, якщо $asd=3$ та $cp \neq 0$, то виконати розсування штор на відкриття на 1 см кожна та виконати вимірювання світлового потоку і перейти на крок 1;

4.5) ввімкнення додаткових ламп: відбувається пошук сценарію відповідно до значень змінних *rlm*, *trl*, *tr*, *chi*, *S*, *Pl* та Φ у множині *SCAL* (якщо $trl=1$, то пошук сценарію відбувається в підмножині *SCALLED*; якщо $trl=2$, то пошук сценарію

відбувається в підмножині *SCALES*; якщо $trl=3$, то пошук сценарію відбувається в підмножині *SCALH*; якщо $trl=4$, то пошук сценарію відбувається в підмножині *SCALI*); якщо розрахована згідно із знайденим сценарієм кількість додаткових ламп (k) є доступною ($k \leq ak$), то підсистема вмикає k ламп, інакше видає повідомлення про неможливість забезпечення необхідного рівня освітлення наявними лампами та рекомендацію про додавання ($k-ak$) ламп у даному приміщенні;

5) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_3=\Phi$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині *SCPE*, тобто визначила сценарій як аномальний (освітлення в приміщенні є надлишковим), то:

5.1) в даний момент часу наявне надлишкове освітлення, відтак підсистема повинна виконати зменшення світлового потоку; якщо $asd=1$, то перевірити положення жалюзі (якщо жалюзі повністю відкриті, то у змінну bp присвоюється 0; якщо жалюзі повністю закриті, то у змінну bp присвоюється 1), інакше, якщо $asd=2$, то перевірити положення ролет (якщо роleti повністю відкриті, то у змінну rsp присвоюється 0; якщо роleti повністю закриті, то у змінну rsp присвоюється 1), інакше, якщо $asd=3$, то перевірити положення штор (якщо штори повністю відкриті, то у змінну cp присвоюється 0; якщо штори повністю закриті, то у змінну cp присвоюється 1);

5.2) якщо $asd=0$, то виконати перехід на крок 5.5;

5.3) якщо $asd=1$ та $bp=1$, то виконати перехід на крок 5.5, інакше, якщо $asd=2$ та $rsp=1$, то виконати перехід на крок 5.5, інакше, якщо $asd=3$ та $cp=1$, то виконати перехід на крок 5.5;

5.4) якщо $asd=1$ та $bp \neq 1$, то виконати поворот жалюзі на закриття на 1 градус та вимірювання світлового потоку і перейти на крок 1, інакше, якщо $asd=2$ та $rsp \neq 1$, то виконати опускання ролет на відкриття на 1 см та вимірювання світлового потоку і перейти на крок 1, інакше, якщо $asd=3$ та $cp \neq 1$, то виконати зсування штор на закриття на 1 см кожна та вимірювання світлового потоку і перейти на крок 1;

5.5) вимкнення зайвих ламп: відбувається пошук сценарію відповідно до значень змінних rlm , trl , tr , chi , S , Pl та Φ у множині *SCOFFL* (якщо $trl=1$, то пошук

сценарію відбувається в підмножині *SCOFFLLED*; якщо $trl=2$, то пошук сценарію відбувається в підмножині *SCOFFLES*; якщо $trl=3$, то пошук сценарію відбувається в підмножині *SCOFFLH*; якщо $trl=4$, то пошук сценарію відбувається в підмножині *SCOFFLI*); якщо розрахована згідно із знайденим сценарієм кількість ламп, які необхідно вимкнути ($k1$), є доступною ($k1 \leq ak$), то підсистема вимикає $k1$ ламп, інакше видає повідомлення про неможливість забезпечення необхідного рівня освітлення наявними засобами та рекомендацію про додавання додаткових засобів затінення у даному приміщенні;

б) оцінювання прийнятих рішень – даний етап застосовується лише за наявності множини прийнятих рішень: наповнення даними матриці невідповідностей (confusion matrix); визначення метрик *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificty*, *F1* за формулами (2.2)-(2.6) відповідно; формування висновку про якість методу у: $M \rightarrow Dn$ на основі отриманих значень метрик;

результуючі дані: рішення – дії, які виконуються кіберфізичною системою, у відповідь на розпізнану ситуацію: жодних додаткових дій за нормального сценарію; відкриття/закриття засобів затінення, ввімкнення/вимкнення необхідної кількості ламп за аномального сценарію.

Представлений метод забезпечує адаптивне та енергоефективне керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок», працюючи з високою частотою (кожні 5 хвилин або миттєво при зміні режиму користувача) для задоволення вимог до soft real-time систем. Його унікальність полягає у реалізації комплексної, багатоетапної стратегії розпізнавання ситуацій та прийняття рішень, що охоплює як природне, так і штучне освітлення з метою узгодження дій.

На першому етапі метод виконує ситуаційний аналіз на основі вимірюного світлового потоку та параметрів ініціалізації (тип приміщення, висота стелі приміщення, площа приміщення, тип використовуваних у приміщенні ламп, потужність однієї використовуваної лампи, кількість використовуваних у приміщенні ламп, наявні у приміщенні засоби затінення, режим активності користувача – стартовий режим освітлення приміщення тощо), класифікуючи ситуацію як нормальну або аномальну.

Ключовою перевагою методу є пріоритетне керування денним світлом – при недостатньому освітленні підсистема спочатку намагається відкрити наявні засоби затінення (жалюзі, ролети, штори) з ітераційним кроком (1 градус або 1 см), повторно вимірюючи світловий потік та мінімізуючи використання штучної енергії. Аналогічно, при надлишковому освітленні система спочатку намагається закрити засоби затінення. Лише після вичерпання можливостей керування денним світлом, метод переходить до автоматичного керування штучним освітленням. Він використовує складний пошук сценаріїв для точного розрахунку кількості ламп, які необхідно ввімкнути чи вимкнути. Це дозволяє системі генерувати рішення з максимальною енергоефективністю та контекстною точністю, забезпечуючи лише необхідний рівень освітленості. У випадках, коли бажаний рівень не може бути досягнутий наявними засобами, система видає рекомендацію користувачеві про необхідність додавання або затінення.

Нарешті, метод включає методологічний етап оцінювання прийнятих рішень, що забезпечує саморефлексію та верифікацію якості роботи розв'язувальної функції. Таким чином, цей метод забезпечує узгодженість дій і високу надійність у динамічному житловому середовищі.

Розглянемо приклади роботи розробленого методу прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Для прикладу¹ користувач виконав ініціалізацію кіберфізичної системи «Розумний будинок»: обрав тип приміщення – «робочий кабінет» ($tr=4$), обрав інтервал висоти стелі приміщення – «2.5-2.7 м» ($chi=1$), ввів значення площі приміщення – «18 м²» ($S=18$), обрав тип використовуваних у приміщенні ламп – «галогенні» ($trl=3$), ввів значення потужності однієї використовуваної лампи – «50 Вт» ($Pl=50$), ввів кількість використовуваних у приміщенні ламп – «8» ($ak=8$), обрав наявні у приміщенні засоби затінення – «не використовується жодного засобу» ($asd=0$), обрав стартовий режим освітлення приміщення – «активність» ($rlm=1$).

Датчиком освітленості було виконано вимірювання світлового потоку при наявному природному освітленні ($\Phi=1900$ люменів). Відбувся пошук сценарію –

оскільки $rlm=1$, $tr=4$, $chi=1$, $S=18$ та $\Phi=1900$, то обрано сценарій з підмножини *SCPIS*: scp_{63} – якщо $rlm=1$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $\Phi < 300 * S$ ($1900 < 5400$), то наявного освітлення недостатньо. Згідно із 4.1 формується рішення, що в даний момент часу освітлення недостатньо, відтак підсистема повинна виконати додавання світлового потоку. Згідно із 4.2, оскільки $asd=0$, то виконується перехід на крок 4.5. Згідно із 4.5 відбувається ввімкнення додаткових ламп: відбувається пошук сценарію – оскільки $rlm=1$, $trl=3$, $tr=4$, $chi=1$, $S=18$, $Pl=50$ та $\Phi=1900$, то обрано сценарій з підмножини *SCALH*: $scal_{93}$ – якщо $rlm=1$ та $trl=3$ та $tr=4$ та $chi=1$ та $(\Phi/15) < (20 * S)$ ($126.67 < 360$), то $k = \left\lceil \frac{20 * S - \Phi / 15}{Pl} \right\rceil$. Тоді $k = \left\lceil \frac{20 * 18 - 1900 / 15}{50} \right\rceil = 5$. Оскільки розрахована згідно із знайденим сценарієм кількість додаткових ламп ($k=5$) є доступною ($5 < 8$), то підсистема ввімкнула 5 ламп.

Для прикладу2 користувач виконав ініціалізацію кіберфізичної системи «Розумний будинок»: обрав тип приміщення – «спальня» ($tr=3$), обрав інтервал висоти стелі приміщення – «2.5-2.7 м» ($chi=1$), ввів значення площі приміщення – «25 м²» ($S=25$), обрав тип використовуваних у приміщенні ламп – «світлодіодні» ($trl=1$), ввів значення потужності однієї використовуваної лампи – «10 Вт» ($Pl=10$), ввів кількість використовуваних у приміщенні ламп – «10» ($ak=10$), обрав наявні у приміщенні засоби затінення – «жалюзі» ($asd=1$), обрав стартовий режим освітлення приміщення – «релакс» ($rlm=2$).

Датчиком освітленості було виконано вимірювання датчиками підсистеми світлового потоку при наявному природному освітленні ($\Phi=300$ люменів). Оскільки $asd=1$, то перевіряється положення жалюзі (оскільки жалюзі повністю закриті, то $bp=1$). Далі відбувається пошук сценарію – оскільки $rlm=2$, $tr=3$, $chi=1$, $S=25$ та $\Phi=300$, то обрано сценарій з підмножини *SCPIS*: scp_{149} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi < 100 * S$ ($300 < 2500$), то наявного освітлення недостатньо. Згідно із 4.1 формується рішення, що в даний момент часу освітлення недостатньо, відтак підсистема повинна виконати додавання світлового потоку. Згідно із 4.4, оскільки $asd=1$ та $bp \neq 0$, то виконується поворот жалюзі на відкриття на 1 градус та перехід на крок 1. Підсистема виконувала цей цикл до повного відкриття жалюзі.

При досягненні повного відкриття жалюзі ($bp=0$) вимірний світловий потік склав 2300 люменів ($\Phi=2300$ люменів). Оскільки $asd=1$, то перевіряється положення жалюзі (оскільки жалюзі повністю відкриті, то $bp=0$). Відбувається пошук сценарію – оскільки $rlm=2$, $tr=3$, $chi=1$, $S=25$ та $\Phi=300$, то обрано сценарій з підмножини *SCPIS*: scp_{149} – якщо $rlm=2$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $\Phi < 100 * S$ ($2300 < 2500$), то наявного освітлення недостатньо. Згідно із 4.1 формується рішення, що в даний момент часу освітлення недостатньо, відтак підсистема повинна виконати додавання світлового потоку. Оскільки $asd \neq 0$, то на кроці 4.2 методу не відбувається жодних дій. Згідно із 4.3, оскільки $asd=1$ та $bp=0$, то виконується перехід на крок 4.5. Згідно із 4.5 відбувається ввімкнення додаткових ламп: відбувається пошук сценарію – оскільки $rlm=2$, $trl=1$, $tr=3$, $chi=1$, $S=25$, $Pl=10$ та $\Phi=2300$, то обрано сценарій з підмножини *SCALLED*: $scal_{29}$ – якщо $rlm=2$ та $trl=1$ та $tr=3$ та $chi=1$ та $(\Phi/75) < (1.335 * S)$ ($30.67 < 33.38$), то $k = \left\lceil \frac{1.335 * S - \Phi/75}{Pl} \right\rceil$. Тоді $k = \left\lceil \frac{1.335 * 25 - 2300/75}{10} \right\rceil = 1$. Оскільки розрахована згідно із знайденим сценарієм кількість додаткових ламп ($k=1$) є доступною ($1 < 10$), то підсистема ввімкнула додатково 1 лампу.

Після того, як було зібрано статистику функціонування методу прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок» на 1500 вимірюваннях світлового потоку, було виконано оцінювання прийнятих рішень. Отриманий масив з 1500 вимірювань є збалансованою вибіркою, що враховує динаміку природної інсоляції протягом різних пір року. Це дозволило перевірити роботу підсистеми як в умовах довгих світлових днів влітку з високою інтенсивністю природного потоку, так і в зимовий період, що характеризується дефіцитом денного світла та потребою у тривалій роботі штучного освітлення. Завдяки такому підходу система пройшла апробацію в широкому діапазоні вхідних даних, що забезпечило об'єктивність розрахованих метрик для сценаріїв як з використанням засобів затінення, так і з активацією різних груп ламп. Крім сезонності, особлива увага приділялася добовій збалансованості та варіативності погодних умов, зокрема зміні хмарності, що викликає різкі флуктуації освітленості

в приміщенні. Масив даних включає вимірювання, зроблені у ранкові, денні, сутінкові та нічні години, а також при різних станах неба – від ясного до суцільної хмарності. Це дозволило наповнити матрицю невідповідностей (confusion matrix) даними про реакцію системи на складні ситуації, де необхідно було узгоджувати положення жалюзі з потужністю штучних джерел світла.

Було наповнено даними матрицю невідповідностей (confusion matrix) – рис. 3.3.

$TP = 700$	$TN = 751$
$FP = 28$	$FN = 21$

Рис. 3.3. Матриця невідповідностей (confusion matrix) для методу прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

На основі отриманої матриці невідповідностей (confusion matrix) було визначено метрики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = \frac{700 + 751}{700 + 751 + 28 + 21} = 0.967;$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{700}{700 + 28} = 0.962;$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{700}{700 + 21} = 0.971;$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN} = \frac{751}{28 + 751} = 0.964;$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} = \frac{2 \cdot 0.962 \cdot 0.971}{0.962 + 0.971} = \frac{1.868}{1.933} = 0.966.$$

На основі отриманих значень метрик можна сформулювати висновок про достатню якість методу прийняття рішень щодо керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Виконані експерименти довели, що розроблений метод прийняття рішень щодо керування освітленням житла кіберфізичної системи «Розумний будинок»

передбачає розпізнавання різних ситуацій у світловому сценарії (достатній світловий потік, недостатній світловий потік, надлишковий світловий потік – згідно із діючими нормами освітлення) та прийняття рішень щодо освітлення житла згідно із заданим користувачем режимом освітлення (вікдриття/закриття засобів затінення, ввімкнення/вимкнення ламп – в залежності від розпізнаної ситуації).

3.4. Метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [80, 84]

Керування гучністю мультимедіа є високоактуальним, хоча і часто недооціненим, завданням у кіберфізичній системі «Розумний будинок», оскільки воно безпосередньо стосується комфорту, соціальної інтеграції та дотримання санітарних норм щодо шуму. На відміну від простих пультів дистанційного керування, кіберфізична система має функціонувати як когнітивний агент, здатний до ситуаційної обумовленості реакцій. Система повинна автоматично регулювати гучність не лише відповідно до побажань користувача, але й на основі зовнішнього контексту – наприклад, знизити гучність, якщо настав нічний час, а рівень звуку перевищує встановлені нормативами гранично допустимі значення шуму. Таке гнучке реагування неможливе без комплексного ситуаційного аналізу рівня шуму та діяльності користувача. Таким чином, розроблення методів розпізнавання ситуацій для керування гучністю мультимедіа є актуальною для забезпечення цілісного комфорту та функціональності кіберфізичної системи.

Метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», розроблений на основі узагальненого методу прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», складається з таких кроків:

вхідні дані: рівень гучності звуку τ з датчика шуму (елемент m_4), яка вимірюється щохвилини;

1) аналіз та інтерпретація вхідних даних та параметрів ініціалізації підсистеми;

2) розпізнавання ситуації – пошук сценарію відповідно до розпізнаної ситуації на основі значення елементу $m_4 = \tau$ та параметрів ініціалізації підсистеми: нормальний (оптимальний) або аномальний;

3) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_4 = \tau$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині $SCVO$, тобто визначила сценарій як нормальний (оптимальний), то підсистема не виконує жодних додаткових дій;

4) генерація та імплементація рішення – якщо відповідно до значення елементу $m_4 = \tau$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині $SCVH$, тобто визначила сценарій як аномальний (гучність звуку у приміщенні є високою), то підсистема автоматично виконує попередження користувача; якщо відповідно до значення елементу $m_4 = \tau$ та параметрів ініціалізації підсистема відшукала сценарій у підмножині $SCVUAH$, тобто визначила сценарій як аномальний (гучність звуку у приміщенні є неприпустимо високою), то підсистема автоматично зменшує гучність звуку мультимедійних пристроїв у приміщенні до максимально припустимого для такого приміщення рівня;

5) оцінювання прийнятих рішень – даний етап застосовується лише за наявності множини прийнятих рішень: наповнення даними матриці невідповідностей (confusion matrix); визначення метрик *Accuracy*, *Precision*, *Recall*, *Specificity*, *F1* за формулами (2.2)-(2.6) відповідно; формування висновку про якість методу у: $M \rightarrow Dn$ на основі отриманих значень метрик;

результуючі дані: рішення – дії, які виконуються кіберфізичною системою, у відповідь на розпізнану ситуацію: жодних додаткових дій за нормального сценарію; попередження користувача або автоматичне зменшення гучності звуку мультимедійних пристроїв за аномального сценарію.

Представлений метод забезпечує автономне, ситуаційно-залежне керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», реалізуючи важливий аспект комфорту та дотримання санітарних норм. Суть методу полягає у моніторингу рівня гучності звуку щохвилини та його контекстному аналізі з урахуванням параметрів ініціалізації підсистеми (тип приміщення, час доби тощо).

Це дозволяє системі класифікувати ситуацію як нормальну, що веде до відсутності дії, або як аномальну з різним ступенем критичності. Метод генерує гнучке автоматичне реагування на аномалії. У разі виявлення сценарію високої гучності, система спочатку виконує попередження користувача, надаючи йому можливість самостійно скоригувати ситуацію. Це відображає концепцію людиноцентричних кіберфізичних систем, які поважають суб'єктність користувача. Однак, у критичному випадку, коли розпізнається сценарій неприпустимо високої гучності, система переходить до жорсткого автоматичного прийняття рішень, негайно зменшуючи гучність мультимедійних пристроїв до максимально припустимого рівня для даного приміщення. Цей механізм забезпечує дотримання санітарних норм і запобігає шумовому забрудненню, виконуючи вимоги до soft real-time систем. Нарешті, метод інтегрує необхідний цикл оцінювання прийнятих рішень через використання матриці невідповідностей та метрик для об'єктивної верифікації якості розв'язувальної функції. Таким чином, метод забезпечує не лише автономне керування гучністю, але й постійне самовдосконалення системи.

Розглянемо приклад роботи розробленого методу прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Під час експерименту, користувач виконав налаштування поточного часу ($tm=11.12$) та обрав тип приміщення «робочий кабінет» ($tr=4$). Далі почало відбуватись щохвилинне автоматичне вимірювання рівня гучності звуку у приміщенні датчиком шуму. Отримані значення рівня шуму протягом 10 хвилин таких вимірювань, а також дії системи «Розумний будинок» в кожний момент часу предствлені нижче:

- 1) час вимірювання – 11.12, рівень шуму – 37 дБА, реакція підсистеми – жодних додаткових дій;
- 2) час вимірювання – 11.13, рівень шуму – 38 дБА, реакція підсистеми – жодних додаткових дій;
- 3) час вимірювання – 11.14, рівень шуму – 40 дБА, реакція підсистеми – жодних додаткових дій;

- 4) час вимірювання – 11.15, рівень шуму – 43 дБА, реакція підсистеми – попередження користувача;
- 5) час вимірювання – 11.16, рівень шуму – 43 дБА, реакція підсистеми – попередження користувача;
- 6) час вимірювання – 11.17, рівень шуму – 47 дБА, реакція підсистеми – попередження користувача;
- 7) час вимірювання – 11.18, рівень шуму – 47 дБА, реакція підсистеми – попередження користувача;
- 8) час вимірювання – 11.19, рівень шуму – 57 дБА, реакція підсистеми – автоматичне зменшення гучності звуку мультимедійних пристроїв у робочому кабінеті до 55 дБА через неприпустимо високу гучність звуку;
- 9) час вимірювання – 11.20, рівень шуму – 55 дБА, реакція підсистеми – попередження користувача;
- 10) час вимірювання – 11.21, рівень шуму – 50 дБА, реакція підсистеми – попередження користувача.

Проведений десятихвилинний експеримент у системі «Розумний будинок» з керування гучністю мультимедіа в робочому кабінеті дозволив чітко проілюструвати роботу розробленого методу прийняття рішень на основі нормативних показників. Згідно з встановленими нормами для робочого кабінету, які діють цілодобово, оптимальний рівень шуму становить 40 дБА, а максимально допустимий рівень – 55 дБА. На початкових етапах (з 11:12 по 11:14), коли рівень шуму (τ) коливався від 37 дБА до 40 дБА, система класифікувала ситуацію як сценарій з підмножини SCVO і не виконувала жодних додаткових дій, що свідчить про коректне визначення комфортного рівня. Ситуація змінилася з 11:15, коли рівень шуму піднявся до 43 дБА і залишався високим (до 47 дБА) до 11:18. У ці моменти система перейшла до сценарію з підмножини SCVN, активувавши попередження користувача. Це відповідає логіці методу – рівень шуму вже перевищує оптимальні 40 дБА, але ще не досяг максимально допустимих 55 дБА, тому система інформує користувача, перш ніж вживати рішучих заходів. Ключовий момент настав о 11:19, коли рівень шуму різко зріс до 57 дБА. Оскільки це

перевищує максимально допустимий рівень 55 дБА, система автоматично перейшла до сценарію з підмножини *SCVUAN* і негайно виконала примусове зниження гучності мультимедійних пристроїв до безпечного рівня 55 дБА. Це доводить ефективність методу у забезпеченні основної мети – недопущення перевищення норм гучності. Після автоматичного зниження гучності, система повернулася до сценарію попередження користувача, що зумовлено тим, що 55 дБА є максимальною, а не оптимальною нормою, а 50 дБА все ще значно перевищує оптимальний рівень 40 дБА, що вимагає уваги користувача.

Після того, як було зібрано статистику функціонування методу прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» на 5000 вимірюваннях гучності, було виконано оцінювання прийнятих рішень. Сформована вибірка з 5000 вимірювань характеризується високим ступенем збалансованості за різними часовими та ситуативними параметрами. Статистика охоплює дані, зібрані у різний час доби, що є критично важливим для перевірки дотримання диференційованих санітарних норм шуму для денного та нічного періодів. Масив даних включає як тихі нічні інтервали, де система повинна проявляти підвищену чутливість до перевищення порогів, так і активні денні години, що дозволило системі пройти апробацію в умовах різного фонового акустичного навантаження. Крім добової циклічності, при формуванні вибірки враховувалася варіативність побутових сценаріїв протягом різних пір року та днів тижня, що відображає різноманітність соціальної активності мешканців – від спокійного відпочинку до гучних святкових подій або від нормальної до гучної роботи мультимедіа.

Було наповнено даними матрицю невідповідностей (confusion matrix) – рис. 3.4.

<i>TP = 2389</i>	<i>TN = 2511</i>
<i>FP = 59</i>	<i>FN = 41</i>

Рис. 3.4. Матриця невідповідностей (confusion matrix) для методу прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

На основі отриманої матриці невідповідностей (confusion matrix) було визначено метрики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = \frac{2389 + 2511}{2389 + 2511 + 59 + 41} = 0.98;$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{2389}{2389 + 59} = 0.976;$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{2389}{2389 + 41} = 0.983;$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN} = \frac{2511}{59 + 2511} = 0.977;$$

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} = \frac{2 \cdot 0.976 \cdot 0.983}{0.976 + 0.983} = \frac{1.919}{1.959} = 0.98.$$

На основі отриманих значень метрик можна сформулювати висновок про достатню якість методу прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

Результати експерименту підтверджують, що розроблений метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» успішно забезпечує повністю автоматичне керування гучністю та адекватно реагує на зміни рівня шуму відповідно до заданих сценаріїв та санітарних норм для робочого кабінету. Система точно розпізнає три стани (оптимальний, високий і неприпустимо високий рівні гучності мультимедіа) і вживає відповідних заходів – від ігнорування в межах комфорту до попередження та примусового коригування при порушенні нормативів.

3.5. Висновки

Розроблений метод прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок» дозволяє оцінити наявні температурні параметри для подальшого автоматичного прийняття рішень в приміщеннях різного типу, а також забезпечує комфортну та оптимальну (з врахуванням будівельних та санітарно-гігієнічних норм) температуру у відповідному приміщенні.

Результати функціювання методу прийняття рішень щодо керування температурою у кіберфізичній системі «Розумний будинок» довели, що розроблений метод передбачає розпізнавання ситуацій (оптимальна температура, низька температура, висока температура) та підтримку прийняття рішень щодо температурного режиму у житловому приміщенні певного типу (ввімкнення обігрівальних приладів, ввімкнення охолоджувальних приладів, жодних дій, тощо).

Розроблений метод прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок» забезпечує комфортну (з врахуванням будівельних та санітарно-гігієнічних норм) концентрацію вологи в повітряному середовищі відповідного житлового приміщення.

Виконані експерименти довели, що розроблений метод прийняття рішень щодо керування вологістю у кіберфізичній системі «Розумний будинок» передбачає розпізнавання ситуацій (нормальна вологість повітря, недостатня вологість повітря, надлишкова вологість повітря) та прийняття рішень щодо концентрації вологи в повітряному середовищі житлового приміщення певного типу (ввімкнення осушувача, ввімкнення зволожувача, жодних дій тощо).

Розроблений метод прийняття рішень щодо керування освітленням житла кіберфізичної системи «Розумний будинок» забезпечує користувачу підсистеми можливість швидкого та зручного налаштування необхідного режиму освітлення, використовуючи засоби затінення та лампи штучного освітлення.

Виконані експерименти довели, що розроблений метод прийняття рішень щодо керування освітленням житла кіберфізичної системи «Розумний будинок» передбачає розпізнавання різних ситуацій у світловому сценарії (достатній світловий потік, недостатній світловий потік, надлишковий світловий потік – згідно із діючими нормами освітлення) та прийняття рішень щодо освітлення житла згідно із заданим користувачем режимом освітлення (вікдриття/закриття засобів затінення, ввімкнення/вимкнення ламп – в залежності від розпізнаної ситуації).

Розроблений метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» забезпечує автоматичне керування гучністю звуку у системі «Розумний будинок» з метою недопущення перевищення

норм гучності звуку в залежності від типу приміщення та часу доби, а також з метою забезпечення комфортного рівня шуму у відповідному приміщенні.

Головна перевага розробленого методу полягає у забезпеченні повністю автоматичного керування гучністю звуку в системі «Розумний будинок», що безпосередньо спрямоване на підвищення комфорту та безпеки мешканців шляхом запобігання шкоді від надмірного шуму. Метод гарантує, що рівень гучності мультимедіа не перевищуватиме встановлених санітарних норм (максимального рівня шуму) у залежності від типу приміщення та часу доби. Це досягається завдяки постійному щохвилинному моніторингу рівня шуму за допомогою датчиків та автоматичному порівнянню отриманих даних з визначеними сценаріями. Крім того, метод є гнучким, оскільки передбачає три рівні реакції – відсутність дій, попередження користувача та примусове автоматичне зниження гучності. Завдяки початковому налаштуванню типу приміщення та автоматичному оновленню поточного часу, система точно застосовує відповідні нормативні обмеження.

Результати експерименту підтверджують, що розроблений метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» успішно забезпечує повністю автоматичне керування гучністю та адекватно реагує на зміни рівня шуму відповідно до заданих сценаріїв та санітарних норм для робочого кабінету. Система точно розпізнає три стани (оптимальний, високий і неприпустимо високий рівні гучності мультимедіа) і вживає відповідних заходів – від ігнорування в межах комфорту до попередження та примусового коригування при порушенні нормативів.

РОЗДІЛ 4.

ПІДСИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ СИТУАЦІЙ ТА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОСВІТЛЕННЯ, МІКРОКЛІМАТУ ТА МУЛЬТИМЕДІА У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

4.1. Вибір компонентів для підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [81]

Будь-яка кіберфізична система функціонує на трьох основних взаємопов'язаних рівнях. Нижній рівень є фізичним і складається з датчиків, які безпосередньо вимірюють різні параметри. Ці дані збираються на середньому рівні, який утворений системою контролерів. Контролери відповідають за збір отриманих від датчиків даних, їхню попередню обробку та передачу до центральної бази даних або відповідного програмного забезпечення для подальшого аналізу. Нарешті, верхній рівень є кібернетичним і представлений аналітичним програмним забезпеченням, яке обробляє отримані дані, проводить їхній глибокий аналіз, формує прогнози чи рекомендації та може використовувати складні алгоритми для автоматизації процесу прийняття рішень.

Основними параметрами, які буде визначати розроблювана підсистема кіберфізичної системи, будуть: освітленість приміщення (фізико-оптична величина, що характеризує відношення світлового потоку (вимірюється в люменах) до площі поверхні, на яку він поширюється; вимірюється в люксах), температура повітря у приміщенні (вимірюється у градусах Цельсія), відносна вологість повітря у приміщенні (відношення масової частки водяної пари в повітрі до максимально можливої при даній температурі; вимірюється у відсотках), гучність звуку (вимірюється у акустичних децибелах – одиниця вимірювання рівня шуму з врахуванням сприйняття звуку людиною).

Проаналізуємо та порівняємо найпоширеніші типи датчиків, що використовуються для вимірювання освітленості приміщення. В системах «Розумного будинку» та автоматизації освітлення найчастіше застосовуються три основні категорії датчиків: фоторезистори, фотодіоди та фотоелементи на інтегральних схемах – Таблиця 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняльний аналіз датчиків освітленості

Характеристика	Фоторезистор (LDR)	Фотодіод	Фотоелементи на інтегральних схемах (люксметри)
Принцип роботи	Зменшення електричного опору при збільшенні інтенсивності світла	Генерація електричного струму (або зміна опору в фототранзисторі) пропорційно інтенсивності світла	Інтегрований кремнієвий фотодіод і підсилювач, що часто включає аналого-цифровий перетворювач (АЦП)
Вихідний сигнал	Аналоговий (змінний опір). Потрібна зовнішня схема (наприклад, дільник напруги)	Аналоговий (струм або напруга)	Цифровий (I2C або SPI) або лінійний аналоговий
Точність та лінійність	Низька. Нелінійний, повільний час відгуку, значна залежність від температури	Висока. Добре лінійний діапазон, швидкий відгук	Дуже висока. Висока точність, лінійність, мінімальна залежність від температури,

			часто мають вбудовану корекцію під спектр людського ока
Спектральна чутливість	Зазвичай не відповідає спектру людського ока (потрібні фільтри для корекції)	Спектр близький до видимого світла, але часто вимагає корекції	Вбудована корекція за допомогою спеціальних фільтрів або подвійних фотодіодів (один для інфрачервоного світла, інший для видимого світла) для кращої відповідності кривій світлової ефективності
Діапазон вимірювання	Обмежений, переважно для простих застосувань типу «ввімкнути/вимкнути»	Широкий, але може вимагати складної схеми підсилення	Дуже широкий (від кількох мілілюксів до десятків тисяч люксів), завдяки автоматичному масштабуванню
Складність інтеграції	Низька (проста аналогова схема)	Середня (потрібен точний підсилювач струму)	Низька (простий цифровий інтерфейс)
Вартість	Дуже низька	Низька/Середня	Середня

Аналіз різних типів датчиків освітленості для систем автоматизації виявляє чіткі відмінності у їхній придатності до конкретних завдань. Фоторезистори (LDR)

є найбільш економічним варіантом і вирізняються надзвичайною простотою підключення. Однак їхні недоліки суттєво обмежують застосування у системах, що вимагають точних вимірювань: вони не підходять для визначення освітленості в люксах через нелінійність, повільний час відгуку та значну невідповідність їхньої спектральної чутливості сприйняттю людським оком. Як наслідок, LDR ідеально пасують лише для простих бінарних рішень, таких як визначення стану "світло/темно" для автоматичного ввімкнення вуличного або нічного освітлення.

На відміну від них, фотодіоди (і фототранзистори) демонструють швидший відгук і кращу лінійність, що є перевагою. Проте їхній основний недолік полягає в необхідності використання складнішої зовнішньої аналогової схеми для перетворення вихідного струму на напругу та для точної компенсації, щоб забезпечити коректне вимірювання в люксах.

Найбільш оптимальним вибором для «Розумного будинку» є фотоелементи на інтегральних схемах (люксметри). Хоча їхня вартість вища, ніж у LDR, вони надають високу точність і, що найважливіше, прямий цифровий вихідний сигнал в люксах через інтерфейс I2C, що значно спрощує інтеграцію та програмування. Ключова перевага цих ІС полягає у вбудованій корекції, яка максимально відповідає спектральній чутливості людського ока. Завдяки цьому, вони рекомендовані для всіх систем, де необхідне точне та надійне регулювання яскравості.

Для точного вимірювання освітленості в системах «Розумний будинок» найчастіше використовуються цифрові сенсори на інтегральних схемах, які забезпечують високу точність і калібрування. У таблиці 4.2 наведено порівняння двох найбільш поширених датчиків – BH1750 та TSL2561.

Обидва цифрові люксметри, BH1750 та TSL2561, є високоякісними рішеннями для систем «Розумного будинку», оскільки вони видають дані безпосередньо в люксах і мають вбудовану компенсацію, значно перевершуючи прості аналогові сенсори. Проте, TSL2561 є технологічно досконалішим рішенням, що підтверджується його аналітичними перевагами.

Таблиця 4.2

Порівняльний аналіз датчиків BH1750 та TSL2561

Характеристика	Датчик BH1750 (ROHM)	Датчик TSL2561
Технологія	Кремнієвий фотодіод + АЦП	Два фотодіоди: один для видимого світла (Visible), інший – для інфрачервоного (IR)
Спектральна корекція	Висока. Вбудований оптичний фільтр, який добре імітує криву чутливості людського ока	Дуже висока. Вимірює видиме світло та інфрачервону складову окремо, а потім використовує програмний алгоритм для компенсації інфрачервоного випромінювання та точної імітації кривої чутливості людського ока
Вихідний сигнал	Цифровий	Цифровий
Діапазон вимірювання	Обмежений (менший): приблизно від 1 до 65535 лк.	Широкий (більший): приблизно від 0.1 до 40000+ лк (залежно від режиму). Краща чутливість при дуже низькій освітленості.
Роздільна здатність	0.5 – 4 лк (залежно від режиму)	0.1 лк (може бути вищою у різних режимах)
Режими роботи	Кілька режимів для вибору між точністю (висока роздільна здатність) та швидкістю (швидкий час вимірювання)	Три режими: низький, середній, високий. Дозволяє вимірювати як яскраве сонячне світло, так і тьмяну кімнатну освітленість

Енергоспоживання	Низьке. Має режим Power Down (сплячий режим)	Дуже низьке. Має режим Power Down та режим очікування, ідеально підходить для пристроїв з живленням від батарей
Типове застосування	Загальне управління освітленням, енергозбереження	Пристрої на батарейках, системи, що вимагають високої точності у широкому динамічному діапазоні (наприклад, професійні люксметри, точний моніторинг сонячного світла)

Зокрема, у питаннях точності та спектральної відповідності, TSL2561 використовує систему з двох фотодіодів (окремо для видимого та інфрачервоного світла), що дозволяє ефективніше відфільтровувати інфрачервону складову. Це критично важливо, оскільки частка інфрачервоного випромінювання у штучному та сонячному світлі різна, а точне вимірювання освітленості вимагає максимальної відповідності кривій світлової ефективності людського ока, яку TSL2561 забезпечує краще. Крім того, динамічний діапазон TSL2561 значно ширший – він здатний вимірювати як дуже низькі (у тьмяному освітленні), так і дуже високі рівні освітленості завдяки змінним режимам посилення, що робить його більш гнучким для розміщення як у затемнених кутках, так і біля вікон. Додатковою перевагою TSL2561 є його енергоефективність, що робить його кращим вибором для пристроїв із батарейним живленням через оптимізовані режими низького споживання енергії. З іншого боку, BH1750 є простішим, надійнішим і економічно вигіднішим сенсором, що забезпечує достатню точність для більшості побутових завдань управління освітленням, де висока роздільна здатність у діапазоні менше 1 люкса не є критичною.

З огляду на необхідність високої точності для реалізації складних сценаріїв енергозбереження та автоматичної підтримки постійного рівня освітленості в умовах різного освітлення (від нічних ламп до сонячного світла), датчик TSL2561 є рекомендованим вибором для кіберфізичної системи «Розумний будинок». Його здатність точно вимірювати освітленість у широкому динамічному діапазоні та ефективно компенсувати інфрачервону складову гарантує, що система керування освітленням буде реагувати відповідно до реального сприйняття людського ока, забезпечуючи оптимальний комфорт та економію ресурсів.

Для вимірювання температури повітря у приміщенні в системах «Розумного будинку» та автоматизації мікроклімату найчастіше використовуються три основні типи електронних датчиків – термістори (NTC/PTC), цифрові датчики на інтегральних схемах та термопари (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3

Порівняльний аналіз датчиків температури

Характеристика	Термістори (NTC/PTC)	Цифрові датчики на інтегральних схемах	Термопари (тип К, J, T)
Принцип роботи	Зміна електричного опору залежно від температури (NTC – негативний, PTC – позитивний)	Використовують напівпровідникові переходи або інші ефекти на кристалі, результат перетворюється внутрішнім АЦП	Використовують ефект Зеєбека – генерація напруги на стику двох різних металів при різниці температур
Вихідний сигнал	Аналоговий (змінний опір/напруга).	Цифровий, видає дані безпосередньо у °C	Аналоговий (дуже мала напруга, мВ). Потребує

	Потребує зовнішнього АЦП		підсилювача та компенсації холодного спаю
Точність (для кімнатної температури)	Середня/Висока. Потребує калібрування та лінеаризації	Дуже висока (до ± 0.1 °C для преміальних моделей). Калібрування заводу	Середня. Точність залежить від типу, але для кімнатної температури часто нижча, ніж у цифрових датчиків
Діапазон вимірювання	Обмежений (зазвичай від -50 °C до 150 °C)	Обмежений (зазвичай від -55 °C до 125 °C)	Надзвичайно широкий (від -200 °C до 2300 °C)
Складність інтеграції	Низька. Потрібен АЦП і складна формула лінеаризації	Дуже низька. Просте підключення, дані готові до використання	Висока. Потрібні спеціалізовані мікросхеми для підсилення
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня/висока (з урахуванням необхідної електроніки)

Аналіз основних типів датчиків температури демонструє їхню різну придатність для використання у системах «Розумний будинок».

Термістори є найдешевшим варіантом, що є їхньою головною перевагою. Однак, їхня інтеграція ускладнена через аналоговий вихід і нелінійну залежність опору від температури, що вимагає використання зовнішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та складних обчислень для лінеаризації та отримання точного значення в градусах Цельсія. Ці технічні складнощі роблять їх не

найкращим вибором для масових і простих у налаштуванні систем, хоча вони можуть застосовуватися у дуже простих контролерах, де вартість є критично важливою, а зниження точності є прийнятним. Термопари є промисловим стандартом, незамінним для вимірювання екстремально високих або дуже низьких температур завдяки надзвичайно широкому діапазону. Проте, їхня інтеграція є складною, оскільки вони генерують дуже малу напругу (мілівольти), що вимагає потужного підсилення, а також обов'язкового застосування компенсації холодного спаю. Для діапазону кімнатної температури їхня точність, як правило, нижча, ніж у інтегральних датчиків. Отже, термопари не підходять для стандартного моніторингу температури повітря у житлових приміщеннях, але є ідеальними для моніторингу високотемпературних процесів, наприклад, котла чи димоходу.

Цифрові датчики на інтегральних схемах визнані найкращим вибором для систем «Розумного будинку». Вони надають готовий цифровий сигнал безпосередньо в $^{\circ}\text{C}$, що усуває необхідність у складному зовнішньому обладнанні та лінеаризації. Вони забезпечують дуже високу точність (часто краще, ніж $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) і низьку складність інтеграції, що є критичним для надійності та швидкого розгортання. Завдяки цим перевагам, цифрові датчики ідеально підходять для точного моніторингу температури повітря.

Аналіз найпопулярніших цифрових датчиків температури демонструє, що вибір оптимального рішення для системи «Розумний будинок» залежить від необхідного функціоналу, точності та вимог до енергоспоживання. Три найпоширеніші моделі – це спеціалізований термометр DS18B20 та комбіновані датчики навколишнього середовища DHT22 і BME280.

DS18B20 є еталоном, коли потрібне лише точне та надійне вимірювання температури. Його головною перевагою є використання протоколу 1-Wire, який дозволяє підключати велику кількість датчиків до одного мікроконтролерного виводу, значно спрощуючи монтаж і кабельні мережі у великих приміщеннях. Завдяки високій точності, що становить $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ у критичному діапазоні, а також можливості герметизації, він ідеально підходить для моніторингу температури повітря, а також для інтеграції у системи керування опаленням чи бойлерами.

Наступний, DHT22, пропонує привабливе рішення, поєднуючи вимірювання температури і вологості при відносно низькій вартості. Проте його функціональні переваги супроводжуються технічними компромісами. Датчик використовує власний, повільний протокол зв'язку, який вимагає точного таймінгу і робить його менш надійним та чутливим до помилок у порівнянні з іншими цифровими сенсорами. Хоча його точність по температурі зазвичай прийнятна, вимірювання вологості часто має меншу стабільність і може бути менш точним у довгостроковій перспективі.

BME280 (або його вдосконалені варіанти) представляє технологічно найдосконаліше рішення, що робить його оптимальним вибором для високопродуктивних систем. Він не лише вимірює температуру та вологість, але й додає третій параметр – атмосферний тиск. Ці комплексні дані є незамінними для просунутого клімат-контролю, дозволяючи системі не лише підтримувати комфорт, але й прогнозувати зміни погоди або точніше регулювати вентиляцію. BME280 використовує швидкі та надійні цифрові протоколи I²C або SPI, забезпечуючи високу точність і стабільність вимірювань. Крім того, його надзвичайно низьке енергоспоживання робить його ідеальним для бездротових, автономних пристроїв.

Хоча DS18B20 є беззаперечним лідером для великих, надійних мереж вимірювання лише температури, а DHT22 пропонує бюджетний компроміс, датчик BME280 є найкращим рішенням для комплексного управління мікрокліматом «Розумного будинку». Його висока точність, надійний цифровий інтерфейс та можливість триплексного вимірювання (температура, вологість, тиск) забезпечують максимальну кількість даних для інтелектуального прийняття рішень системою.

Для вимірювання відносної вологості повітря у приміщеннях систем «Розумного будинку» використовуються переважно два основні типи електронних датчиків – ємнісні та резистивні (гігрометри). Останнім часом домінує ємнісний принцип в інтегрованих цифрових рішеннях. Порівняльний аналіз датчиків відносної вологості повітря представлений у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Порівняльний аналіз датчиків відносної вологості повітря

Характеристика	Резистивні датчики (гігрометри)	Ємнісні датчики	Інтегровані датчики
Принцип роботи	Зміна електричного опору чутливого матеріалу (солі, полімери) залежно від поглинання водяної пари	Зміна діелектричної проникності полімерного шару між двома електродами під впливом вологості	Ємнісний сенсор + вбудований АЦП, калібрування та температурна компенсація
Вихідний сигнал	Аналоговий (змінний опір/напруга)	Аналоговий (змінна частота або ємність)	Цифровий (I ² C, SPI). Готові дані в %
Точність	Низька/середня ($\pm 5\%$ і вище)	Середня/висока ($\pm 2\% - \pm 5\%$)	Дуже висока ($\pm 2\% - \pm 3\%$). Заводське калібрування
Стабільність (довговічність)	Низька. Схильні до дрейфу та забруднення, вимагають частого калібрування	Вища. Краща стійкість до хімічних речовин та дрейфу	Висока. Краща довгострокова стабільність завдяки внутрішній корекції
Залежність від температури	Значна. Потребує складної зовнішньої температурної компенсації	Значна. Температурна компенсація критично необхідна	Мінімальна. Вбудована температурна компенсація
Швидкість відгуку	Повільна	Середня/висока	Висока
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня

Аналіз датчиків відносної вологості повітря свідчить про докорінну різницю між застарілими та сучасними рішеннями. Резистивні датчики (гігрометри) є найпростішими та найдешевшими, однак їхній аналоговий вихід та низька довгострокова стабільність роблять їх непридатними для надійних систем «Розумного будинку», оскільки вони схильні до дрейфу показань і вимагають складної зовнішньої електроніки для лінеаризації та температурної компенсації. Через ці недоліки їхнє використання обмежується лише найпростішими індикаторами, де точність не є критичною. На противагу цьому, ємнісні датчики, інтегровані в цифрові мікросхеми, визнані найкращим вибором для сучасних систем. Вони успішно вирішують ключові проблеми, пропонуючи прямий цифровий вихід (через протоколи I²C/SPI) із готовими даними у відсотках відносної вологості. Критично важливою їхньою перевагою є вбудована температурна компенсація завдяки інтеграції термометра та алгоритму корекції, що є необхідним, оскільки відносна вологість безпосередньо залежить від температури. Це забезпечує високу точність і значно кращу стабільність порівняно з резистивними аналогами. Таким чином, оптимальним рішенням для точного клімат-контролю, керування зволожувачами/осушувачами та моніторингу якості повітря у «Розумному будинку» є використання цифрових інтегрованих датчиків ємнісного типу, які забезпечують високу надійність і простоту інтеграції.

Порівняємо три найпопулярніші моделі інтегрованих цифрових датчиків для вимірювання відносної вологості повітря у приміщеннях систем «Розумного будинку» – DHT22, SHT31 (як представник високоточних серій SHTx) та BME280 (як представник багатфункціональних сенсорів) – таблиця 4.5.

Аналіз популярних моделей цифрових датчиків вологості, а саме DHT22, SHT31 та BME280, виявив чіткий розподіл їхньої ефективності за критеріями ціна, точність та функціональність.

Таблиця 4.5

Порівняльний аналіз датчиків DHT22, SHT31, BME280

Характеристика	DHT22	SHT31	BME280
Вимірювані параметри	Температура + відносна вологість	Температура + відносна вологість	Температура + відносна вологість + тиск
Точність вимірювання відносної вологості	$\pm 2\% - 5\%$	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$
Інтерфейс	Власний (Single-Wire)	I ² C	I ² C/SPI
Швидкість/частота оновлення	Низька (мінімум 2 с між читаннями)	Висока (до 10 разів на секунду)	Середня/висока
Довгострокова стабільність	Середня/низька. Схильність до дрейфу	Висока. Дуже стабільний	Висока
Енергоспоживання	Середнє	Дуже низьке	Дуже низьке
Вартість	Низька	Висока	Середня

Найбільш бюджетний варіант, DHT22, виступає як компромісне рішення, пропонуючи подвійне вимірювання температури та вологості, але має суттєві недоліки – його точність відносної вологості є найнижчою (до $\pm 5\%$), а використання повільного, пропрієтарного протоколу знижує частоту оновлення та надійність, роблячи його придатним лише для некритичних додатків. Протилежним є датчик SHT31, який є еталоном високоточності, забезпечуючи найкращу точність $\pm 2\%$) та найвищу довгострокову стабільність завдяки швидкому

інтерфейсу і відмінному калібруванню. Проте його найвища вартість обмежує його застосування переважно преміальними або лабораторними системами. Золоту середину представляє BME280, який є найуніверсальнішим та оптимальним вибором для більшості систем «Розумного будинку». Він вимірює три ключові параметри (температуру, відносну вологість та тиск) одночасно, забезпечуючи чудовий баланс функціональності та надійності при помірній вартості. Хоча його точність $\pm 3\%$ трохи поступається SHT31, проте швидкий цифровий інтерфейс і дуже низьке енергоспоживання роблять його ідеальним для комплексного моніторингу мікроклімату і реалізації складних кліматичних сценаріїв. Таким чином, для більшості типових завдань датчик BME280 є рекомендованим оптимальним рішенням.

Датчики для вимірювання гучності звуку (рівня звукового тиску), що вимірюється у акустичних децибелах (дБА), які враховують сприйняття звуку людиною, переважно ґрунтуються на мікрофонній технології. У системах «Розумний будинок» найчастіше використовуються такі основні типи сенсорів – аналогові електретні мікрофони, цифрові MEMS-мікрофони та інтегровані модулі рівня шуму (таблиця 4. 6).

Таблиця 4.6

Порівняльний аналіз датчиків вимірювання гучності звуку

Характеристика	Аналоговий електретний мікрофон	Цифровий MEMS-Мікрофон	Модуль рівня шуму
Принцип роботи	Перетворення звукових хвиль у зміну ємності (електретний конденсатор), що	Використання мікроелектромеханічної системи (MEMS) на кристалі для	Інтегрована система: мікрофон + підсилювач з автоматичним

	генерує аналоговий сигнал напруги	перетворення звуку, часто з вбудованим АЦП	регулюванням посилення (АРП) + фільтри
Вихідний сигнал	Аналоговий (необроблена напруга). Потребує зовнішнього підсилення та АЦП	Цифровий (I ² S, PDM). Видає цифрові дані звуку	Аналоговий (підсилена напруга) або цифровий (оброблений сигнал)
Точність вимірювання	Низька. Точність залежить від якості зовнішньої схеми підсилення, фільтрації та калібрування	Середня. Вимагає складного ПЗ для перетворення цифрових даних у дБА (виконання А-зважування, фільтрації)	Висока. Модуль часто спроектований для вимірювання рівня, а не просто аудіосигналу
Спектральна відповідність	Відсутня. Потрібна складна програмна фільтрація (А-зважування)	Відсутня. Потрібна складна програмна фільтрація (А-зважування)	Часто вбудована або спрощена апаратна фільтрація
Складність інтеграції	Середня/висока. Потрібне оброблення аналогового сигналу	Середня. Потрібна підтримка мікроконтролером спеціалізованих цифрових інтерфейсів	Низька. Вихідний сигнал часто вже підсилений і спрощений
Вартість	Дуже низька	Середня	Середня/висока (залежно від функціоналу)

Аналіз датчиків вимірювання гучності звуку для систем «Розумного будинку» чітко розмежовує їхню придатність залежно від кінцевої мети – вимірювання рівня шуму в акустичних децибелах (дБА) чи реєстрація самого аудіосигналу. Аналогові електретні мікрофони є найдешевшими та найпростішими фізично, але їхній аналоговий вихід робить їх найскладнішими для отримання точних показань дБА, оскільки це вимагає дорогих зовнішніх компонентів (підсилювачів, точних АЦП) та складного програмного забезпечення для перетворення і необхідного А-зважування. Через це їхнє використання обмежене лише простим виявленням присутності чи порогу звуку. Цифрові MEMS-мікрофони, хоча й забезпечують найкращу якість аудіосигналу та високу стійкість до шумів, також видають необроблений аудіопотік. Програмне перетворення цих даних у надійні значення дБА є дуже ресурсоемним завданням для мікроконтролера, оскільки вимагає швидкої вибірки та складних математичних перетворень, що робить їх кращим вибором для запису аудіо та голосового керування, а не для моніторингу шуму. Як наслідок, оптимальним рішенням для «Розумного будинку», коли метою є саме вимірювання рівня гучності у дБА без запису звуку, є інтегровані модулі рівня шуму (SLM Modules). Ці модулі є найкращим вибором, оскільки містять усю необхідну електроніку на одній платі чи чипі. Це значно спрощує інтеграцію, забезпечує більш надійний та стабільний вихідний сигнал, який безпосередньо корелює з рівнем шуму, дозволяючи легко реалізовувати сценарії моніторингу шумового забруднення та автоматичного керування пристроями.

Для точного та надійного моніторингу рівня гучності в дБА у системах «Розумного будинку» використовуються спеціалізовані модулі, які інтегрують мікрофон, підсилювач та часто мають функцію автоматичного регулювання посилення. Порівняємо дві популярні категорії рішень, що використовуються у комерційних прототипах – модулі на базі Max9814 та модулі з лінійним аналоговим виходом (наприклад, на базі MAX4466) – таблиця 4.7.

Таблиця 4.7

Порівняльний аналіз модулів на базі Мах9814 та на базі МАХ4466

Характеристика	Модуль на базі Мах9814	Модуль на базі МАХ4466
Принцип обробки	Мікрофон + автоматичне регулювання посилення	Мікрофон + високоточний фіксований підсилювач
Вихідний сигнал	Аналоговий. Напруга, що автоматично масштабується під діапазон гучності	Аналоговий. Лінійна напруга, що відповідає амплітуді звуку
Головна перевага	Здатність працювати у дуже широкому динамічному діапазоні без насичення	Висока якість аудіосигналу та краща лінійність у вузькому діапазоні
Інтеграція в «Розумний будинок»	Дуже проста. Автоматичне регулювання посилення мінімізує потребу у складній програмній обробці	Складна. Потребує точного АЦП та програмної оптимізації для дБА
Вимірювання дБА	Досягається простіше. Модуль видає сигнал, який легше перетворити в умовні дБА	Складніше. Амплітуда сильно залежить від відстані та чутливості, вимагає складного калібрування
Призначення	Моніторинг рівня шуму (наскільки він гучний)	Якісний запис або голосове керування (що саме сказано)
Вартість	Середня	Низька

Аналіз датчиків для моніторингу гучності в системах «Розумного будинку» чітко вказує на те, що для досягнення цілей, пов'язаних із вимірюванням рівня шуму в акустичних децибелах (дБА), перевагу слід надавати інтегрованим модулям з автоматичним регулюванням посилення. Хоча модулі на базі МАХ4466 з

лінійним підсиленням є дешевшими та можуть забезпечити високу якість необробленого аудіосигналу, їхнє фіксоване посилення створює критичну проблему – вони не можуть ефективно працювати у широкому динамічному діапазоні. Це призводить до того, що тихі звуки можуть бути недостатньо розпізнані, а гучні – насичують (перевантажують) аналого-цифровий перетворювач, унеможливаючи точне вимірювання дБА. Крім того, вони вимагають складного програмного обчислення та калібрування. На противагу цьому, модулі на базі Max9814 є оптимальним рішенням для моніторингу шуму, оскільки їхня ключова функція автоматично адаптує посилення мікрофона до поточного рівня звуку. Ця особливість ефективно вирішує проблему широкого динамічного діапазону, гарантуючи, що сигнал завжди коректно масштабується в робочий діапазон напруги, незалежно від того, чи це тиха розмова, чи гучний крик. Як наслідок, вихідний аналоговий сигнал є більш надійним для перетворення в умовні дБА за допомогою мікроконтролера, що суттєво спрощує інтеграцію. Таким чином, для керування гучністю в «Розумному будинку» інтегровані модулі рівня шуму на базі Max9814 є найкращим вибором, оскільки вони мінімізують складність апаратного та програмного забезпечення, необхідну для стабільного та надійного вимірювання рівня шуму.

Для інтеграції обраних датчиків – TSL2561 (освітленість), BME280 (температура, вологість) та модуля рівня шуму на базі Max9814 (гучність мультимедіа) – необхідно обрати контролер та стандарт передачі даних, які забезпечать надійність, швидкість та мінімальну складність інтеграції.

Перш за все, проаналізуємо інтерфейси, які використовують обрані датчики: TSL2561 використовує цифровий інтерфейс I2C, BME280 використовує цифровий інтерфейс I2C або SPI, Max9814 використовує аналоговий вихід. Оскільки два ключові датчики використовують I2C, а третій (Max9814) вимагає аналогового входу, найбільш оптимальним стандартом зв'язку для більшості сенсорів буде I2C, а контролер повинен мати як мінімум один I2C порт та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для керування «Розумним будинком» у цьому випадку найкраще підходять мікроконтролери з вбудованим Wi-Fi та потужними

периферійними можливостями. Порівняємо дві найпопулярніші платформи – ESP32 та ESP8266 – таблиця 4.8.

Таблиця 4.8

Порівняльний аналіз контролерів ESP32 та ESP8266

Характеристика	ESP8266 (наприклад, NodeMCU)	ESP32 (наприклад, ESP32 DevKit)
Кількість ядер	Одноядерний (80/160 МГц)	Двоядерний (до 240 МГц)
I²C інтерфейси	Один апаратний порт (або програмна реалізація)	Два апаратних порти
Аналогові входи (АЦП)	Один 10-бітний канал	Багатоканальний 12-бітний АЦП
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi (802.11 b/g/n)	Wi-Fi + Bluetooth/BLE (Dual-mode)
Обробка даних	Добре для простих завдань	Відмінно (може обробляти складні алгоритми, наприклад, FFT для звуку)
Енергоспоживання	Низьке	Низьке (з режимами глибокого сну)
Вибір для "Розумного будинку"	Підходить для одного пристрою (сенсор + реле)	Оптимально для комплексних систем та шлюзів

Аналіз вимог до контролера для обраного набору датчиків (TSL2561, BME280 та Max9814) однозначно вказує на те, що контролер ESP32 є оптимальним вибором. Його переваги базуються на вищій обчислювальній потужності та кращих

периферійних можливостях порівняно з ESP8266. Передусім, для обробки аналогового сигналу з модуля рівня шуму Max9814, ESP32 оснащений 12-бітним багатоканальним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Ця 12-бітна роздільна здатність, на відміну від 10-бітної у конкурента, забезпечує вищу точність і кращу деталізацію при перетворенні аналогової напруги в цифрове значення дБА, що є критичним для надійного моніторингу шуму. Крім того, його двоядерна архітектура дозволяє ефективно розподіляти завдання – одне ядро може бути виділене для складної обробки алгоритмів (наприклад, фільтрації чи перетворення звуку), не перевантажуючи ядро, відповідальне за роботу Wi-Fi та опитування інших сенсорів. Щодо цифрових сенсорів TSL2561 та BME280, обидва яких використовують I2C, наявність на ESP32 двох апаратних I2C портів підвищує гнучкість архітектури системи та дозволяє уникнути потенційних конфліктів адрес або перешкод, які часто виникають при програмній реалізації протоколу. Нарешті, універсальність ESP32 підкріплюється вбудованою підтримкою Bluetooth/BLE, що робить його ідеальним для безпосередньої взаємодії з мобільними пристроями, а також для інтеграції з іншими BLE-пристроями в екосистемі «Розумного будинку».

Аналізуючи необхідну архітектуру зв'язку для обраного контролера ESP32 і комплекту датчиків (TSL2561, BME280, Max9814), слід розрізняти локальний та мережевий стандарти передачі даних. Для локального зв'язку між контролером та цифровими сенсорами (TSL2561 та BME280) основним і найбільш обґрунтованим стандартом є I2C (Inter-Integrated Circuit), оскільки це його першочергове призначення – забезпечення надійного зв'язку між інтегральними схемами на одній платі або на короткій відстані. Щодо бездротової передачі зібраних комплексних даних (освітленість, температура, відносна вологість, рівень шуму) до центральної системи управління, Wi-Fi (IEEE 802.11) є оптимальним стандартом, оскільки він забезпечує необхідну високу швидкість та можливість віддаленого доступу через вже існуючу домашню мережу. Поверх цього бездротового стандарту критично важливо використовувати протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT є найбільш ефективним протоколом додатків для архітектури «Розумного будинку» та Інтернету речей (IoT), оскільки він є легким і швидким, застосовуючи

модель публікації/підписки. Це дозволяє мінімізувати мережевий трафік і гарантувати надійну доставку даних на центральний вузол, що є ключовим для енергоефективності та надійності системи. Таким чином, оптимальна архітектура зв'язку передбачає дволанкову схему – використання I2C для прямого підключення цифрових датчиків до ESP32 та використання Wi-Fi з протоколом MQTT для ефективною та надійною інтеграції даних в центральну систему управління.

4.2. Архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» [81]

Підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» – це інтегроване технологічне середовище, що поєднує фізичні компоненти (сенсори, контролери, виконавчі пристрої) з цифровими компонентами (програмне забезпечення та методи/алгоритми аналізу). Її ключова мета – забезпечити безперервний автоматичний контроль комфортності приміщення (освітлення, мікроклімат та мультимедіа). Система функціонує в режимі реального часу, охоплюючи всі етапи роботи – від зчитування параметрів середовища до прийняття рішень. Вона автоматично збирає, обробляє та аналізує інформацію, виявляючи відхилення від заданих нормативів, і обробляє ці результати з подальшим реагуванням.

Враховуючи проведений вибір компонентів (датчиків TSL2561, BME280, Max9814 та контролера ESP32), а також стандартів передачі даних I2C (Inter-Integrated Circuit), Wi-Fi (IEEE 802.11) та MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), модель підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» матиме такий вигляд – рис. 4.1.

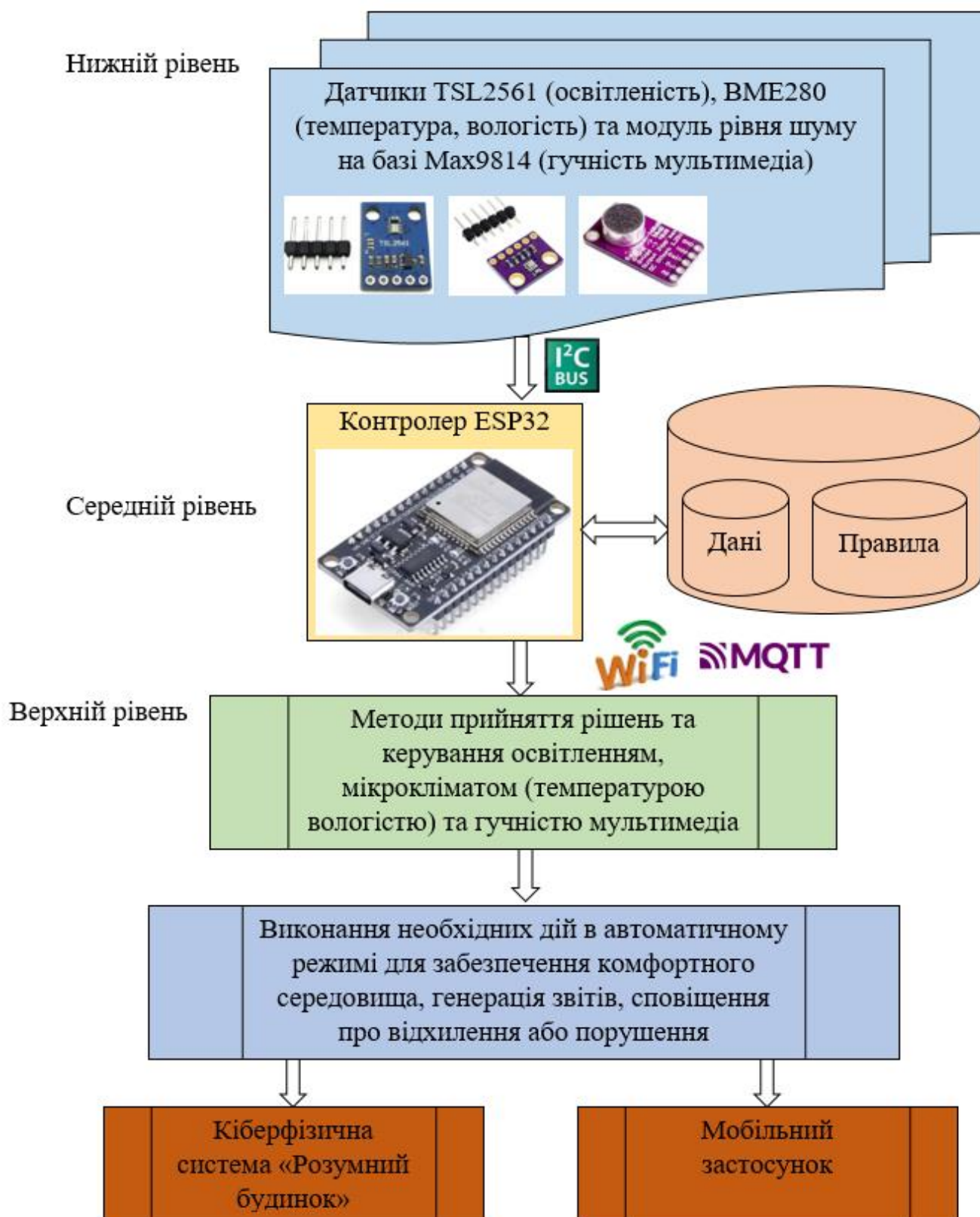


Рис. 4.1 – Архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок»

Представлена архітектура описує функціонування інтегрованої підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень для керування освітленням, мікрокліматом і мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка складається з трьох ключових рівнів – нижнього, середнього та верхнього.

На нижньому рівні відбувається безпосереднє зчитування параметрів навколишнього середовища за допомогою обраного комплекту сенсорів – датчик TSL2561 фіксує рівень освітленості, датчик BME280 вимірює температуру та відносну вологість, а модуль рівня шуму на базі Max9814 вимірює гучність мультимедіа. Ці фізичні компоненти збирають первинну інформацію, яка є основою для подальшого аналізу.

Зібрані дані передаються на середній рівень, центральним елементом якого є контролер ESP32. Контролер виконує роль мосту та первинного процесора – він отримує цифрові дані від TSL2561 та BME280 через високошвидкісну шину I2C, а також зчитує аналоговий сигнал від Max9814 через свій 12-бітний АЦП. ESP32 не лише агрегує ці дані, але й використовує їх для формування бази знань, зокрема, її розділу даних. Після первинної обробки та перевірки, контролер використовує Wi-Fi-зв'язок та протокол MQTT для ефективної передачі даних на верхній рівень, що забезпечує мінімальний мережевий трафік та надійну інтеграцію у мережу будинку. Враховуючи вимоги до автономності та швидкодії кіберфізичної системи, як брокер було використано локальний сервер (на базі Mosquitto), розгорнутий у межах внутрішньої мережі «Розумного будинку». Локальне розташування брокера дозволило мінімізувати затримки передачі даних та забезпечити функціонування системи навіть за відсутності доступу до глобальної мережі Інтернет.

Для структурування потоків даних було розроблено систему топіків, що відповідають кожному вимірюваному параметру та керуючим сигналам:

`home/livingroom/sensors/temperature` – для передачі значень температури;

`home/livingroom/sensors/humidity` – для передачі значень відносної вологості;

`home/livingroom/sensors/light` – для передачі даних освітленості;

home/livingroom/sensors/noise – для передачі рівня гучності;
 home/livingroom/actuators/hvac – для керування температурою;
 home/livingroom/actuators/lighting – для керування освітленням;

home/livingroom/actuators/volume – для керування гучністю мультимедіа.

Для всіх критично важливих повідомлень, що стосуються імплементації рішень (керування актуаторами), було встановлено рівень якості обслуговування QoS 1 (At least once). Це гарантує, що кожна команда на ввімкнення обігрівача, зволожувача або зміну гучності буде доставлена та підтверджена отримувачем, що є критичним для запобігання аномальним ситуаціям. Для регулярних сенсорних даних, які оновлюються часто (наприклад, щохвилинні заміри шуму), було використано QoS 0 (At most once), що дозволило знизити навантаження на мережу без втрати загальної точності ситуаційного аналізу.

На верхньому рівні розміщуються методи прийняття рішень та керування, які є аналітичним ядром та модулем ситуаційного аналізу підсистеми. Тут відбувається фінальний аналіз отриманих комплексних даних – застосовуються методи для розпізнавання поточних ситуацій та для визначення оптимальних дій щодо керування освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) та гучністю мультимедіа відповідно до заздалегідь заданих сценаріїв, що містяться в розділі правил бази знань. Завершальним етапом роботи підсистеми є виконання необхідних дій в автоматичному режимі, спрямованих на забезпечення комфортного середовища. Це включає активацію виконавчих пристроїв (наприклад, ввімкнення освітлення, вимкнення зволожувача, зниження гучності мультимедіа тощо), генерацію звітів про роботу та, у випадку виявлення критичних відхилень або порушень, сповіщення користувача. Ці результати та сповіщення доставляються безпосередньо у кіберфізичну систему «Розумний будинок» для інтеграції з іншими підсистемами, а також у мобільний застосунок (або веборієнтований застосунок), який є інтерфейсом кіберфізичної системи «Розумний будинок», для контролю та взаємодії з користувачем.

Розроблена підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень є інтегрованим технологічним ядром кіберфізичної системи «Розумний будинок» і забезпечує три ключові функції комфорту – керування освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) та гучністю мультимедіа, причому робить це комплексно та узгоджено. Вона гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального житлового середовища шляхом безперервного моніторингу, аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил. Ця підсистема може використовуватися для автоматичного енергозбереження (наприклад, вимкнення світла, зниження опалення, вимкнення зволожувача тощо), для створення адаптивних сценаріїв комфорту (наприклад, автоматичне додавання світла, підвищення температури у вечірній час або ввімкнення зволожувача при сухому повітрі), для оперативного контролю безпеки та якості життя (наприклад, сповіщення про різкий стрибок температури чи перевищення критичного рівня шуму), а також для оптимізації роботи мультимедійних систем (наприклад, автоматичне зменшення гучності мультимедіа у нічний час).

Наукова новизна полягає у розробленні інтегрованої архітектури підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок», яка, на відміну від відомих рішень, що зосереджуються лише на одній групі функцій (наприклад, тільки мікроклімат), забезпечує комплексне й узгоджене керування трьома ключовими групами функцій житла (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа), що гарантує автоматичне створення комфортного середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил.

Обмеженнями пропонованої підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» є: залежність від коректності даних, отриманих з датчиків, та від стабільності мережевої інфраструктури; залежність від ручної ініціалізації та коректності введених користувачем даних ініціалізації підсистеми; залежність від роботоздатності актуаторів (обігрівальних та охолоджувальних приладів, зволожувачів та осушувачів повітря, засобів затінення та ламп освітлення тощо);

обмеження у врахуванні суб'єктивних переваг комфорту конкретного користувача, які можуть виходити за межі стандартних нормативів; залежність від безперебійного електроживлення.

До переліку обмежень також варто включити семантичні та функціональні конфлікти, що можуть виникнути у процесі одночасного керування декількома підсистемами. Оскільки «Розумний будинок» є цілісним кіберфізичним простором, дії одного актуатора можуть прямо впливати на сенсорні показники іншого, створюючи ситуації взаємовиключних цілей. Наприклад, спроба системи підняти рівень освітленості шляхом відкриття ролет у літній день може призвести до надмірного нагрівання приміщення сонячними променями, що змусить підсистему мікроклімату інтенсивніше використовувати кондиціювання, створюючи конфлікт між цілями освітленості та енергоефективності.

4.3. Результати експериментальних досліджень

Проведемо експеримент із розробленим прототипом підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок».

Під час ініціалізації кіберфізичної системи «Розумний будинок» користувач:

- 1) перевіряє коректність поточної дати ($d=11.05$);
- 2) перевіряє коректність поточного часу ($tm=13.00$);
- 3) виконав вибір типу приміщення – вітальня ($tr=2$);
- 4) виконав вибір інтервалу висоти стелі приміщення – 2.5-2.7 м ($chi=1$);
- 5) ввів значення площі приміщення – 25 м² ($S=25$);
- 6) виконав вибір типу використовуваних у приміщенні ламп – світлодіодні, ($trl=1$);
- 7) ввів значення потужності однієї використовуваної лампи – 12 Вт ($Pl=12$);
- 8) ввів кількість використовуваних у приміщенні ламп – 12 ($ak=12$);
- 9) виконав вибір наявних у приміщенні засобів затінення – не використовується жодного такого засобу ($asd=0$);

10) виконав вибір стартового режиму освітлення приміщення – активність ($rlm=1$).

Далі почало відбуватись автоматичне вимірювання температури, відносної вологості, рівня освітлення, рівня гучності мультимедіа датчиками температури, вологості, освітленості, гучності шуму.

Отримані значення рівня температури протягом 5 годин таких вимірювань, а також дії системи «Розумний будинок» в кожний момент часу представлені в Таблиці 4.9. Вибір п'ятигодинного інтервалу для проведення експерименту з підсистемою керування температурою обумовлений необхідністю спостереження за динамікою теплових процесів у приміщенні, які характеризуються значною інерційністю. Оскільки температура повітря в житловій зоні не змінюється миттєво, такий часовий проміжок дозволяє зафіксувати природні коливання показників, спричинені зміною зовнішньої температури або внутрішніми тепловими навантаженнями, та перевірити здатність системи розпізнавати різні типи сценаріїв – від оптимальних до аномальних (нагрівання та охолодження). Цього часу цілком достатньо для первинної верифікації працездатності розроблених методів прийняття рішень, оскільки протягом п'яти годин система може встигнути пройти повний цикл. Отже, п'ятигодинний період є репрезентативним для підтвердження того, що підсистема коректно обробляє дані з датчиків у режимі soft real-time та стабільно функціонує без накопичення помилок у логіці вибору сценаріїв, враховуючи той факт, що вимірювання температури відбуваються кожні 30 хвилин.

Таблиця 4.9

Значення рівня температури та дії підсистеми під час 5-годинного експерименту

Час вимірювання	Температура	Дії підсистеми
13.00	24°	Жодних дій
13.30	24.5°	Жодних дій

14.00	24.5°	Жодних дій
14.30	25°	Жодних дій
15.00	26°	Жодних дій
15.30	27°	Ввімкнення охолоджувальних приладів (вентилятора)
16.00	26°	Жодних дій
16.30	25°	Жодних дій
17.00	24°	Жодних дій
17.30	23°	Жодних дій
18.00	22°	Ввімкнення обігрівальних приладів (котла)

Отримані значення рівня вологості протягом 5 годин таких вимірювань, а також дії системи «Розумний будинок» в кожний момент часу представлені в Таблиці 4.10. Вибір п'ятигодинного часового інтервалу для експериментального дослідження підсистеми керування вологістю пояснюється специфікою фізичних процесів вологообміну в замкненому просторі, які, подібно до температурних, мають виражений інерційний характер. Протягом цього періоду система має можливість не лише зафіксувати початковий стан середовища, а й продемонструвати повний цикл роботи зволожувача повітря. П'ять годин є достатнім терміном для того, щоб підтвердити стабільність алгоритму в умовах поступової зміни параметрів і переконатися, що система коректно інтерпретує вхідні дані з датчика вологості без виникнення хибних спрацювань через короткострокові флуктуації повітряних мас, враховуючи той факт, що вимірювання рівня вологості відбуваються кожні 30 хвилин.

Таблиця 4.10

Значення рівня вологості та дії підсистеми під час 5-годинного експерименту

Час вимірювання	Вологість	Дії підсистеми
13.00	20%	Ввімкнення зволожувача повітря
13.30	22%	Зволожувач повітря продовжує працювати
14.00	24%	Зволожувач повітря продовжує працювати
14.30	26%	Жодних дій. Зволожувач повітря вимикається
15.00	26%	Жодних дій
15.30	26%	Жодних дій
16.00	27%	Жодних дій
16.30	30%	Жодних дій
17.00	32%	Жодних дій
17.30	35%	Жодних дій
18.00	36%	Жодних дій

Отримані значення рівня освітлення протягом 1 години таких вимірювань, а також дії системи «Розумний будинок» в кожний момент часу представлені в Таблиці 4.11. Вибір одногодинного інтервалу для експериментального дослідження підсистеми керування освітленням обумовлений високою динамікою світлових процесів та високою частотою дискретизації даних, оскільки вимірювання світлового потоку відбуваються кожні п'ять хвилин. На відміну від інерційних теплових процесів, рівень освітленості в приміщенні змінюється миттєво при перемиканні ламп або зміні положення засобів затінення, що дозволяє системі за короткий проміжок часу виконати велику кількість ітерацій циклу

«аналіз – розпізнавання – імплементація». Протягом однієї години підсистема встигає дванадцять разів опитати датчики та верифікувати сценарій, що є цілком репрезентативним для підтвердження стабільності алгоритму та його здатності підтримувати заданий світловий режим в умовах постійного моніторингу. Цього часу цілком достатньо для перевірки працездатності методу прийняття рішень, оскільки ключовим завданням експерименту є підтвердження точності розв’язувальної функції та коректності вибору сценаріїв залежно від ініціалізованих параметрів (типу ламп, площі, режиму активності). Оскільки протягом години система демонструє здатність утримувати показники в межах норми без виникнення помилок у розрахунках кількості ламп чи положення жалюзі, подальше збільшення тривалості вимірювань для цього конкретного завдання не принесе додаткової наукової цінності. Таким чином, одна година активного моніторингу дозволяє повністю підтвердити ефективність підсистеми в режимі soft real-time та її готовність до автономного функціонування в динамічному світловому середовищі.

Таблиця 4.11

Значення рівня освітленості та дії підсистеми під час 1-годинного експерименту

Час вимірювання	Світловий потік	Дії підсистеми
13.00	13000 Лм	Наявне надлишкове освітлення, проте система не виконує жодних дій через відсутність засобів затінення
13.05	13100 Лм	Жодних дій
13.10	13150 Лм	Жодних дій
13.15	13180 Лм	Жодних дій
13.20	13200 Лм	Жодних дій
13.25	13230 Лм	Жодних дій

13.30	13240 Лм	Жодних дій
13.35	13270 Лм	Жодних дій
13.40	13300 Лм	Жодних дій
13.45	13330 Лм	Жодних дій
13.50	13360 Лм	Жодних дій
13.55	13380 Лм	Жодних дій
14.00	13350 Лм	Жодних дій

Отримані значення рівня гучності звуку мультимедіа протягом 20 хвилин таких вимірювань, а також дії системи «Розумний будинок» в кожний момент часу представлені в Таблиці 4.12. Вибір двадцятихвилинного інтервалу для експерименту з підсистемою керування гучністю мультимедіа зумовлений надзвичайно високою динамікою акустичних подій та потребою системи реагувати на них майже миттєво. Оскільки рівень шуму може змінюватися за частки секунди, а опитування датчика рівня шуму відбувається щохвилини, цей проміжок часу дозволяє системі накопичити достатню кількість даних для верифікації багаторівневої логіки реагування. Протягом двадцяти хвилин підсистема може встигнути пройти через усі можливі стани. Цього часу цілком достатньо для підтвердження працездатності методу, оскільки головною метою є перевірка точності розпізнавання сценаріїв у динаміці та швидкості переходу між ними. Оскільки акустичний комфорт мешканців залежить від оперативності реакції системи на кожен окремий сплеск шуму, двадцятихвилинна серія щохвилинних вимірювань надає вичерпні докази того, що розроблена розв'язувальна функція працює коректно, забезпечуючи дотримання санітарних норм у реальному часі.

Проведені експерименти демонструють успішну та узгоджену роботу розробленої підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень кіберфізичної системи «Розумний будинок» за трьома ключовими функціями – мікрокліматом (температурою та вологістю), освітленням та гучністю мультимедіа. Система ефективно функціонує як автономний ситуаційний агент, демонструючи гнучке, контекстно-залежне реагування в soft real-time режимі.

Таблиця 4.12

Значення рівня гучності звуку та дії підсистеми під час 20-хвилинного експерименту

Час вимірювання	Рівень гучності	Дії підсистеми
13.00	20 дБА	Жодних дій
13.01	20 дБА	Жодних дій
13.02	20 дБА	Жодних дій
13.03	20 дБА	Жодних дій
13.04	20 дБА	Жодних дій
13.05	30 дБА	Жодних дій
13.06	30 дБА	Жодних дій
13.07	30 дБА	Жодних дій
13.08	45 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.09	45 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.10	45 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.11	55 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.12	55 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.13	55 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.14	65 дБА	Примусове зниження рівня гучності мультимедіа
13.15	55 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку

13.16	65 дБА	Примусове зниження рівня гучності мультимедіа
13.17	55 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.18	55 дБА	Попередження користувача про високий рівень звуку
13.19	35 дБА	Жодних дій
13.20	35 дБА	Жодних дій

Аналіз даних мікроклімату підтверджує, що підсистема здатна автоматично коригувати відхилення від нормативних діапазонів комфорту. Так, при виявленні аномальних ситуацій підсистема продемонструвала пряме прийняття рішень через активацію охолоджувальних приладів при 27° та обігрівальних приладів при 22°. У всіх інших випадках, коли температура була в межах допустимих відхилень, система не виконувала жодних додаткових дій. Аналогічно підсистема швидко розпізнала аномалію (20%) на початку експерименту і негайно активувала зволожувач. Щойно вологість зросла до 26%, підсистема автоматично вимкнула зволожувач, переходячи до сценарію «жодних додаткових дій». Це демонструє здатність системи розпізнавати момент досягнення норми та узгоджено припиняти дію актуатора.

Дані щодо освітленості показують, що протягом годинного вимірювання світловий потік, який досягав 13000-13380 Лм, хоча і був розпізнаний як аномальний для вітальні в режимі «активність» (надлишкове освітлення), проте система не виконувала жодних дій через відсутність засобів затінення.

Експеримент із гучністю мультимедіа підтверджує багаторівневе, гнучке реагування системи. При нормальному рівні гучності звуку система не виконувала жодних дій. При підвищенні гучності звуку до 45 дБА, система видавала попередження користувачеві, демонструючи людиноцентричний підхід та даючи шанс на самостійне коригування. При досягненні гучності у 65 дБА, система автоматично застосувала примусове зниження рівня гучності мультимедіа. Це

підтверджує здатність системи до жорсткого прийняття рішень для дотримання санітарних норм та забезпечення якості життя.

4.4. Висновки

Для проєктування та розроблення підсистеми розпізнавання ситуацій у «Розумному будинку» був зроблений обґрунтований вибір компонентів, що забезпечують комплексний моніторинг середовища. Зокрема, для вимірювання освітленості обрано датчик TSL2561, який надає точні цифрові дані; для моніторингу ключових параметрів мікроклімату – датчик BME280, що комплексно вимірює температуру та вологість; для контролю гучності мультимедіа обрано модуль на базі Max9814, що вирішує проблему широкого динамічного діапазону шуму. В якості центрального контролера обрано ESP32, який є оптимальним завдяки своїй двоядерній архітектурі та 12-бітному АЦП, необхідному для точної обробки аналогового сигналу від Max9814 та виконання складних алгоритмів. Зв'язок у цій архітектурі реалізований на двох рівнях: для локальної взаємодії між цифровими датчиками TSL2561 та BME280 і контролером ESP32 використовується стандарт I2C, що забезпечує швидкий та надійний зв'язок на короткій відстані; для мережевої передачі зібраних даних до центральної системи управління обрано Wi-Fi (IEEE 802.11) з протоколом MQTT.

Розроблена підсистема розпізнавання ситуацій та прийняття рішень є інтегрованим технологічним ядром кіберфізичної системи «Розумний будинок», що принципово відрізняється від традиційних автоматизованих рішень. Її основна функція полягає у комплексному та узгодженому керуванні трьома ключовими функціями комфорту – освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) та гучністю мультимедіа.

Підсистема гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального житлового середовища шляхом безперервного моніторингу, аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази сценаріїв. Це

виводить її на якісно новий рівень – від простого контролю до ситуаційного прийняття автоматичних рішень.

Наукова новизна підсистеми полягає саме у розробленні інтегрованої архітектури, яка, на відміну від відомих рішень, що зосереджуються лише на одній групі функцій, забезпечує комплексне й узгоджене керування трьома функціональними групами одночасно. Це гарантує автоматичне створення комфортного середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази правил (сценаріїв).

Практичне використання підсистеми охоплює широкий спектр застосувань. Вона використовується для автоматичного енергозбереження (наприклад, вимкнення світла, зниження опалення або вимкнення зволожувача при досягненні норми), для створення адаптивних сценаріїв комфорту (наприклад, автоматичне додавання світла, підвищення температури або ввімкнення зволожувача при сухому повітрі), для оперативного контролю безпеки та якості життя (наприклад, сповіщення про перевищення оптимального рівня шуму), а також для оптимізації роботи мультимедійних систем (наприклад, автоматичне зменшення гучності мультимедіа при критичному перевищенні нормативних показників).

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'ятується *актуальна науково-прикладна задача* забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» шляхом розроблення методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

У роботі отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проведений огляд існуючих методів розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень виявив їхній ключовий системний недолік – наявні рішення демонструють високу інтелектуалізацію у вузьких, спеціалізованих областях (наприклад, лише мікроклімат), але не забезпечують інтегрованого та комплексного аналізу. Зокрема, було встановлено, що розпізнавання ситуацій та підтримка прийняття рішень обмежується лише однією з груп керованих функцій житла або взагалі не передбачається. Це означає, що відсутній механізм, який дозволяв би системі автономно поєднувати та узгоджувати дії за трьома основними функціями (мікроклімат, освітлення та мультимедіа) на основі єдиного контексту. Крім цього, більшість існуючих рішень зводяться до автоматизованого керування, керованого людиною, і їм бракує здатності до автономного ситуаційного лідерства. Отже, на даний момент часу спостерігається суперечність між потребою в розпізнаванні ситуації та автоматичному прийнятті рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок» для всіх трьох груп керованих функцій житла (мікроклімат, освітлення та мультимедіа), з одного боку, і недосконалістю методів та засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок», з іншого боку.

2. У дисертаційній роботі була розроблена концепція розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка складається з абстрактної моделі, методу ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа, а також з узагальненого методу прийняття

рішень. Ключовим завданням кіберфізичної системи «Розумний будинок» є розробка розв'язувальної функції u , яка переводить множину сенсорних показників M (температура, вологість, освітленість, гучність) у множину дій Dn (команди актуаторам), що вимагає переходу від простої автоматизації до ситуаційної автоматичності, де центральним механізмом є розпізнавання ситуацій. Розпізнана ситуація Sc , сформована через аналіз та інтерпретацію гетерогенних сенсорних даних, є вхідним контекстом, що активує відповідні сценарії – заздалегідь задані послідовності дій, які забезпечують системі здатність автономно обирати найбільш доречні рішення без прямої команди користувача. Для забезпечення цієї автономної роботи був розроблений метод ініціалізації, який є критичною передумовою і надає системі необхідну базу знань через синхронізацію часових даних та семантичне маркування приміщення, що є основою для коректного ситуаційного аналізу. Цей метод також інтегрує технічні характеристики освітлювального обладнання та засобів затінення, що дозволяє узагальненому методу прийняття рішень здійснювати точні розрахунки та забезпечувати комплексне й узгоджене керування трьома функціональними групами – мікрокліматом, освітленням та мультимедіа.

3. Проведено сценарне моделювання керування мікрокліматом, освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», під час якого деталізовані сценарії були розроблені для забезпечення комплексного та узгодженого керування трьома функціональними групами – мікрокліматом, освітленням та мультимедіа. Сценарії керування, включаючи розрахунок необхідної кількості ламп для досягнення цільової освітленості, дозволяють генерувати автоматичні рішення для житлових приміщень різного типу на основі розпізнаної ситуації та параметрів ініціалізації.

4. Розроблено методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» (метод прийняття рішень щодо керування температурою, метод прийняття рішень щодо керування вологістю, метод прийняття рішень щодо керування освітленням, метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний

будинок»), які комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання комфортного та оптимального житлового середовища, суворо дотримуючись при цьому будівельних та санітарно-гігієнічних норм відповідно до типу приміщення інших параметрів. Зокрема, метод керування температурою гарантує підтримку оптимальних теплових параметрів, а метод керування вологістю забезпечує комфортну концентрацію вологи в повітрі. Метод керування освітленням дозволяє системі гнучко регулювати світловий потік, використовуючи засоби затінення та штучні лампи для забезпечення необхідного режиму освітленості. Головною перевагою методу керування гучністю мультимедіа є забезпечення недопущення перевищення встановлених санітарних норм (максимального рівня шуму), що спрямовано на підвищення комфорту, безпеки та автономності мешканців.

5. Для проєктування та розроблення підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» був зроблений обґрунтований вибір компонентів, що забезпечують комплексний моніторинг середовища. Зокрема, для вимірювання освітленості обрано датчик TSL2561, який надає точні цифрові дані; для моніторингу ключових параметрів мікроклімату – датчик BME280, що комплексно вимірює температуру та вологість; для контролю гучності мультимедіа обрано модуль на базі Max9814, що вирішує проблему широкого динамічного діапазону шуму. В якості центрального контролера обрано ESP32, який є оптимальним завдяки своїй двоядерній архітектурі та 12-бітному АЦП, необхідному для точної обробки аналогового сигналу від Max9814 та виконання складних алгоритмів. Зв'язок у цій архітектурі реалізований на двох рівнях: для локальної взаємодії між цифровими датчиками TSL2561 та BME280 і контролером ESP32 використовується стандарт I2C, що забезпечує швидкий та надійний зв'язок на короткій відстані; для мережевої передачі зібраних даних до центральної системи управління обрано Wi-Fi (IEEE 802.11) з протоколом MQTT.

6. У дисертації спроектовано архітектуру та реалізовано підсистему розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та

мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка виступає як інтегроване технологічне ядро кіберфізичної системи «Розумний будинок», забезпечуючи комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту – освітленням, мікрокліматом (температурою та вологістю) і гучністю мультимедіа. Її новизна полягає у створенні інтегрованої моделі, яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази сценаріїв, виводячи систему від простого контролю до ситуаційного прийняття автоматичних рішень. Практичне застосування цієї підсистеми охоплює широкий спектр можливостей – від автоматичного енергозбереження (наприклад, оптимізація опалення та освітлення) та створення адаптивних сценаріїв комфорту (наприклад, додавання світла чи підвищення температури) до оперативного контролю безпеки та якості життя (наприклад, сповіщення про перевищення рівня шуму).

Обмеженнями пропонованої підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» є: залежність від коректності даних, отриманих з датчиків, та від стабільності мережевої інфраструктури; залежність від ручної ініціалізації та коректності введених користувачем даних ініціалізації підсистеми; залежність від роботоздатності актуаторів (обігрівальних та охолоджувальних приладів, зволожувачів та осушувачів повітря, засобів затінення та ламп освітлення тощо); семантичні та функціональні конфлікти, що виникають у процесі одночасного керування декількома підсистемами; обмеження у врахуванні суб'єктивних преференцій комфорту конкретного користувача, які можуть виходити за межі стандартних нормативів; залежність від безперебійного електроживлення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Maslova M. "Smart House": bibliographic index. URL: <https://zounb.zp.ua/wp-content/uploads/2021/07/Rozumnij-budinok-pokazhchik-6.04.21-s-oblozhkoj.pdf>.
2. Yurchak I., Vyshynskiy P. Application of Fuzzy Logic Algorithms in Smart Home Systems. *Computer Systems and Networks*. 2018. Vol. 905. Pp. 142-148.
3. Kukunin S. Development of a holistic methodology for the organization of "Smart House" type systems within the framework of the "Internet of Things" paradigm. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2020. Vol. 38. Pp. 40-45.
4. Sribna I., Aleksandrov A. Interactive automatic system "Smart House". *Communication*. 2019. Vol. 3. Pp. 55-58.
5. Prediction of factors for Controlling of Green House Farming with Fuzzy based multiclass Support Vector Machine / K. Devi Thangavel et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2022.
6. Sung W.-T., Hsiao S.-J. Creating Smart House via IoT and Intelligent Computation. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2023. Vol. 35, no. 1. P. 415–430.
7. Ayu Lestari R., Yusmaniar Oktiawati U. Full state feedback and feed forward control of servo smart window using MATLAB/Simulink. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol. 28, no. 3. P. 1355.
8. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control. 2022 *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Prague, Czech Republic, 28 June – 1 July 2022. 2022.
9. Abedi S., Kwon S. Rolling-horizon optimization integrated with recurrent neural network-driven forecasting for residential battery energy storage operations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023. Vol. 145. P. 108589.

10. Home Energy Management System with Improved Binary PSO / A. Mohammad et al. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2022. P. 873–881.
11. Optimal components capacity based multi-objective optimization and optimal scheduling based MPC-optimization algorithm in smart apartment buildings / K. Tamashiro et al. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 278. P. 112616.
12. Optimal Energy Scheduling of Appliances in Smart Buildings Based on Economic and Technical Indices / I. Muda et al. *Environmental and Climate Technologies*. 2022. Vol. 26, no. 1. P. 561–573.
13. Fuada S., Hendriyana H. UPISmartHome V.2.0 – A Consumer Product of Smart Home System with an ESP8266 as the Basis. *Journal of Communications*. 2022. P. 541–552.
14. Design and Implementation of Real-Time Kitchen Monitoring and Automation System Based on Internet of Things / C. A. U. Hassan et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 18. P. 6778.
15. OTP-Based Smart Door Opening System / P. Srinivasan et al. *Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks*. Singapore, 2022. P. 87–98.
16. Lentzas A., Vrakas D. Machine learning approaches for non-intrusive home absence detection based on appliance electrical use. *Expert Systems with Applications*. 2022. P. 118454.
17. Kumar T., Srinivasan R., Mani M. An Emergy-based Approach to Evaluate the Effectiveness of Integrating IoT-based Sensing Systems into Smart Buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52. P. 102225.
18. ECHONET Lite Framework Based on Embedded Component Systems / F. Qi et al. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT)*. 2022. Vol. 16, no. 1. P. 74–83.
19. Smart Home Personal Assistants: Fueled by Natural Language Processor and Blockchain Technology / S. A. Ansar et al. *2022 Second International Conference on Interdisciplinary Cyber Physical Systems (ICPS)*, Chennai, India, 9–10 May 2022. 2022.
20. Smart sensors network for accurate indirect heat accounting in apartment buildings / Y. Stauffer et al. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 46. P. 103534.

21. Kalytka A. A Computer System for Collecting Data on Temperature and Humidity on Premises. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2023. Vol. 8, no. 1. P. 17–24.
22. Lozynskyi Y., Yurchak I. An Alternative to Vending Machines. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2023. Vol. 8, no. 2. P. 118–126.
23. Kohut Y., Yurchak I. Recommendation System for Purchasing Goods Based on the Decision Tree Algorithm. *Advances in Cyber-Physical Systems*. 2021. Vol. 6, no. 2. P. 121–127.
24. Kukunin S. V. Estimation of Basic Approaches for Home Automation System Based on Artificial Intelligence Development. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2020. Vol. 1, no. 1. P. 89–93.
25. Tsyurulnyk S. Mobile Applications and Online Wi-Fi Monitoring Platforms of Weather Stations. *Open Educational E-Environment of Modern University*. 2020. No. 9. P. 181–192.
26. Remotely Manage the Power of Iot Devices / S. Tsyurulnyk et al. *Elektronnoe modelirovanie*. 2024. Vol. 46, no. 5. P. 74–91.
27. Tsyurulnyk S. M., Tkachuck V. M., Tsyurulnyk M. O. Prototyping IOT project at WOKWI service. *16th IC Measurement and Control in Complex Systems*, Vinnytsia, Ukraine, 15–17 November 2022. Vinnytsia, 2022.
28. Казарян А. Г., Теслюк В. М., Машевська М. В. Розроблення системи керування базою даних системи "Розумного" будинку. *Моделювання та інформаційні технології*. 2018. Вип. 84. С. 184–190.
29. Теслюк В. М., Цмоць І. Г., Казарян А. Г., Теслюк Т. В. Метод проектування систем "Розумного" будинку з використанням архітектурного шаблону Redux. *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*. 2019. Т. 29. № 7. С. 146–150.
30. Баран М. М., Береговська Х. В., Теслюк В. М. Розроблення автоматизованої програмної системи адміністрування та моніторингу систем "Розумний будинок". *Моделювання та інформаційні технології : збірник наукових праць ІПМЕ НАН України*. 2017. Вип. 81. С. 114–123.

31. Yatskiv V., Bodnarovskyi V. Research of Methods of Energy Efficiency Management in the "Smart House" System. *Computer systems and information technologies*. 2022. No. 2. P. 42–46.
32. Review of Smart-Home Security Using the Internet of Things / G. Vardakis et al. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 16. P. 3343.
33. Smart Home: Deep Learning as a Method for Machine Learning in Recognition of Face, Silhouette and Human Activity in the Service of a Safe Home / G. Vardakis et al. *Electronics*. 2022. Vol. 11, no. 10. P. 1622.
34. Artificial Intelligence-Driven Composition and Security Validation of an Internet of Things Ecosystem / G. Hatzivasilis et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 14. P. 4862.
35. Hsiao S.-J., Sung W.-T. Intelligent Home Using Fuzzy Control Based on AIoT. *Computer Systems Science and Engineering*. 2023. Vol. 45, no. 2. P. 1063–1081.
36. Constructing a Lightweight Fire and Smoke Detection through the Improved GhostNet Architecture and Attention Module Mechanism / W.-T. Sung et al. *IEEE Access*. 2025. P. 1.
37. Sung W.-T., Aryani J., Hsiao S.-J. Intelligent Factory with Environment Quality Control Based on Fuzzy Method through Deep Reinforcement Learning. *Sensors and Materials*. 2024. Vol. 36, no. 8. P. 3491.
38. Internet of Things (IoT) Monitoring and Control for Smart Heating and Cooling in a Residential Building / W. Yaïci et al. *2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Oshawa, ON, Canada, 29 August – 1 September 2023. 2023.
39. Yaïci W., Longo M. Performance analysis of domestic boilers fuelled with hydrogen-enriched natural gas blends and pure hydrogen. *Energy*. 2025. P. 135536.
40. Hybrid Renewable Energy Systems with Hydrogen and Battery Storage Options for Stand-Alone Residential Building Application in Canada / W. Yaici et al. *2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, Istanbul, Turkey, 18–21 September 2022. 2022.

41. Economic and Environmental Impact of Energy Efficient Design of Smart Lighting System / A. Mohammad et al. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*. 2023.
42. Mohammad A., Kamal M. M., Ashraf I. Mathematical Modeling of Water Heater and HVAC for Demand Response Analysis. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2021. P. 545–554.
43. Smart Streetlight System for Smart Cities Using IoT / A. Mohammad et al. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2021. P. 565–571.
44. Aljarboun A., Zubov D. Matching and Discovery Algorithms in Internet of Things: Open Issues, Challenges, and Future Directions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, 2024. P. 423–436.
45. Zubov D., Kupin A., Shaidullaev N. Indoor spatial cognition of the hearing/visually impaired: pentest-inspired WiFi heatmap on Android platform. *CEUR-WS*. 2024. Vol. 3790. Pp. 285-294.
46. Zubov D., Aljarboun A., Kupin A., Batayeva G. PV-driven Smart Islanded Microgrid: Intelligent I2C Arduino-based Demand Energy Management. *CEUR-WS*. 2024. Vol. 3736. Pp. 212-222.
47. Kupin A., Zubov D., Zhenishbekova A. Smart Control of Temperature and Audio Monitoring Inside Beehive: IoT ESP8266 NodeMCU and Android Mobile Platforms. *CEUR-WS*. 2023. Vol. 3513. Pp. 239-249.
48. Adjusting the brightness and contrast parameters of digital video cameras using artificial neural networks / S. Balovsyak et al. *International Conference Correlation Optics (COR2023)*, Chernivtsi, Ukraine, 18–21 September 2023 / ed. by O. V. Angelsky, C. Y. Zenkova. 2024.
49. Computer system for increasing the local contrast of railway transport images / S. Balovsyak et al. *Fifteenth International Conference on Correlation Optics*, Chernivtsi, Ukraine, 13–16 September 2021 / ed. by O. V. Angelsky. 2021.
50. Balovsyak S., Hrynyk N., Hu Z., Odaiska K., Yanchuk I. Improving accuracy of photogrammetry method using image segmentation by YOLO neural networks. *CEUR-WS*. 2025. Vol. 3963. Pp. 125-138.

51. Enhanced fire hazard detection in solar power plants: an integrated UAV, AI, and SCADA-based approach / A. Lysyi et al. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. Vol. 2025, no. 2.
52. Підвищення надійності та функціональної безпеки автоматизованої системи керування водопостачанням / О. Савенко та ін. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 4. С. 145–152.
53. Hovorushchenko T., Pavlova O., Kostiuk M. Method of Increasing the Security of Smart Parking System. *Journal of Cyber Security and Mobility*. 2023. Vol. 12. Issue 3. Pp. 297-314.
54. T. Hovorushchenko, V. Baranovskyi, O. Ivanov, A. Hnatchuk. Subsystem for monitoring atmospheric air quality in the cyber-physical system “Smart city”. *Computer systems and information technologies*. 2024. №1. Pp. 17-26.
55. T. Hovorushchenko, Ye. Voevudskyi, O. Ivanov, O. Voichur. Cyber-physical system for monitoring the environment for allergens using geolocation data. *Computer systems and information technologies*. 2024. №1. Pp. 127-133.
56. Kovtun V., Izonin I., Gregus M. Mathematical models of the information interaction process in 5G-IoT ecosystem: Different functional scenarios. *ICT Express*. 2021.
57. Kovtun V., Izonin I., Gregus M. The functional safety assessment of cyber-physical system operation process described by Markov chain. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12 (1). Paper 7089.
58. IOT Based Smart Farming Application / D. P.M et al. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 399. P. 04012.
59. IOT Based Real Time River Water Quality Monitoring and Control System / D. P.M et al. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 399. P. 04013.
60. Sleep apnea monitoring system using pulse oximeter / S. R. Savarimuthu et al. *International Conference on Green Computing for Communication Technologies (ICGCCT – 2024)*, Salem, India. 2025. P. 020149.

61. Kumar T., Mani M. Discerning Occupant Psychosocial Behaviour in Smart Built Environment and its Design. *The 1st ACM International Workshop*, New York, NY, USA, 13–14 November 2019. New York, New York, USA, 2019.
62. Development and Metrological Characterization of a Multi-sensor Device for Indoor Environmental Quality (IEQ) monitoring / A. Astolfi et al. *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv)*, Milano, Italy, 29–31 May 2023. 2023.
63. Experimental Analysis of a Heat Cost Allocation Method for Apartment Buildings / F. Saba et al. *Buildings*. 2017. Vol. 7, no. 4. P. 20.
64. Hnatchuk Ye., Hovorushchenko T., Shteinbrekher D., Boyarchuk A., Kysil T. Medical Information Technology for Decision-Making Taking into Account the Norms of Civil Law. *International Journal on Information Technologies and Security*. 2023. Vol. 15. No. 1. Pp. 77-88.
65. Hovorushchenko T., Hnatchuk Ye., Osyadlyi V., Kapustian M., Boyarchuk A. Blockchain-Based Medical Decision Support System. *Journal of Cyber Security and Mobility*. 2023. Vol. 12. Issue 3. Pp. 253-274.
66. Hnatchuk Ye., Hovorushchenko T., Pavlova O. Methodology for the Development and Application of Clinical Decisions Support Information Technologies with Consideration of Civil-Legal Grounds. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No 1. Pp. 33-44.
67. Tverdokhlib O., Shavaev D., Matseliukh Y., Gozhyi A., Trzaskowska A.M., Korobchynskyi M., Chyrun L., Kalinina I. Analysis Method for Determining the Suitability of Water for Human Consumption. *CEUR-WS*. 2022. Vol. 3312. Pp. 388-411.
68. Digital Signature Scheme Based on Linear Equations / G. Khalimov et al. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, 2025. P. 711–728.
69. Lovkin V., Oliinyk A., Lukashenko Y. Air pollution prediction as a source for decision making framework in medical diagnosis. *CEUR-WS*. 2021. Vol. 2853. Pp. 295-302.

70. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Lytvyn V., Korniienko O. Implementation of reinforcement learning strategies in the synthesis of neuromodels to solve medical diagnostics tasks. *CEUR-WS*. 2021. Vol. 3038. Pp. 34-43.
71. Rabcan J., Zaitseva E., Levashenko V., Kvassay M., Surda P., Macekova D. Fuzzy decision tree based method in decision-making of COVID-19 patients' treatment. *Mathematics*. 2021. Vol. 9 (24). Paper 3282.
72. Levashenko V., Zaitseva E., Kvassay M., Deserno T. Reliability Estimation of Healthcare Systems using Fuzzy Decision Trees. *11-th International Conference on Computer Science and Information Technologies: Proceedings* (Lviv (Ukraine), September 06-10, 2016). Lviv, 2016. Pp. 331-340.
73. Goodman K. Ethical and Legal Issues in Decision Support. *Health Informatics Series*. 2016. Pp. 131-146.
74. Varotsos C., Krapivin V., Xue Y., Soldatov V., Voronova T. COVID-19 pandemic decision support system for a population defense strategy and vaccination effectiveness. *Safety Science*. 2021. Vo. 142. Paper 105370.
75. Strategic decision making in smart home ecosystems: A review on the use of artificial intelligence and Internet of things / P. Rodriguez-Garcia et al. *Internet of Things*. 2023. P. 100772.
76. T. O. Hovorushchenko, S. V. Aleksov, S. I. Talapchuk, O. V. Shpylyuk, V. V. Magdin. Overview of the Methods and Tools for Situation Identification and Decision-Making Support in the Cyberphysical System "Smart House". *Computer Systems and Information Technologies*. 2022. №4. Pp. 20-26.
77. T. Hovorushchenko, S. Aleksov, Yu. Popov, V. Bachuk. Decision-Making Method for Temperature Control in the Smart Home. *Computer systems and information technologies*. 2023. №3. Pp. 6-11.
78. С. Алексов, Т. Говорущенко, О. Войчур, Ю. Войчур. Метод керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний дім». *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. №4. С. 108-114.

79. С. Алексов, Т. Говорущенко, Ю. Войчур, А. Боярчук. Метод керування вологістю в кіберфізичній системі «Розумний дім». *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2024. №6. С. 125-128.

80. Алексов С.В., Коробчинський М.В. Метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2025. №6. Том 1. С. 323-328.

81. Говорущенко Т.О., Алексов С.В. Підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. №4. С. 23-34.

82. T. Hovorushchenko, S. Aleksov, E. Ishtvan, O. Voichur, P. Popov. Recognizing the Situations and Supporting the Decision-Making in the Residential Luminosity Control Subsystem of «Smart House» Cyber-Physical System. *CEUR-WS*. 2023. Vol. 3373. Pp. 566-588.

83. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for the Humidity Control Subsystem of the Cyber-Physical System “Smart House”. 2023 *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 13–15 October 2023. 2023.

84. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for Sound Volume Control in the “Smart House” System. *2024 IEEE 19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 16–19 October 2024. 2024. P. 1–4.

85. Resilient Distributed Optimization for Multi-Agent Cyberphysical Systems / M. Yemini et al. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2025. P. 1–16.

86. Explainable AI for Cyber-Physical Systems: Issues and Challenges / A. Hoenig et al. *IEEE Access*. 2024. P. 1.

87. Artificial intelligence in cyber physical systems / P. Radanliev et al. *AI & Society*. 2020.

88. Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook / S. J. Oks et al. *Information Systems Frontiers*. 2022.
89. A Cyber Physical Interface for Automation Systems—Methodology and Examples / H.-A. Kao et al. *Machines*. 2015. Vol. 3, no. 2. P. 93–106.
90. Chen N., Geng S., Li Y. Modeling and Verification of Uncertain Cyber-Physical System Based on Decision Processes. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, no. 19. P. 4122.
91. Asmat M. N., Khan S. U. R., Hussain S. Uncertainty handling in cyber–physical systems: State-of-the-art approaches, tools, causes, and future directions. *Journal of Software: Evolution and Process*. 2022.
92. Harnessing Real-Time Data for Intelligent Decision-Making in Cyber-Physical Systems / T. Premavathi et al. *Advances in Computer and Electrical Engineering*. 2024. P. 257–286.
93. Pinto A. Analysis and Design of Uncertain Cyber-Physical Systems. *Systems & Control: Foundations & Applications*. Cham, 2023. P. 25–53.
94. Development of smart application for house condition survey / A. Hyder Chohan et al. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 101628.
95. Energy Savings in Buildings Based on Image Depth Sensors for Human Activity Recognition / O. Mata et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 1078.
96. Tunable White Light for Elders (TWLITE): A Protocol Demonstrating Feasibility and Acceptability for Deployment, Remote Data Collection, and Analysis of a Home-Based Lighting Intervention in Older Adults / J. E. Elliott et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 14. P. 5372.
97. Smith N. Smart Bee Houses: Designing to Support Urban Pollination. *ACI'21: Eight International Conference on Animal-Computer Interaction*, Bloomington IN USA. New York, NY, USA, 2021.
98. Abha Mahalwar A., Sharma R. Cyber-Physical Systems: Challenges and Future Directions. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 2020. Vol. 11, no. 3. P. 2865–2870.

99. Siakas D., Lampropoulos G., Siakas K. Autonomous Cyber-Physical Systems Enabling Smart Positive Energy Districts. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 13. P. 7502.
100. A Reference Architecture of Human Cyber-Physical Systems – PART I: Fundamental Concepts / W. Damm et al. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2023.
101. Azeri N., Hioual O., Hioual O. Towards an Approach for Modeling and Architecting of Self-Adaptive Cyber-Physical Systems. *2022 4th International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Systems (PAIS)*, Oum El Bouaghi, Algeria, 12–13 October 2022. 2022.
102. Cognitive architecture for cognitive cyber-physical systems / J. Al Haj Ali et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, no. 19. P. 1180–1185.
103. Kluge T. A role-based architecture for self-adaptive cyber-physical systems. *SEAMS '20: IEEE/ACM 15th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*, Seoul Republic of Korea. New York, NY, USA, 2020.
104. Dutt N., TaheriNejad N. Self-Awareness in Cyber-Physical Systems. *2016 29th International Conference on VLSI Design and 2016 15th International Conference on Embedded Systems (VLSID)*, Kolkata, India, 4–8 January 2016. 2016.
105. Li T., Sun J., Fei L. Application of Multiple-Criteria Decision-Making Technology in Emergency Decision-Making: Uncertainty, Heterogeneity, Dynamicity, and Interaction. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, no. 5. P. 731.
106. Hsieh F.-S. A Theoretical Foundation for Context-Aware Cyber-Physical Production Systems. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 10. P. 5129.
107. Nota G., Petraglia G. Heritage buildings management: the role of situational awareness and cyber-physical systems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2024.
108. Edge-Computing-Driven Internet of Things: A Survey / L. Kong et al. *ACM Computing Surveys*. 2022.

109. An intelligent edge-enabled distributed multi-task learning architecture for large-scale IoT-based cyber-physical systems / S. Hamdan et al. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2022. P. 102685.

110. Research on Designing Context-Aware Interactive Experiences for Sustainable Aging-Friendly Smart Homes / Y. Lu et al. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 17. P. 3507.

111. Nota G., Petraglia G. The Design of Human-in-the-Loop Cyber-Physical Systems for Monitoring the Ecosystem of Historic Villages. *Smart Cities*. 2024. Vol. 7, no. 5. P. 2966–2994.

112. Modeling Human Behavior in Cyber-Physical-Social Infrastructure Systems / M. Doctorarastoo et al. *BuildSys '23: The 10th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, Istanbul Turkey. New York, NY, USA, 2023.

113. Korki M., Jin J., Tian Y.-C. Real-Time Cyber-physical Systems: State-of-the-Art and Future Trends. *Handbook of Real-Time Computing*. Singapore, 2022. P. 509–540.

114. Design Procedure for Real-Time Cyber-Physical Systems Tolerant to Cyberattacks / C. M. Paredes et al. *Symmetry*. 2024. Vol. 16, no. 6. P. 684.

115. He Y., Tian J., Cao Y. Intelligent home temperature and light control system based on the cloud platform. *2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, Xi'an, China, 15–17 April 2022. 2022.

116. Nchena L. Smart House Assistive Technologies for Senior Citizens. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia, 26–28 September 2022. 2022.

117. Saha A., Das P. S., Banik B. C. Smart Green House for Controlling & Monitoring Temperature, Soil & Humidity Using IOT. *2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, Vijayawada, India, 12–14 February 2022. 2022.

118. Шостак І. В., Данова М.О., Феоктистова О. І. Підхід до роботизації процесів функціонування системи «Розумний будинок» на основі Інтернету речей.

XIII міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», Київ, 19-20 трав. 2020 р. 2020. С. 48-49.

119. Полякова О. В. Класифікація функціональних складових елементів системи інтелектуального керування середовищем при проектуванні житла. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки.* 2016. № 4 (100). С. 133-140.

120. Федоров Д. Збільшення комфорту життя за допомогою інтелектуальних машин «Безпечний будинок». *Наукові записки Малої академії наук України. Серія: Педагогічні науки.* 2018. Вип. 12. С. 179-185.

121. Jiang J. Y., Qi F., Oyama H., Nagashima H., Azumi T. ECHONET Lite Framework Based on Embedded Component Systems. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology.* 2022. Vol. 16. Issue 1. Pp. 74 – 83.

122. Zvenihorodskyi O. S. Recommendation system for managing a Smart Home. *Connectivity.* 2022. Vol. 159, no. 5.

123. Васильченко Є., Шевченко В. Система керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення. *Measuring and computing devices in technological processes.* 2024. № 4. С. 256–264.

124. Automation of microclimate control processes in residential premises / Z. Mykytyuk et al. *Information and communication technologies, electronic engineering.* 2024. Vol. 4, no. 1. P. 155–162.

125. Chovniuk Y., Cherednichenko P., Moskvitina A. Modeling and algorithm for calculation of parameters of the room microclimate regulation system with artificial intelligence elements. *Urban development and spatial planning.* 2022. No. 79. P. 446–462.

126. Yevseienko O., Kachanov P. Shopping mall premises scada-microclimate control system development. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences.* 2022. Vol. 309, no. 3. P. 168–176.

127. Zhou J., Chu Q., Zhang Y. Temperature and humidity characteristics of residential buildings in northern China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019. Vol. 371. P. 022065.

128. Ambroziak A., Borkowski P. Temperature and humidity model for predictive control of smart buildings. *Journal of Building Engineering*. 2024. P. 111668.
129. Zhu X., Li H. Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) Temperature and Humidity Control Optimization Based on Large Language Models (LLMs). *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 1813.
130. Shehadi M. Review of humidity control technologies in buildings. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 19. P. 539–551.
131. Zhu H.-C., Ren C., Cao S.-J. Fast prediction for multi-parameters (concentration, temperature and humidity) of indoor environment towards the online control of HVAC system. *Building Simulation*. 2020.
132. An Analytical Review of Humidity-Regulating Materials: Performance Optimization and Applications in Hot and Humid Regions / D. Zhang et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15, no. 23. P. 4376.
133. Improved indoor air temperature and humidity control using a novel direct-expansion-based air conditioning system / L. Yang et al. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. P. 102920.
134. Economic and Energy Efficiency of Artificial Lighting Control Systems for Stairwells of Multistory Residential Buildings / V. Burmaka et al. *Journal of Daylighting*. 2020. Vol. 7, no. 1. P. 93–106.
135. Vasylenko M. P., Saponiuk I. Y. Automatic system of lighting control in residential buildings. *Electronics and Control Systems*. 2020. Vol. 1, no. 63.
136. Climatization and luminosity optimization of buildings using genetic algorithm, random forest, and regression models / B. Mota et al. *Energy Informatics*. 2021. Vol. 4, S2.
137. Ferreira V., Pinto T., Baptista J. Contextual Rule-Based System for Brightness Energy Management in Buildings. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 1. P. 218.
138. Quantitative Evaluation and Optimization of the Light Environment in Sleep-Conductive Workplaces / B. Zhang et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15, no. 23. P. 4373.
139. Optimum external shading system for counterbalancing glare probability and daylight illuminance in Sydney's residential buildings / E. Sorooshnia et al. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021.

140. Retrofitting the Electric Lighting and Daylighting Systems to Reduce Energy Use in Buildings: A Literature Review / M.-C. Dubois et al. *Energy Research Journal*. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 25–41.

141. Advancing Smart Lighting: A Developmental Approach to Energy Efficiency through Brightness Adjustment Strategies / V. P. Widartha et al. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 6.

142. Mohanaprasad K. Sound-Based Control System Used in Home Automation. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2018. P. 267–278.

143. Active Volume Control in Smart Phones Based on User Activity and Ambient Noise / V. D. Ambeth Kumar et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 15. P. 4117.

144. Knudsen S. L., Fritsch J., Jørgensen S. M. H. MoSS: Unfolding Playful Imaginaries of Synthetic Voice Design through a Modular Smart Speaker. *DIS '24: Designing Interactive Systems Conference*, IT University of Copenhagen Denmark. New York, NY, USA, 2024.

145. Bansal A., Garg N. K. Robust technique for environmental sound classification using convolutional recurrent neural network. *Multimedia Tools and Applications*. 2023.

146. Sound Source Localization Algorithm of Microphone Array Based on Incremental Broad Learning System / R. Tang et al. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2023.

147. Real-Time Sound Recognition System for Human Care Robot Considering Custom Sound Events / S.-H. Kim et al. *IEEE Access*. 2024. P. 1.

148. Yang C. Design of Smart Home Control System Based on Wireless Voice Sensor. *Journal of Sensors*. 2021. Vol. 2021. P. 1–11.

149. Confusion Matrix: How To Use It & Interpret Results [Examples]. Веб-сайт. URL: <https://www.v7labs.com/blog/confusion-matrix-guide>. (Дата звернення: 06.03.2025).

150. Гнатчук Є.Г. Теоретичні та прикладні засади інформаційної технології підтримки прийняття медичних рішень з врахуванням цивільно-правових підстав: дис. ... доктора техн. наук: 05.13.06. Хмельницький, 2024. 500 с.

ДОДАТОК А.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових
видань України:*

1. T. O. Hovorushchenko, S. V. Aleksov, S. I. Talapchuk, O. V. Shpylyuk, V. V. Magdin. Overview of the Methods and Tools for Situation Identification and Decision-Making Support in the Cyberphysical System "Smart House". Computer Systems & Information Technologies. 2022. №4. Pp. 20-26. <https://doi.org/10.31891/csit-2022-4-3>
2. T. Hovorushchenko, S. Aleksov, Yu. Popov, V. Bachuk. Decision-Making Method for Temperature Control in the Smart Home. Computer systems and information technologies. 2023. №3. Pp. 6-11. <https://doi.org/10.31891/csit-2023-3-1>
3. С. Алексов, Т. Говорущенко, О. Войчур, Ю. Войчур. Метод керування освітленням у кіберфізичній системі «Розумний дім». Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2024. №4. С. 108-114. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-4>
4. С. Алексов, Т. Говорущенко, Ю. Войчур, А. Боярчук. Метод керування вологістю в кіберфізичній системі «Розумний дім». Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». 2024. №6. С. 125-128. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-345-6-19>
5. Алексов С.В., Коробчинський М.В. Метод прийняття рішень щодо керування гучністю мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». 2025. №6. Том 1. С. 323-328. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-44>
6. Говорущенко Т.О., Алексов С.В. Підсистема розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок». Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2025. №4. С. 23-34. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-3>

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. T. Hovorushchenko, S. Aleksov, E. Ishtvan, O. Voichur, P. Popov. Recognizing the Situations and Supporting the Decision-Making in the Residential Luminosity Control Subsystem of «Smart House» Cyber-Physical System. CEUR-WS. 2023. Vol. 3373. Pp. 566-588. *(індексована в наукометричній базі Scopus)* <https://ceur-ws.org/Vol-3373/paper39.pdf>

8. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for the Humidity Control Subsystem of the Cyber-Physical System “Smart House”. 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 13–15 October 2023. 2023. *(індексована в наукометричній базі Scopus)* <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416435>

9. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for Sound Volume Control in the “Smart House” System. 2024 IEEE 19th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 16–19 October 2024. 2024. P. 1–4. *(індексована в наукометричній базі Scopus)* <https://doi.org/10.1109/CSIT65290.2024.10982549>

ДОДАТОК Б.
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

«Затверджую»

Директор ТОВ «Деймос»

Пантелєєв С.В.

2025 р.

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи
 «Методи і засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у
 кіберфізичній системі «Розумний будинок»»
 Алексова Сергія Вікторовича

Даним актом засвідчується впровадження результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії С. В. Алексова на підприємстві ТОВ «Деймос», який проводив роботи з впровадження методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок».

В процесі розв'язання здобувачем науково-прикладної задачі забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок», Алексовим С.В. були одержані особисто та використані на підприємстві ТОВ «Деймос» такі наукові та практичні результати:

1) метод ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» як комплексної процедури первинної ініціалізації підсистеми, який, на відміну від відомих рішень, що обмежуються лише налаштуванням часових або порогових параметрів, забезпечує систему комплексною, багатфакторною базою знань – від синхронізації soft real-time часових даних і семантичного маркування приміщення до інтеграції технічних характеристик обладнання та цільових пріоритетів;

2) методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», які, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано, комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання оптимального житлового середовища, гарантують підвищення комфорту, безпеки та автономності мешканців відповідно до будівельних і санітарно-гігієнічних вимог;

3) архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, що керують лише однією групою функцій, забезпечує комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа). Така архітектура гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази сценаріїв, переводячи систему від простого контролю до ситуаційного прийняття автоматичних рішень.

«Затверджую»

Голова
ГО «ІТ-КЛАСТЕР міста Хмельницького»

 В. В. Аскеров

«15» 10 2025 р.
Ідентифікаційний код 42426458

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Алексова Сергія Вікторовича

Голова ГО «ІТ-КЛАСТЕР міста Хмельницького» Аскеров В.В. склав цього акта про впровадження результатів дисертаційної роботи Методи і засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» Алексова Сергія Вікторовича у ГО «ІТ-КЛАСТЕР м. Хмельницького» у тому, що він проводив роботи з впровадження методів і засобів методів і засобів розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у кіберфізичній системі «Розумний будинок» на підприємствах, які входять до ГО.

В процесі розв'язання здобувачем науково-прикладної задачі забезпечення розпізнавання ситуації та автоматичного прийняття рішень кіберфізичною системою «Розумний будинок», Алексовим С.В. були одержані особисто та використані у ГО «ІТ-КЛАСТЕР міста Хмельницького» такі наукові та практичні результати:

- деталізована сценарна модель керування мікрокліматом (температурою та вологістю), освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізолювано або лише за бінарними умовами, забезпечує комплексне та узгоджене прийняття автоматичних рішень одразу за всіма трьома групами функцій, інтегруючи при цьому розрахунок необхідної кількості ламп для досягнення цільової освітленості. Така сценарна модель забезпечує автоматичне генерування узгоджених рішень для приміщень різного типу на основі розпізнаної ситуації та первинних параметрів ініціалізації;

- методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», які, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізолювано, комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання оптимального житлового середовища, гарантують підвищення комфорту, безпеки та автономності мешканців відповідно до будівельних і санітарно-гігієнічних вимог;

- архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, що керують лише однією групою функцій, забезпечує комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту.

«Затверджую»

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету

д.т.н., професор

Олег СИНЮК

2025 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

«Методи і засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у
кіберфізичній системі «Розумний будинок»»

Алексова Сергія Вікторовича

Комісія Хмельницького національного університету в складі: завідувача кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, д.ф., доцента Ольги Павлової, професора кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, д.т.н., професора Сергія Лисенка, доцента кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, к.т.н., доцента Андрія Нічепорука склали цього акта в тому, що результати дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Алексова С.В. впроваджені у навчальний процес на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, зокрема, в навчальних дисциплінах: «Комп'ютерні та кіберфізичні системи», «Системне програмування та Інтернет речей», «Програмування мікроконтролерних систем».

При викладанні цих навчальних дисциплін використовувались і використовуються такі матеріали досліджень, проведених автором:

1) методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», які, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано, комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання оптимального житлового середовища. Вони гарантують гнучке регулювання світлового потоку (з урахуванням затінення), підтримку оптимальних теплових параметрів та концентрації вологи,

а також автоматичне недопущення перевищення санітарних норм гучності, що загалом підвищує комфорт, безпеку та автономність мешканців відповідно до будівельних і санітарно-гігієнічних вимог;

2) метод ініціалізації підсистеми розпізнавання ситуацій та підтримки прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок» як комплексної процедури первинної ініціалізації підсистеми, який, на відміну від відомих рішень, що обмежуються лише налаштуванням часових або порогових параметрів, забезпечує систему комплексною, багатofакторною базою знань – від синхронізації soft real-time часових даних і семантичного маркування приміщення до інтеграції технічних характеристик обладнання (типу ламп, засобів затінення) та цільових пріоритетів (стартового режиму освітлення). Такий метод є передумовою для подальшого ситуаційного аналізу та автономного прийняття узгоджених рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа, дозволяючи системі розпочати роботу з передбачуваних потреб мешканців;

3) архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі «Розумний будинок», яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, що керують лише однією групою функцій, забезпечує комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа). Така архітектура гарантує автоматичне створення та підтримання оптимального середовища шляхом одночасного аналізу та взаємопов'язаного коригування всіх параметрів на основі єдиної бази сценаріїв, переводячи систему від простого контролю до ситуаційного прийняття автоматичних рішень.

Використання зазначених результатів дозволили підвищити якість викладання зазначених навчальних дисциплін.



Ольга ПАВЛОВА



Сергій ЛИСЕНКО

Андрій НІЧЕПОРУК



ЗАТВЕРДЖУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки
начальника Воєнної академії
імені Євгенія Березняка

ПОЛКОВНИК

Вячеслав КОЛОТОВ

18.12.2025

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

“Методи і засоби розпізнавання ситуації та підтримки прийняття рішень у
кіберфізичній системі “Розумний будинок””

Алексова Сергія Вікторовича

Комісія в складі: голова комісії – начальник Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка, кандидат технічних наук, доцент, полковник Чумак Олександр Ілліч; члени комісії: заступник начальника другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка, кандидат технічних наук, доцент, полковник Руденко Михайло Миколайович; доцент другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка, кандидат технічних наук, доцент, полковник Гончарук Андрій Вікторович; старший викладач другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, полковник Волков Олександр Віталійович, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Алексова С.В. впроваджені в освітній процес у блоці військово-спеціальних дисциплін та використані при удосконаленні навчально-лабораторного комплексу другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка.

До переліку впроваджених та використаних результатів дисертаційної роботи Алексова С.В. належать:

1) сценарна модель керування мікрокліматом (температурою та вологістю), освітленням та мультимедіа у кіберфізичній системі “Розумний

будинок”, яка, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано або лише за бінарними умовами, забезпечує комплексне та узгоджене прийняття автоматичних рішень одразу за всіма трьома групами функцій, інтегруючи при цьому розрахунок необхідної кількості ламп для досягнення цільової освітленості. Така сценарна модель забезпечує автоматичне генерування узгоджених рішень для приміщень різного типу на основі розпізнаної ситуації та первинних параметрів ініціалізації;

2) методи прийняття рішень щодо мікроклімату, освітлення та мультимедіа у кіберфізичній системі “Розумний будинок”, які, на відміну від відомих рішень, що керують цими функціями ізольовано, комплексно та узгоджено забезпечують автоматичне створення й підтримання оптимального житлового середовища. Вони гарантують гнучке регулювання світлового потоку (з урахуванням затінення), підтримку оптимальних теплових параметрів та концентрації вологи, а також автоматичне недопущення перевищення санітарних норм гучності, що загалом підвищує комфорт, безпеку та автономність мешканців відповідно до будівельних і санітарно-гігієнічних вимог;

3) архітектура підсистеми розпізнавання ситуацій та прийняття рішень щодо освітлення, мікроклімату та мультимедіа у кіберфізичній системі “Розумний будинок”, яка, на відміну від вузькоспеціалізованих відомих рішень, що керують лише однією групою функцій, забезпечує комплексне та узгоджене керування трьома ключовими функціями комфорту (освітленням, мікрокліматом і мультимедіа).

Впровадження та використання зазначених результатів дозволили підвищити якість викладання військово-спеціальних дисциплін та удосконалити навчально-лабораторний комплекс другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка.

Голова комісії: полковник

Члени комісії: полковник
полковник
полковник

Олександр ЧУМАК
Михайло РУДЕНКО
Андрій ГОНЧАРУК
Олександр ВОЛКОВ