

Криворізький національний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГОРШКОВ ВІКТОР ВІКТОРОВИЧ**

УДК 620.92

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ НЕЧІТКЕ КЕРУВАННЯ**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ**  
**ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ МІСТ ТА НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ**

**ТОМ 1**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В.В. Горшков

Науковий керівник

Сінчук Олег Миколайович,  
доктор технічних наук, професор

КРИВИЙ РІГ – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Горшков В.В.* Енергоефективне нечітке керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення населених пунктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія». – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Зовнішнє освітлення міст та населених пунктів, виконуючи своє основне призначення, відіграє значну роль у підвищенні рівня безпеки транспортного і пішохідного руху. З-поміж іншого, вуличне освітлення, в сучасному його сприйнятті, має відігравати роль додаткового естетичного оформлення міських споруд і ландшафту у вечірній та нічний час, з метою створення комфортних умов для мешканців населених пунктів.

Спираючись на дані аналізу, доступні із відкритих літературних джерел статистичних даних, визначено, що існуючий стан зовнішнього освітлення більшості міст, районних центрів та сіл України не є задовільним, згідно вимог та умов сучасності. Існуючий негатив ситуації зумовлений, у першу чергу, низькою енергоефективністю системи взагалі та якістю світло-віддачі конструктивно застарілих джерел світла, зокрема. Такий стан систем вуличного освітлення є результатом того, що на потреби освітлення в Україні споживається майже вдвічі більше електроенергії, ніж у розвинених країнах світу.

Оцінюючи прогресивний досвід інших країн, логічним є твердження, що у сфері зовнішнього освітлення актуальним і перспективним є напрям у бік розвитку автоматизованих систем управління цим непростим – агрегативним за структурою і енергоємним за рівнем споживання електроенергії електротехнічним комплексом.

Відносно реалізації останнього, з наведених попередню спрямувань, та

спираючись і враховуючи тенденції розвитку сучасних систем управління та факт процесу активного впровадження у різні сфери промисловості і транспорту джерел розосередженої генерації, електричної енергії, креативу новітніх систем зовнішнього освітлення, мають додати гібридні (синергетичні) структури штучного освітлення з новітніми, за технологічними можливостями, системами комплексного керування цим процесом на основі інтелектуалізації управлінських дій щодо рівня освітленості як транзиту для керування процесом електроспоживання – електропостачання з урахуванням значних за кількістю і рівнями впливу на цей процес факторів.

При цьому, системоутворюючими показниками ефективності таких систем повинні бути: безперебійність електропостачання, енергоефективність та якість освітлення і поточна керованість рівнями електроспоживання у функції ряду технологічних факторів впливу.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення рівня енергоефективності функціонування електричних мереж зовнішнього освітлення міст та населених пунктів шляхом застосування методу нечіткого керування режимами роботи освітлювальних пристроїв і рівнями випромінюваного ним освітлення.

**Для досягнення мети були поставлені й вирішені наступні наукові завдання:**

– на основі аналізу існуючого стану формалізувати системоутворюючі чинники, котрі впливають на енергоефективність, якість і безперебійність зовнішнього освітлення міст та населених пунктів, визначити й оцінити варіанти напрямків підвищення рівнів вищенаведених показників із максимальним наближенням їх до сучасних вимог, шляхом вибору формату креативного рішення;

– теоретично обґрунтувати та розробити методику вибору варіанта структури енергоефективного комплексу електропостачання зовнішнього освітлення з інтегруванням у технологію його функціонування багатфункціональної системи керування режимами роботи освітлювальних пристроїв

у функції ряду впливових системоутворюючих факторів для умов міст та населених пунктів;

– розробити адекватну імітаційну модель електроенергетичного комплексу зовнішнього освітлення, з можливістю дослідження на її основі режимів із максимальним наближенням до реальних, та визначення оптимальних параметрів і діапазонів ефективного функціонування освітлювальних комплексів і систем, із варіативністю оцінювання та ранжування, за рівнями усталеності, впливових на цей процес факторів;

– встановити залежність між поточним станом і необхідним рівнем зовнішньої освітленості для обґрунтування та ідентифікації вхідних і вихідних параметрів при реалізації закону адаптивного керування режимами роботи як системи освітлення в цілому, так і локальних освітлювальних пристроїв як складових даного комплексу, зокрема; розробити варіант АСК для керування процесом зовнішнього освітлення вулиць міст та населених пунктів відповідного електроенергетичного комплексу із залученням до цього елементів штучного інтелекту.

**Значимість наукового дослідження полягає у тому, що:**

– вперше формалізовано, як комплекс, побіжні фактори та встановлено рівень як їх індивідуального, так і агрегатного впливу, на показники ефективності функціонування електротехнічного комплексу зовнішнього електричного освітлення вулиць міст та населених пунктів і доведено доцільність синергетичного підходу до структурування системи електропостачання з інтеграцією в управлінський процес варіанта нечіткого адаптивного керування режимами функціонування об'єкта, що аналізується, згідно з форматом превентивно визначених критеріїв;

– доопрацьовано, з отриманням нового ефекту, концепцію, котра узагальнює і розвиває теорію синтезу гібридних електричних систем і розширює межі її втілення у варіанти мереж зовнішнього освітлення міст та населених пунктів, що дозволило підвищити ефект керованості енергоефективністю, надійністю та безперебійністю їх функціонування як у штатних, так

і у нештатних режимах;

– вдосконалено, для умов загальної непрогнозованості та варіативності змін вхідних параметрів, закон керування для регулятора рівня зовнішнього освітлення, котрий проявляється у використанні даного суб'єкта в системі управління процесом нечіткого регулювання, що дозволяє забезпечити необхідні, у відповідності до поточних значень, режими оптимального електроенергоєфективного функціонування гібридного комплексу джерел живлення, об'єднаних у єдину синергетичну електроенергетичну структуру;

– розроблено, на основі відомих, новий формат розбудови структури АСК з елементами штучного інтелекту керуваності та інтеграцією їх у процес керування для прийняття управлінських рішень з адаптивності вибору режимів живлення електротехнічного комплексу зовнішнього освітлення як у локальному, так і в агрегативному форматі, у функції програмованих ключових критеріїв.

Результати дослідження викладені у 2-х томах рукопису, котрі структуровано як:

– Том 1: Вступ, 4-и розділи, Загальні висновки, Список використаних літературних джерел;

– Том 2: Додатки.

Загальний обсяг дисертації: Том 1. 160 стор., Том 2. 82 стор.

У **вступі** узагальнено викладені проблеми в стані мереж зовнішнього електричного освітлення вулиць міст та населених пунктів. Сформовано мету та наукові завдання, котрі підлягали вирішенню, означено наукову новизну та практичну значимість отриманих дослідницьких результатів.

У **розділі 1** наведено результати аналізу існуючих та експлуатованих у ряді міст України варіантів електроенергетичних систем зовнішнього освітлення. Визначено основні напрямки підвищення технологічних показників функціонування комплексів, що аналізуються, – розробка синергетичних структур мереж живлення освітлювальних комплексів та розробка систем

адаптивного керування процесом електроспоживання освітлювальних пристроїв у функції ряду впливових факторів.

У **розділі 2** викладено процедуру аналізу параметрів складових елементів комплексів зовнішнього освітлення.

Проаналізовано і формалізовано фактори та проведено оцінювання рівнів їх впливу на ефективність функціонування електроенергетичних комплексів зовнішнього освітлення.

Підтверджено як факт позитив підходу до модернізації складових електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення, базуючись на світлодіодних джерелах і сучасному підході до доцільності та необхідності узагальненого інтелектуального керування процесом зовнішнього освітлення.

Проаналізовано місце систем акумулювання електричної енергії у варіантах синергетичних видів структур зовнішніх освітлювальних мереж населених пунктів, що дасть можливість реально вирішити існуючу одіозну проблему безперебійності систем електропостачання даних видів електричних мереж.

У **розділі 3** наведено авторський варіант логістики розбудови формату закону управління електроенергетичним комплексом зовнішнього освітлення, визначено систему правил Fuzzy Logik для реалізації відповідного алгоритму інтелектуального керування режимами роботи складових цих мереж – освітлювальних приладів у функції ряду впливових факторів.

**Розділ 4** присвячено процесу формування комплексу вхідних параметрів для розбудови алгоритму функціонування відповідної АСК та розробки тактики її роботи в умовах невизначеності, непрогнозованості та стохастичної поведінки факторів впливу як критеріїв формату вхідних параметрів для АСК.

Визначено формат і проведено ранжування факторів впливу з визначенням системоутворюючих їх видів.

**Загальні висновки** в тексті дисертаційного дослідження віддзеркалюють квінтесенцію отриманих результатів.

**Ключові слова:** електрична енергія, енергоефективність, електричні мережі, зовнішнє освітлення, розосереджена генерація.

## ABSTRACT

*Gorshkov V.V.* Energy-efficient fuzzy control of the electrical complex of outdoor lighting in populated areas. – Qualifying research work on the rights of a manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree. Specialty 141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrical Mechanics. Study Area 14 – Electrical Engineering. – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024.

The external lighting of cities and settlements, fulfilling its main purpose, plays a significant role in increasing the level of safety of transport and pedestrian traffic. Among other things, street lighting, in its modern perception, should play the role of additional aesthetic decoration of city buildings and landscape in the evening and at night, with the aim of creating comfortable conditions for residents of settlements.

Based on the analysis data available from open literary sources of statistical data, it was determined that the current state of outdoor lighting in most cities, district centers and villages of Ukraine is not satisfactory, according to the requirements and conditions of modernity. The existing negativity of the situation is caused, first of all, by the low energy efficiency of the system in general and the quality of light output of constructively outdated light sources, in particular. This state of street lighting systems is the result of the fact that almost twice as much electricity is consumed for lighting needs in Ukraine than in the developed countries of the world.

Evaluating the progressive experience of other countries, it is logical to say that in the field of outdoor lighting, the direction towards the development of automated control systems for this complex electrical engineering complex, which is aggregative in structure and energy-intensive in terms of electricity consumption, is relevant and promising.

Regarding the implementation of the latter, from the above directions, and based on and taking into account the trends in the development of modern control systems and the fact of the process of active introduction into various spheres of

industry and transport of sources of distributed generation, electric energy, creativity of the latest outdoor lighting systems, hybrid (synergistic) structures of artificial lighting with the latest in technological capabilities, systems of complex management of this process based on the intellectualization of management actions regarding the level of illumination as a transit for managing the process of electricity consumption - electricity supply, taking into account factors that are significant in terms of the number and level of influence on this process.

At the same time, the system-forming performance indicators of such systems should be: uninterrupted power supply, energy efficiency and quality of lighting, and current controllability of power consumption levels as a function of a number of technological influencing factors.

**The purpose and tasks of the research.** The aim of the dissertation research is to increase the level of energy efficiency of the functioning of electric networks of outdoor lighting of cities and settlements by applying the method of fuzzy control of the modes of operation of lighting devices and the levels of light emitted by them.

**To achieve the goal, the following scientific tasks were set and solved:**

– on the basis of the analysis of the existing state, formalize the system-forming factors that affect the energy efficiency, quality and uninterrupted outdoor lighting of cities and settlements, determine and evaluate the options for increasing the levels of the above indicators with the maximum approximation of them to modern requirements, by choosing the format of a creative solution;

– to theoretically substantiate and develop a methodology for choosing a variant of the structure of an energy-efficient power supply complex for outdoor lighting with the integration into the technology of its operation of a multifunctional system for controlling the operating modes of lighting devices as a function of a number of influential system-forming factors for the conditions of cities and settlements;

– to develop an adequate simulation model of the electric power complex of outdoor lighting, with the possibility of researching on its basis the modes with



the maximum approximation to the real ones, and determining the optimal parameters and ranges of the effective functioning of lighting complexes and systems, with the variability of evaluation and ranking, according to the levels of stability, factors influencing this process;

- to establish the dependence between the current state and the required level of external illumination for substantiation and identification of input and output parameters when implementing the law of adaptive control of operating modes of both the lighting system as a whole and local lighting devices as components of this complex, in particular; to develop a version of the ACS for controlling the process of external lighting of the streets of cities and settlements of the corresponding electric power complex with the involvement of elements of artificial intelligence.

**The significance of scientific research is that:**

- for the first time, transitory factors were formalized as a complex and the level of both their individual and aggregate influence on performance indicators of the electrotechnical complex of external electric street lighting of cities and settlements was established, and the expediency of a synergistic approach to the structuring of the power supply system with integration into the management process of the variant of the fuzzy adaptive management of the operating modes of the object being analyzed, according to the format of predetermined criteria;

- the concept, which generalizes and develops the theory of synthesis of hybrid electrical systems, and expands the limits of its implementation into options for outdoor lighting networks of cities and settlements, has been refined, with a new effect, which allowed to increase the effect of energy efficiency control, reliability and uninterrupted operation of them as in regular ones, as well as in abnormal modes;

- improved, for the conditions of general unpredictability and variability of changes in input parameters, the control law for the outdoor lighting level regulator, which is manifested in the use of this subject in the control system of the fuzzy regulation process, which allows to ensure the necessary, in accordance with the

current values, modes of optimal energy-efficient functioning a hybrid complex of power sources combined into a single synergistic power structure;

– on the basis of the known, a new format for building the structure of the ACS with elements of artificial intelligence of controllability and their integration into the control process for making management decisions on the adaptability of the choice of power modes of the electrical complex of outdoor lighting in both local and aggregate format, as a function of programmable key criteria, was developed .

The results of the research are presented in the manuscript, which is structured as: Introduction, 4 Sections, General conclusions, List of used literary sources and Additions. The total volume of the dissertation, including the "Additions" 160 p.

**The Introduction** summarizes the problems in the state of outdoor electric street lighting networks in cities and towns. The goal and scientific tasks to be solved were formed, the scientific novelty and practical significance of the obtained research results were defined.

In **Section 1**, the results of the analysis of existing and operated in a number of cities of Ukraine, options for electric energy systems for outdoor lighting are presented. The main directions for improving the technological indicators of the functioning of the analyzed complexes have been determined - the development of synergistic structures of power supply networks of lighting complexes and the development of adaptive control systems for the process of power consumption of lighting devices as a function of a number of influencing factors.

**Section 2** describes the procedure for analyzing the parameters of the constituent elements of outdoor lighting complexes.

The factors were analyzed and formalized, and the levels of their influence on the efficiency of the functioning of electric energy complexes of outdoor lighting were evaluated.

It has been confirmed as a fact that the positive approach to the modernization of the component electrotechnical complexes of outdoor lighting, based on

LED sources and a modern approach to the expediency and necessity of generalized intelligent control of the outdoor lighting process.

The place of electric energy storage systems in variants of synergistic types of structures of external lighting networks of populated areas has been analyzed, which will make it possible to really solve the existing odious problem of uninterrupted power supply systems of these types of electric networks.

In **Section 3**, the author's version of the logistics of building the format of the law of control of the electric energy complex of outdoor lighting is given, the system of Fuzzy Logik rules is defined for the implementation of the appropriate algorithm for intelligent control of the modes of operation of the components of these networks - lighting devices as a function of a number of influencing factors.

**Section 4** is devoted to the process of forming a set of input parameters for developing the algorithm of the corresponding ACS and developing the tactics of its operation in conditions of uncertainty, unpredictability and stochastic behavior of influencing factors as criteria for the format of input parameters for ACS.

The format was determined and the ranking of the influencing factors was carried out with the determination of their system-forming types.

**General Conclusions** in the text of the dissertation research reflect the quintessence of the obtained results.

**Key words:** electric energy, energy efficiency, electric networks, outdoor lighting, distributed generation.

**Список публікацій здобувача за темою  
дисертаційного дослідження:**

**Монографія**

1. Горшков В.В. *Енергоефективний електротехнічний комплекс з елементами інтелектуального керування процесом освітлення вулиць населених пунктів*: монографія, під редакцією проф. О.М. Сінчука. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2023. 94 с.

**Наукові статті у фахових виданнях**

2. Горшков В.В. та Сінчук О.М. “Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку систем штучного зовнішнього освітлення в Україні”. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, випуск 1/(57), 2022, с. 55-60.

3. Горшков В.В. та Сінчук О.М. “Управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення за допомогою нечіткого регулятора”. *Технічні науки та технології*, № 2(28), 2022, с. 138-145.

4. Горшков В.В. та Сінчук О.М. “Система управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення”. *Вісник Хмельницького національного університету*, № 4(311), 2022, с. 232-236.

5. Сінчук О.М., Михайленко О.Ю., Горшков В.В. “Нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення населених пунктів”. *Центральноукраїнський науковий Вісник*, № 9(40), ч. I, 2024, с. 205-217.

**Матеріали конференцій**

6. Горшков В.В. До проектування сучасного комплексу вуличного освітлення населених пунктів. *Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2021): II Міжнародна науково-практична конференція (м. Чернігів, 17 грудня 2021 р.)*: тези доповідей у 2 ч. Ч. I. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 196.

7. Горшков В. В. Особливості побудови систем керування електротехнічних систем вуличного освітлення. *The 12th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and*

*development prospects*” (May 22-24, 2022), MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2022. - С. 195.

8. Горшков В.В., Сінчук О.М. Сучасний стан розвитку систем штучного зовнішнього освітлення в Україні. *Міжнародна науково-технічна конференція “Розвиток промисловості та суспільства” (3-7 жовтня 2022 р.)*. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2022. С. 43.

9. Горшков В.В. Оцінювання необхідності залучення інтелектуального управління до автоматизації керування вуличним освітленням міст та населених пунктів. *Міжнародна науково-технічна конференція “Розвиток промисловості та суспільства” (23-24 травня 2024 р.)*. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2024. С. 86.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ МІСТ ТА НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ.....	27
1.1 Аналіз техніко-енергетичного стану комплексів освітлювальних електричних мереж вулиць та населених пунктів в Україні і в світі...	27
1.2 Стан і регламенти функціонування процесу електропостачання у системах зовнішнього освітлення.....	34
1.3 Огляд наукових досліджень за напрямком дисертаційного пошуку.....	41
1.4 Визначення та формування завдань наукового пошуку.....	48
1.5 Висновки до розділу 1.....	54
РОЗДІЛ 2. ФОРМАТИ СТРУКТУРУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ МІСТ ТА НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ.....	56
2.1 Системи електропостачання – стартові позиції формування структур комплексів керування зовнішнім освітленням.....	56
2.2 Сканування та варіативність прогнозів споживання електроенергії комплексом зовнішнього освітлення міста.....	65
2.3 Формация завдань з модернізації електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення з керованістю процесу їх енергоефективності	72
2.4 Варіативність підходу до процесу реструктуризації електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення міст та населених пунктів...	74
2.5 Комунікація процесу керування та аналіз варіантів структур автоматизованих систем керування електротехнічними комплексами зовнішнього освітлення.....	77
2.6 До процесу інтеграції засобів акумулювання електричної енергії	

у варіанти синергетичних структур систем електропостачання зовнішнім освітленням.....	90
2.7 Висновки до розділу 2.....	94
<b>РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА РОЗБУДОВА ФОРМАТУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ.....</b>	<b>96</b>
3.1 Моделювання процесу керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення .....	96
3.2 Моделювання та дослідження роботи системи керування освітлювальної установки .....	99
3.3 Сучасні аспекти побудови інтелектуальних електричних мереж.....	107
3.4 Алгоритм роботи системи інтелектуального контролю рівня вуличного освітлення.....	110
3.5 Загальні засади побудови нечіткої системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення .....	112
3.6 Висновки до розділу 3.....	115
<b>РОЗДІЛ 4. НЕЧІТКА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ.....</b>	<b>117</b>
4.1 Обґрунтування вибору системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення.....	117
4.2 Розробка системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення .....	119
4.2.1 Фазифікація .....	121
4.2.2 База правил.....	127
4.3 Умови проведення моделювання системи керування зовнішнім освітленням.....	132
4.4 Моделювання системи керування зовнішнім освітленням.....	136
4.5 Висновки до розділу 4.....	140

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ЕЕ – електрична енергія

СЕП – система електропостачання

АСК – автоматизована система керування

ДРЛ – дугові ртутні лампи

ЛН – лампи розжарювання

ЛЛ – люмінесцентні лампи

МГЛ – метало-галогенні лампи

НЛВД – натрієві лампи високого тиску

ВВП – валовий внутрішній продукт

СД – світлодіоди

ЗО – зовнішнє освітлення

ЛЕП – лінії електропередач

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

ОУ – освітлювальна установка

ЦДП – центральний диспетчерський пункт

ПУ – пункт управління

САУ – система автоматичного управління

СУО – система управління освітленням

ДСОУ – ділянки систем освітлювального управління

ВОСП – волоконно-оптичні системи передавання

СУЗО – система управління зовнішнім освітленням

УЗО – управління зовнішнім освітленням

ЕІДЖ – електронні імпульсні джерела живлення

ЦДУЗО – централізоване дистанційне управління зовнішнього освітлення

ДП – диспетчерський пункт

СР – сервер

ПС – підстанція

С – мережа світильників

ФД – фотодіоди

КУС – канал управління світильників

ПУС – пристрій управління світильниками

КД – комп'ютер диспетчера

МІ – мережа Інтернет

ПДСРП – пристрої доступу до сервера підстанції

ВО – виконавче обладнання

КОП – комутаційне обладнання підстанції

ЛМУО – локальна мережа управління освітленням

АПУС – автоматичний пристрій управління світильниками

ІПУС – індивідуальний пристрій управління світильниками

СП – самонесучий ізольований провід

ЗТП – закритий тип електричних підстанцій

СТП – стовбова (мачтова) комплексна трансформаторна підстанція

ТП – трансформаторна електрична підстанція

НЛВ – нечіткий логічний вивід

НСК ЗО – нечітка система керування із зовнішнім освітленням

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Зовнішнє освітлення вулиць та площ міст та населених пунктів, виконуючи ряд притаманних саме цьому електроенергетичному комплексу функцій, відіграє значну роль і у складових соціуму [1, 2].

З-поміж іншого – позитивного, зовнішнє освітлення має відігравати роль додаткового естетичного оформлення фасадів споруд і ландшафту міст в цілому у вечірній та нічний час з метою створення комфортних умов для мешканців тих чи інших населених пунктів.

Як факт сьогодення, зазначимо, що у світі близько 20% від загального обсягу згенерованої електричної енергії витрачається на потреби систем ЗО міст та населених пунктів [3].

Станом на 01.01.2022 р. загальна протяжність електромереж ЗО у населених пунктах України становить понад 100 тис. км, кількість світлоточок – близько 2 млн. одиниць, з тенденцією подальшого зростання [4].

Спираючись на офіційні дані, з доступних автору літературних джерел, можна визначити, що існуючий (загальний) стан, як-то: технічні і технологічні показники ЗО більшості міст, районних центрів та сіл України, з позицій сучасності, потребують свого покращення з ряду системоутворюючих позицій [5-7].

У числі таких, існуючих у сьогоденні, й одіозних для України позицій, особливе місце серед показників, притаманних саме системам ЗО, займає проблема необхідності покращення електроенергетики даних комплексів, оскільки зовнішні освітлювальні системи в Україні більше ніж удвічі енергоємні і майже вдвічі більше споживають електроенергії на потреби освітлення, ніж у розвинених країнах світу [8].

**Актуальність досліджень.** В Україні освітлювальні електричні мережі структурно інтегровані в загальнодержавну енергетичну систему і являють собою вагомий сегмент у формуванні рівнів споживання електроенергії і, що логічно, як активні споживачі ЕЕ, повинні бути в числі креативних

дійових суб'єктів у вирішенні проблеми підвищення електроенергоефективності в країні взагалі [9-10].

Проте при прискіпливому аналізі можливих шляхів досягнень очікуваного ефекту в енергоефективності ЗО, все ж, на перший план із вирішення низки узагальнених проблем аналізованих видів електроенергетичних систем виступає першочергове – базове, в технології їх призначення, завдання даних комплексів (для чого вони й існують) – забезпечення якості освітлення по максимуму можливої досяжності цього показника [11, 12].

При цьому логічним виглядає питання – а як це співвіднести з електроенергетикою цих комплексів? Тим паче, що вищезазначена і логічна тенденція розширення меж і локацій зовнішніх освітлювальних мереж, із відповідним збільшенням точок освітлення, провокує процес потенційного збільшення обсягів споживання ЕЕ цими видами споживачів.

Між тим, такі постійно діючі й реалізовані організаційно-технічні і необхідні для зменшення рівнів споживання ЕЕ заходи, як застосування нових енергоефективних ламп і конструкцій світильників, даючи певний ефект, все ж не в змозі мінімізувати реальний потенціал темпів зростання рівнів електроспоживання зовнішніми освітлювальними мережами в державі [13, 14].

У переліку черги із сучасних спрямувань, із підвищення енергоефективності та надійності СЕП ЗО, особливе місце займають варіанти структур електропостачання з розосередженою генерацією електричної енергії [15-18].

Та все ж, для більшої коректності вищенаведеного трактування, зазначимо, що, аналізуючи результати впровадження даних видів структур СЕП у практику роботи ряду промислових підприємств [19-20], вочевидь, що такий «оголений варіант» потенційно енергоефективних і синергетичних за структурою систем електропостачання, у своєму кінцевому форматі рішення, не в змозі надати можливість для досягнення рівня їх енергоефективності до показників своєї максимальної енергоефективної досяжності, без

застосування в технології їх функціонування елементів керованості електроенергетичними процесами в даному варіанті СЕП.

Для реальних, в умовах сучасного сприйняття, та видимих і реально досяжних горизонтів, очікуваних рівнів електроенергоефективності, доцільно «відчепитися» від існуючого бачення шляхів реалізації цього процесу – виключно шляхом зменшення обсягів споживання електроенергії, а в необхідному обсязі сконцентруватись на вирішенні проблеми керованості цим процесом з акцентом на можливість не тільки зменшення обсягів споживання ЕЕ, хоча це лишається пріоритетним завданням у будь-якому варіанті вирішення проблеми підвищення енергоефективності, скільки у стримуванні темпів зростання цього показника.

Проте, формуючи «дорожню карту» такого потенційно ефективного варіанта рішення, треба розуміти, що керування рівнями споживання ЕЕ в часі для таких непростих за технологією функціонування й агрегативно структурованих систем, як освітлювальні мережі, являє собою складний багатокритеріальний процес із рядом непрогнозованих і нерідко суперечливих системоутворюючих факторів як за кількістю, так і за рівнем їх впливу на режими функціонування електроенергетичного комплексу, що аналізується [21-27].

Вищенаведена «логіка протиріч» може, в значній мірі, мінімізуватися вищезазначеним шляхом керованості процесом споживання ЕЕ, згідно ряду критеріїв і, в тому числі, функцією варіативності в часі рівнів випромінюваного світла світильниками. Тобто, сам процес керованості процесом споживання ЕЕ в освітлювальних мережах, у такому варіанті, можна характеризувати як транзитний – нечіткий, у функції рівня освітленості.

У такому варіанті значно змінюється формат керування освітлювальними комплексами з переходом із варіанта однофункціональності в багатofункціональність. При цьому розширюються як функціональні можливості цих комплексів – межі використання технічного потенціалу, так і ефективність їх функціонування в цілому.

У цьому спрямуванні є певні позитивні практичні напрацювання, але вони притаманні, у більшості своїй, закордонним дослідженням, де з-поміж відомих і практично впроваджених сучасних технологій у сфері штучного зовнішнього освітлення активно впроваджують різні варіанти АСК [28-31].

В сьогоднішній, реалії технологічності функцій існуючих варіантів АСК зовнішніх освітлювальних комплексів населених пунктів в Україні обмежуються в більшості своїй операціями: «увімкнути – вимкнути», у відповідності до годин доби: вечір – ніч.

Спираючись на результати превентивного пошуку автора та враховуючи існуючу, значну за обсягом, варіативність і невизначеність меж та рівнів факторів впливу на енергоефективність функціонування зовнішніх освітлювальних мереж і, згідно з певним, але допустимим рівнем упередженості в оцінюванні сучасного бачення спрямувань вирішення викладеної проблеми, слід наголосити на тому, що розробка комплексів ЗО, з керованістю режимами їх функціонування, може і повинна покладатись на варіанти максимально наближені за технологією їх функціонування до інтелектуального. Це, відповідно, потребує прискіпливого вивчення стану і формалізації сучасних завдань та шляхів їх вирішень, котрі повинні і можуть бути покладені на нові, комплексно ефективні види електроенергетичних систем зовнішнього освітлення міст та населених пунктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана у відповідності і до планів наукових досліджень, котрі проводились кафедрою «Автоматизовані електромеханічні системи в промисловості та транспорті», а тепер, згідно з новою назвою кафедри «Електрична інженерія», на цій кафедрі Криворізького національного університету. Зокрема, при виконанні НДР «Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі» (Договір № 30-114-21. РК № 0121 U 111 709).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення рівня енергоефективності функціонування мереж освітлення

міст та населених пунктів шляхом застосування методу нечіткого керування режимами роботи освітлювальних пристроїв і рівнями випромінюваного ними освітлення.

**Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні наукові завдання:**

– на основі аналізу існуючого стану формалізувати системоутворюючі чинники, котрі впливають на енергоефективність, якість і безперебійність зовнішнього освітлення міст та населених пунктів, визначити й оцінити варіанти напрямків підвищення рівнів вищенаведених показників із максимальним наближенням їх до сучасних вимог шляхом вибору формату креативного рішення;

– теоретично обґрунтувати та розробити методіку вибору варіанта структури енергоефективного комплексу електропостачання зовнішнього з інтегруванням у технологію його функціонування багатофункціональної системи керування режимами роботи освітлювальних пристроїв у функції ряду впливових системоутворюючих факторів для умов міст та населених пунктів;

– розробити адекватну імітаційну модель електроенергетичного комплексу зовнішнього освітлення з можливістю дослідження на ній режимів із максимальним наближенням до реальних, та визначення оптимальних параметрів діапазонів ефективного функціонування з варіативністю оцінювання та ранжування, за рівнями усталеності, впливових на цей процес факторів;

– встановити залежність між поточним станом і необхідним рівнем зовнішньої освітленості для обґрунтування та ідентифікації вхідних і вихідних параметрів при реалізації закону адаптивного керування режимами роботи як системи освітлення в цілому, так і локальних освітлювальних пристроїв як складових даного комплексу, зокрема; розробити варіант структури АСК для керування процесом зовнішнього освітлення вулиць міст та населених пунктів відповідного електроенергетичного комплексу із залученням до цього елементів штучного інтелекту.

**Об’єкт дослідження** – процес керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення населених пунктів.

**Предмет дослідження** – показники функціонування електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення населених пунктів, котрі характеризують рівень їх енергоефективності.

**Методи дослідження.** Для розв’язання поставлених завдань і аналізу прийнятих схематичних та алгоритмічних рішень використані такі методи дослідження: методи статистичного аналізу для оцінювання поточних енергетичних показників та прогнозування очікуваних рівнів функціонування систем зовнішнього освітлення; методи математичного моделювання – для створення математичної моделі комплексу зовнішнього освітлення; методи нечіткої логіки – для синтезу структури регулятора; методи теорії автоматичного керування – для створення структури системи автоматичного керування комплексу зовнішнього освітлення населених пунктів; методи розрахунку електричних кіл – для визначення відповідних параметрів комплексу зовнішнього освітлення населених пунктів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що:

– вперше формалізовано як комплекс побіжні фактори та встановлено рівень як їх індивідуального, так і агрегативного впливу, на показники ефективності функціонування електротехнічного комплексу зовнішнього електричного освітлення вулиць міст та населених пунктів і доведено доцільність синергетичного підходу до структурування системи електропостачання з інтеграцією в управлінський процес варіанта нечіткого адаптивного керування режимами функціонування об’єкта, що аналізується, згідно з форматом превентивно визначених критеріїв;

– вперше встановлено та проведено оцінювання залежності між рівнями освітленості та видами структур і режимами електроживлення систем електропостачання зовнішніх освітлювальних мереж в енергоефективному спрямуванні в залежності від варіативності їх функціонування;



– доопрацьовано з отриманням нового ефекту концепцію, котра узагальнює і розвиває теорію синтезу гібридних електричних систем, та розширено межі її втілення у варіанти мереж зовнішнього освітлення міст та населених пунктів, що дозволило підвищити ефект керованості енергоефективністю, надійністю і безперебійністю їх функціонування як у штатних, так і в нештатних режимах;

– вдосконалено, для умов загальної непрогнозованості та варіативності змін вхідних параметрів, закон керування для регулятора рівня зовнішнього освітлення, котрий проявляється у використанні даного суб'єкта в системі управління процесом нечіткого регулювання, що дозволяє забезпечити необхідні, у відповідності до поточних значень, режими оптимально енергоефективного функціонування гібридного комплексу джерел живлення, об'єднаних у єдину синергетичну електроенергетичну структуру;

– розроблено, на основі відомих, новий формат розбудови структури АСК з елементами штучного інтелекту керованості та інтеграцією їх у процес керування для прийняття управлінських рішень з адаптивності вибору режимів живлення електротехнічного комплексу зовнішнім освітленням як у локальному, так і в агрегативному форматі, у функції програмованих ключових критеріїв.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені в дисертаційній роботі теоретичні положення дозволили:

– розробити синергетичну структуру мережі живлення комплексу зовнішнього освітлення населених пунктів із підвищеним рівнем енергоефективності;

– розробити нове схемотехнічне рішення та запропонувати методику розрахунку параметрів регулятора системи автоматичного керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення населених пунктів, що дозволяє проводити адаптивне керування даним комплексом у функції струму;

– для реалізації необхідного рівня функціонування регулятора системи автоматичного керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення населених пунктів на базі контролера з підтримкою *Fuzzy Logic* розробити методику функціонування даного освітлювального комплексу, що дозволяє підвищити гнучкість і спростити процес налагодження усієї системи;

– розробити систему з елементами інтелектуального керування зовнішнім освітленням, що дозволяє практикувати налаштування системи зовнішнього та декоративного освітлення в залежності від реальної необхідності.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві безпосередньо належать: аналіз сучасного стану та перспектив розвитку систем штучного зовнішнього освітлення [2], розробка системи правил нечіткого регулятора зовнішнього освітлення [3], розробка структури системи штучного зовнішнього освітлення [4]. В опублікованих зі співавторами наукових працях, у яких наведені ідеї та результати, що використані в дисертації, особистий внесок здобувача дорівнює 70 – 90%.

**Апробація результатів дисертації.** Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2021): II Міжнародна науково-практична конференція (м. Чернігів, 17 грудня 2021 р.); The 12th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (Берлін, Німеччина, 22-24 травня 2022 р.); Авіація, промисловість, суспільство: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Кременчук, 12 травня 2022 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 3-7 жовтня 2022 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 23-24 травня 2024 р.).

**Публікації.** Основні результати, отримані під час дисертаційного дослідження, знайшли своє відображення шляхом публікації в монографії, 4-х статтях у фахових виданнях та 4-х тез доповідей на наукових міжнародних конференціях.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з 2-х томів. Том 1: вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел. Том 2: додатки. Загальний обсяг дисертації складає: Том 1 – 160 сторінок, з яких 145 сторінок основний зміст дисертації. Том 2 – 82 сторінок.

## Розділ 1

# АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ МІСТ ТА НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

### 1.1 Аналіз техніко-енергетичного стану комплексів освітлювальних електричних мереж вулиць та населених пунктів в Україні і в світі

Зовнішнє електричне освітлення повинно відповідати вимогам ПУЕ, відповідним будівельним нормам та правилам [82].

Основними базовими критеріями з оцінювання ефективності систем зовнішнього штучного освітлення вулиць і шляхів міських площ та інших місцевих об'єктів є якість освітлення, надійність, безперебійність та електроенергоєфективність усього по складу агрегативного електроенергетичного комплексу, що аналізується. Не відхиляючи та не припинуючи вагу всіх із вищезазначених вимог, зазначимо, що в умовах сьогодення особливо актуально виглядають останні три. Саме ці три показники, в значній мірі, залежать від їх відповідності критеріям технології функціонування централізованих магістральних СЕП, котрі живлять ЕЕ ЗО комплекси міст та населених пунктів.

У цьому аспекті цікавим і, водночас, вельми драматичним виглядають показники кількості відключень в електроенергетичній мережі України (Додаток А). Як свідчать статистичні дані, наша держава тут «домінує» в негативному вигляді серед інших країн світу. Логічно, що факти, по суті, як мінімум щодобових відключень у магістральних електромережах протягом року, є причиною відповідної реакції на це і мереж освітлення населених пунктів держави. При цьому, щоб підкреслити драматизм ситуації за фактом утрати живлення ЕЕ мереж ЗО, зазначимо, що дані рис. 1.1. стосуються

років до початку широкомасштабної агресії російської федерації в Україні. Стан, у цьому питанні в Україні з лютого місяця 2022 року по теперішній час, як в енергетичних, так і в мережах освітлення, зокрема, додатково акцентує увагу і підкреслює на необхідності вирішення проблеми безперебійності та енергоефективності видів мереж ЗО, як у масштабах держави, так і в масштабах окремих міст та населених пунктів (Додаток А).

За даними Міністерства енергетики України [32], загальна протяжність електромереж зовнішнього освітлення в населених пунктах України станом на 01.01.2020 року становила понад 124,32 тис. км.

Загальна кількість освітлювальних установок зовнішнього освітлення складає близько 3,53 млн. од.

А частка освітлювальних установок у зовнішніх освітлювальних мережах країни склала приблизно 60% (рис. 1.1), що є хоч і позитивним показником, та все ж потребує постійності в покращенні.

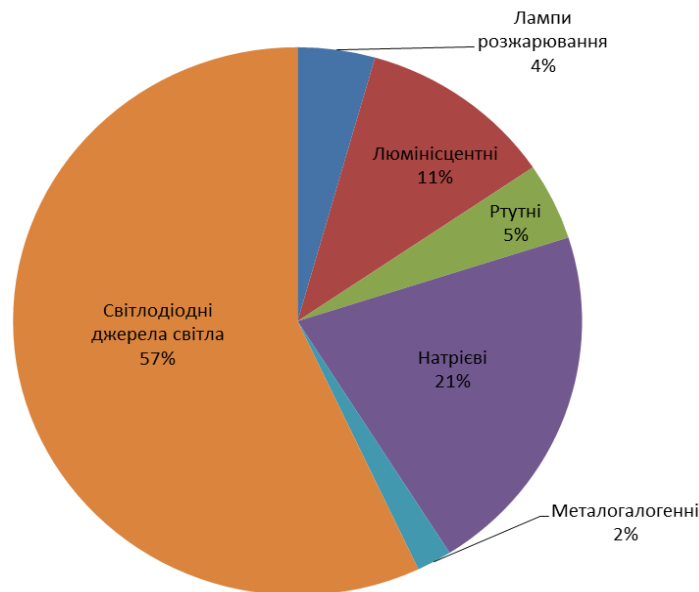


Рисунок 1.1 – Розподіл типів світлоточок за типами джерел світла в Україні станом на 2019 рік

У сфері зовнішнього освітлення населених пунктів нашої країни застосовується близько 3,38 млн. од. енергозберігаючих джерел світла (95,6% загальної кількості) [32].

За результатами аналізу впровадження різних типів джерел зовнішнього штучного освітлення в освітлювальних мережах населених пунктів країни було виявлено, що Одеська область має найбільший показник застосування енергоефективних світлодіодних джерел світла (рис. 1.2), що складає близько 90% від загально встановлених. Але враховуючи лідируючі показники Одеської області за кількістю освітлювальних установок, все ж залишається негативним фактом, що загальна кількість неенергоефективних штучних освітлювальних установок в інших регіонах залишається неприпустимо високою [33].

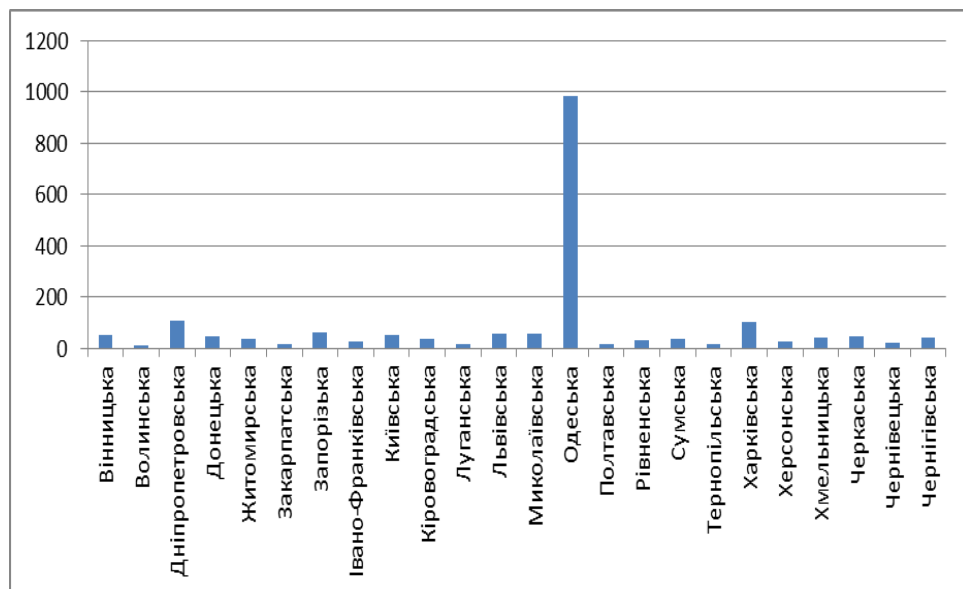


Рисунок 1.2 – Кількісна характеристика світлодіодних джерел світла по областях України станом на 2019 р., тис. шт.

Одним з основних чинників, що сприяють такому негативному стану справ, є виконання місцевими владами не в повному обсязі вимог Закону України [34], а саме: в частині обмеженості та недостатнього обсягу фінансування цієї сфери, що не сприяє належному проведенню заходів щодо модернізації та переоснащенню електромереж зовнішнього освітлення населених пунктів у сучасні варіанти.

Між тим, за даними державної статистики, Дніпропетровська область в рейтингу за кількістю світлоточок входить до п'ятірки областей із високими показниками (рис. 1.3) та займає одне з перших місць серед областей за критерієм протяжності електромереж зовнішнього освітлення населених пунктів (рис. 1.4) (Додаток Б).

Результати аналізу частки різних типів світлоточок за типами джерел світла у Дніпропетровській області станом на 2019 р. (рис. 1.5) засвідчили, що рівень упровадження енергоефективних світлоточок у зовнішніх освітлювальних електромережах області являє собою середній серед показників інших областей України і складає біля 40%. У поняттях сьогодення, це недостатній рівень до необхідного для вирішення ефективного функціонування освітлювальних комплексів [5].

Наведені показники, точніше, їх рівні, окрім як вищезазначених, так і тих, що будуть наведені в подальшому, лежать і в площині невизначеності місця в цьому процесі АСК процесом ЗО. Проте саме АСК реально зможуть вирішити ряд існуючих проблем у комплексах ЗО.

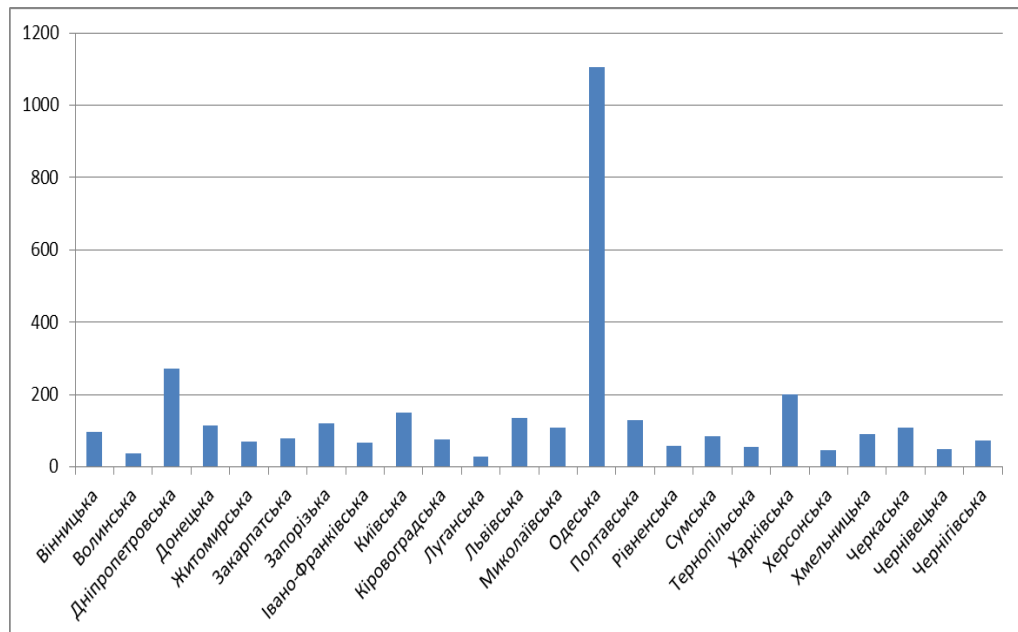


Рисунок 1.3 – Кількісна характеристика світлоточок по областях станом на 2019 р., тис. шт.

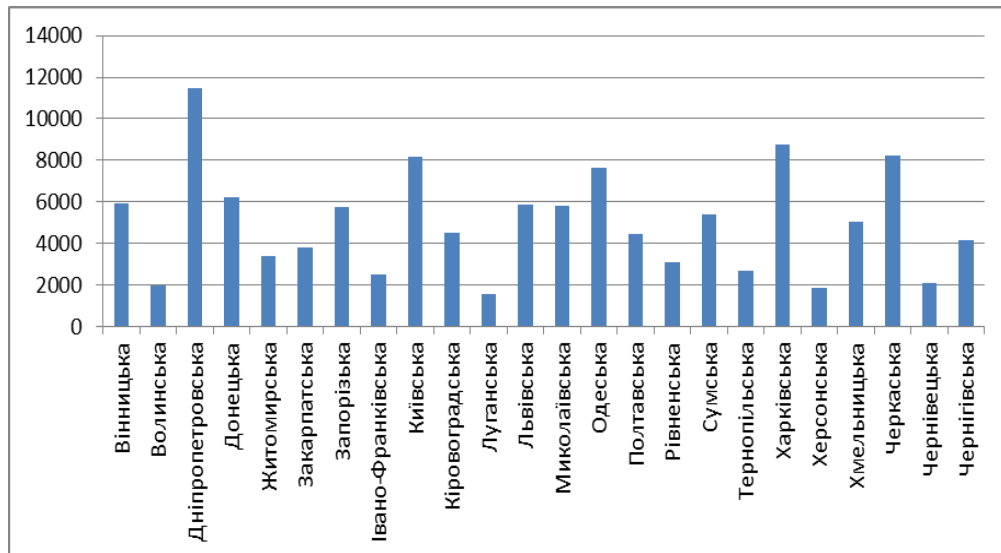


Рисунок 1.4 – Загальна протяжність мереж зовнішнього освітлення населених пунктів по областях України станом на 2019 р., км

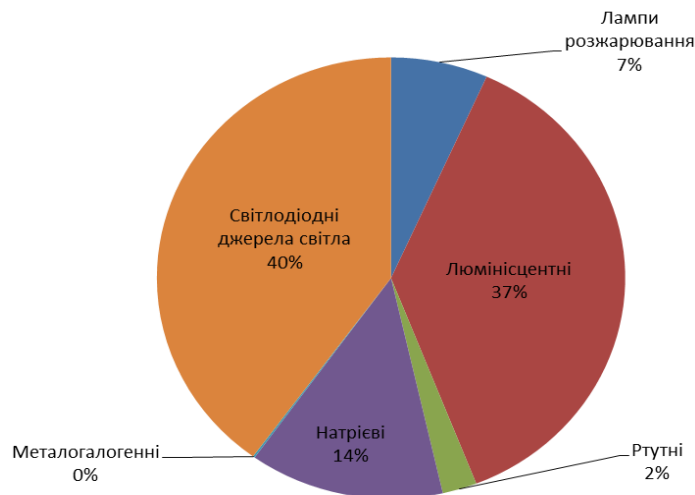


Рисунок 1.5 – Розподіл типів світлоточок за типами джерел світла у Дніпропетровській області станом на 2019 р.

Так, сумарна кількість автоматизованих систем дистанційного керування ЗО населених пунктів у країні станом на 2019 рік складала біля 17,5 тис. шт. Серед областей-лідерів у встановленні автоматизованих систем дистанційного управління зовнішнім освітленням слід відзначити Харківську, Черкаську, Київську, Дніпропетровську та Одеську області (рис. 1.6) [5].

У той же час, у ряді інших областей України впровадження цих систем залишається на досить низькому рівні.

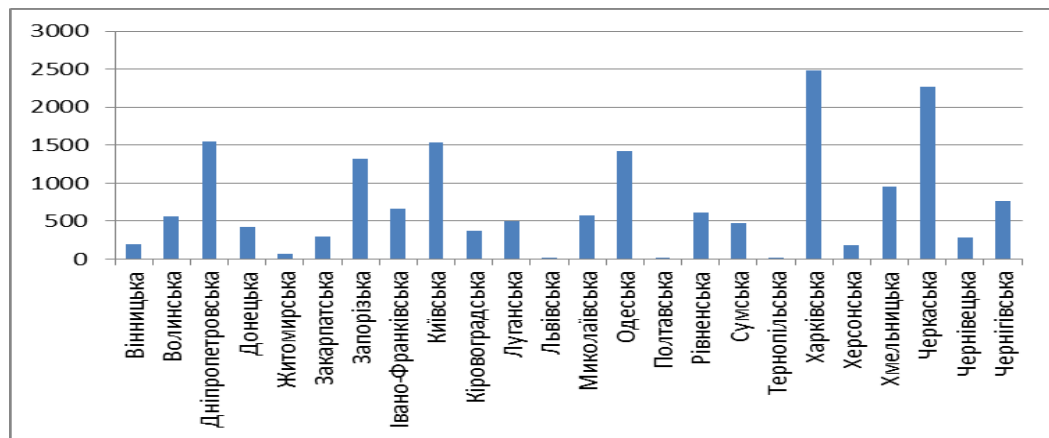


Рисунок 1.6 – Кількісна характеристика автоматизованих систем дистанційного управління зовнішнім освітленням по областях України станом на 2019 р., шт.

Як приклад негативного ставлення до необхідності застосування АСК у сфері штучного освітлення є Львівська область, у якій майже нульовий рівень застосування даних систем, а рівень споживання ЕЕ освітлювальними комплексами найбільший серед інших областей України. В той же час – домінуюча за рівнями впровадження АСК – Харківська область у сфері рівнів споживання ЕЕ знаходиться в числі лідерів мінімальних споживчих обсягів.

Станом на 2019 р. в Україні системами ЗО було спожито понад 820,2 млн. кВт/год. електроенергії. При цьому, витрати на закупівлю електроенергії, спожиту на зовнішнє освітлення, становили майже 1433,0 млн. грн [5].

Із 90,022 тис. приладів обліку електричної енергії 46,279 тис. одиниць (51,4%) – це прилади диференційованого обліку електричної енергії.

Серед областей-лідерів у споживанні електроенергії зовнішніми освітлювальними мережами слід відзначити Львівську та Дніпропетровську області (рис. 1.7).



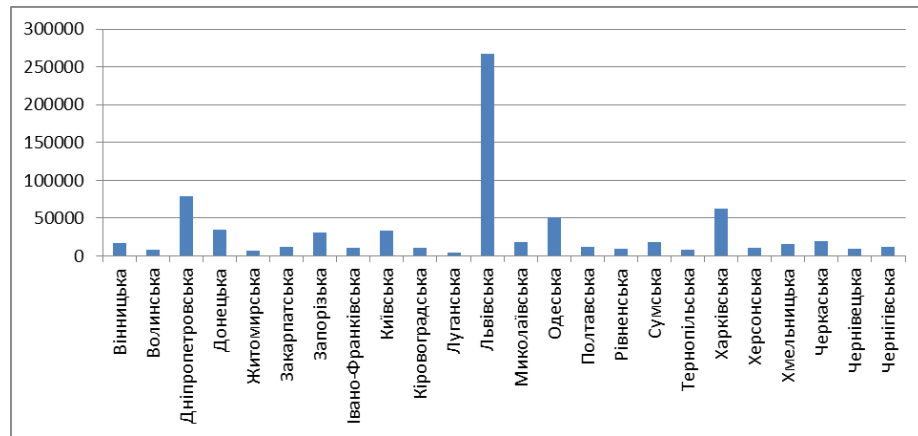


Рисунок 1.7 – Кількісна характеристика спожитої електроенергії зовнішніми освітлювальними мережами по областях України станом на 2019 р., тис. кВт·год.

Результати аналізу кількості електроенергії, спожитої однією світлоточкою, показали, що найбільші до рівнів усереднених показників електроспоживання в Україні мають: Закарпатська, Харківська, Донецька, Дніпропетровська, Львівська області (рис. 1.8).

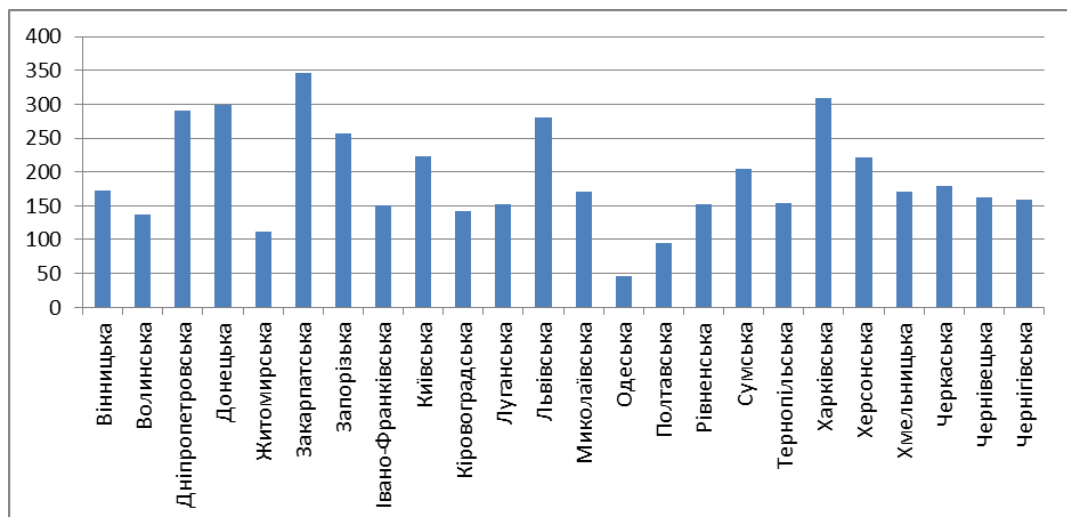


Рисунок 1.8 – Кількість електроенергії, спожитої однією світлоточкою по областях станом на 2019 р., кВт·год.

У діючий період часу на ЗО міст у середньому по Україні витрачається приблизно 15% від усієї споживаної електроенергії. Тому в умовах безперервного підвищення цін на енергоресурси і, що головне, гострого дефіциту генеруючих енергоресурсів у державі, а також, незважаючи на політичну ситуацію в країні, зростаючих вимог до якості освітлення, особливої актуальності для міст, як і для всіх інших населених пунктів України, набуває проблема зниження витрат і раціонального використання електроенергії, а також підвищення екологічної чистоти установок ЗО.

Вирішення цього комплексу завдань, або хоча б наближення до цього процесу, можливе зміною логістики досяжності шляхом переорієнтації цього процесу з варіанта локальних рішень у комплексний варіант із кінцевим форматом розбудови відповідної АСК.

## **1.2 Стан і регламенти функціонування процесу електропостачання у системах зовнішнього освітлення<sup>1</sup>**

При проведенні аналізу стану режимів функціонування електричних мереж ЗО зробимо превентивне зауваження – цей стан, окрім усталених форматів (Додатки Б, В), визначається в значній мірі конкретикою ландшафтів, схем міст та інших населених пунктів, базуючись на генеральних планах їх розвитку, котрі включають у себе і сегменти розвитку мереж вуличного освітлення (Додатки Г, Д).

Аналізуючи в загальному вигляді шляхи вирішення проблем вуличного ЗО, в тому числі його світловіддачі енергоефективності, та рівня керованості цими процесами, зазначимо, що вирішення питання, як правило, відбувається тривалим у часі шляхом – підвищення якості регулювання –

---

<sup>1</sup> Статистичні дані по параметрах технологічного електроенергетичного стану мереж ЗО з відомих на те причин наведені в більшості своїй на період 2021 року

управлінських рішень. Наслідком цього стало застосування ряду регуляторів. Але постійне, за фактом зростання структур мереж ЗО, кількості освітлювальних пристроїв та збільшення обсягів споживання електричної енергії обумовило значну системоутворюючу розбіжність графіків функціонування цих видів споживачів ЕЕ, нелінійність їх параметрів і стохастичність режимів споживання електричної енергії.

Для запобігання непрогнозованих, але реально можливих драматичних ситуацій, система електропостачання комплексів ЗО повинна перетворюватись у єдиний автоматизований інформаційно-вимірjuвальний і керований комплекс, що забезпечить оптимізацію режимів його функціонування, в тому числі, за рівнем напруги живлення та реактивної енергії в мережі. Окрім цього, необхідно відповідати комплексу соціально-економічних критеріюв. Оскільки принциповою основою формування критеріюв оцінки режимів функціонування системи електропостачання й освітлення міст є загальні завдання її як системи міського господарства, котрі служать глобальній меті цього комплексу — поліпшенню умов проживання населення міст на основі підвищення кількості та якості послуг, що надаються ЗО, то тут необхідна формалізація рівнів відповідних пріоритетів усіх критеріюв.

Аналіз у спрямуванні наукового пошуку, що аналізується [10, 11, 14, 22], та результати авторських досліджень дозволили, у першому приближенні, виділити критерію, які обов'язково та першочергово необхідно враховувати в процесі оптимізації системи ЗО міст. До таких критеріюв відносяться соціальний, економічний, екологічний і технічний показники. Між тим, у відомих літературних джерелах з техніко-економічних досліджень систем енергетики знайшли віддзеркалення лише технічний та економічний критерію. За таких умов, представлення вибраного критерію, як обмеження завдання дослідження, зводиться до однокритеріального. У той же час у [35] встановлено, що функціонування СЕП і ЗО міст має важливі соціальні та екологічні наслідки і їх необхідно враховувати під час прийняття та

оцінювання ефективності конкретних технічних рішень. Більше того, за сучасних умов, що характеризуються втіленням ринкових відносин, при яких рішення приймаються в умовах конкурентної боротьби фірм, важливість цих критеріїв іще більше підвищується у зв'язку з необхідністю розширення обсягів і якості послуг, що надаються населенню. Таким чином, упровадження розглянутої системи техніко-економічних показників може виглядати як комплексний критерій, який буде враховувати показники соціальної, технічної, економічної й екологічної адекватності і найповніше відбиває процеси у системах електропостачання й освітлення міст.

У такій постановці завдання оптимізації режимів функціонування системи електропостачання міст взагалі і ЗО, зокрема, зводиться до визначення таких їх параметрів, котрим відповідає максимум ефективності за заданими критеріями, яким відповідає функція мінімізації, що є сумою експлуатаційних витрат на виробництво, передачу, розподіл і перетворення параметрів і виду електроенергії, а також супутніх витрат, пов'язаних з екологічністю, надійністю та якістю електропостачання споживачів.

Структура такої системи керування режимами роботи мереж ЗО, котра дасть можливість відстежувати і вимірювати поточні параметри функціонування мережі, та моніторити поточний стан електрообладнання і ЛЕП у превентивному варіанті, складається з двох наступних рівнів [23]:

- можливість використання автоматичного керування ЗО за допомогою фотоелектричних датчиків, які вмикають групу світильників у залежності від зміни природної освітленості, що надасть можливість досягнути найбільшої енергетичної ефективності;

- можливість віддаленого керування лампами і рівнем ЗО кожного вуличного світильника з гарантією потрібної кількості світла при різних умовах. Не менш важлива наявність зворотного зв'язку в режимі реального часу, яка повідомляє про будь-які зміни, що відбуваються уздовж лінії, знижує втрати енергії і пропонує передові інструменти оптимізації технічного обслуговування.

Втілення комплексу вищеназваних заходів щодо підвищення ефективності системи ЗО дозволить забезпечити:

- безперебійне функціонування систем освітлення в разі зовнішнього позаштатного втручання в систему керування цим процесом;
- постійне підтримання у технічно справному стані об'єктів і мереж зовнішнього освітлення;
- усунення аварійних ситуацій на обладнанні та мережах інженерної інфраструктури;
- підвищення естетичної привабливості міста і якості життя населення.

У реаліях сьогодення відповідно до існуючих стандартних систем напруги в електричних освітлювальних мережах України джерела світла випускаються на номінальну напругу 220 В та 380 В. У вуличних освітлювальних установках застосовується напруга 380/220 В, джерела світла вмикаються на фазну напругу 220 В (Додаток Е, И).

Для забезпечення адекватності вибору рівнів освітлення існує уніфікована класифікація об'єктів міських просторів (Додатки Е, Є, Ж).

Вулиці й дороги класифікують за їхньою значимістю у міському середовищі та інтенсивністю руху транспорту. Клас вулиці визначається за значимістю дороги, а підклас – за активністю руху.

Пішохідні простори належать до класу П, а різновиди конкретних пішохідних просторів класифікуються відповідно [36].

Підклас пішохідних просторів визначається залежно від особливості поля зору, труднощів зорової орієнтації, наявності в полі зору додаткових користувачів, підвищеного ризику кримінальних ситуацій, а також від необхідності розрізнення осіб і створення привабливого вигляду освітлювальної установки. Ця класифікація не поширюється на майданчики для спокійного й культурно-масового відпочинку, а також на підземний і надземні пішохідні переходи.

Освітлення проїзної частини вулиць і доріг із прямолінійною геометрією з регулярним транспортним рухом проєктують з огляду на норми середньої яскравості удосконалених дорожніх покриттів.

Рівень освітлення поверхні проїжджої частини вулиць і доріг із непрямолінійною геометрією (площі, транспортні розв'язки тощо), а також із перехідними та іншими видами покриттів регламентується величиною середньої горизонтальної освітленості поверхні.

Середня освітленість покриттів тротуарів, що прилягають до проїжджої частини доріг і площ, має бути близька до половини середньої освітленості покриття проїжджої частини цих локацій.

З-поміж іншого, освітлення трамвайних шляхів, які розташовані на проїжджій частині доріг, має бути на рівні освітлення відповідної вулиці.

В установках зовнішнього освітлення використовуються прилади з економічними джерелами ЗО, серед яких: натрієві лампи високого тиску, металогалогенні лампи, розрядні лампи низького тиску та світлодіодні світильники [13, 26].

В установках з ускладненим доступом для обслуговування світильників, як правило, застосовуються безелектродні розрядні лампи, термін служби яких більше за 50 тис. год.

У процесі проєктування систем ЗО особливу, наразі значну, увагу приділяють оптимальному підбору й розміщенню освітлювальних приладів з урахуванням їхнього світлорозподілу (Додаток Д). Критерієм оптимізації проєктного рішення є енергоекономічність – мінімум потужності освітлювальної системи під час забезпечення нормованих і розрахункових кількісних та якісних показників. Під час розміщення світильників необхідно враховувати можливість зручного обслуговування освітлювальної арматури.

З метою забезпечення зорової орієнтації водіїв і пішоходів освітлювальні пристрої необхідно розташовувати таким чином, щоб утворена ними лінія однозначно була спрямована за напрямом дороги. Слід зауважити про

заборону в нічний час часткового відключення світильників у разі їхнього однорядного розташування й освітлювальній установці по одному світильнику на опорі.

На прилеглий території заправних станцій та автостоянок, що знаходяться поряд із дорогами з активним транспортним рухом, світильники розсіяного світла мають бути встановлені на висоті не менше ніж 3 м за світловим потоком ламп до 6000 лм. Для освітлення зазначених рекомендовано застосовування прожекторів, розташованих на дахах та навісах і спрямованих у бік вулиці або дороги.

Освітлення наземних пішохідних переходів має забезпечувати людям безпечно перетинання проїжджої частини і можливість бачити перешкоди й дефекти дорожнього покриття.

У разі оформлення пішохідних переходів спеціальними світловими знаками на кожній стороні й на центральному островці їх потрібно встановлювати на висоті 2–3 м над проїжджою частиною [11, 36]. Яскравість цих приладів повинна бути не менше 300 кд/м<sup>2</sup>. Допустима частота миготінь 40–60 спалахів за хвилину. З метою застереження учасників руху, рекомендується використовувати в зоні переходу контрастне за кольорами освітлення.

Слід зауважити, що у житлових кварталах варто звертати увагу на те, що засоби ЗО мають естетично сполучатися з навколишньою архітектурою. Це стосується форми і пропорцій світильників, кронштейнів та опор, висоти установки освітлювальних приладів. Для забезпечення сучасних дизайнерських рішень вулиць рекомендовано приділяти увагу архітектурним рішенням елементів освітлювальних пристроїв. Пропонується застосовувати опори ЗО для установки транспортних знаків, табличок із найменуваннями вулиць, урн, квіткових горщиків. Варто передбачати, щоб зелені насадження під час їх зростання не перешкоджали світловому потоку. Між тим, у разі наявності зелених насаджень допускається для підсвічування дерев застосовувати освітлювальні прилади, що випромінюють світловий потік,

направлений до верхньої напівсфери.

Для підвищення привабливості житлової зони рекомендується варіювати як рівнем освітлення, так і його кольоровістю.

Слід зауважити, що у житлових мікрорайонах рекомендоване застосування настінних світильників або поздовжньо-підвісної системи їх кріплення, що забезпечить безпеку руху його учасникам, а також зниження екомічної складової проєкту.

У разі обладнання житлових зон дорожніми знаками й покажчиками зі світловою підсвіткою, слід контролювати їхню яскравість з метою запобігання зниження пильності водіїв і зменшенню загального естетичного враження.

ЗО потребує керування, незалежного від керування освітленням самих будівель. Між тим, керування ЗО може бути ситуативно розташоване і безпосередньо в будівлі.

Метою удосконалення еталона було забезпечення на високому рівні єдності та точності вимірювань енергетичних параметрів, випромінювання та розширення його функціональних можливостей на нові типи ЗВТ, у т.ч. для ВОСП. Основне завдання – це підвищення метрологічних характеристик, розширення динамічного діапазону для відтворення, зберігання та передачі одиниці потужності неперервного випромінювання у світловоді та розширення його функціональних можливостей, а саме: спорядження еталона апаратурою для відтворення, зберігання та передавання одиниці часу розповсюдження випромінювання у світловоді. Зазначений еталон є найвищою ланкою державної перевіркової схеми для даних видів вимірювань. Удосконалений еталон передбачений для відтворення і зберігання одиниць середньої потужності в імпульсі випромінювання, потужності неперервного випромінювання у світловоді та часу розповсюдження випромінювання у світловоді, а також для передачі розміру одиниць робочим еталонам і безпосередньо робочим засобом вимірювальної апаратури, які використовую-



ються в країні, що мають на меті забезпечення єдності й однозначної точності вимірювань у галузях сучасних електронно-комп'ютерних телекомунікацій, оборонної промисловості, наукових досліджень, оптичної локації, далекометрії та ін.

Відтворення одиниці потужності неперервних світлових потоків випромінювання у світловоді, джерелом якого є стабілізований лазер, базується на вимірюванні потужності випромінювання за допомогою еталонного первинного вимірювального перетворювача [38].

Наведені попереду заходи підвищення ефективності взагалі та енергоефективності мереж штучного освітлення міст і населених пунктів являють собою базову складову для формату нового етапу наукового пошуку.

### **1.3 Огляд наукових досліджень за напрямком дисертаційного пошуку**

Як зазначалось у попередньо викладеному тексті цього дослідницького рукопису, науковий пошук варіантів вирішення проблеми, що аналізується, ніколи не зупинявся, починаючи свій шлях з перших моментів втілення стандартів електричного ЗО в містах та населених пунктах України. Проте акценти в тактиці пошуків із плином часу змінювались і змінюються, що провокується зміною ситуацій та станом відповідності існуючих систем ЗО до постійно зростаючих вимог до них.

Це віддзеркалюється і у тактиці проведення досліджень, особливо в останні десятиріччя, де акцент робиться на впровадженні в алгоритм функціонування ЗО автоматизованих систем керування роботою освітлювальних мереж із залученням до цього елементів штучного інтелекту [16, 22, 26, 39-41]. Досягнуто непоганих результатів, більшість котрих відноситься до закордонних досліджень.

Так, однією із провідних фірм по впровадженню сучасних технологій

у ЗО є компанія «Sibelga», яка управляє вуличним освітленням ряду міст на планеті і яка разом із фірмою Schreder випробували нову інноваційну систему розумного вуличного освітлення у Буа-де-ла-Камбре, великому міському парку на півдні Брюсселя (Бельгія) [42]. Ця територія даного міста є ідеальним місцем для тестування варіанта «розумного» освітлення, оскільки через цей парк проходить важлива транспортна артерія, тобто рух може бути дуже інтенсивним: автомобілі, велосипедисти, пішоходи. Крім того, оскільки ця зелена зона багата на біорізноманіття, було доречним мінімізувати будь-яке світлове забруднення. Адаптація світлового потоку 72 світлодіодних світильників CITEA NG, встановлених на дорозі і в парку, відбувалася за даними, зібраними в режимі реального часу. Ці дані збиралися не датчиками, встановленими на світильниках, а через онлайн-бази даних в Інтернеті.

Збиралися три типи даних: погодні умови, інтенсивність руху та розташування пішохідних переходів. Дані, що наводили з баз даних, дозволили системі Schreder EXEDRA розрахувати оптимальні рівні освітлення для кожної світлової точки і, в разі потреби, кожних 15 хвилин адаптувати світловий потік до умов реального часу. Світловий потік змінювався за 3-ма рівнями (100%, 75%, 50%), щоб відповідати необхідним стандартам освітлення міста. Таким чином, за повний календарний рік такий тип системи може забезпечити 10% збільшення економії енергії. Крім того, зниження світлового потоку дозволило мінімізувати будь-яке світлове забруднення, не впливаючи на безпеку і комфорт людей, які рухаються дорогою.

Вищезазначені варіанти адаптивних систем зможуть бути особливо цікавими для територій, де інтенсивність руху істотно і стохастично змінюється. Цей факт провокує подальше спрямування нових напрямків наукового пошуку в розвитку теоретичних засад побудови адаптивних систем керування системами ЗО.

У [43] наведено основні критерії, котрі рекомендують автори для вра-

хування при проєктуванні дорожнього освітлення з оптимізацією використання електроенергії за допомогою генетичних алгоритмів. У працях [44-49], як і в ряді інших праць [50-54], викладено проєктні пропозиції авторських бачень щодо реалізації інтелектуальних систем керування ЗО. Роботи [55, 56] визначають своє бачення систем ЗО у варіантах «розумних» міст.

Пізнавальним і, водночас, повчальним фактором, котрий викристалізувався в результаті ознайомлення автора з «пошуковим портфелем» досліджень закордонних вчених у даному спрямуванні, на значний за кількістю науковий блок, що відкриває можливості застосування в комплексах ЗО акумулюючих накопичувачів ЕЕ.

У роботі [57] аналізується доцільність застосування різних систем зберігання енергії для систем ЗО доріг, що використовують сонячні електростанції. Розглядаються свинцево-кислотні та літій-іонні акумулятори, суперконденсатори та гібридні системи зберігання енергії. Результати показують, що свинцево-кислотні, літій-іонні акумулятори та суперконденсатори забезпечують задовільну якість активної потужності для ефективного заряджання у всіх діапазонах сонячного випромінювання. Використання свинцево-кислотних батарей дає найнижчу вартість установки, а літій-іонні – найкращу довговічність. Вартість суперконденсаторів занадто висока, щоб використовувати їх як систему зберігання енергії для сонячних систем освітлення доріг. Однак, вони можуть залучатися до комбінованих систем з акумуляторами для зменшення коливань струму й активної потужності для зарядки акумуляторів.

У роботі [58] досліджується продуктивність автономної фотоелектричної системи для ЗО з використанням акумуляторних батарей та водневої системи зберігання електроенергії. Побудовано повні математичні моделі обох систем. Вони змодельовані для реальних кліматичних умов міста Нью-Борг-Ель-Араб (Єгипет). Результати показали, що річне навантаження освітлення можна покрити за допомогою 160 м<sup>2</sup> фотоелектричних панелей у ви-

падку застосування водневого накопичення і 40 м<sup>2</sup> для системи з акумуляторами. Крім того, загальна ефективність системи вища для акумуляторної системи.

Дослідження [59] фокусувалося на оптимізації автономної фотоелектричної системи з літій-іонними акумуляторами для світлодіодного ЗО у провінції Магетан (Індонезія). Процес оптимізації включав у себе вибір місткості батареї, контролера заряду, потужності фотоелектричних панелей при дотриманні вимог до електропостачання і проектних обмежень. Техніко-економічний аналіз системи проводився, базуючись на оцінці сонячних ресурсів PVGIS. Моделювання показало ефективність роботи для вуличного освітлення саме з використанням літій-іонних акумуляторів.

Оцінюванню продуктивності літій-залізо-фосфатних (LiFePO<sub>4</sub>) акумуляторів як накопичувачів для автономної фотоелектричної системи ЗО присвячена робота [60]. Експерименти показують, що при застосуванні LiFePO<sub>4</sub> батареї є різниця між вхідною та вихідною енергією акумулятора, яка в основному впливає на її дефіцит – близько 10% в кожному циклі заряду/розряду. Отримане значення продуктивності батареї LiFePO<sub>4</sub> може бути орієнтиром для проектування автономної фотоелектричної системи вуличного освітлення. Результат вказує на те, що система потребує більш високого піка вихідної потужності фотоелектричної системи для застосування LiFePO<sub>4</sub> акумуляторів.

Підводячи незначний за обсягом, але достатній для розуміння та сприйняття обсягів наукових досягнень закордонних пошукачів вирішення проблем ЗО аналіз закордонних досліджень, зазначимо, що більшість із них виконувались «адресно» для конкретних умов і з ініціативи замовників-муніципалітетів, громад тощо.

Суттєво, по формату підходу в дослідженнях, різняться від закордонних доробки вітчизняних вчених. Розробки наших вчених носять більш узагальнений характер з відтінком уніфікованості рішень.

У розвитку цих ідей, когорта вітчизняних науковців, серед яких: Л.А.

Назаренко, К.І. Іоффе, В.О. Салтиков, О.М. Сінчук, Ю.П. Мисюк, Р.В. Пилипчук, Є.О. Рейцен, С.Ю. Поталіцин, В.А. Андрійчук, П.П. Алексєєв, В.О. Артемчук, Т.Р. Білан, О.Л. Декуша, А.О. Запорожець, В.П. Розен, А.В. Саприка, П.П. Говоров, М.С. Тарасенко, А.К. Кіндрінова, І.М. Трунова, Л.Ю. Волоotka, Т.Л. Насєдкіна та ряд інших [61-79].

Наукові дослідження [68] присвячено підвищенню ефективності роботи освітлювальних установок на основі застосування світлодіодів та ламп типу ДНаТ у системі ЗО. Розвинено базу даних, що дозволяє зробити оцінювання ефективності зовнішнього освітлення у процесі експлуатації. Проаналізовано застосування світильників на основі СД у діючих системах зовнішнього освітлення. Обґрунтовано принцип забезпечення нормованого теплового режиму роботи для СД під час регулювання струму. Запропоновано оптичну систему для СД світильників, яка дозволяє створити вузьконаправлений світловий потік для застосування у декоративно-художньому підсвічуванні вулиць, скульптурних композицій, споруд і парків міст, що зменшує втрати світлового потоку і не створює при цьому надлишкове світлове забруднення. Розроблено схему для можливості регулювання світлового потоку від 50 до 100% для ламп типу ДНаТ.

У [69] запропоновано авторський підхід до реалізації заходів з економії ЕЕ в загальноміських СЕП.

У працях [70] розглянуто розвиток нормативної бази ЗО в Україні та аналітичний огляд робіт міжнародних енергетичних організацій щодо стану та сценарії розвитку аналізованого сегмента, світової енергетичної сфери. Детально висвітлено питання освітленості як одного з ключових чинників покращення безпеки на автодорогах. Визначено три рівні одержання інформації у процесі керування автомобілем: позиційний, ситуаційний і навігаційний. Наведено конкретний приклад розрахунку видимості – можливого показника нормування ЗО в майбутніх нормативних документах.

У наукових доробках [71] проаналізовано сучасний стан споживання електричної енергії в Україні освітлювальними системами, приділено увагу

експлуатаційним процесам і надано рекомендації щодо підвищення енергоефективності освітлювальних комплексів ЗО.

У [72] акцент досліджень робився на підвищенні енергоефективності ЗО шляхом покращення якості ЕЕ в СЕП.

У [73] запропоновано варіант АСК ЗО. Дослідження [74] присвячені конкретиці оцінювання світловіддачі освітлювальних пристроїв на основі світлодіодних джерел Svitlo Lux. Результат наукових досліджень, котрі викладені в працях [75-77], дають необхідні вхідні дані для енергоаудиту систем ЗО та відповідних рішень шляхів покращення енергоефективності останніх.

Логістиці в оцінюванні ефективності АСК ЗО в конкретиці реалій їх застосування викладено в [78].

Ряд праць присвячені аналізу розвитку систем збору даних, інформаційних технологій, зокрема, інтернету речей (ІоТ) [82-83], засобів керування ЗО, які прийнято називати інтелектуальними (smart). Їх застосування дозволить суттєво знизити рівень споживання електроенергії обладнанням освітлювальних мереж.

Наприклад, масштабний огляд smart-методів керування ЗО наведений у роботі [85]. Серед них особливо виділяються ті, що використовують методологічний апарат нечіткої логіки [86-92], керування з прогнозуючими моделями або машинного навчання через високу ефективність.

Разом з тим, системи нечіткого логічного виводу отримали найбільше поширення, зважаючи на свою простоту. Проте ці системи мають і свої особливості.

У роботі [86] нечітка система керування окремою освітлювальною установкою складається з двох нечітких підсистем. Одна з них регулює яскравість LED-світильника, залежно від освітленості та світлового шуму. Інша – тривалість включення залежно від швидкості автомобіля. У [87] автор наводить практичну реалізацію системи.

Нечітка система керування вуличною світлоточкою також запропонована у [88]. Входами в ній виступають рівень сонячного освітлення і присутність об'єкта в районі дії освітлювальної установки, виходом – рівень яскравості LED-світильника.

У статті [89] автором розроблена інтелектуальна нечітка система керування вуличними ліхтарями, що базується на інформації з датчиків швидкості транспортних засобів та освітленості, яка дозволяє заздалегідь регулювати кількість ввімкнених ліхтарів перед транспортним засобом, а також рівень освітленості LED-світильників. Система дозволяє динамічно керувати традиційними вуличними ліхтарями відповідно до конкретних умов на дорозі в нічний час.

Відзначимо роботу [90]. У ній запропонована нечітка система динамічного регулювання яскравості штучного ЗО, враховуючи різні фактори, такі як: інтенсивність природнього освітлення, інтенсивність світлового шуму та швидкість руху автотранспорту. Запропонований алгоритм нечіткого керування значно знижує енергоспоживання освітлювального пристрою.

У [91] пропонується ще одна система керування вуличними ліхтарями, заснована на теорії нечіткого керування. Яскравість кожного LED-світильника можна регулювати відповідно до рівня природнього освітлення. Автором встановлено, що метод дозволяє досягнути енергозбереження. Проте, зазначимо, система керування не враховує наявність автотранспорту або пішоходів.

Стаття [92] присвячена розробці концепції енергозбереження в системах ЗО шляхом керування яскравістю світлодіодних освітлювальних приладів. Пропонована система оснащена датчиками визначення інтенсивності природнього освітлення, руху транспортного засобу по дорозі, а також фіксації дощу. Вихідною величиною для системи є яскравість освітлення.

Проведений аналіз літератури вказує на те, що системи керування еле-

ктротехнічним комплексом ЗО, котрі використовують методи нечіткої логіки, сфокусовані тільки на рівні освітленості (як основної величини) та інтенсивності руху автотранспорту, проте не враховують тариф на електроенергію при генерації величини керуючої дії за напругою або струмом (залежно від типу LED-драйвера). Також жодна з розглянутих систем не надає рекомендації щодо вибору джерела автономного живлення для освітлювальної установки, хоча деякі з рекомендованих варіантів мають сонячні панелі з акумуляторами.

Сканування результатів відомих перфектних досліджень в авторському оцінюванні досягнутого виглядає таким чином, що як би прискіпливо ми не аналізували ці пошуки, але без компліментарності на їхню адресу тут не обійтись. Саме ці дослідження, як у позитиві, так і в негативі, кінцевих результатів у варіантах пошуків дали і дають можливість для продовження процесу наукового пошуку у вельми актуальному питанні, що аналізується.

Проте говорити про завершеність спрямувань цих досліджень та їх насичення ідеями, що реалізуються, у напрямку реальних проєктів для втілення їх у практику створення сучасного керування електричних освітлювальних мереж зарано.

#### **1.4 Визначення та формування завдань наукового пошуку**

Креативний формат розбудови систем та комплексів ЗО, в сучасному їх баченні, існує в Україні значний період часу [3-18]. Ці доробки, а, точніше, їх позитив, відомий і оцінений мешканцями міст та населених пунктів країни.

Проте, як факт сьогодення, можна ствердно констатувати, що ліміт пострадянського формату досліджень у вирішенні проблем ЗО перевищено, як і закінчується потенціал безплідних рішень. У діючий період часу (Додаток Г) у містах та населених пунктах України аналогічно або близько до світових зразків, певні етапи з комплексу сучасних спрямувань – рішень у



рамках реалізації відповідних міських і регіональних програм, котрі органічно включають у себе і складові систем ЗО.

Базові цілі таких програм:

- відновлення, реконструкція та будівництво мереж зовнішнього електричного освітлення;
- приведення електромереж ЗО у відповідності до норм і стандартів діючого законодавства;
- оснащення об'єктів зовнішнього освітлення обладнанням із використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій;
- покращення стану благоустрою населених пунктів;
- покращення криміногенної та аварійної ситуації у нічний час, комфорту проживання населення;
- зменшення травматизму населення в умовах незадовільного стану доріг, недостатньої видимості у зв'язку з погодними умовами;
- зменшення споживання електричної енергії об'єктами ЗО.

Очікувані результати виконання «Програм»:

- забезпечити реалізацію державної політики щодо розвитку, передусім, у сфері благоустрою населених пунктів;
- забезпечити підвищення рівня безпеки систем життєзабезпечення населених пунктів;
- поліпшити якість житлово-комунального обслуговування населення;
- знизити кількість аварійних ситуацій на об'єктах ЗО;
- створити умови безпечного руху автотранспорту та пішоходів;
- створити ефективну систему обліку та регулювання споживання електричної енергії, раціональне її використання для освітлення населених пунктів;
- скоротити витрати енергії, підвищити енергоефективність ЗО вулично-дорожньої мережі.

Проте, як зазначалось у попередньо викладеному матеріалі, проблема, хоча і в дещо завуальованому вигляді, в ЗО міст України існує, а в останні роки, з відомих причин, вона доведена до рівня драматичності ситуації та необхідності прискореного вирішення з новими варіантами.

Перш за все це стосується безперебійності та енергоефективності ЗО. Реалізація вирішення такої проблеми потребує нового, додатково науково обгрунтованого спрямування до пошуку не завжди традиційних шляхів рішення. Але саме без такого підходу важко, а, скоріше, неможливо буде досягти бажаного ефекту, котрий можливо досягти за допомогою АСК.

Автоматизація керування ЗО може і повинна забезпечити адаптування рівня освітленості освітлювальних приладів до комплексу змінних умов, у яких вони повинні функціонувати. В переліку таких умов мають місце: години доби, погодні особливості та рух пішоходів або транспорту. Окрім цього, вельми важливим фактором такого дійства буде і те, що керування рівнем освітленості надасть можливість реально зменшити обсяги споживання електроенергії, що є аспектом сталого розвитку міст та селищ.

Не слід відкидати також і соціальну складову наслідків роботи комплексів ЗО. Автоматизоване керування освітлювальними приладами дозволяє використовувати світлоточки тільки тоді, коли в цьому є потреба, тобто навіть у ті години доби, коли раніше зовнішнє освітлення вимикалося повністю, надасть можливість підвищення рівня комфортабельності жителів міст та підвищує привабливість самого міста для населення. Причому, на рівень споживання електроенергії таке включення не матиме суттєвого впливу через низьку інтенсивність автомобільного та пішохідного руху в темний час доби, а також можливість створити достатню освітленість при потужності нижче номінальної. Це твердження потребує теоретико-експериментального підтвердження.

При цьому слід розуміти, що траєкторія процесу вирішення проблеми підвищення ефективності функціонування ЗО, в часі, може сягати тривалих термінів, а інтенсивний період при цьому – значних матеріальних вкладень.

Та все ж, для досягнення поставленої мети, впровадження новітніх технологій у формат розбудови систем керування процесом функціонування комплексів ЗО, є необхідним, неминучим і безальтернативним рішенням у рівні своєї досяжності.

Стартовим моментом у такому форматі рішення повинно стати наукове обґрунтування та практичні рекомендації щодо втілення дослідницьких результатів для їх апробації у реаліях проєктів розробки та експлуатації комплексів ЗО в умовах міст та населених пунктів України.

Базуючись на результатах аналізу оцінювання стану та реально обґрунтованих можливостей сучасного відтворення рівнів досяжності підвищення комплексу ефективності функціонування мереж ЗО, розроблено авторську узагальнену логістичну схему практичної реалізації такого проєкту (рис. 1.9).

Зрозуміло, що кожне локальне спрямування з комплексу, при його реалізації, у змозі дати повний позитивний ефект у підвищенні енергоефективності ЗО. Зрозуміло й те, що максимальний ефект може бути досягнуто лише при остаточному вирішенні всього комплексу завдань. Подолання такого шляху – непростий процес як у часі, так і в необхідних матеріальних ресурсах, але альтернатива такого варіанта в кінцевому досяжно очікуваному рівні енергоефективності ЗО не існує, хоча траєкторія розбудови формату такого комплексного рішення може бути і, скоріш за все, буде неоднорідною з певним різноманіттям рішень.

Враховуючи той факт, що дана робота, з авторського бачення, покликана доповнити існуючі й отримані раніше результати у напрямку підвищення життєзабезпечення населених пунктів, шляхом розроблення і застосування комплексно ефективних електротехнічних комплексів ЗО, шляхом застосування сучасних управлінських методів керування процесом функціонування освітлювальних пристроїв для досягнення поставленої мети, необхідно визначити наступне.

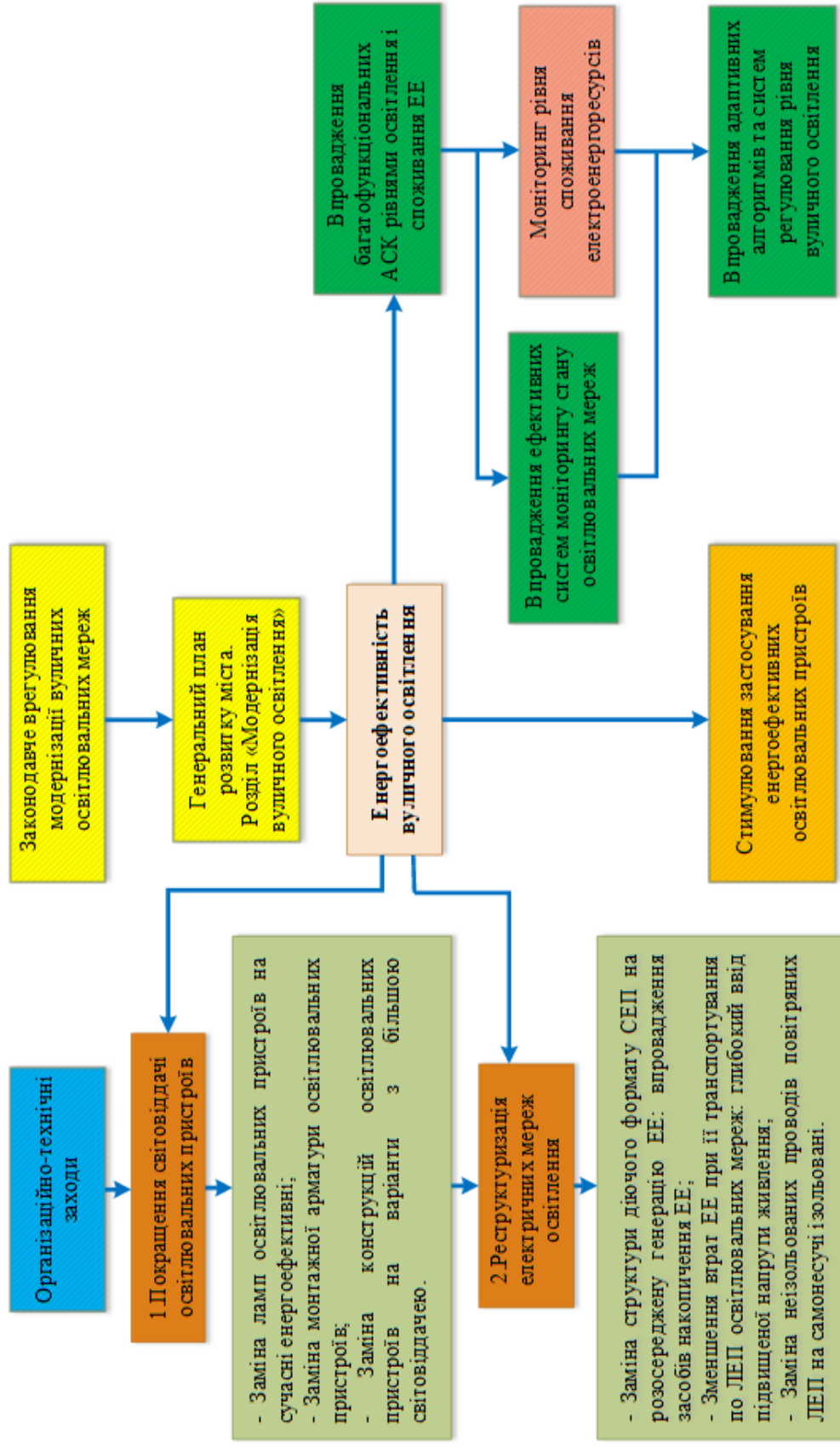


Рисунок 1.9 – Основні спрямування з підвищення ефективності функціонування мереж зовнішнього освітлення міст та населених пунктів

**Мета і завдання дослідження.** Метою даного дисертаційного дослідження є підвищення рівня електроенергоефективності та безперебійності функціонування електричних мереж освітлення міст та населених пунктів як у штатних, так і позаштатних умовах функціонування, шляхом застосування сучасних методів інтелектуального управління режимами роботи освітлювальних пристроїв і рівнями випромінюваного ними освітлення.

Для досягнення мети та логістики її реалізації в процесі наукового пошуку в схему дослідження були поставлені та вирішені наступні наукові завдання:

- на основі аналізу існуючого стану формалізувати системоутворюючі чинники, котрі впливають на електроенергоефективність, якість і безперебійність вуличного штучного освітлення міст та населених пунктів; визначити та оцінити варіанти напрямків підвищення рівнів вищенаведених показників із максимальним наближенням їх до сучасних вимог шляхом вибору формату креативного рішення;

- теоретично обґрунтувати та розробити методіку вибору варіанта структури енергоефективного, за технологією функціонування, комплексу електропостачання вуличного освітлення для умов міст та населених пунктів із наповненням її багатofункціональною системою керування режимами освітлювальних пристроїв у функції ряду впливових системоутворюючих факторів;

- розробити адекватну імітаційну модель електроенергетичного комплексу вуличного освітлення з можливістю дослідження на ній режимів та визначення оптимальних параметрів і діапазонів ефективного функціонування освітлювальних комплексів і систем, із варіативністю оцінювання та ранжування, за рівнями усталеності, впливових на цей процес факторів;

- встановити залежність між поточним станом рівнів природної освітленості вулиць і необхідним рівнем додаткової штучної освітленості при обґрунтуванні та ідентифікації вхідних і вихідних параметрів для реалізації закону адаптивного керування режимами роботи, як системи освітлення в цілому, так і локальних освітлювальних пристроїв, зокрема, у відповідності до реальних показників освітленості, розробити варіант структури АСК для керування процесом освітлення вулиць міст та населених пунктів відповідного електроенергетичного комплексу із залученням до цього елементів штучного інтелекту.

Зі значним рівнем коректності, результати як зазначених, так і незазначених, за фактом обмеженості обсягу дисертації записки досліджень, підкреслимо значну практичну спрямованість пошуків авторів у цьому питанні – як складового комплексу підвищення енергоефективності ЗО, і як результат – реалізація в конкретних проєктах. В Україні, поки що, бракує саме практичної реалізації і саме цих складових з усього комплексу модернізації СЕП ЗО.

## **1.5 Висновки до розділу 1**

1. Комплекси зовнішнього освітлення міст та населених пунктів України являють собою енергозатратні види споживачів електроенергії, котрі у відповідності та згідно зі своїм узагальненим функціональним призначенням – створення комфортних умов для населення, різняться між собою індивідуальністю архітектури, розбудови, рівнями споживання електроенергії, типами освітлювальних пристроїв і незначними відмінностями технології погодинного функціонування. З ряду як об'єктивних, так і не зовсім об'єктивних причин, електротехнічні комплекси, що аналізуються, в сучасному баченні сьогодні до них, не відповідають в достатньо необхідній мірі зростаючим критеріям як у технології, так і в енергетичному аспекті їх функціонування і потребують вирішення відповідних проблем.

2. Тривіальним, проте безпосереднім у сфері системоутворюючих реалій очікуваного позитиву, ефектом досяжності в напрямку підвищення складових ефективності функціонування комплексів зовнішнього освітлення, згідно з функціонуванням пропонованим форматом «дорожньої карти» досягнення мети є інтеграція в технологію їх роботи процесу адаптивної керованості, котрий, базуючись і віддзеркалюючись на функціональних показниках – рівня освітленості та рівня споживання електроенергії та, враховуючи рейтинг відповідності факторів впливу, наповнить змістом пакет вхідних-вихідних параметрів у структуру алгоритму управлінських дій.

## РОЗДІЛ 2

### ФОРМАТИ СТРУКТУРУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ МІСТ ТА НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

#### 2.1 Системи електропостачання – стартові позиції формування структур комплексів керування зовнішнім освітленням

Структурування проектних форматів схем ЗО здійснюється ситуативно, у відповідності з ландшафтом, архітектурою того чи іншого міста або населеного пункту, а також у відповідності й на основі існуючих норм і стандартів [4], у тому числі у відповідності до [93].

Як зазначалось у попередньому розділі даного дослідження, згідно існуючої в Україні усталеної практики розбудови структур ЗО, їх системи електропостачання, як правило, здійснюються із TNS-системою заземлення через пункти живлення від трансформаторних підстанцій загальних СЕП конкретного міста чи населеного пункту. Мережі ЗО, маючи різні структури виконання, все ж складаються з ряду послідовно включених ділянок каскаду – каскадні варіанти (Рис. 2.1) [37].

Побудова мереж ЗО, в сьогоденні, як каскадних варіантів, передбачає практичну можливість і, що реалізується – регулювання споживаної електричної потужності цих комплексів шляхом вмикання їх на вечірній (вимкнена частина освітлення) і нічний (увімкнено все освітлення) режими роботи, для чого каскади мають фази нічного та вечірнього режимів роботи.

На теперішній час керування вуличним освітленням вулиць здійснюється з використанням досить простих алгоритмів. Як правило, після початку заходу сонця, із настанням сутінок вмикаються освітлювальні прилади на 50% потужності, з приходом ночі світлоточки ЗО починають працювати на повну потужність. Після цього зовнішнє освітлення працює без зміни режиму роботи до 23 години, після чого вимикається до настання світанку.



Разом з тим, це узагальнений режим, який може змінюватися залежно від міста або селища, інтенсивності руху автотранспорту та пішоходів і т.ін. [94].

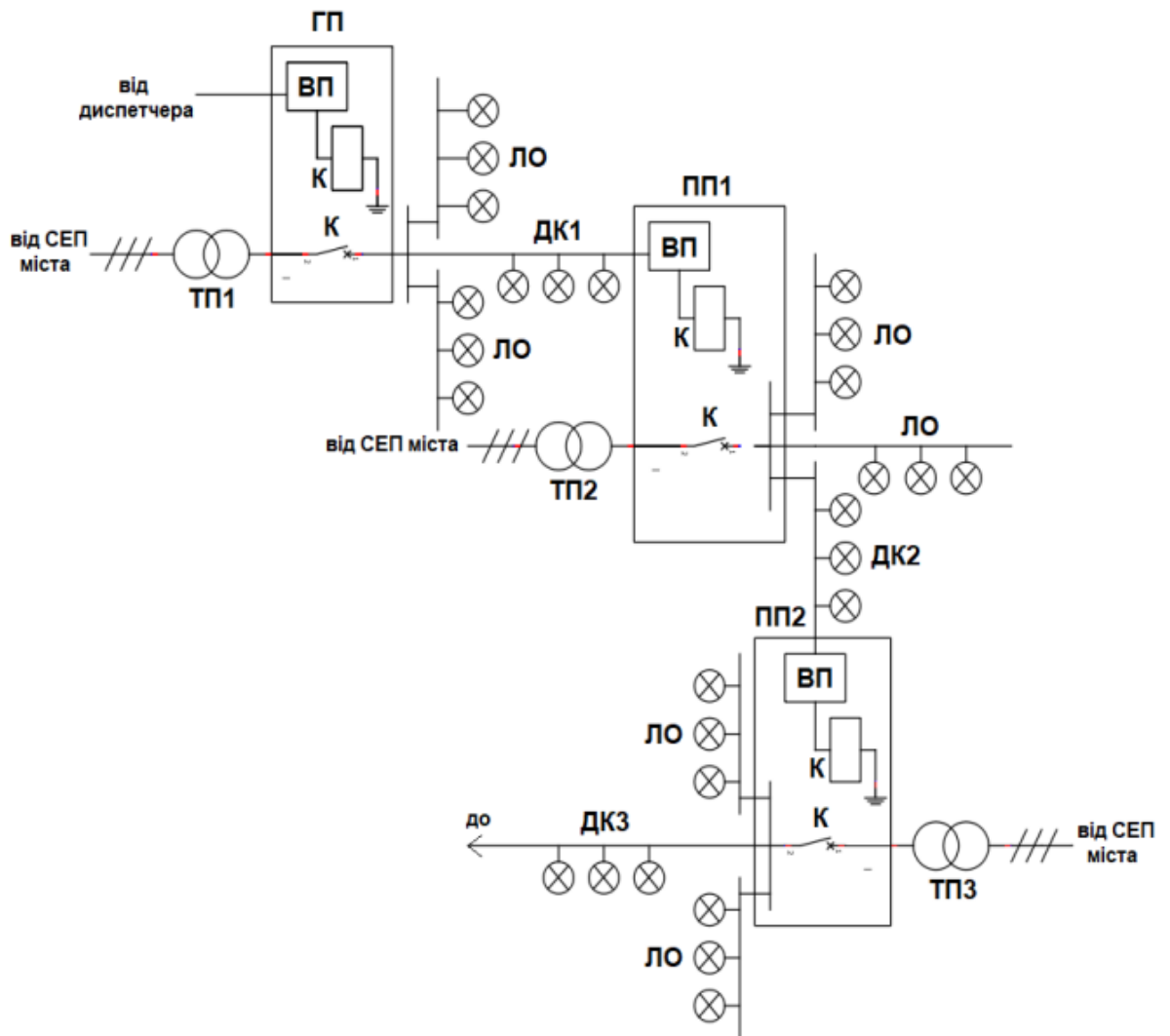


Рисунок 2.1 – Типова структура розгалуженої каскадної схеми зовнішнього освітлення вулиць, де:

ТП (1, 2, 3) – трансформатори підстанції системи електропостачання;  
 ЛО – лінії живлення електроенергією освітлювальних пристроїв; ДК  
 (1, 2, 3) – ділянки каскаду комплексу зовнішнього освітлення; К – силові  
 контактори; ВП – виконавчі пункти каскадів комплексу керування  
 зовнішнім освітленням

Наприклад, у місті Києві здійснюється 50% відключення світлоточок між 23:00 і 6:00 [95]. Таке неповне вимикання пояснюється високим темпом життя в цьому місті. У полтавській громаді з 23:00 до 00:00 освітлюються вулиці вздовж тролейбусних маршрутів, після чого зовнішнє освітлення вмикається до ранку [96]. У місті Кривому Розі з 23:00 до 5:00 освітлювальна мережа відключається практично повністю, а о 5-й годині ранку знову вмикається до настання світанку [97]. Це пояснюється тим, що місто є промисловим і завершення нічної зміни або початок денної на виробництвах починається дуже рано, тобто працівникам потрібно дістатися до робочого місця або повернутися додому. Звісно, усі вищеописані графіки роботи відповідають мирному часу, під час військового стану вони, як правило, підлягають корегуванню зі зрозумілих причин.

Такий підхід до керування зовнішнім освітленням можна вважати достатнім, але сучасні технології дають можливість досягти більшого ефекту, котрий апріорно може бути досяжним шляхом керуваності процесом функціонування комплексів ЗО.

Типовий варіант існуючої технології функціонування мереж ЗО в годинах доби наведено в табл. 2.1 та на рис. 2.2 [37].

Таблиця 2.1 – Варіативність функціонування системи зовнішнього освітлення в періоди доби

Вид команд	Режими роботи		Режим функціонування трифазної мережі живлення
	Ніч	Вечір	
Відключити освітлення	Відключено	Відключено	Знеструмлена
Включити 100%	Включено	Включено	Повнофазний
Включити 50%	Включено	Відключено	Неповнофазний



Рисунок 2.2 – Варіант однієї з канонічних схем функціонування зовнішнього освітлення в годинах доби міста

Як правило, керування мережами ЗО здійснюється в канонічному форматі – централізовано-дистанційно диспетчерами з пунктів керування за допомогою комутаційних апаратів-контакторів. Також застосовуються системи телекерування з дискретністю при передачі команд і безперервністю – в режимі контролю технічного стану мереж ЗО [37].

Мережі комплексів ЗО міст та населених пунктів в Україні являють собою формати споріднених, або близьких до цього визначення, варіантів структур [94-96]. Проте ряд міст мають свою систему, котра утворює варіативну специфіку структурування мереж ЗО. Нерідко саме ця специфіка визначає непрості додаткові проблеми і, перш за все, щодо показників енергоефективності ЗО як електроенергетичних комплексів, а також розбудову систем керування ними (Додаток Б, В, Г). Як наведено в підрозділі 1.1 даного дослідження, одним зі складних у черзі варіантів із формування структури і системи керування систем ЗО є м. Кривий Ріг (Дніпропетровська обл.) [97].

Місто, що аналізується, має унікальну структуру як за траєкторією розбудови систем ЗО, так і за протяжністю відповідних ЛЕП.

У зв'язку з цим цікавим моментом, за складністю та обсягом очікуваного дослідження, як наукового пошуку, є аналіз стану розбудови структури ЗО, параметрів СЕП і рівнів споживання ЕЕ комплексами ЗО даного міста, з його існуючою складністю та особливістю розбудов структур зовнішнього освітлення вулиць та площ [33, 98-100].

Аналізуючи стан показників функціонування мереж ЗО на прикладі міста, що аналізується, доцільно і реально стверджувати, що за останні десять років системоутворюючі експлуатаційні параметри їх роботи набрали тенденцію позитиву.

Водночас зазначимо, що структурування схеми освітлення у місті Кривому Розі значно складніше, ніж у більшості населених пунктів України. Пов'язане це як із протяжністю вулиць міста, де деякі сягають декількох десятків кілометрів, так і з його ландшафтом. Останній складно форматизувати в чітку систему чи схему, тому що ландшафт міста вкраплює в себе масу штучних техногенних негараздів [97-100].

У діючий період часу, біля 27% від земельної площі міста зайнято під промислові площі кар'єрів, шахт, відвали пустих порід, шламосховища та водозбірники мінералізованих вод, котрі відкачуються в підземних горизонтах гірничовидобувних підприємств. Більше того, з розширенням вищезазначених техногенних явищ, що має місце в реаліях функціонування промисловості міста, змінюється і локація освітлювальних мереж. При цьому, враховуючи вищенаведені аргументи, це не проста задача, але вона вирішується.

У прогнозованому періоді до 2031 р. обсяг споживання електроенергії у місті планувався зростати до 2,3% на рік, а загальний ріст електроенергії за рахунок впровадження відновлюваних джерел – щорічно на 3%, і його

частка повинна сягнути з 18% до 30% у 2030 році.

У діючий період часу, за структурою побудови, електричні мережі міста є класичним прикладом індустріальних центрів України. У складі магістральних електричних мереж регіону знаходяться повітряні лінії електропередачі напругою 330 кВ та 5 електростанцій із вищим рівнем напруги 330 кВ (ПС «Рудна», ПС «Першотравнева», ПС «Криворізька», ПС «Гірнична», ПС «Південна») (рис. 2.3, 2.4)

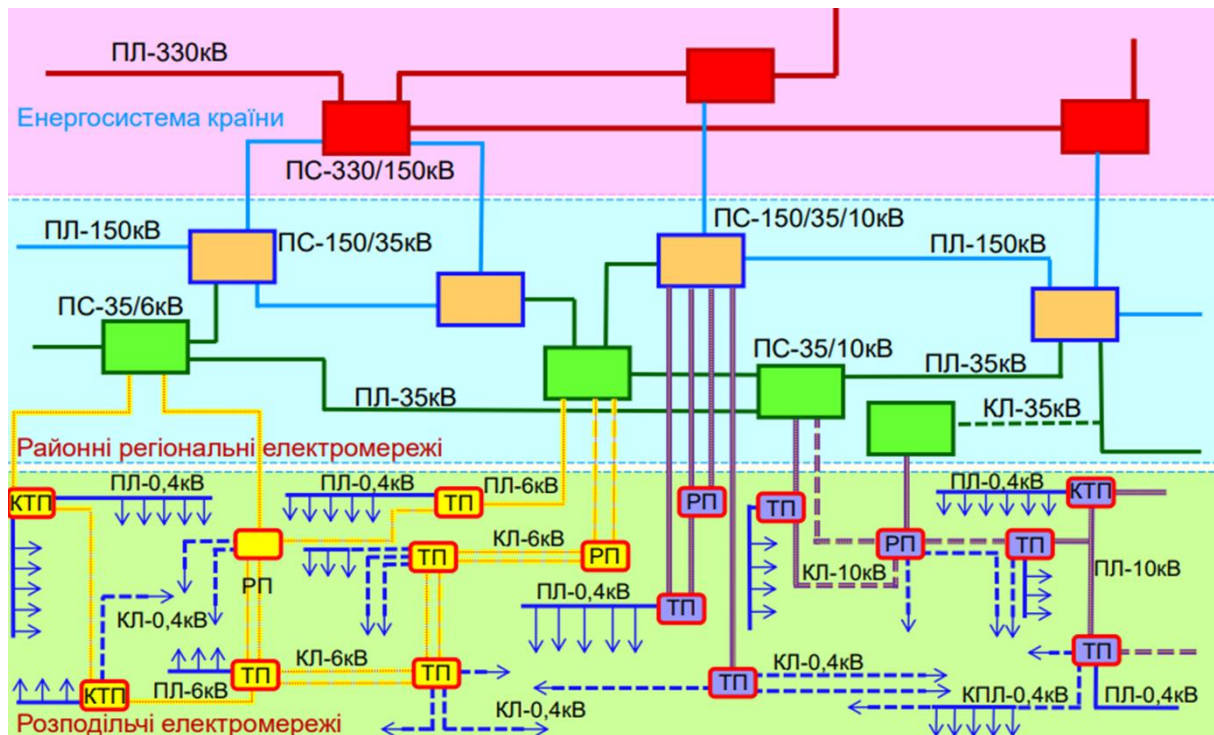


Рисунок 2.3 – Структура розподілу електроенергії, котру отримує місто Кривий Ріг (Дніпропетровська обл.) від енергосистеми України

Районні електричні мережі міста напругою 35-150 кВ формують повітряні лінії електропередачі 35 кВ та 150 кВ, кабельні лінії електропередачі 35 кВ та електростанції з вищим рівнем напруги 35 кВ та 150 кВ, що знаходяться на балансі промислових підприємств та Оператора системи розподілу АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі», який діє на території Дніпропетровської області. Загальна кількість цих електростанцій складає близько – 120, з них на обслуговуванні ДТЕК лише – 20 (150 кВ – 9, 35 кВ – 11).

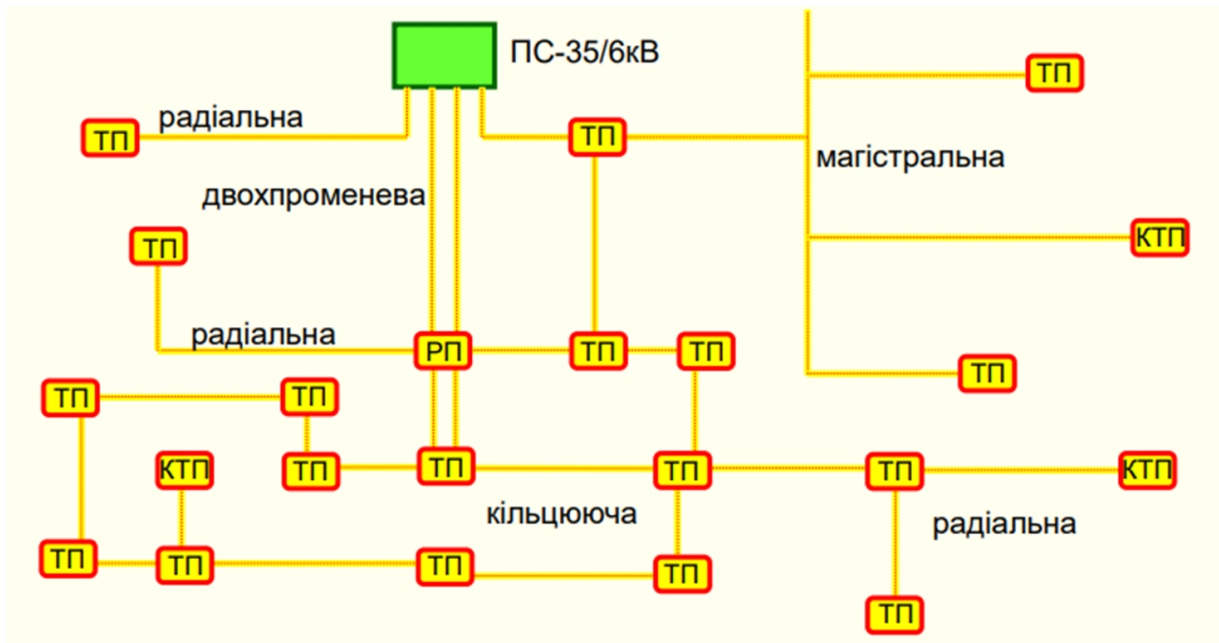


Рисунок 2.4 – Схеми електричних мереж міста Кривого Рогу  
(Дніпропетровська обл.), Україна

У зв'язку з тим, що місто Кривий Ріг розвивалось одночасно з освоєнням родовищ залізної руди та будівництвом гірничовидобувних та гірничозбагачувальних підприємств, підприємств металургії, підприємств машинобудування для потреб гірничовидобувної та металургійної галузей, більшість центрів живлення районних електричних мереж розташовувались саме на цих підприємствах.

Електричні мережі міста транспортують електроенергію безпосередньо до побутових та юридичних споживачів і складаються з повітряних і кабельних ліній напругою 10 кВ, 6 кВ та 0,4 кВ, а також із розподільних пунктів 10 кВ, 6 кВ і трансформаторних пунктів 10/0,4 кВ, 6/0,4 кВ. Більшість цих мереж знаходиться в обслуговуванні ОСР АТ «ДТЕК Дніпровські електричні мережі», який з умовами Договірних відносин забезпечує безперебійне електропостачання споживачів електроенергії з нормованими параметрами якості електричної енергії.

Розподільні електричні мережі 6-10 кВ міста (рис. 2.4) в основному виконані комбінованим методом. При цьому застосовуються двопроменеві,

кільцюючі, радіальні та магістральні схеми з'єднання між живлячими підстанціями розподільчими пунктами і трансформаторними пунктами. Такий метод забезпечує максимальну надійність електропостачання кінцевих споживачів електроенергії (табл. 2.2).

При виборі схеми електропостачання враховуються вимоги до надійності, умови будівництва та економічна доцільність. Чим надійніша схема електропостачання, тим дорожче витрати на проєктування і будівельно-монтажні роботи.

Таблиця 2.2 – Характеристика міських електричних мереж

№ з/п	Показник	Кількість, шт.	Довжина, м
1.	Повітряні лінії електропередачі 6-10 кВ	280	219,6
2.	Повітряні лінії електропередачі 0,4 кВ	1254	1135,8
3.	Кабельні лінії електропередачі 6-10 кВ	1427	871,7
4.	Кабельні лінії електропередачі 0,4 кВ	3294	772,4
7.	Розподільчі пункти (РП) 6-10 кВ	55	25 010
8.	Трансформаторні пункти (ЗТП) 6-10/0,4 кВ	971	469 034
9.	Трансформаторні пункти (КТП) 6-10/0,4 кВ	145	37 003

Всього у міських розподільчих електричних мережах знаходиться в роботі 1971 силовий трансформатор 6-10/0,4 кВ загальною встановленою потужністю майже 660 МВА.

Для порівняння співвідношення можна навести дані, що номінальна генеруюча потужність лише одного тербогенератора теплової електростанції складає 300 МВт, а атомної електростанції – 1000 МВт.

Електропостачання міських житлових масивів приватного сектора забезпечується в основному повітряними електричними лініями 0,4 кВ з окремими вводами до кожного помешкання.

Електропостачання двох-, трьох-, чотирьох-, п'ятиповерхових багатоквартирних житлових будинків, побудованих до 1970-х років, забезпечується в основному повітряними електричними лініями 0,4 кВ із вводами до ввідно-розподільчих пунктів 0,23-0,4 кВ будинків.

Електропостачання інших житлових будинків, громадських будівель та об'єктів комунальних закладів забезпечується кабельними лініями 0,23-0,4 кВ.

У стислих умовах міської забудови перевага надається використанню саме кабельних ліній електропостачання, прокладених у землі або в інших підземних спорудах (комунікаційні колектори, тунелі та ін.). Саме під ці принципи нещодавно були внесені відповідні зміни в правила проектування електричних мереж та в будівельні норми.

Якщо за місцевими умовами допускається застосування для електропостачання повітряних ліній електропередачі 6-10 кВ чи 0,4 кВ, то вони передбачаються у виконанні самонесучим ізольованим проводом – СП, що дозволяє підвищити надійність електропостачання (зменшити кількість аварійних відключень чи інших незапланованих переривань електропостачання споживачів) та підвищити рівень безпеки експлуатаційного обслуговування ЛЕП-0,4 кВ в умовах перебування великої кількості людей і транспорту. Трансформаторні пункти 6-10/0,4 кВ за виконанням існують як закритого типу, будівельна частина яких виконана з цегли, бетонних блоків чи плит. КТП – комплексна трансформаторна підстанція виконана в металевому корпусі і має відносно менші, ніж у ЗТП, установочні габарити і витрати на будівництво. В електроустановках відкритого типу СТП – стовбова (мачтова) комплектна трансформаторна підстанція комунікаційні апарати на стороні високої\ напруги та силові трансформатори встановлені відкрито. В таких ТП все обладнання закріплюється на залізобетонних стояках, у тому



числі й низьковольтна шафа. Такі електроустановки бувають переважно тупикового типу.

Основні поточні заходи, котрі в планах реалізації до впровадження, щодо модернізації СЕП комплексів ЗО міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.) наведені в [97]. Формат цих заходів свідчить про їх дієвість і позитивну спрямованість.

## **2.2 Сканування та варіативність прогнозів споживання електроенергії комплексом зовнішнього освітлення міста**

Як зазначалось у Розділі 1 даного наукового пошуку та згідно мети, кумулятивність цього дослідження формується на процесі керованості існуючими електроенергетичними процесами, являють собою системоутворюючий комплекс впливу на вищезазначений процес і притаманні системам ЗО взагалі та окремим суб'єктам – містам, зокрема.

Для підтвердження цього постулату проведемо аналітику електроенергетичного стану ЗО все того ж міста Кривого Рогу, базуючись на статистичних матеріалах, котрі були отримані за останні 10-ть років. При цьому, не безпідставно будемо вважати, що передбачення, на основі статистики прогнозних значень таких показників і, що головне, розробка на основі отриманих даних відповідних рішень, із послідуєчим втіленням їх у практику функціонування ЗО дозволить шляхом визначення варіативності розбудови відповідних схем додатково суттєво вплинути на рівень енергоефективності ЗО.

У табл. 2.3 надано значення показників рівнів споживання електроенергії вуличним освітленням у місті Кривому Розі (Дніпропетровська обл.) в період з 2014-2023 рр.

Таблиця 2.3 – Показники рівнів споживання електроенергії вуличним освітленням

I. Встановлені електричні потужності освітлювальної мережі міста (кВт)									
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
38566,1	41222,3	44568,5	45755,5	45755,5	45755,5	45755,5	45755,5	45755,5	45755,5
II. Рівні споживання електроенергії вуличним освітленням (кВт-год)									
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
14980 000	17833 900	18593 842	18692 374	20705 598	17331 494	18030 988	17475 465	8686 635	7634 690
III. Протяжність освітлювальних мереж (км)									
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1582,7	1622,4	1733,3	1835,56	1837,59	1837,59	1837,59	1837,59	1837,59	1837,59
IV. Кількість електричних підстанцій у мережі (шт.). (Шафи управління зовнішнім освітленням)									
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
541	552	552	512	562	562	562	566	566	566

Візуалізуємо надану інформацію у відповідності до табл. 2.3 (рис. 2.5)

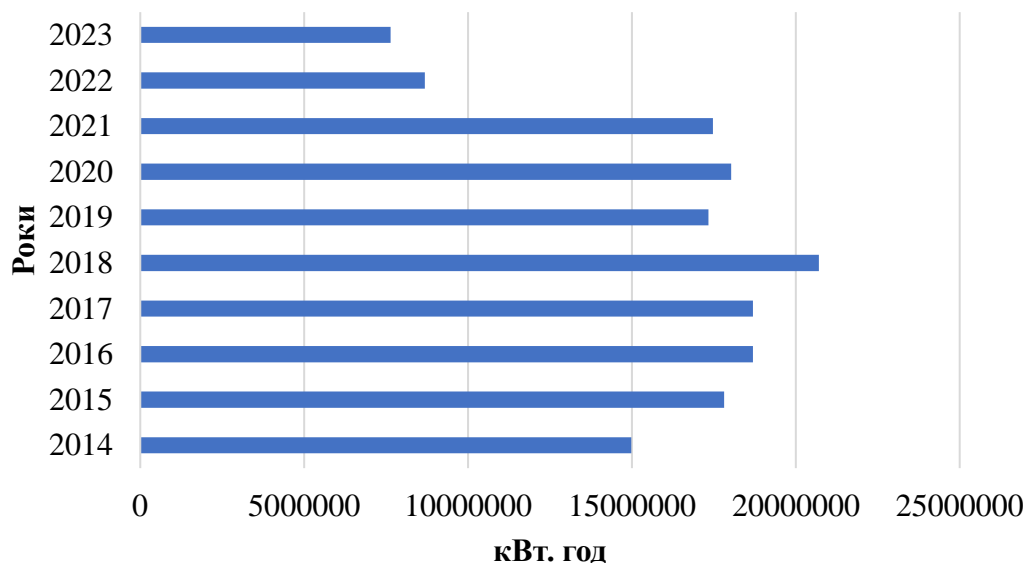


Рисунок 2.5 – Рівні споживання електроенергії зовнішнім освітленням міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.) у період 2014-2023 рр.

Подалі, згідно та у відповідності до «канонів» [101], здійсимо апроксимацію представленої графічно інформації, з метою виділення тренду – рис. 2.6.

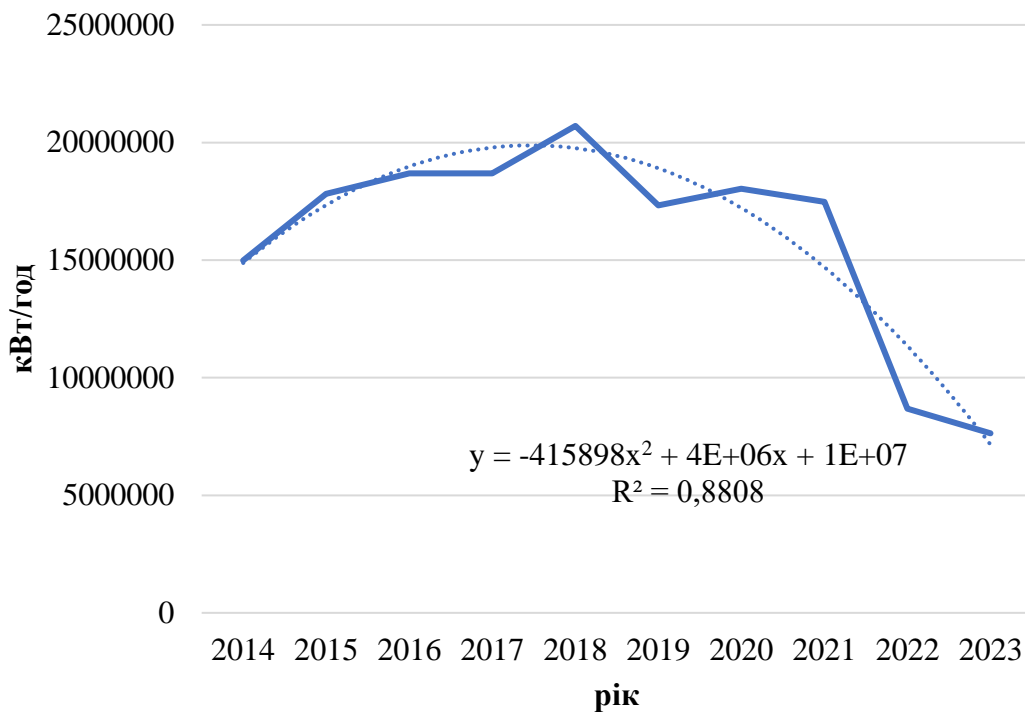


Рисунок 2.6 – Графічне представлення тренду значень показників рівнів споживання електроенергії зовнішнім освітлення міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.) у період 2014-2023 рр.

У варіанті, що аналізується, вочевидь, є застосування апроксимуючого поліному другого ступеня, який відображає тренд розвитку процесу і дорівнює:

$$Y = -415898x^2 + 4 \cdot 10^6x + 10^7 \quad (2.1)$$

Вочевидь, поліном відповідає вимогам адекватності, тому як коефіцієнт детермінації дорівнює 88,1%.

Тому для подальшого визначення прогнозу може бути застосована отримана аналітична залежність (2.1).

Також отримання значень прогнозу рівнів споживання електроенергії вуличним освітленням можемо отримати, застосувавши відповідне програмно-інформаційне забезпечення згідно табл. 2.4.

При цьому отримаємо розрахункові й візуалізовані дані – рис. 2.7.

Таблиця 2.4 – Прогноз рівнів споживання електроенергії вуличним освітленням

Часова шкала, (роки)	Значення, кВт·год.	Прогноз кВт·год.	Привязка низької ймовірності, кВт·год.	Привязка високої ймовірності, кВт·год.
2014	14980000			
2015	17813900			
2016	18692374			
2017	18692374			
2018	20705598			
2019	17331494			
2020	18030988			
2021	17475465			
2022	8686635			
2023	7634690	7634690	7634690,00	7634690,00
2024		6777469,1	675434,70	12879503,46
2025		5920248,2	-904764,78	12745261,09
2026		5063027,2	-2417890,23	12543944,70

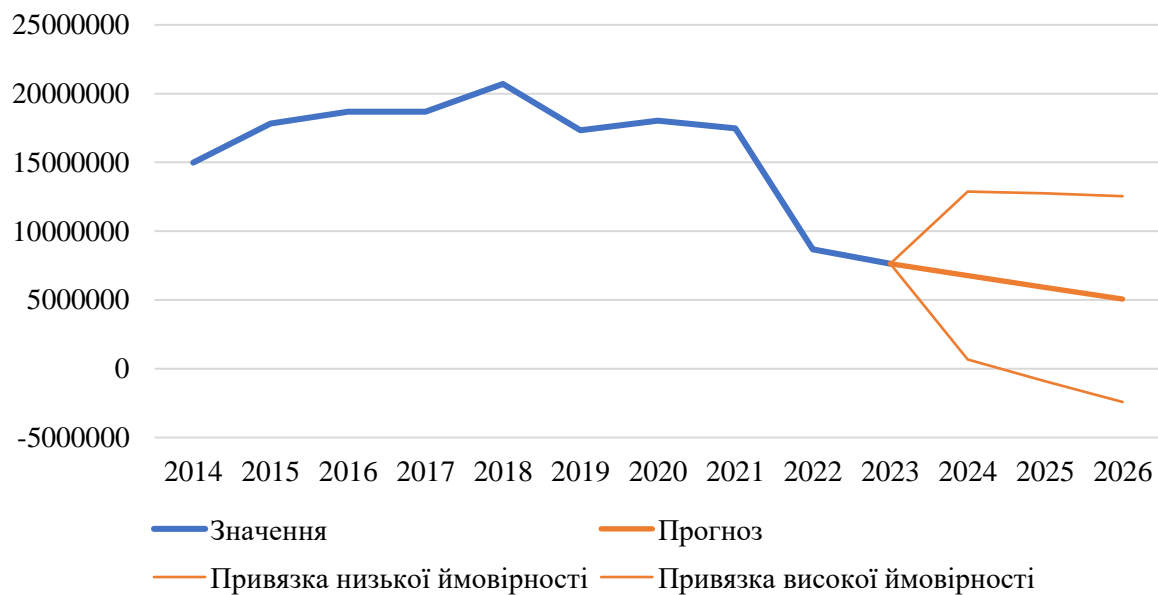


Рисунок 2.7 – Значення показників прогнозу рівнів споживання електроенергії зовнішнім освітленням міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.)

Нескладно відзначити, що, згідно з аналізом, спостерігається тенденція з певним рівнем позитиву. Також, слід відзначити, що прогноз – це ймовірнісні показники, значення яких можуть змінюватися в залежності від релевантної інформації.

Доцільним, у реаліях сьогодення, є порівняння значень прогнозу рівнів споживання електроенергії вуличним освітленням, використовуючи інформацію до 2022 р., вважаючи її форс-мажорними обставинами (рис. 2.8).

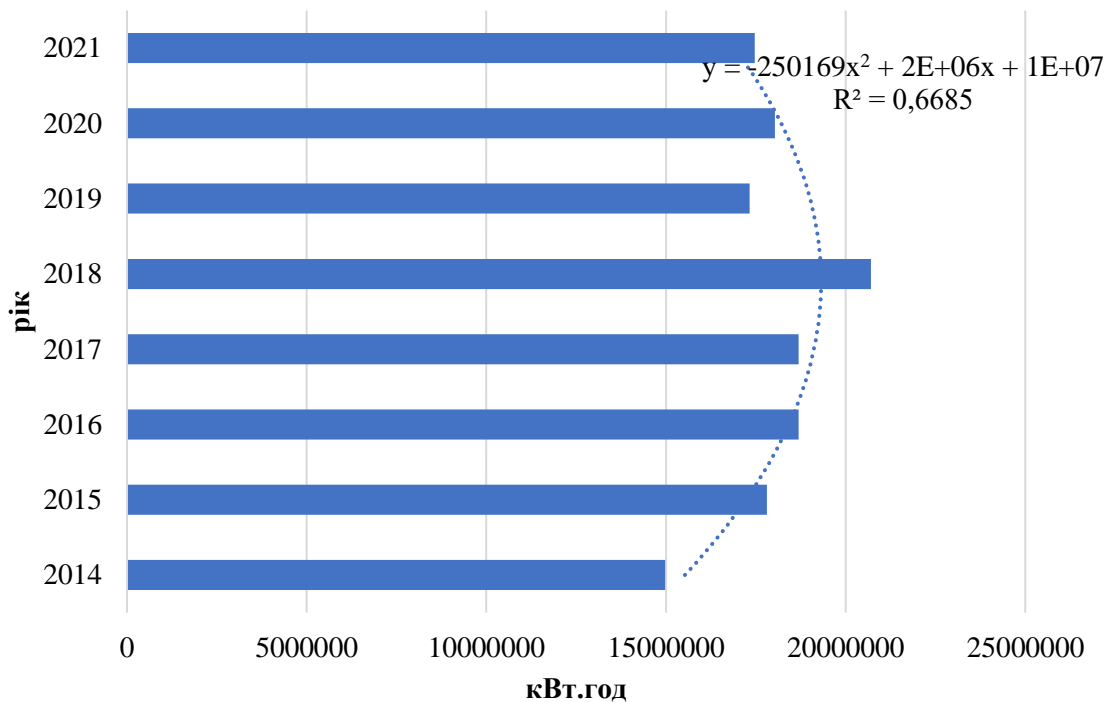


Рисунок 2.8 – Графічне представлення тренду значень показників рівнів споживання електроенергії зовнішнім освітленням міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.) у період 2014-2021 рр.

Проводячи групування даних, візуально відзначаємо зменшення споживання електроенергії зовнішнім освітленням.

Відповідно отримаємо аналітичну залежність щодо тренду. Маємо поліном другого ступеня (рис. 2.2):

$$Y = -250169x^2 + 2 \cdot 10^6 x + 10^7 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт детермінації відповідно дорівнює 66,8%.

Тобто, існує доцільність побудови прогнозу з відповідними прив'язками з табл. 2.5 (рис. 2.9).

Таблиця 2.5 – Прогноз рівнів споживання електроенергії вуличним освітленням

Часова шкала, (роки)	Значення, кВт·год.	Прогноз кВт·год.	Привязка низької ймовірності, кВт·год.	Привязка високої ймовірності, кВт·год.
2014	14980000			
2015	17813900			
2016	18692374			
2017	18692374			
2018	20705598			
2019	17331494			
2020	18030988			
2021	17475465	17475465	17475465,00	17475465,00
2022		17879421	14582592,48	21176249,16
2023		18077403	13954388,74	22200417,48
2024		18275385	13464381,97	23086388,85
2025		18473368	13059624,20	23887111,20
2026		18671350	12714180,96	24628519,03

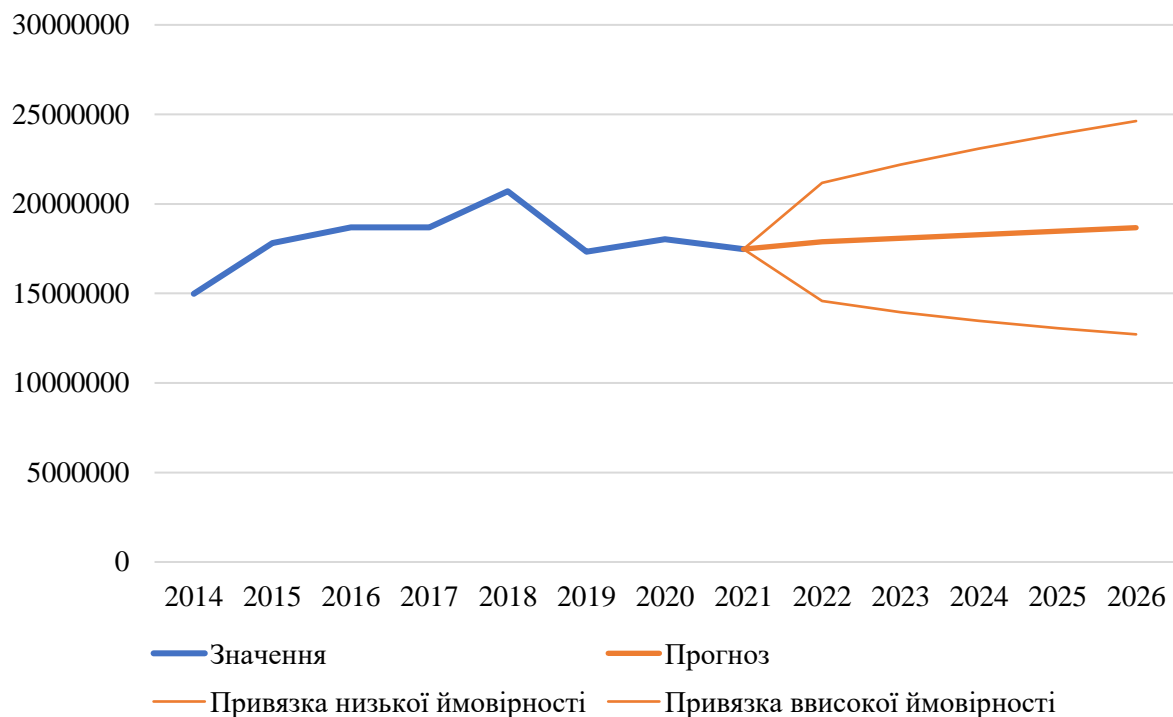


Рисунок 2.9 – Значення показників прогнозу рівнів споживання електроенергії зовнішнім освітленням міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.)

Відзначаємо зростання показників прогнозу, тому логічним є визначити порівняння прогнозних значень при вихідній інформації – 2014-2021 та 2014-2023 рр. (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Порівняння значень прогнозу рівнів споживання електроенергії зовнішнім освітленням міста Кривого Рогу (Дніпропетровська обл.) у періоди 2014-2021 та 2014-2023 рр.

Період \ Прогноз	2014-2021	2014-2023	Δ (різниця)
2024	18275385	6777469,1	11497916,33
2025	18473368	5920248,2	12553119,54
2026	18671350	5063027,2	13608322,76

Нескладно відзначити, що вклад у формування тренду дають саме 2022 та 2023 рр., на що вказує різниця у значеннях відповідних показників прогнозу. Між тим, повертаючись до попередніх висновків, зазначимо, що показники 2022 та 2023 років, як у майбутньому 2024 році не є типовими, оскільки режим функціонування комплексів, що аналізуються, був далеким від усталеного по роках до цих періодів. «Виною» в цьому зменшенні є введення комендантських годин, у періоди котрих системи вуличного освітлення не функціонували, та виведення з ладу значних ділянок даних комплексів через причину пошкоджень їх у результаті відповідних дій країни-агресора. Також слід відзначити, що прогноз – це ймовірності показники, значення яких можуть змінюватися в залежності від релевантної інформації.

Проте, навіть у такій обмеженій інформації (рис. 2.9), вочевидь, є факт, що при незмінності протяжності ЛЕП, електричних потужностей та інших параметрів освітлювальних мереж у місті, що аналізується, (Додаток 3) рівні споживання ЕЕ комплексами ЗО мають тенденцію до коливань, котру можна характеризувати як стохастичність.

Так, різниця між рівнями споживання ЕЕ комплексами ЗО міста в 2019 році, у порівнянні з 2018-м, склала (-) 17,3%, а в 2020 до 2019 – біля (+) 4%, а в 2021 до 2020 – біля (-) 3%.

Такі коливання, навіть у незначних рівнях, приводять у невідповідність план-факт виділення коштів місцевих бюджетів за сплату спожитої на вуличне освітлення ЕЕ.

### **2.3 Формация завдань з модернізації електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення з керованістю процесу їх енергоефективності**

Згідно з ПУЕ, «у містах та населених пунктах, на промислових підприємствах необхідно передбачити централізоване керування зовнішнім освітленням».

У відповідності до [93], керування ЗО міст слід здійснювати від одного центрального диспетчерського пункту, але у великих містах із перешкодами рельєфу місцевості можливо передбачати районні диспетчерські пункти. У свою чергу, системи керування ЗО повинні забезпечувати його вимкнення протягом не більше як 3 хв. [93].

Тобто, вочевидь, що формат завдань для пошуку та розробки нових, сучасно спрямованих у досягненні ефективності систем ЗО населених пунктів, логічно, повинен інтегруватись у базові нормативи відповідних критеріїв-вимог до цих електротехнічних комплексів, котрі в основі своїй виглядають як [3, 4]:

- достатнє, згідно нормативних документів, і рівномірне освітлення поверхонь покриттів вулиць та площ населених пунктів;
- відсутність затінення світла при русі об'єктів по робочій поверхні вулиць та площ;
- захист від засліплення джерелом світла пішоходів та водіїв транспортних засобів;
- вибір ефективних напрямків розповсюдження штучного освітлення від освітлювальних джерел.

Реалізація цих вимог у практиці розробки та розбудови в структурі ЗО



сприяє підвищенню рівня ефективності використання штучних джерел світла при їх застосуванні у складі електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення населених пунктів і підвищує рівень енергоефективності освітлювальних комплексів у цілому.

До основних факторів, що мають вагомий вплив на структуру логістики проєктування та процес модернізації електротехнічних комплексів ЗО міст та населених пунктів, можна віднести [4, 8, 13, 22, 36]:

- середньостатистичну інтенсивність руху пішоходів і транспортних засобів;
- категорію дороги;
- кількість смуг руху;
- наявність підземного чи надземного переходів;
- особливості розбудови пішохідної доріжки;
- наявність велосипедної доріжки;
- наявність офіційно дозволених і визначених паркувальних місць;
- коефіцієнт забудови досліджуваного кварталу;
- наявність об'єктів соціальної, адміністративної чи торговельно-розважальної сфери;
- вид і стан покриття дороги та пішохідної доріжки;
- відстань від опори світильників до краю проїжджої частини і т.ін.

Функціонально залежність системи управління ЗО є залежність потужності освітлювальної установки від природної освітленості  $P=f(E)$  (вечір, ніч). Для отримання цієї залежності необхідно визначити залежність освітленості, що створюється на дорожньому покритті освітлювальною установкою від потужності  $E_{\text{осв}}=f(P)$ . Освітленість на дорожньому покритті можна визначити як суму рівня освітленості, створюваної безпосередньо освітлювальною установкою і природною освітленістю  $E_{\text{д.п.}}=E_{\text{осв}}+E$ . Для знаходження кожного з доданків цієї суми необхідно знати силу світла джерела освітлення і кут падіння його променів на розрахункову площину. Між тим, для штучного джерела освітлення ці параметри можуть бути розраховані, а

для природньої освітленості вони залежатимуть від багатьох випадкових факторів, що мають стохастичний характер [4].

Далі, визначивши рівень освітленості на дорожньому покритті рівним, нормуючи і приймаючи природне освітлення за незалежну змінну, можна знайти залежність  $P=f(E)$ .

У зв'язку з цим формалізацію узагальненого завдання по знаходженню залежності  $P=f(E)$  в аналітичному вигляді виразити складно, враховуючи нелінійність і залежність від ряду випадкових факторів, котрі, в свою чергу, роблять різницю в залежності від конкретних умов експлуатації комплексів ЗО, що ускладнює розробку формату бажаної керованості цим процесом для досягнення очікуваних меж ефективності взагалі та енергоефективності, зокрема.

Для визначення конкретики в стартових позиціях для розбудови логістики керування процесами ЗО необхідним моментом є звернення та оцінювання реальних параметрів функціонування даних комплексів. Для цього доцільно провести тестовий варіант аналізу на прикладі діючої структури ЗО.

## **2.4 Варіативність підходу до процесу реструктуризації електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення міст та населених пунктів**

Зважаючи на традиційність підходів до здійснення систем електропостачання взагалі, а для мереж зовнішнього освітлення міст та населених пунктів, зокрема, донедавна, як правило, їх модернізація здійснювалася і здійснюється виключно шляхом заміни застарілого перетворюючого, комутуючого та захисного обладнання на більш сучасне. На жаль, як правило, це робилось недостатньо системно, а, скоріше, апріорно, методами вкраплення. Водночас зміні не підлягав сам принцип організації роботи електро-

енергосистемами. Це є фактом того, що зовнішнім освітленням міст та населених пунктів як функціонування СЕП електричних мереж зі значною специфікою їх функціонування по відношенню до загальнопроменевих, являють собою зразки малоефективних і таких, що не демонструють свою відповідність до сучасних вимог.

На відміну від існуючих варіантів СЕП ЗО, слід зазначити стрімкі темпи розвитку і застосувань на практиці сучасного підходу до реалізації систем електропостачання, який отримав назву «розумні мережі» («smart grids») [39, 40, 66]. Цей варіант розглядається державними агенціями провідних країн світу, що регулюють питання у сфері енергетики, як основний етап розвитку енергосистем промислового та цивільного призначення на період до 2050 року.

Разом з тим, аналіз публікацій, нормативної документації та прикладів реалізації «розумних» електроенергосистем дозволив визначити, що, наразі, єдина концепція їх побудови відсутня. Зауважимо, що також чітко не сформульовано визначення терміну «розумні мережі». Кожне бачення цього поняття інтерпретує його по-різному [102].

У зв'язку з цим фактом, як варіант авторського бачення цього тлумачення у відповідності з метою дослідження, і, базуючись на відомих тлумаченнях формату суті визначення поняття «розумних» електричних мереж, система зовнішнього освітлення, в сучасному варіанті, повинна виконувати наступні функції:

- автоматично ввімкнення або вимкнення світлових пристроїв за командою СУЗО, згідно алгоритму відповідних управлінських дій;
- відключення відповідних груп освітлювальних пристроїв за розкладом чи відповідно до команди від СУЗО;
- моніторинг та передача відповідної інформації про стан обладнання шаф керування через модем GSM;

- автоматична передача інформації СУЗО щодо підвищення температури або появи ознак диму у шафах керування при спрацюванні датчиків диму або температури;

- передавання інформації про спроби проникнення у шафи керування та інформування щодо місцезнаходження шафи та часу проведення спроб проникнення;

- можливість розширення функціональних можливостей шаф для інших завдань при використанні вільних входів контролера;

- дистанційне налаштування відповідних параметрів шафи із СУЗО до шафи за каналом GSM.

У вищенаведеному форматі пропонованого варіанта структури ЗО, вочевидь, є ряд переваг у порівнянні зі звичайною системою освітлення, а саме:

- додаткова економія електроенергії за рахунок установки датчиків присутності людей і датчиків зовнішньої освітленості;

- адаптація рівня освітленості і температури кольору відповідно до проєктних особливостей користувачів, на кшталт створення екологічно комфортного для людини освітленого середовища;

- наявність автоматики, яка забезпечує комфортне застосування системи;

- функціональні параметри діагностики, для спрощення обслуговування;

- підтримка постійної величини світлового потоку світильників протягом терміну служби світлового пристрою.

Інтелектуальні функціональні можливості систем освітлення мають можливість реалізації у контексті децентралізованих або централізованих системах керування. При впровадженні у системах централізованого керування використовуються дротові або бездротові мережі зв'язку.

Основні функції датчиків у системах освітлення такі:

- виявлення присутності людей;

- вимір рівня зовнішньої освітленості.

## **2.5 Комунікація процесу керування та аналіз варіантів структур автоматизованих систем керування електротехнічними комплексами зовнішнього освітлення**

У розробці будь-яких варіантів та їх технологічної спрямованості в структурах АСК, важливим моментом кінцевого рівня ефективності функціонування даних систем виступає вид комунікації між центром керування та приймачем, тобто канал передачі керуючих сигналів.

При цьому, як би тривіально не виглядала фраза: «Для виконання будь-якої дії необхідні, щонайменше, два пристрої: передавач і приймач сигналу», за нею стоїть вельми непростий процес її практичної реалізації. Важливим і системоутворюючим моментом у цій складності є те, що один із вищезгаданих пристроїв, або одразу обидва, можуть працювати і як приймач, і як передавач сигналів керування. Для суттєвого знання рівня складності в цій проблемі існує такий захід, як РЧ-технології [102]. Та, незважаючи на те, що початком для застосування цих технологій можна вважати момент винаходу радіо, але застосування таких варіантів для передачі управляючих команд при автоматизації установок ЗО стало можливим лише нещодавно.

Когорта знаних наукових фахівців у спрямуванні, що аналізується, сходиться у міркуваннях щодо необхідності адаптивності до змін, які проходять при розбудові АСК у багатьох галузях промисловості, але в індустрії засобів управління ЗО поки що мало реалізується це застосування для транспортування керуючих сигналів. Однак, навіть тестові впровадження АСК з даними видами комунікації в умовах систем ЗО справляють вражаючий ефект, перш за все, з економічної точки зору, а також і за функціоналом у загальному баченні процесу керуваності даним об'єктом [103-106].

При цьому зрозуміло, що функції АСК можуть змінюватися, проте інформація, що передається, буде постійно містити такі значення, як освітленість, наявність та інтенсивність руху на проїжджій і пішохідній частині вулиці, вологість повітря, температура та інші параметри як природ-

нього, так і штучного походження. При цьому звичайна система УЗО може бути масштабована та розширена додатковими датчиками, і з цього випливає, що в системі з'являються додаткові можливості для розширення меж керованості [107].

Існуюча концепція бездротового керування системою ЗО є оптимальною для багатьох сфер, де використовуються АСК. Але вона поки що не є «стимулом» щодо широкого використання і поширення цієї технології серед фахівців, котрі встановлюють вимоги для відповідних інженерних рішень АСК ЗО. Для стимулювання впровадження бездротових пристроїв можливо використовувати економічні переваги і можливість «тонкого» налаштування рівня керованості, що є необхідним критерієм для систем ЗО міст та населених пунктів не тільки у відповідності до технічних норм, а й з урахуванням загальноміських потреб.

І те, що, оскільки проєкт такої системи має потенційно високий рівень функціональності в процесі керування ЗО, то застосування центрального сервера, що є складовою даної структури керування, призведе до зменшення споживання електроенергії на 40% і дозволить зменшити експлуатаційні витрати на 30% [107]. При цьому слід враховувати, що виникнення несправностей при цій системі, прогнозується визначатись і розпізнаватись миттєво, що приведе до скорочення часу в напрацюванні світильників на 75% [107].

Оцінювання результатів впровадження бездротових систем управління ЗО відкриває можливість економії електроенергії на освітлення міста до 40% від існуючого начасі [104].

Для реалізації алгоритму структурування та функціонування АСК ЗО необхідним моментом повинно бути витримання регламентованих показників рівнів освітленості, згідно з якими при нормованій яскравості більше  $0,8 \text{ кд/м}^2$ , або середній нормованій освітленості більше 15 лк у нічний час, допускається зниження рівня вуличного освітлення [69-73]:

- на 20% при зменшенні інтенсивності транспортного руху до  $\frac{1}{2}$  максимальної величини ( $k_{\max}$ );
- на 30% при зменшенні інтенсивності транспортного руху до  $\frac{1}{3}$  максимальної величини ( $k_{\max}$ );
- на 40% при зменшенні інтенсивності транспортного руху до  $\frac{1}{4}$  максимальної величини ( $k_{\max}$ );
- на 50% при зменшенні інтенсивності транспортного руху до  $\frac{1}{5}$  максимальної величини ( $k_{\max}$ ).

Тобто, для категорії доріг класу А і Б та підкласу В1 можливе регулювання світлового потоку від вуличних світильників із лампами, в яких можливе регулювання світлового потоку у функції величини сили струму, що проходить через них.

Так як інтенсивність руху транспорту не є величиною сталою, а залежність як категорії (класу) дороги, так і від пори року, і часу доби, від стану дорожнього покриття та його освітлення і погодних умов, тому є можливість регулювання ЗО дороги в залежності від вище перелічених факторів, враховуючи періодичну зовнішню світимість у різних інтервалах часу.

Логістика керування – регулювання ЗО здійснюється шляхом регулювання світлового потоку світильників, а джерелами світлового потоку є лампи, якими вони укомплектовані. Проте, не всі існуючі типи ламп придатні до регулювання плавної зміни світлового потоку (Додаток Е) .

Так, газорозрядні лампи при зменшенні сили струму на 15% негативно впливають на стабільність горіння газового розряду, що стає причиною мерехтіння і зменшення терміну служби лампи у результаті прискорення виходу з ладу електродів [8, 11, 13, 36, 65, 69].

У світлодіодних світильників джерелом світла є світлодіоди, які мають високу світловіддачу і великий термін служби, а також мають можливість глибокого регулювання світлового потоку від 10% до 100%, і досить легкий спосіб його реалізації, шляхом зміни сили струму, який проходить через світлодіоди [70].

У світлодіодів світильників, з метою регулювання світлового потоку, використовують електронні імпульсні джерела живлення, за допомогою яких можна регулювати не тільки величиною світлового потоку світильників шляхом зміни сили струму, який буде проходити через світлодіоди, а в залежності від складності ЕІДЖ може мати деякі інтелектуальні властивості, в результаті наявності мікропроцесора чи мікроконтролера, що забезпечує виконання самодіагностики системи, моніторингу стану світлодіодів і стану електричної мережі живлення, визначати проміжки робочого часу вмикання системи освітлення, згідно попередньо заданого розкладу (графіка інтенсивності світлового потоку та робочих інтервалів часу доби протягом певного періоду).

При наявності каналу зв'язку між мережею світильників, укомплектованих ЕІДЖ, та диспетчерською службою, існує можливість передачі інформації про стан функціонування ЕІДЖ та працездатності світильників з метою виявлення відхилень у роботі ЕІДЖ та світильників, які потребують заміни.

Отже, вид обладнання системи управління ЗО має ряд додаткових переваг, з точки зору економії, а саме: 1) зменшення експлуатаційних витрат і виявлення світильника, який вийшов із ладу; 2) зменшення грошових витрат на заміну світильника або його ремонт; 3) своєчасне виявлення відхилення в роботі ЕІДЖ та його заміни; 4) своєчасне виявлення місця і причину виникнення несправності (відхилення в роботі) світильників.

Централізоване дистанційне управління ЗО (рис. 2.10) міських доріг являє собою комплекс взаємопов'язаних в одну систему наступних складових: 1) диспетчерський пункт; 2) сервер; 3) підстанція; 4) мережа світильників, укомплектованих ЕІДЖ і фотодіодами; 5) канал управління світильників; 6) пристрій управління світильниками.



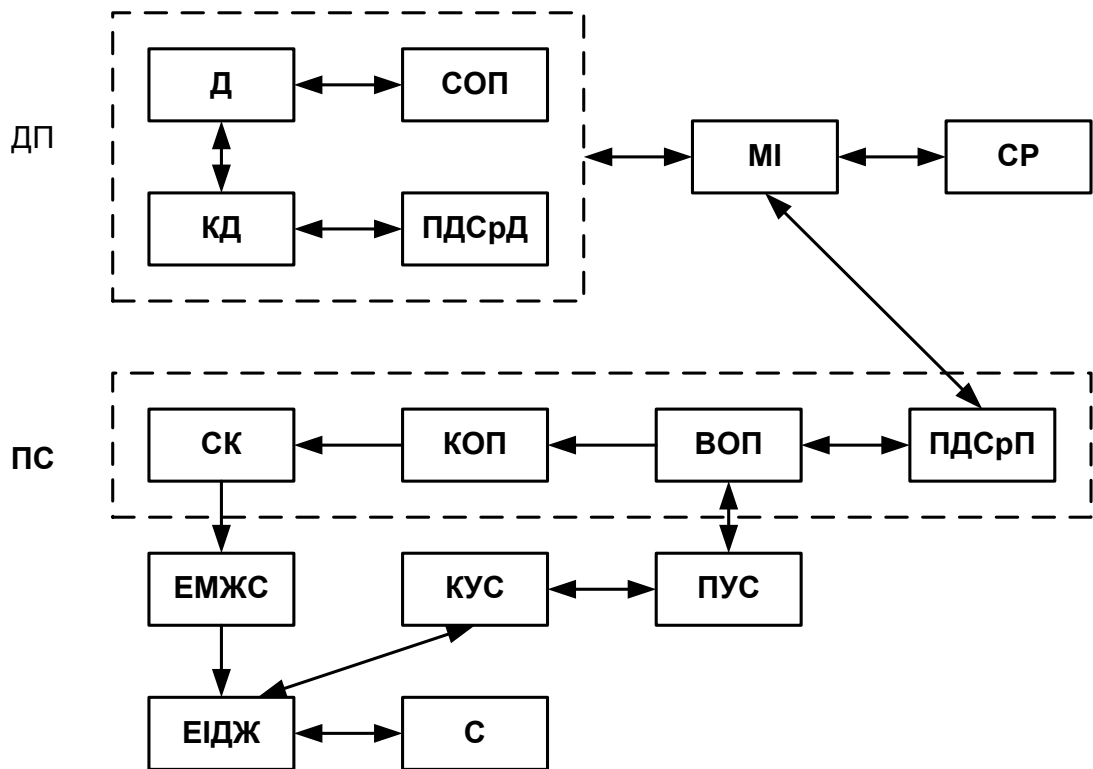


Рисунок 2.10 – Структурна схема функціонування централізованого диспетчерського управління мережею світильників зовнішнього освітлення з централізованим дистанційним керуванням:

ДП – диспетчерський пункт; ПС – підстанція; СР – сервер; МІ – Інтернет; ЕМЖС – електромережа живлення світильників; ККС – канал керування світильниками; Д – диспетчер; КД – комп’ютер диспетчера; ПДСрД – пристрій доступу до сервера із диспетчерського пункту; ПДСрП – пристрій доступу до сервера із підстанції; ВОП – виконавче обладнання підстанції; КОП – комутаційне обладнання підстанції; СК – силові контакти; ПКС – пристрій керування світильниками; ЕІДЖ – електронно-імпульсне джерело живлення світильників; С – світильники

Мережа Інтернет – це засіб зв’язку, котрий є сучасним комунікаційним видом керування ЗО між комп’ютером диспетчера і сервером через пристрої доступу до сервера і мережу Інтернет, а потім через сервер і мережу Інтернет та пристрої доступу до сервера підстанції і до виконавчого та комутаційного обладнання підстанції та РМДУ [9, 10, 25, 33, 35].

Одержавши інформацію від серверу, яку передано з комп'ютера, виконавче обладнання підстанції провокує на відповідні дії силові контакти комутаційного обладнання, забезпечуючи подачу або відключення напруги електромережі живлення світильників на блок чи лінію освітлення і світильники, які підключені до даної підстанції [81].

З метою регулювання світлового потоку світильників, підстанція повинна бути обладнана пристроєм управління світильниками, які підключені до даної підстанції. Виконавче обладнання підстанції «обмінюється» інформацією, одержаною від сервера із управляючим пристроєм світильника. Програмне забезпечення комп'ютера диспетчера повинне забезпечувати управління як окремими світильниками, так і групами світильників.

У відповідності до заданого графіка зміни рівня зовнішнього освітлення, програмне забезпечення КД надсилає команду про зміну рівня світлового потоку на конкретних світильниках. ВОП передає вхідну інформацію (команду) на ПКС, який разом із підключеним до нього каналом управління світильниками формує локальну мережу управління освітленням. Аналізуючи одержану команду, ПКС визначає, які світильники з усієї мережі управління повинні змінити величину світлового потоку, і посилає управляючий сигнал для даних світильників по каналу управління. Канал управління світильниками може бути різним за способом його реалізації:

- 1) як окремий кабель із провідниками управління;
- 2) безпроводний ККС із використанням радіоканалу;
- 3) ККС із використанням уже існуючих ліній електроживлення, підведених до світильників.

Принципова схема ЦДК ЗО передбачає дистанційне управління електроживленням світильників шляхом

$$\text{КД} \leftrightarrow \text{СР} \leftrightarrow \text{ВОП} \leftrightarrow \text{КОП} \leftrightarrow \text{СК} \leftrightarrow \text{ЕМЖС} \leftrightarrow \text{ЕІДЖ} \leftrightarrow \text{С},$$

а також дистанційне управління світловим потоком світильників шляхом:  $\text{КД} \leftrightarrow \text{СР} \leftrightarrow \text{ВОП} \leftrightarrow \text{ПКС} \leftrightarrow \text{ККС} \leftrightarrow \text{ЕІДЖ} \leftrightarrow \text{С}$ . Зв'язок ДП із ПС та СР здійснюється через мережу Інтернет, маючи двосторонній зв'язок. А через ЕМЖС і

ККС здійснюється електроживлення світильників і управління рівнем світлового потоку світильників через ЕІДЖ, яке забезпечує зворотній зв'язок через  $\text{ККС} \leftrightarrow \text{ПКС} \leftrightarrow \text{ВОП}$  із СР і ДП через МІ, що забезпечує передачу на ДП всієї інформації про стан функціонування ЕІДЖ і роботоздатність світильників, що знижує рівень експлуатаційних витрат і ремонт у локальній мережі управління освітленням. У той же час виконавче обладнання підстанції аналізує інформацію, одержану від СР, та має можливість обмінюватися інформацією із ПКС, котрий через канал управління світильниками передає відповідну команду на ЕІДЖ, яке відповідним чином управляє рівнем світлового потоку, окремими світильниками, та передає одержану інформацію від мережі світильників через  $\text{ККС} \leftrightarrow \text{ПКС} \leftrightarrow \text{ВОП} \leftrightarrow \text{СР} \leftrightarrow \text{КД}$ , через МІ диспетчеру.

Якщо ПКС на АПКС, котрий містить енергонезалежний годинник реального часу і можливість завжди визначати дату і час доби, із можливістю зміни рівня світлового потоку кожної доби протягом календарного року, у відповідності до завчасно поданого графіка управління світильниками, із визначенням конкретного світильника з рівнем зміни світлового періоду доби. Тоді АПКС визначає команди управління рівнем зовнішнього освітлення, які передаються по каналу управління світильників через ЕІДЖ до конкретного світильника у визначений час доби, відповідної року.

Даний пристрій АПКС функціонує незалежно від виконавчого обладнання підстанції і здійснює управління світильниками по ККС, який може бути реалізований різними способами. При наявності АПКС відсутня необхідність удосконалення диспетчерського пункту і сервера, що являють собою комплекс із досить нескладною організацією локальної мережі управління ЗО.

Якщо АПКС надати додаткові функції щодо управління комутаційним обладнанням електромережі світильників із календарним графіком управління через комутаційне обладнання підстанції, тоді можливе функціонування локальної мережі управління зовнішнім освітленням без наявності

диспетчерського пункту і сервера, а також зникає необхідність зв'язку ДП, СР, ПС через ІМ. А, отже, за даних умов управління освітленням стає фактично централізованим, а структурна схема передбачає значне зменшення матеріальних і грошових витрат на облаштування ЛМУО, так і на її обслуговування та експлуатацію.

У той же час, децентралізована система управління зовнішнім освітленням має ряд недоліків, а саме:

- при внесенні змін у графік управління освітленням світильників, з метою внесення змін у програму АПКС, виникає необхідність у наявності спеціаліста з обслуговування АПКС та внесення змін у програму на підстанції;

- відсутній зворотній зв'язок про стан функціонування ЛМКО;

- відсутня можливість управління освітленням на даний момент часу без виїзду спеціаліста на підстанцію;

- конструктивна складність і збільшення вартості АПКС.

Децентралізована система управління ЗО передбачає (рис. 2.11) відсутність диспетчерського пункту, сервера, пристроїв доступу до сервера, а також мережі Інтернет як засобу зв'язку, виконавчого обладнання підстанції та заміну ПКС на АПКС, також наявність обслуговуючого персоналу, який буде обслуговувати обладнання підстанції АПКС, КОП і СК, в результаті відсутності зворотнього зв'язку від АПКС до ОП, тобто обслуговування ПС здійснюється безпосередньо спеціалістами з обслуговування та програмування.

Канал управління світильниками є дорогим обладнанням і при виході з ладу зникає можливість управління рівнем світлового потоку від світильників.

А при виході з ладу АПКС, або ж при збоях у роботі, можливе повторне відключення керування електроживленням світильників та управління світловим потоком від світильників.

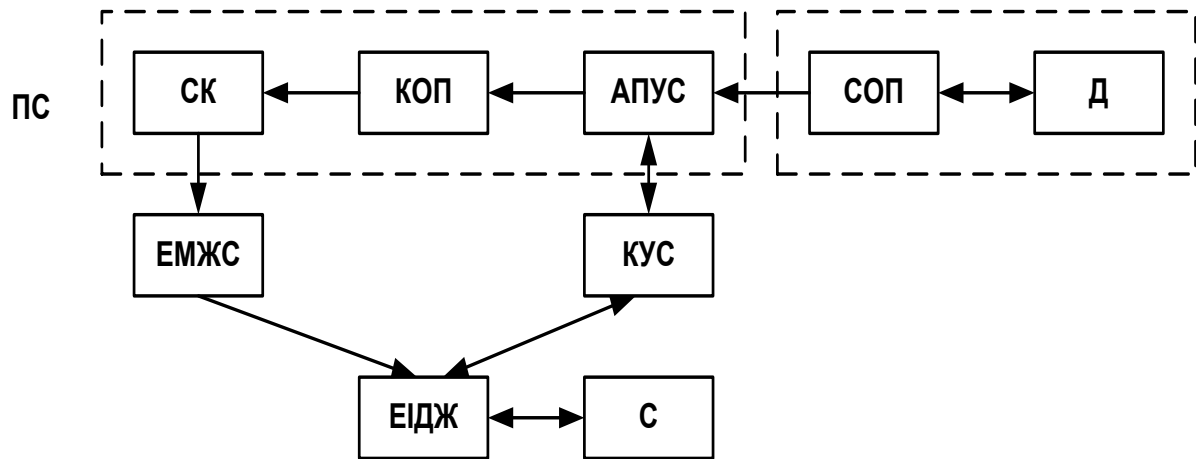


Рисунок 2.11 – Принципова схема децентралізованого керування зовнішнім освітленням на міських автомагістралях і в громадських місцях:

Д – диспетчер, СОП – спеціаліст з обслуговування та програмування, ПК – підстанція, АПКС – автоматичний пристрій керування світильниками, КОП – комутаційне обладнання підстанції, СК – силові контакти, ЕМЖС – електромережа живлення світильників, ККС – канал керування світильників, ЕІДЖ – електронно-імпульсне джерело живлення, С – світильники

Зворотній зв'язок між АПКС підстанції та підрозділом ОП можна встановити шляхом облаштування АПКС і підрозділ ОП радіозв'язком, що, в свою чергу, значно вплине на вартість системи управління обладнанням.

Реально можливими можуть бути й інші варіанти організації системи управління зовнішнім освітленням доріг з інтенсивним рухом транспорту [33, 43-46].

Принципова схема змішаного управління світильниками передбачає централізоване управління електроживленням світильників і автономне управління рівнем світлового потоку від світильників, відповідно до реальних погодних умов, рівня забрудненості атмосфери, загального рівня освітленості, поверхні дороги та її фізичного стану, інтенсивності руху транспорту, часу доби.

Принципова схема змішаного управління зовнішнім освітленням доріг з інтенсивним рухом автотранспорту передбачає функціонування управління світловим потоком від світильників, які додатково укомплектовані пристроями керування світильниками, шляхом інтеграції ПКС в ЕІДЖ або ж окремо вмонтовано у світильник, а тому в подальшому будемо його називати як індивідуальний пристрій керування світильниками. ПКС функціонує в автономному та автоматичному режимах, у відповідності із завчасно поданим графіком управління світловим потоком і в залежності від конкретних зовнішніх умов навколишнього середовища у конкретній локації розташування світильника, або групи світильників, якими ПКС управляє.

За даних умов, коли ПКС знаходиться безпосередньо на світильнику і функціонує згідно введеної у нього програми і графіка, тобто працює в автоматичному режимі, незалежно від диспетчера, тоді на підстанції буде відсутня ПКС, а в схемі управління відсутній канал управління світильниками. ПКС функціонує незалежно від диспетчера і підстанції та виконавчого обладнання.

Переваги змішаного управління зовнішнім освітленням доріг над централізованим у тому, що воно забезпечує гарантоване функціонування кожного окремо взятого світильника або групи світильників, у відповідності із заданим графіком і конкретними локальними умовами навколишнього середовища. В той же час, значне збільшення вартості ЕІДЖ і світильника в цілому, є суттєвим недоліком змішаної системи управління зовнішнім освітленням.

ЗмСКЗО має такі недоліки:

- відсутність зворотного зв'язку з диспетчером;
- необхідність наявності обслуговуючого персоналу для контролю, обслуговування, ремонту світильників;
- відсутність можливості управління зовнішнім освітленням у конкретних умовах.

У той же час, як значна перевага ЗмСКЗО (рис. 2.12) перед ЦДКЗО і ДЦКЗО, є відсутність каналу управління світильниками, який передбачає виконання значних обсягів робіт під час монтажу, при ремонті та обслуговуванні, великі обсяги грошових витрат.

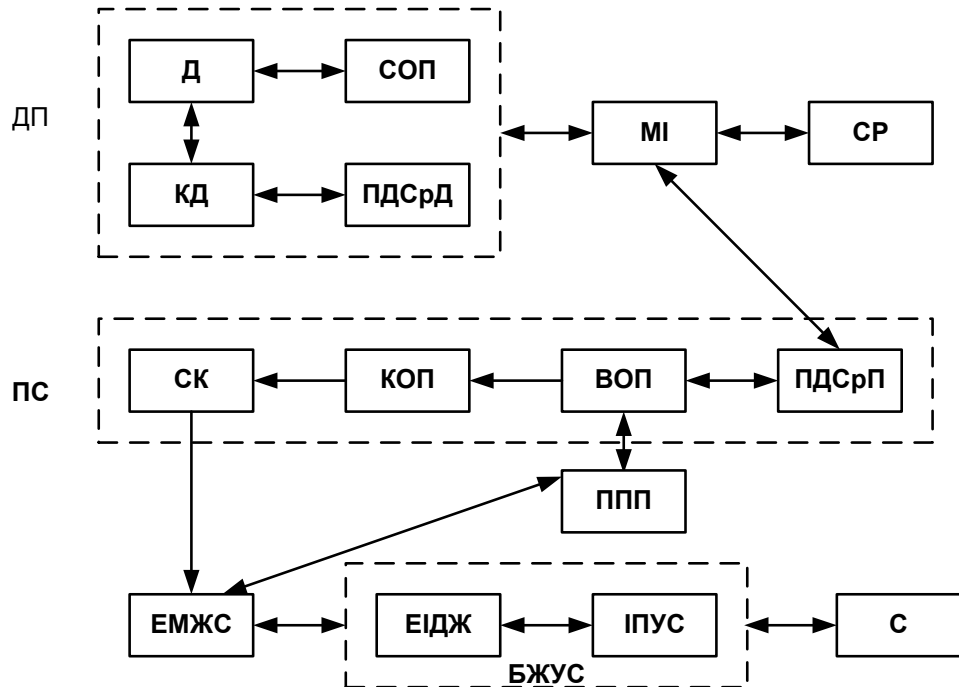


Рисунок 2.12 – Принципова схема функціонування змішаної системи керування зовнішнім освітленням: ДП – диспетчерський пункт, Д – диспетчер, КД – комп'ютер диспетчера, ПДСрП – пристрій доступу до сервера підстанції, ВОП – виконавче обладнання підстанції, СОП – спеціаліст з обслуговування та програмування, ПС – підстанція, ПКС – електронне джерело живлення з інтегрованим у нього індивідуальним пристроєм керування світильниками, КОП – комутаційне обладнання підстанції, СР – сервер, МІ – мережа Інтернет, СК – силові контакти, ЕМЖС – електромережа живлення світильників, ЕІДЖ – електронно-імпульсне джерело живлення, С – світильники, ППП – приймально-передавальний пристрій

Зменшення грошових витрат на ЗмСКЗО можливе за умови, якщо один ПКС обслуговує групу світильників, що знаходяться практично в одних умовах.

ЗмСКЗО забезпечує функціонування каналу електрозабезпечення та регулювання рівня світлового потоку від світильників без каналу управління світильниками, який можливо замінити іншими способами, без прокладання каналів управління, таких як радіозв'язок, шляхом встановлення приймально-передавальних пристроїв на підстанції та в індивідуальних пристроях управління світильниками, встановлення зв'язку по ЕМЖС, шляхом використання дротової лінії.

Тобто, приймально-передавальний пристрій інтегрований у виконавче обладнання підстанції і у груповий пристрій управління світильниками у блоці живлення та керування режимами їх роботи забезпечує зворотній зв'язок від ГПКС до ВОП через електричну мережу живлення світильників, із наступним виходом на сервер і комп'ютер диспетчера через мережу Інтернет (рис. 2.13).

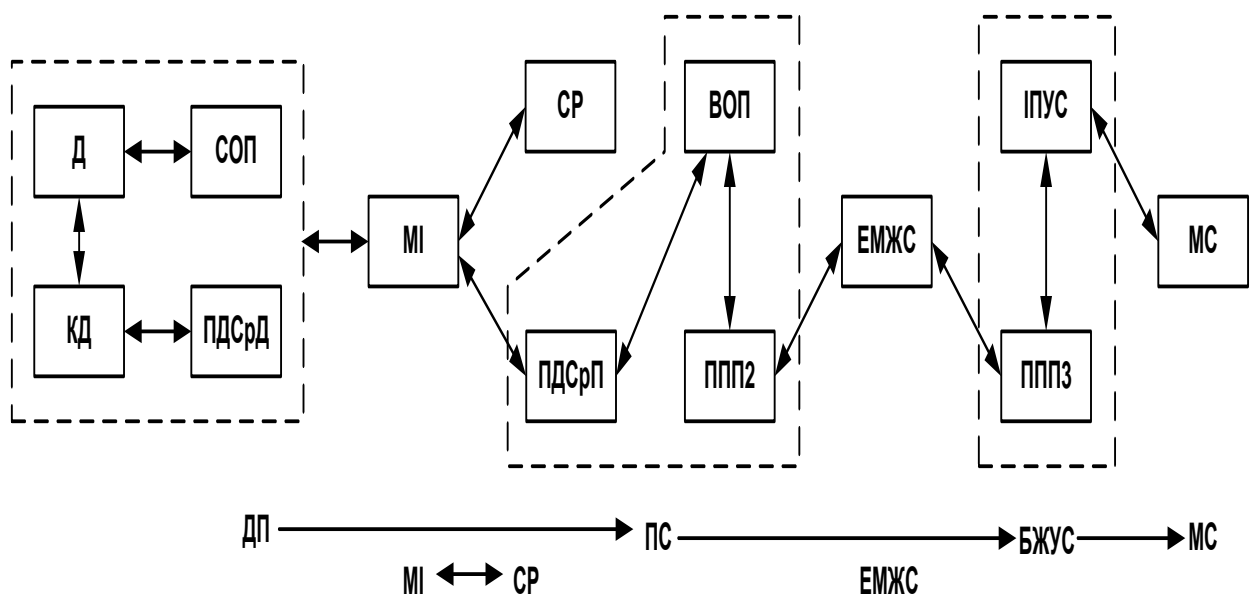


Рисунок 2.13 – Схема передачі інформації від блока живлення системи керування світильниками до комп'ютера диспетчера

Тобто, для передачі інформації від диспетчерського пункту до світильників або від світильників до диспетчерського пункту застосовується два способи передачі інформації:



1) між ДП і ПС передача інформації здійснюється через мережу Інтернет і сервер;

2) між ПС і БЖКС передача інформації здійснюється через мережу електроживлення світильників, використовуючи приймально-передавальні пристрої, інтегровані у ВОП і ЕІДЖ, або виконані у вигляді окремого пристрою, розміщеного у корпусі світильника.

Передачу інформації між підстанцією і блоком живлення та управління можна здійснити або через ЕМЖС, шляхом частотних перетворень у ППП, або по радіоканалу від ВОП до ЕІДЖ із виходом на ПКС (рис. 2.14).

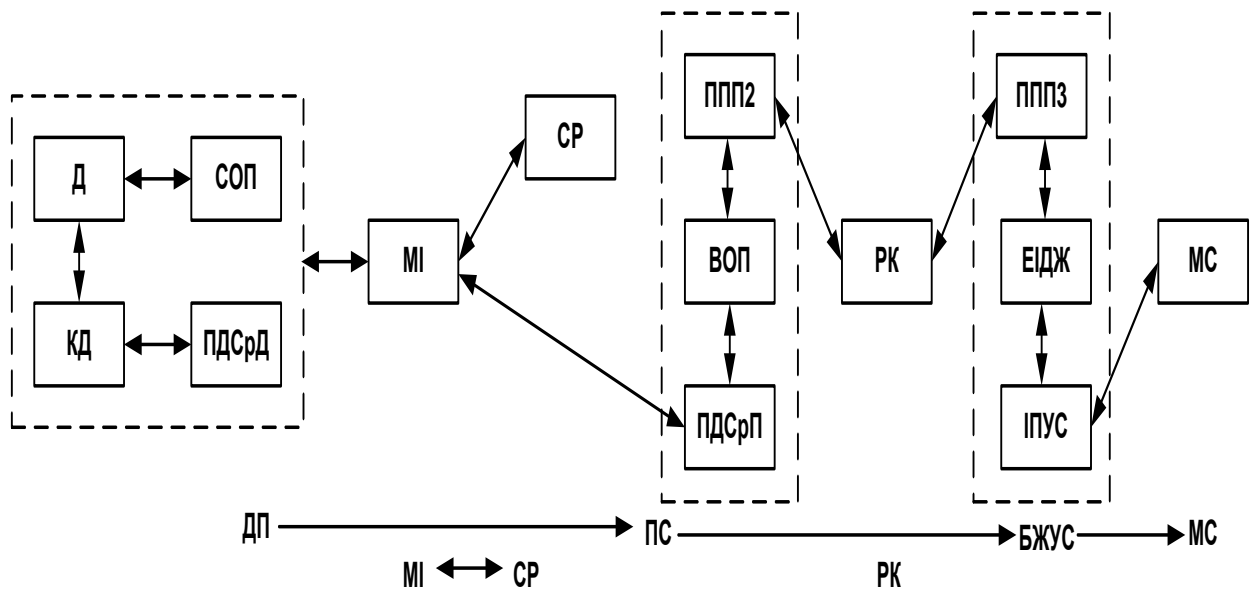


Рисунок 2.14 – Схема передачі управляючих сигналів від підстанції (пунктів живлення) до світильників по радіоканалу

Якщо ЕІДЖ додатково обладнаний мікроконтролером і системою контролю за навколишнім середовищем, тобто за станом забруднення атмосфери, температури, тиску, вологості повітря, освітлення дороги, інтенсивності руху транспорту в нічний час, тоді можливе ефективне управління БЖКС світловим потоком від світлодіодних світильників, забезпечивши мінімальне споживання електроенергії, тобто максимальний рівень економії

грошових витрат за освітлення доріг у нічний час та ефективне споживання електричної енергії освітлювальними установками.

Звичайно, додаткове обладнання системи управління зовнішнім освітленням передбачає додаткові матеріальні та фінансові витрати, які повинні бути доцільними й економічно ефективними на даний час.

## **2.6 До процесу інтеграції засобів акумулювання електричної енергії у варіанти синергетичних структур систем електропостачання зовнішнім освітленням**

Як зазначалось у матеріалах досліджень попередніх розділів, у реаліях сьогодення, найбільш ефективним спрямуванням у розбудові комплексів ЗО вулиць та площ населених пунктів є застосування синергетичних видів структур СЕП з облаштуванням їх як автономними генеруючими джерелами, так і накопичувачами ЕЕ.

У період ряду наукових досліджень [26, 108-115] наведено ряд цікавих проєктів застосування накопичувачів ЕЕ в структурах СЕП ЗО.

Однак, надання єдиних за форматом застосування уніфікованих рекомендацій щодо тих чи інших конкретних видів джерел генерації та накопичувачів ЕЕ не є логічним і доцільним твердженням щодо місць локації цих засобів на мапі СЕП джерел ЗО в конкретних блоках їх формації. Обидва вищенаведені критерії повинні визначатись конкретною структурою схеми СЕП, ландшафтом місцевості, екологічними вимогами і т.ін.

Безперечно в цьому одне, що схеми СЕП зовнішньої освітлювальної мережі – складова загальної електроенергоструктури конкретного населеного пункту і вона повинна логічно формуватись у цю структуру, наповнюючи та доповнюючи її з особливостями дотримання нормативної конкретики структурування.

При цьому зазначимо, що вибір та оцінювання ефективності застосування тих чи інших структур СЕП ЗО являє собою завдання наукового рівня пошуку, а от вибір заходів генерації та накопичення ЕЕ в обґрунтованих схемах електропостачання, це вже, скоріше, завдання інженерне.

До основних, із плеяди відомих та реально досяжних видів відновлювальних джерел ЕЕ, котрі можуть бути використані в системах ЗО населених пунктів, відноситься енергія сонця та вітру. Тобто, це провокує варіативність розбудови відповідних СЕП із включенням до їх структури автономних міні-електростанцій, тобто систем електропостачання з розподіленою генерацією ЕЕ (рис. 2.15).

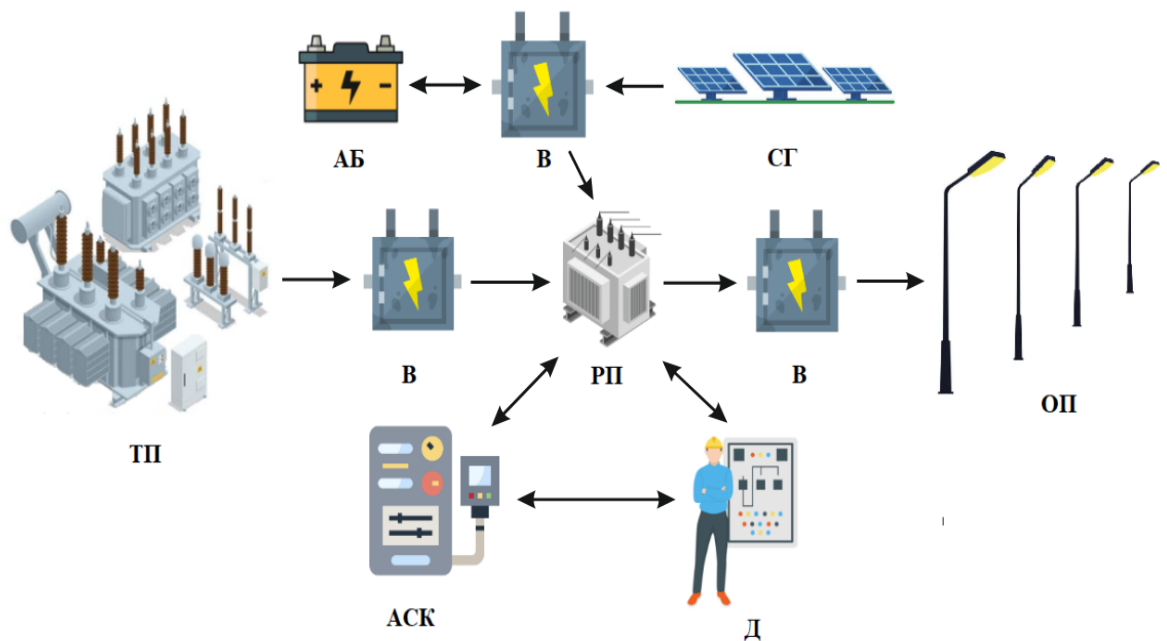


Рисунок 2.15 – Спрощена структура варіанта керування зовнішнім освітленням: ТП – трансформаторна підстанція; РП – розподільчий пункт; СГ – сонячна мікро-електростанція; АБ – акумуляторна батарея; В – вимикачі; АСК – автоматизована система керування; Д – диспетчер; ОП – освітлювальні пристрої

Однією з особливостей роботи таких міні (мікро) електростанцій у структурах СЕП ЗО є те, що використання ними відповідних енергоресурсів вступає у певну невідповідність (дисбаланс) між рівнями генерації та споживання електроенергії, що зумовлено нерівномірним характером і стохастичністю процесу накопичення ними, згідно погодних умов, необхідного обсягу ЕЕ для її подальшого споживання комплексом ЗО.

Так, наприклад, на сонячних електростанціях максимальна потужність, котра може бути вироблена протягом світлового дня, забезпечується за умови, що день був безхмарний, буде забезпечена максимальна інсоляція робочої поверхні сонячної панелі.

На вітроелектростанціях при несприятливих вітрових умовах, коли швидкість вітру знаходиться поза межами мінімального чи максимального граничного значення діапазону генерування ЕЕ та достатнього для запуску віротурбіни, електроенергія взагалі не буде і не зможе вироблятися.

Тобто, прогнозування рівнів генерації ЕЕ в таких випадках неможливо і потрібна відповідна адаптивна реакція системи на ці випадки для забезпечення достатньої працездатності та надійності роботи всієї СЕП ЗО.

Доцільним у цьому спрямуванні – для зниження коливань вихідної потужності в таких варіантах синергетичних СЕП ЗО на базі різних сонячних і вітрових міні-електростанцій доцільно додати в їх структуру накопичувачі електричної енергії. Як правило, у якості таких накопичувачів використовуються вторинні електромеханічні джерела струму, що характеризуються властивістю багаторазового перезаряду: акумулятори, конденсатори і т.ін.

Свого часу, і в значний проміжок років, велику популярність мало застосування в енергетичних системах відновлювальної енергетики свинцево-кислотних АБ [115]. Проте останнім часом їх витісняють за розрядно-зарядними, енергетичними та малогабаритними характеристиками сучасні типи акумуляторів, побудовані за літєвими та спорідненими до цього технологіями. Це відбувається внаслідок того, що АБ на базі

літєвих технологій мають ряд переваг серед інших видів акумуляторних батарей, котрі експлуатуються в теперішній час. З-посеред інших характеристик, котрі впливають на популярність указаних типів АБ, слід виокремити вищу щільність, потужність, менші габарити й оптимальну їх вартість. Також, враховуючи стохастичність рівнів генерації відновлювальними джерелами енергії та мінливим, не завжди лінійним графіком споживання, ЕЕ ЗО, варто зазначити «ефект пам'яті», котрий відсутній у даних типів АБ, що збільшує ефективне використання протягом тривалого часу.

Однак, під час експлуатації вказаних типів АБ, як і всіх інших, є і свої недоліки та особливості. Тож, під час їх експлуатації слід звертати увагу на такі особливості функціонування даних типів акумуляторних батарей, як: робоча напруга, яка складає від 3.7 до 4.2 В, недопустимість перегрівання, невідновлювана втрата ємності при розряді до напруги нижче 2.7...3 В, прискорена деградація при перезаряді вище 4.2 В, а також обмежена ємність окремо взятої батареї. Тому для створення необхідних за рівнем акумуляюючих потужностей, в тому числі, на електростанціях автономного живлення, літєві акумулятори необхідно і, як правило, об'єднують у послідовно-паралельні збірки – комплекси АБ [115].

Основною умовою за таким варіантом створення необхідних акумуляюючих потужностей на базі акумуляюючих збірок є застосування в них акумуляторів одного типу і з однаковими або незначно відмінними параметрами.

Для надійної роботи акумуляторної збірки всі включені елементи повинні мати однаковий рівень напруги і ємності. Наявність хоча б одного елемента з відмінними параметрами призведе до завчасного повного розряду того чи іншого акумулятора нижче допустимого рівня напруги, що зумовить невідновлювальну втрату ємності, або перевищення максимального рівня напруги при заряді, що, в свою чергу, спричинить перегрівання цього акумулятора та його термічне руйнування. У результаті,

в подальшому зростає навантаження на інші акумулятори в збірці, що призведе до прискорення розряду та зниження вихідної напруги загальної системи накопичення енергії в цілому по акумулюючому комплексу. Це значно знизить ефективність роботи акумулюючої електростанції, тому що темп заряду акумуляторів генеруючим обладнанням може бути нижчим, ніж інтенсивність їх розряду. Результуюче зниження вихідної напруги системи накопичення енергії також знизить ефективність перетворення електроенергії інвертором, через який отримує живлення споживач. Також може виникнути ситуація, коли напруга в ланці постійного струму впаде нижче допустимого рівня, і перетворення з передачею потужності в мережу взагалі припиниться.

Окрім АБ, в ролі дієвих накопичувачів ЕЕ для умов СЕП ЗО, можуть бути задіяні конденсатори – суперконденсатори, конструкції та відповідні енергетичні параметри котрих в останні роки інтенсивно покращуються. Важливим штрихом для позитивного рішення проблем накопичення ЕЕ в структурах СЕП ЗО з розосередженою генерацією є те, що малогабаритні умови в даному випадку не відіграють системоутворюючого визначення. Існуючі приміщення трансформаторних підстанцій та розподільчих пунктів, що аналізуються СЕП, володіють відповідним потенціалом для монтажу в них засобів з акумулювання ЕЕ. Наведено приклад розрахунку з визначення електричних параметрів елементів автономних джерел генерації та накопичення ЕЕ в СЕП варіанті розподіленої генерації.

## **2.7 Висновки до розділу 2**

1. Аналіз та послідуоча формалізація факторів впливу на ефективність функціонування електроенергетичних комплексів зовнішнього освітлення у населених пунктах дозволяє визначити логіку управлінської розбудови таких систем з можливістю комплексного багатфункціонального керування освітлювальним процесом.

2. Пропонований підхід до модернізації електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення, на базі світлодіодних джерел світла та сучасного підходу до необхідності розбудови інтелектуальної системи керування, дозволить підвищити ефективність функціонування вуличних освітлювальних систем як у рівнях світловіддачі, так і в рівнях енергоефективності.

3. Інтеграція в структури електропостачання комплексів зовнішнього освітлення елементів акумулювання електричної енергії в синергетичних варіантах освітлювальних мереж населених пунктів дасть можливість вирішити проблему безперебійності комплексів електропостачання освітлювальних мереж.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ ТА РОЗБУДОВА ФОРМАТУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ

#### 3.1 Моделювання процесу керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення

Створення та втілення в практику функціонування керування зовнішнім освітленням у сучасному баченні формату ефективності кінцевого рішення апріорно передбачає застосування складного обладнання, а методи формування управлінських систем є досить не простими і передбачають значних затрат.

Процес розробки формування схем керування ЗО визначає необхідність наявності прикладної теорії аналітичного розв'язання завдань, які орієнтовані на ефективне використання їх в комплексах ДСУЗО.

Основними принципами прикладної теорії розробки структур і функціональних можливостей ДСУЗО можуть бути:

- комплексний підхід до аналізу пропонованих моделей і методів керування ЗО на всіх його етапах;
- системний глибокий аналіз впливу на рівень світлового потоку світильників усіх наявних факторів (інтенсивність руху транспорту, освітлення доріг, погодні умови, забруднення атмосфери та ін.);
- забезпечення мінімальних матеріальних і фінансових затрат при розробці системи дистанційного керування ЗО доріг;
- формування найбільш ефективної системи керування ЗО доріг та його програмного забезпечення.

Дотримання цих принципів повинне забезпечити застосування теоретичних методів і алгоритмів керування ДСУЗО та виконати моделювання



такої системи керування світильниками, застосовуючи методи теорії обернених задач динаміки, варіаційного обчислення, оптимального керування, математичного програмування, теорії інтелектуального керування та інших наукових дисциплін. А систему математичних виразів, які характеризують систему керування світильниками, називають математичними моделями керування ЗО на різних проміжках часу [44].

У векторній формі математичну модель керування електротехнічним комплексом ЗО можна записати наступним чином:

$$\dot{X} = f(X, \Phi, u, t), \text{ якщо } t \in [t_0, t_m], \Phi(t_0) = \Phi_0 \text{ і } X(t_0) = t_0 \quad (3.1)$$

де  $[t_0, t_m]$  – інтервал часу протягом якого здійснюється ЗО дороги;

$t_0$  – момент включення світильників;

$t_m$  – момент виключення світильників;

$\Phi$  – світловий потік із світильників;

$\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$  – вектор рівня світлового потоку;

$u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  – управляючий вектор;

$f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  – вектор-функція своїх аргументів,

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор стану світильників.

Причому, на управляючий сигнал покладають такі обмеження, щоб  $u_{\min}$  відповідав  $\Phi_{\min}$ , а  $u_{\max}$  відповідав  $\Phi_{\max}$ , тобто

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, t \in [t_0, t_m] \quad (3.2)$$

Аргументи, вони ж фактори, від яких залежить рівень світлового потоку  $\Phi$  від світильників:

$E$  – освітленість дороги;

$M$  – світимість інших джерел світла в нічний час;

$K$  – інтенсивність руху транспорту по дорозі;

$x = x(t), y = y(t), z = z(t)$  координати світильників у декартовій системі координат, із центром у точці розміщення підстанції ПС відповідного диспетчерського пункту ДП [45].

Тоді фазовий вектор рівня світлового потоку має наступні характеристики координати:  $E(t), M(t), k(t), x(t), y(t), z(t)$ .

Початковими умовами для даної системи диференціальних рівнянь будуть наступні вирази:

$$E(t_0) = E_0; M(t_0) = M_0; k(t_0) = k_0; x(t_0) = x_0; y(t_0) = y_0; z(t_0) = z_0.$$

Тоді систему диференціальних рівнянь можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \dot{E} = f_1(E, M, k, x, y, z, u), t \in [t_0, t_m] \\ \dot{M} = f_2(E, M, k, x, y, z, u) \\ \dot{k} = f_3(E, M, k, x, y, z, u) \\ \dot{x} = E \cos M \cdot \cos k \\ \dot{y} = E \sin M \\ \dot{z} = E \cos M \cdot \sin k \end{cases}, \quad (3.3)$$

Сформований вектор керування  $u(t)$  оцінюється шляхом підстановки в систему диференціальних рівнянь і моделювання рівня світлового потоку  $\Phi$  від світильників шляхом числового інтегрування при заданих початкових умовах.

Для характеристики дистанційного керування ЗО доріг у нічний час можна використати формальне керування ЗО, яке в загальному вигляді можна характеризувати векторною системою диференціальних рівнянь наступного виду:

$$\dot{x} = f(x, t, S), t \in [t_0, t_m], x(t_0) = x_0 \quad (3.4)$$

де  $S$  – множина управляючих команд.

$S = \{S_1(a), S_2(a), S_3(a) \dots S_m(a)\}$ , де  $S(a)$  – найменування  $j$ -ої управляючої команди (номер і цифровий код), де  $j = (1, \bar{m})$ ,  $a$  – вектор параметрів, який характеризує необхідний рівень світлового потоку  $\Phi$ , при заданих управляючих командах.

У кожний момент часу  $t \in [t_0, t_m]$  у правій частині диференційного рівняння  $\dot{x} = f(x, t, S)$  повинна бути лише одна управляюча команда  $S_j(a)$ ,  $j = (1, \bar{m})$ .

Для того, щоб у кожен момент часу керування ЗО виконувалось лише однією командою, введемо в розгляд булеву  $w_j(t)$  функцію, яка має вигляд [116]:

$$w_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \in [\tau_j, \tau_{jm}] \text{ при } S_j(a) \in S; \\ 0, & \text{якщо } j = (1, \bar{m}) \text{ при } S_j(a). \end{cases} \quad (3.5)$$

Виконання у кожний момент керування світловим потоком світильника формується таким чином:

$$\sum_{j=1}^m w_j(t) = 1, t \in [t_0, t_m]. \quad (3.6)$$

Тоді модель керування світловим потоком ЗО доріг у нічний час можна записати так:

$$\dot{x} = f\left(x, t, \sum_{j=1}^m S_j(a) w_j(t)\right), t \in [t_0, t_m], x(t_0) = x_0. \quad (3.7)$$

Вибір управляючих сигналів світильника ЕІДЖ виступає як вибір на інтервалі часу  $[t_0, t_m]$  функцій  $w_1(t), w_2(t) \dots w_m(t)$ , що задовольняють умовам керування ЗО.

### **3.2 Моделювання та дослідження роботи системи керування освітлювальної установки**

На рис. 3.1 зображена структурна схема освітлювальної системи, що складається з контролера, акумуляторної батареї, фотоелектричного модуля, датчика руху та світлодіодних прожекторів.

Структура енергетичної системи освітлювальної системи з джерелами розосередженої генерації виглядає наступним чином: первинний перетво-

рювач енергії сонця в електричну енергію постійного струму – перетворювач електричної енергії постійного струму в електричну енергію змінного струму, або перетворювач енергії вітру в електричну енергію.

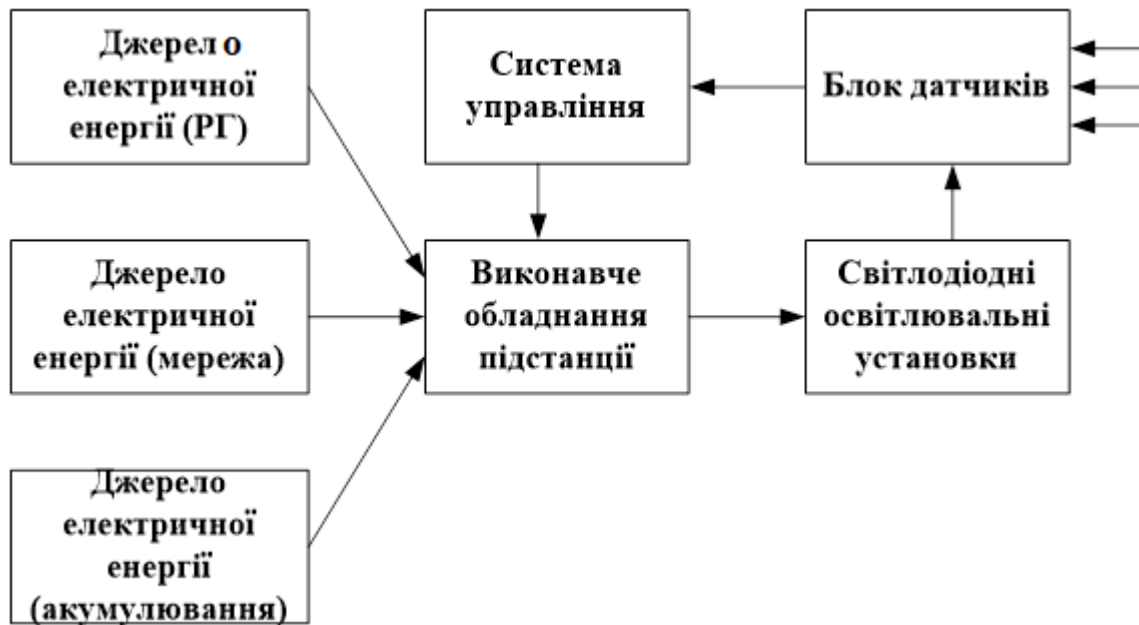


Рисунок 3.1 – Структурна схема освітлювальної системи

Вибрана освітлювальна система, на базі сонячної енергетичної установки, складається з первинного перетворювача енергії сонця в електричну енергію постійного струму і регулюючого пристрою (контролера) [117].

Така система вуличного освітлення може працювати повністю автономно. Перевагами цих систем є можливість встановлення на будь-якому рельєфі, де навіть неможливо провести кабель чи повітряну лінію живлення.

Обчислимо номінали лабораторного комплексу для дослідження енергетичних характеристик запропонованої системи керування системами освітлення (рис. 3.2).

Для розрахунку елементів системи приймаємо ємність акумуляторної батареї  $c_a = 60 \text{ А} \cdot \text{годин}$ , розрахованої на робочу напругу  $12 \text{ В}$ , якщо щоденно від акумуляторної батареї протягом  $\tau = 8$  годин споживається струм силою  $I = 2 \text{ А}$ , при умові, що напруга одного кремнієвого сонячного елемента при максимальному навантаженні  $U = 0,442 \text{ В}$ , а густина струму на ньому  $j = 2 \cdot 10^2 \text{ А/см}^2$ .

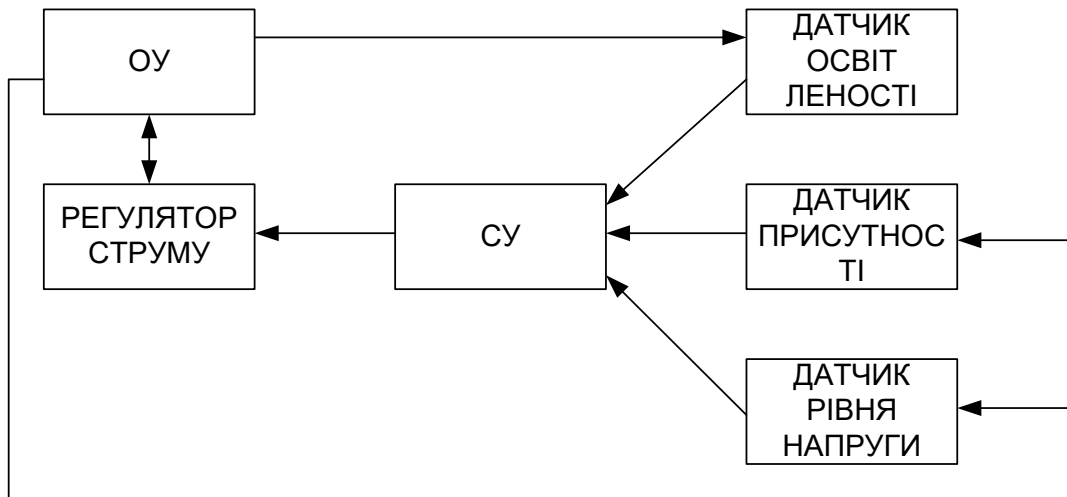


Рисунок 3.2 – Структурна схема лабораторного комплексу з дослідження функціонування системи регулювання освітленням

Розрахуємо напругу сонячної панелі, яка необхідна для зарядки акумуляторної батареї до напруги 12 В за формулою [120, 121]:

$$U = 1,25 \cdot U_{ok}, \quad U = 1,25 \cdot 12 = 15 \text{ В.}$$

Визначимо, яку кількість кремнієвих сонячних елементів необхідно з'єднати послідовно, щоб напруга сонячної панелі була не меншою 15 В, за формулою [118, 119]:

$$n_{el} = \frac{U_c}{U_{ok}}, \quad n_{el} = \frac{15}{0,442} \approx 33,94 \approx 34 \text{ елемента.}$$

Обчислимо щоденну витрату електричної енергії від акумулятора споживачами за формулою [118, 119]:

$$C_{ак} = I \cdot \tau, \quad C_{ак} = 2 \cdot 8 = 16 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Розрахуємо величину енергії, яку треба використовувати щоденно від сонячної панелі за формулою [118, 119]:

$$C_c = C_{ак} \cdot \frac{U_c}{U_{ак}}, \quad C_c = 16 \cdot \frac{12}{15} = 20,0 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Так як кремнієві сонячні елементи щоденно освітлюються сонячними променями протягом 5-ти годин, то необхідний струм для зарядки акумуляторної батареї обчислимо за формулою [120]:

$$I_3 = \frac{C_c}{\tau_c}, I_3 = \frac{20}{5} = 4 \text{ A.}$$

Знаходимо площу сонячної панелі, з якої можна одержати зарядний струм  $I_3$  при послідовному з'єднанні елементів між собою за формулою:

$$S_{\Pi} = \frac{I_3}{j}, S_{\Pi} = \frac{4}{2 \cdot 10^{-2}} = 200 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^2 \text{ см}^2.$$

Обчислимо величину площі одного кремнієвого елемента [121]:

$$S_{ел} = \frac{S_{\Pi}}{n_{ел}}, S_{ел} = \frac{200}{34} \approx 5,88 \text{ см}^2 \approx 5,9 \text{ см}^2.$$

Радіус одного кремнієвого елемента визначається за формулою [121]:

$$R_{ел} = \sqrt{\frac{S_{ел}}{\pi}}, R_{ел} = \sqrt{\frac{5,9}{\pi}} \approx 1,4 \text{ см.}$$

Розмір сонячної панелі при послідовному з'єднанні елементів у два ряди по 17 штук буде дорівнювати:

а) довжина панелі  $a = 17 \cdot 2 \cdot 1,4 \approx 46,5 \text{ см}$ ,

б) ширина панелі  $b = 4 \cdot 1,4 \approx 5,5 \text{ см}$ .

Послідовне з'єднання 34-х кремнієвих сонячних елементів радіусом 1,4 см забезпечить зарядження акумуляторної батареї протягом 5-ти годин освітлення сонцем панелі щоденно [121].

Проведений аналіз NiCd, NiMh, Pb, Li-х електрохімічних систем показує, що для сонячної енергетичної установки оптимальним є варіант використання Li-іонних акумуляторних батарей [57].

Таким чином, акумуляторну батарею вибираємо на 60 А·годин, запобіжники на 10 А, світлодіодний модуль 60 Вт.

Установка світлодіодних прожекторів дозволить освітлювати проїзну частину автодоріг на розтяжках між двома опорами освітлення. Установка датчиків руху дозволить вмикати світильник тільки в разі присутності людини та транспортного засобу, що призведе до зменшення потужності встановленого фотоелектричного модуля та ємності АКБ.

Графік залежності світлового потоку має типовий для світлодіодів вид (рис. 3.3), де на початковому етапі залежність між лінійним характером і світловим потоком зростає зі збільшенням значення прямого струму.

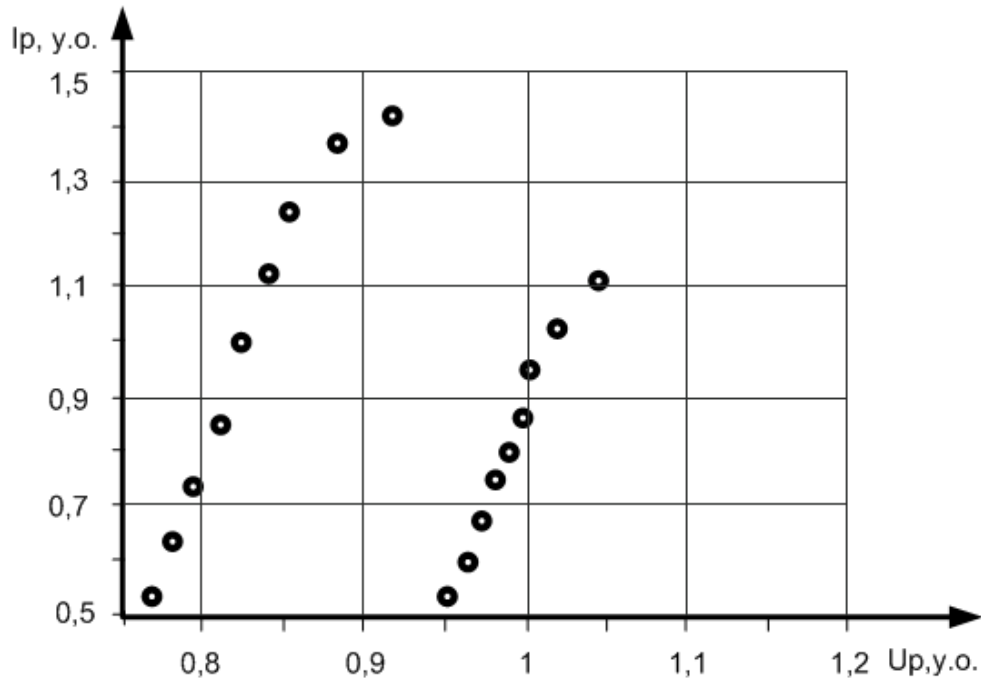


Рисунок 3.3 – Залежність вольт-амперної характеристики систем освітлення від напруги живлення

У центральній частині залежність змінює характер, і світловий потік починає знижуватися зі зростанням електричного навантаження, що пов'язано з нагріванням активної області кристалів і пояснюється збільшенням частки безвипромінювальної рекомбінації носіїв у матеріалі світлодіода.

Між тим, як показано на рис. 3.4, світловий потік світлодіодного джерела світла майже лінійно залежить від регулювання струмом керування. При цьому слід зауважити, що при збільшенні струму керування вище номінального значення, світловий потік починає зменшуватися, що зумовлено нагріванням активної області кристалів.

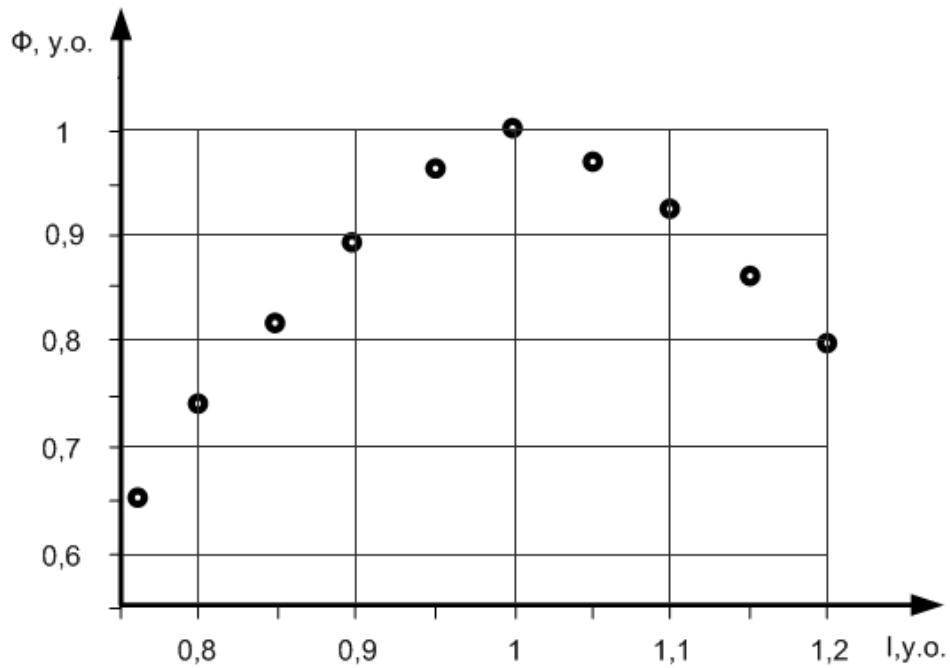


Рисунок 3.4 – Залежність світлового потоку від струму керування

Отже, залежність вихідного струму системи керування від напруги мережі (рис. 3.5) показана як пропорційна, що забезпечує ефективну роботу системи освітлення.

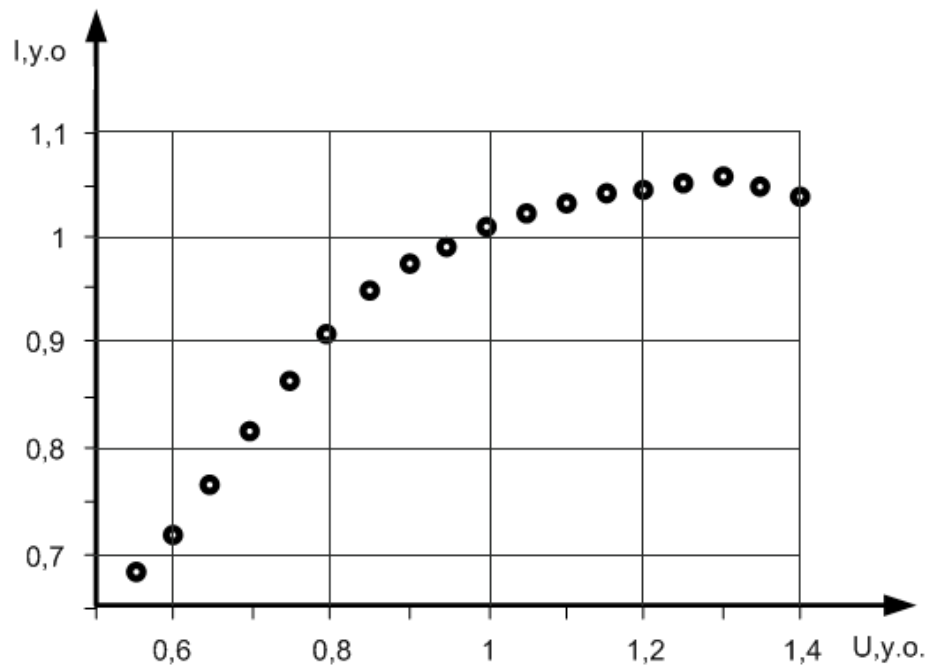


Рисунок 3.5 – Залежність вихідного струму системи керування від напруги мережі



Залежність ККД (рис. 3.6) від напруги мережі при незмінному навантаженні показує оптимальні значення коефіцієнта корисної дії у діапазоні значень 0,75-1U.

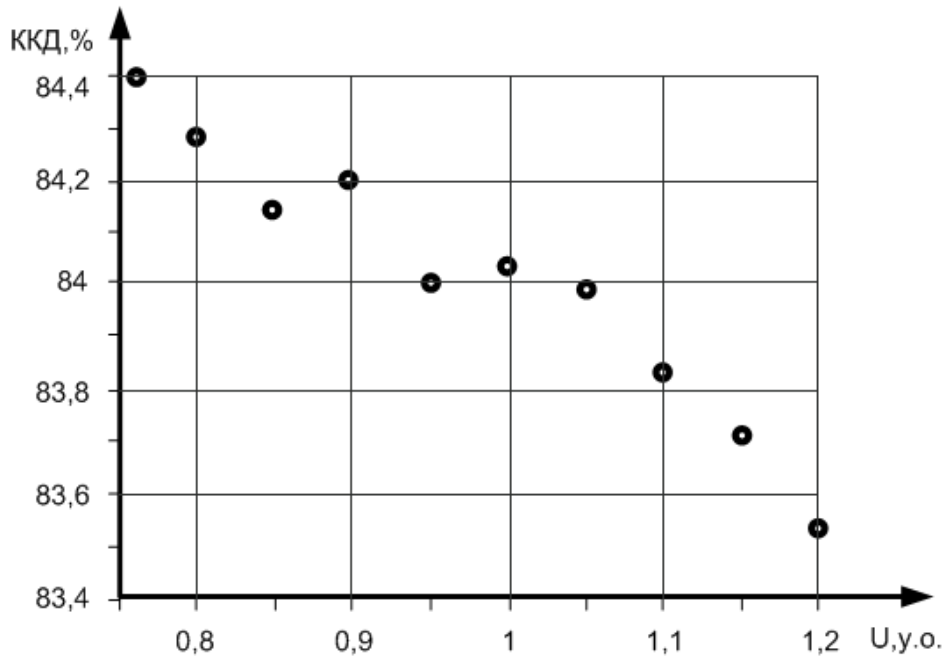


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта корисної дії від напруги мережі при незмінному навантаженні

У програмі DIAL.ux version 4.9 спроектовано систему освітлення вулиці населеного пункту (рис. 3.7).

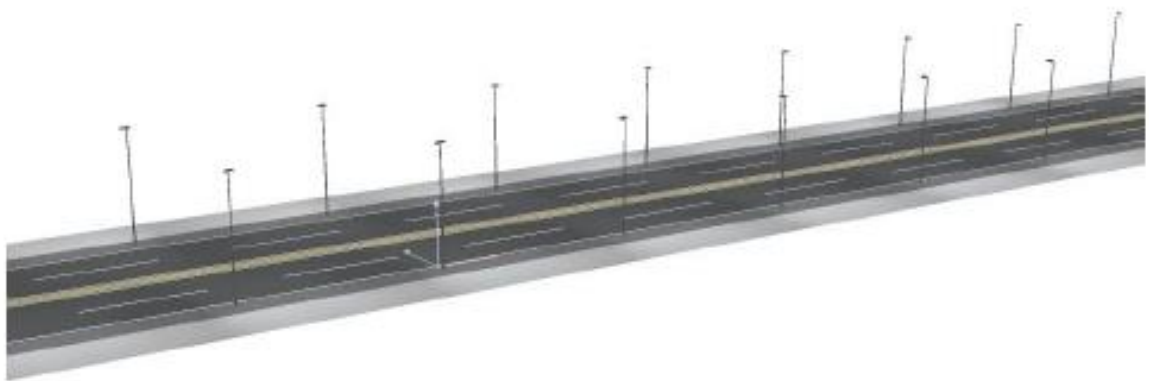


Рисунок 3.7 – Проект системи освітлення вулиці населеного пункту

Результати моделювання роботи системи керування показали, що система керування освітленням при зменшенні чи збільшенні освітленості має

оптимальні показники і забезпечує освітлення вулиць населених пунктів на достатньому рівні (рис. 3.8 і рис. 3.9).

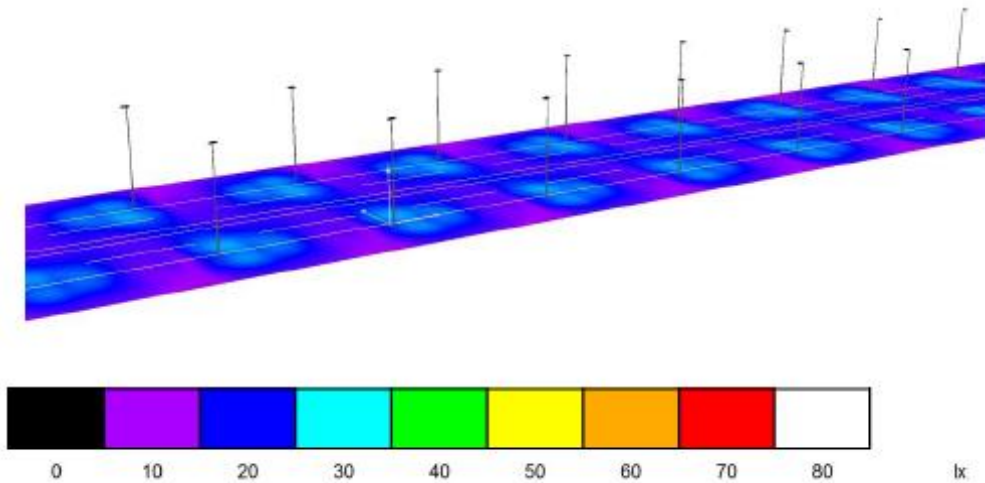


Рисунок 3.8 – Результати моделювання роботи системи керування освітленням при збільшенні освітленості

Вочевидь, система керування є достатньо стійкою по каналу керування напругою на навантаженні, що свідчить про можливість якісного керування освітленістю вулиць населених пунктів.

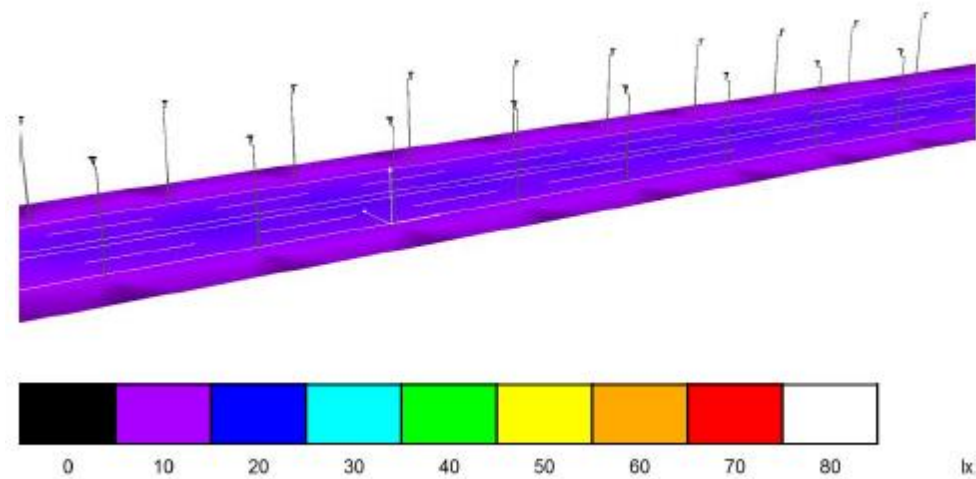


Рисунок 3.9 – Результати моделювання роботи системи керування освітленням при зменшенні освітленості

Незначна розбіжність теоретичних та експериментальних даних підтверджує адекватність розроблених моделей. Сумарна похибка вимірювання

інформативних параметрів системи керування не перевищує 10% і не буде суттєво впливати на якість керування.

### **3.3 Сучасні аспекти побудови інтелектуальних електричних мереж**

Згідно з визначенням, що наводиться Міністерством електричної енергетики США, «інтелектуальна» електрична мережа – це повністю автоматизована система, що забезпечує двосторонній потік електричної енергії та всієї необхідної інформації між енергетичними об'єктами на всій місцевості, де вона розгорнута [122].

У країнах Євросоюзу під цим терміном слід розуміти таку електричну мережу, яка відповідає усім вимогам енергоефективного та економічного функціонування енергетичної системи шляхом скоординованого керування та за шляхом двосторонньої взаємодії між елементами електричної мережі – електростанціями, джерелами та акумуляторами електричної енергії та її споживачами [123].

За визначенням NETL (The National Energy Technology Laboratory USA), «інтелектуальна» електрична мережа – це сукупність організаційних змін, нової моделі процесів, рішень у галузі автоматизованих систем керування технологічними процесами та диспетчерського керування в електроенергетиці [124].

Однак, на погляд більшості науковців, загальне та технічно повне визначення зазначеного поняття запропоновано колективом вчених інституту IEEE (The Institute of Electrotechnic and Electronic Engineers), за яким це повністю інтегрована саморегульована та самовідновлювальна електроенергетична система, що має мережну топологію та включає в себе усі джерела генерації, магістральні та розподільчі мережі та всі види споживачів елект-

роенергії, керування якими здійснюється за допомогою єдиної мережі інформаційно управляючих пристроїв і систем у реальному масштабі часу [125].

Конкретизація поняття Smart Grid щодо електроенергетичних систем різного технічного рівня ініціювала появу таких термінів, як Strong Smart Grid (SSG) – мережі напруги вище 110 кВ, Regional Smart Grid (RSG) – напруга від 3 до 110 кВт і Micro Smart Grid (MSG) – напруга 0,4-3 кВ, характерними безпосередньо для самих систем і виникаючими при їх об'єднанні, що визначає особливості побудови обладнання у вузлах їх сполучення та у вузлах підключення навантажень [126]. Практичне розв'язання перерахованих завдань може бути здійснено на основі застосування засобів силової електроніки і, зокрема, на основі широкого впровадження перетворювачів параметрів електричної енергії.

Вибір типу і всіх структурних елементів, запропонованих для використання в інтелектуальних мережах, слід проводити з урахуванням характеру зміни параметрів електричної енергії, характерних для тієї чи іншої системи. Основними особливостями SSG, RSG і MSG систем є істотна відмінність зміни параметрів їх електричної енергії в часі. Так, для SSG-систем характерна відносно висока стабільність параметрів енергії. У RSG-системах відбувається деяка, а іноді і значна, зміна параметрів електричної енергії, зумовлена типом під'єданого навантаження і потужністю трансформованих підстанцій [127].

Між тим, сучасні тенденції розвитку світової енергетики спрямовані на модернізацію електричних мереж, у тому числі MSG. У більшості випадків це проявляється у підвищенні енергетичної ефективності, стимулюючи розвиток альтернативної та відновлювальної енергетики, підвищення рівня автоматичної оптимізації та контролю електричних мереж, удосконалення засобів релейного захисту та ін.

Сучасні тенденції розвитку енергетики направлені на поступовий перехід до принципово нового рішення, яке орієнтоване на широке застосування розосереджених джерел енергії, та активних мереж, які здатні надавати послуги з передачі та зберігання і перетворення електричної енергії. Активні електричні мережі здатні швидко адаптуватися до мінливих потреб зацікавлених сторін енергетичного ринку. На сьогоднішній день усі аспекти створення «розумних» енергосистем розглядаються в концепції Smart Grid, найбільш відомій концепції модернізації електричних мереж. Така концепція характеризується двосторонніми потоками електроенергії та інформації для створення автоматизованої, широко розгалуженої розподільної мережі. Обмін інформацією в ній відбувається між комукаційними джерелами генерування, передачі, розподілу та споживання електроенергії, які фізично представлені системами автоматизації та управління виробництвом кожного із доменів. Також ця концепція передбачає здійснення поточного контролю, захисту й оптимізації функціонування всіх взаємодіючих елементів, до яких відносяться потужні генератори і відновлювані джерела енергії, які за допомогою магістральних та розподільних мереж об'єднані зі споживачами електричної енергії, установками накопичення електроенергії, а також з кінцевими споживачами [127].

Слід зазначити, що Smart Grid – це не тільки нові енергетичні технології, але також і сучасні інформаційні та комунікаційні технології електронної комерції, керування доступом та адміністрування в мережах різного масштабу, моделювання і зберігання даних, збору, обробки і передачі інформації в реальному часі. Таким чином, Smart Grid слід розглядати не як окрему технологію, а як комплексний підхід і методику створення великомасштабних «розумних» енергооб'єктів, що функціонують на базі нової технологічної платформи і надають широкий спектр послуг із використанням інформаційних та енергетичних технологій.

Між тим, фахівці вважають, що застосування сучасних технологій керування, поряд із широким використанням новітніх інформаційних і комунікаційних технологій, дасть можливість підтримувати в «розумних» енергосистемах попит і пропозицію на рівні окремого енергетичного пристрою. SmartGrid дозволить споживачам усвідомлено брати участь у функціонуванні енергосистем, при цьому покращиться використання активів в енергетиці, зросте економічна ефективність, підвищиться якість електроенергії і стійкість енергосистемам до несанкціонованих зовнішніх впливів [126].

Для надійного та якісного електропостачання споживачів в енергосистемах має бути передбачено резерви потужності, до складу якого входять такі види, як навантажувальні, народногосподарські, аварійні та ремонтні.

### **3.4 Алгоритм роботи системи інтелектуального контролю рівня вуличного освітлення**

Логістика інтелектуального керування системою освітлення включає в себе і відповідну підсистему контролю – монітору рівня освітленням.

Підсистема інтелектуального контролю рівня вуличного освітлення працює за попередньо визначеним алгоритмом роботи (рис. 3.10), що задається програмно після установки системи.

Інтелектуальна система керування ЗО є рішенням для віддаленого керування зовнішнього освітлення, яка має можливість управління роботою електричними джерелами світла та рівнем споживання ними електричної енергії, відповідно до реального рівня освітленості заданої ділянки.

Також запропонована система керування гарантує освітленість заданої ділянки при різних умовах функціонування цілодобово. Не менш важливим є факт наявності зворотного зв'язку в режимі реального часу, що повідомляє про будь-які зміни, що відбуваються вздовж лінії або ділянки, зни-

жує втрати електричної енергії. Таким чином, навіть при виході з ладу деяких світильників на лінії, система керування буде намагатися виконати завдання нормованого освітлення певної ділянки.

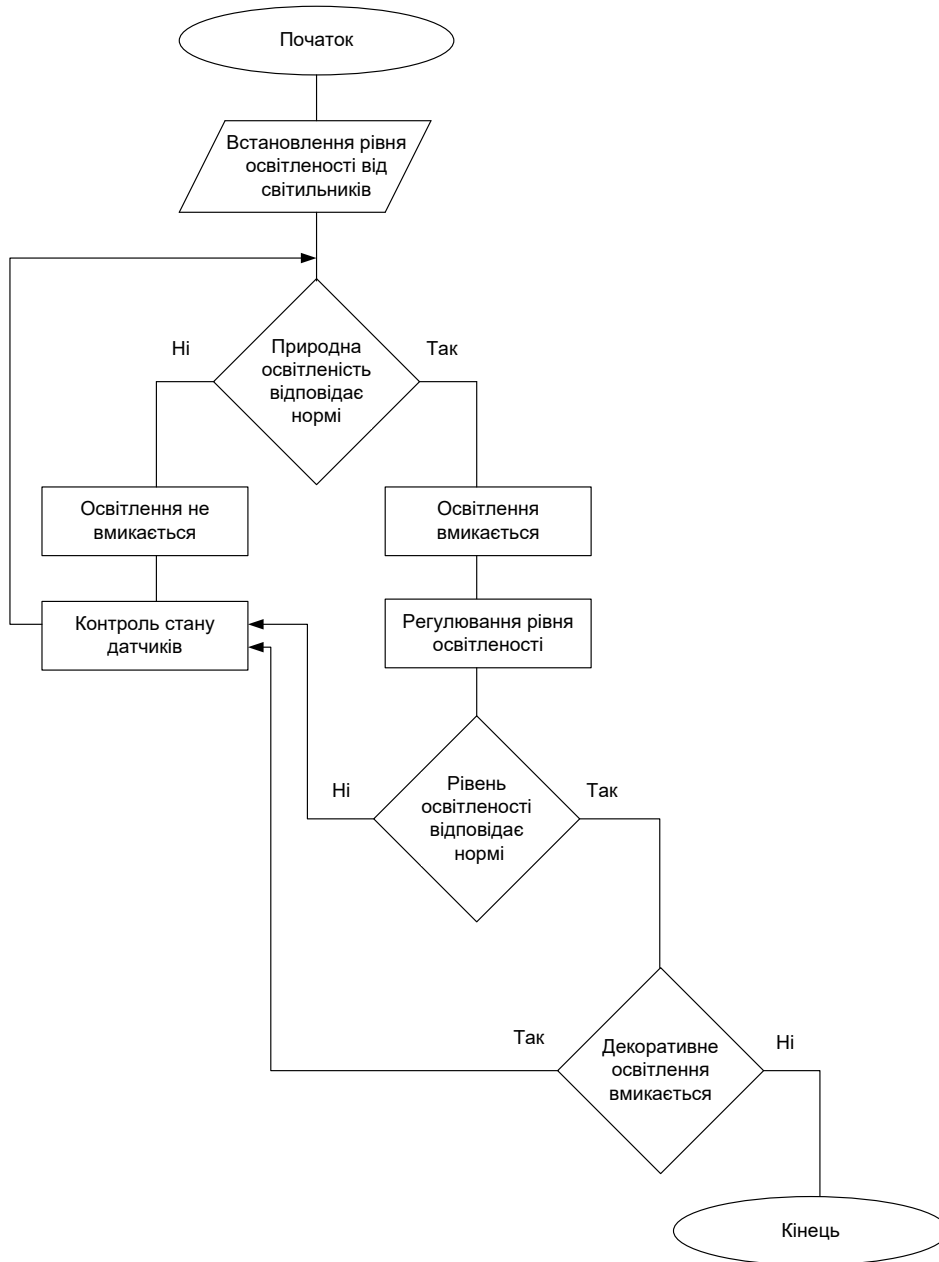


Рисунок 3.10 – Алгоритм роботи інтелектуальної системи керування зовнішнього освітлення

Інтелектуальна система керування ЗО працює в будь-який час, тим самим допомагає практично повністю уникнути ризику аварійних ситуацій в освітлювальній мережі через несправність системи освітлення.

Як додаткова функція цієї системи керування є можливість регулювання декоративного освітлення, що зменшує витрати на побудову додаткової системи керування.

### 3.5 Загальні засади побудови нечіткої системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення

Систему можна формалізувати у вигляді нечітких логічних тверджень. Кожне твердження можна оцінити нечітким ступенем істинності. Кожне таке твердження можна описати за допомогою відношень множин лінгвістичних нечітких змінних.

Лінгвістична змінна представляє собою кортеж наступних значень  $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$ , де

$\beta$  – ім'я змінної (наприклад, «освітленість»);

$T$  – базова множина значень, кожне з яких надається за допомогою нечіткої множини (наприклад, «мала», «середня», «висока», «дуже висока»);

$X$  – множина-носіїв можливих конкретних значень змінної для всіх множин (наприклад,  $X = [0, 200]$  лк);

$G$  – деяка синтетична процедура генерації нових нечітких множин з  $T$  (наприклад, «дуже мала»);

$M$  – семантична процедура надання нечіткої множини певної нечіткої змінної вигляду  $\langle X, \mu_i(X) \rangle$ ,  $\mu_i(X)$  - функція приналежності  $i$ -ої нечіткої множини з  $T$ .

Побудова системи нечіткого логічного виводу (НЛВ), яка оснований на використанні алгоритму Мамдані, що дозволяє значно зменшити обсяги обчислень, має наступні етапи [128]:

1. Проектування бази правил НЛВ. Кожне правило записується у вигляді:

**Якщо** <умова>, **тоді** <висновки> [міра вірності правила]



Для алгоритму Мамдані <умова> і <висновки> виглядають як логічні зв'язки наступних записів: <нечітка змінна> = <значення >

2. Введення цих правил у НЛВ.

3. Використання НЛВ для обробки вхідної інформації у вигляді конкретних значень вхідних (нечітких) змінних. Цей етап, у свою чергу, розкладається на наступні складові:

3.1. Введення значень вхідних змінних. Тобто, деякий фактів, які вважаються істинні на 100%.

3.2. Фазифікація вхідних змінних – встановлення відповідності між конкретним значенням вхідних змінних і значенням її нечіткої множини, разом із функцією приналежності.

3.3. Агрегування складних умов, які стоять у правилах після ключового слова ЯКЩО, тобто визначення ступеню істинності всіх умов в усіх правилах, якщо умови надаються за допомогою складних логічних виразів. Правило активується, якщо істинність його умови більша за нуль. У базах знань процедура агрегування умов у правилах виконується за допомогою нечітких логічних операцій – нечіткої кон'юнкції, нечіткої диз'юнкції, нечіткої відмови та ін.

3.4. Активація підзаключень – процес визначення ступеню істинності (приналежності до відповідних нечітких множин) змінних, які стоять у висновках активних правил, за формулою:  $c_k = b_k F_k$ , де  $c_k$  – ступінь істинності висновку правила  $k$ ,  $b_k$  – ступінь істинності його умови,  $F_k$  – ступінь істинності самого правила (ваговий коефіцієнт  $k$ -правила).

Після визначення вектору  $C = (c_1, \dots, c_q)$  визначаються функції належності для кожного із підвисновків для кожної вихідної лінгвістичної змінної. Припустимо, що відповідна нечітка множина вихідної лінгвістичної змінної визначається функцією приналежності  $\mu(y)$ . Тоді після процедури активації отримуємо поновлену функцію приналежності відповідної нечіткої множини (підвисновку)  $\mu'(y)$  за одним із методів нечіткої композиції:

- min-активізація:  $\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}$ ;
- prod-активізація:  $\mu'(y) = c_i \mu(y)$ ;
- average-активізація:  $\mu'(y) = 0.5(c_i + \mu(y))$ .

Відзначимо, що різні правила підвисновків можуть містити однакові нечіткі множини лінгвістичних змінних. У таких випадках для кожної лінгвістичної змінної ми визначаємо множину різних функцій приналежності, які обраховуються за одним із правил нечіткої композиції за кожним правилом. Остаточна функція приналежності для цієї нечіткої множини визначається далі.

3.5. Акумуляція висновків, тобто, визначення значення функцій приналежності для нечітких множин усіх вихідних змінних. Якщо для однієї лінгвістичної змінної визначена множина функцій приналежності  $\mu'_1(y), \dots, \mu'_p$ , то акумуляція виконується за одним із правил об'єднання нечітких множин:

- об'єднання:  $\mu'(y) = \max\{\mu'_1(y), \mu'_2(y)\}$ ;
- алгебраїчне об'єднання:  $\mu'(y) = \mu'_1(y) + \mu'_2(y) - \mu'_1(y)\mu'_2(y)$ ;
- граничне об'єднання:  $\mu'(y) = \max\{\mu'_1(y) + \mu'_2(y) - 1, 0\}$ ;
- операція  $\lambda$ -суми:  $\mu'(y) = \lambda\mu'_1(y) + (1 - \lambda)\mu'_2(y)$ ,  $\lambda \in [0, 1]$ .

$$- \text{драстичне об'єднання: } \mu'(y) = \begin{cases} \mu'_1(y), & \text{if } \mu'_2(y) = 0, \\ \mu'_2(y), & \text{if } \mu'_1(y) = 0, \\ 1, & \text{else.} \end{cases} \quad (3.8)$$

3.6. Дефазифікація вихідних змінних тобто, визначення конкретних значень за функціями приналежності нечітких множин, визначається методом центру ваги для неперервних і дискретних нечітких множин за формулами:

$$z = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \mu'(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu'(y) dy}, \quad z = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu'(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu'(y_i)}. \quad (3.9)$$

Система керування освітлення реалізується у формі блоку нечіткого логічного виводу Мамдані, який можна представити у вигляді структури, зображеної на рис. 3.11 [128].

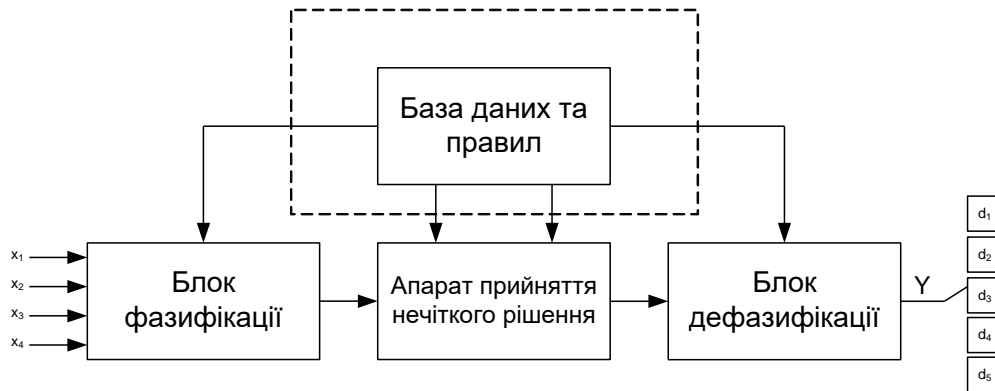


Рисунок 3.11 – Структурна схема блоку нечіткого логічного виводу

Наступним кроком створення нечіткої математичної моделі є фазифікації входних величин  $X$  згідно нечітких множин і отримання нечіткої множини  $\tilde{X}$ .

Маючи виміряні входні величини  $X$ , використовуючи дану модель, знаходимо нечітку множину, з якої після операції дефазифікації, за методом центра ваги, отримуємо значення коригувального коефіцієнта величини вихідного керування [128].

Згідно з алгоритмом нечіткого виводу, наступним етапом є процес фазифікації, де встановлюється відповідність між кожним конкретним значенням входної змінної системи нечіткого керування та відповідною до неї нечіткою множиною входної лінгвістичної змінної. Після завершення цього процесу для всіх входних змінних задані конкретні значення функцій належності по всіх лінгвістичних змінних [128].

### 3.6 Висновки до розділу 3

1. Запропонований вперше підхід до побудови інтелектуалізації структур системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освіт-

лення населених пунктів дозволяє впровадження в практику побудови систем керування вуличним освітленням населених пунктів основних принципів концепції Smart Grid.

2. Моделювання за допомогою розробленої імітаційної моделі керування зовнішнім освітленням населених пунктів із застосуванням запропонованої системи керування із використанням нечіткого виводу показали плавне регулювання функціонування системи освітлення, що якісно відрізняється від енергетичних характеристик перфектних та існуючих систем керування.

3. Запропонований алгоритм роботи інтелектуальної системи керування зовнішнім освітленням дасть можливість не лише забезпечити безпечні умови дорожнього руху, безпеку пішоходів, а й значно поліпшить архітектурну, туристичну та комерційну продукцію міста.

4. За результатами розрахунку діючої вуличної освітлювальної мережі, визначено втрати електричної енергії при її експлуатації, результати яких підтверджують необхідність модернізації діючих систем вуличного освітлення.

5. Виконаний приклад практичного вибору сучасного електротехнічного обладнання для існуючої зовнішньої освітлювальної мережі з інтелектуальною системою керування, дозволяє якісно, ефективно та надійно забезпечити освітлення вулиць та доріг населених пунктів.

## РОЗДІЛ 4

### НЕЧІТКА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ

Як вже було показано у п. 2.1 на теперішній час керування зовнішнім освітленням (ЗО) здійснюється майже в ручному режимі з використанням простих алгоритмів.

Автоматизація керування ЗО може забезпечити адаптування рівня освітленості освітлювальних приладів до змінних умов у яких вони повинні працювати, таких як час доби, погодні особливості та рух пішоходів або автотранспорту. Керування рівнем освітленості знижує споживання електроенергії, що є важливим аспектом сталого розвитку міст та селищ.

Не слід відкидати також і соціальну складову. Автоматизованого керування освітлювальними приладами дозволяє використовувати світлоточки тільки коли в цьому є потреба, тобто навіть в ті години, коли раніше ЗО відключалося повністю, що призводить до покращення комфортабельності міста та робить його привабливим для населення.

#### **4.1 Обґрунтування вибору системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення**

Враховуючи, що задача керування ЗО має враховувати складні нечіткі зв'язки між вхідними та вихідними змінними й представляти висновки системи в термінах нечітких значень, то в такому варіанті розбудові системи потрібно застосувати НЛВ Мамдані. Це дає можливість вираження нечітких правил у вигляді «ЯКЩО – ТО», при чому вихідні лінгвістичні змінні в НЛВ Мамдані описуються нечіткими множинами на відміну від НЛВ Такагі-Сугено-Канга або Цукамото, де виходом є, відповідно, лінійні або монотонні функції.

Загальне завдання роботи полягає в створенні системи керування електротехнічним комплексом ЗО на базі алгоритму НЛВ Мамдані з багатьма входами і виходами, котра, по-перше враховували би поміж інших величину тарифу на електроенергію при генерації керування, а також надавала рекомендацію щодо вибору джерела живлення освітлювальних установок для досягнення зниження рівня споживання електричної енергії обладнанням освітлювальних мереж.

Аналізувати роботу системи будемо на прикладі блоку освітлення дорожнього покриття для проїзду автотранспорту по вулиці Костенко між перехрестями вулиць Костенко – Героїв АТО і Костенко – проспект Університетський у м. Кривий Ріг (рис. 4.1).

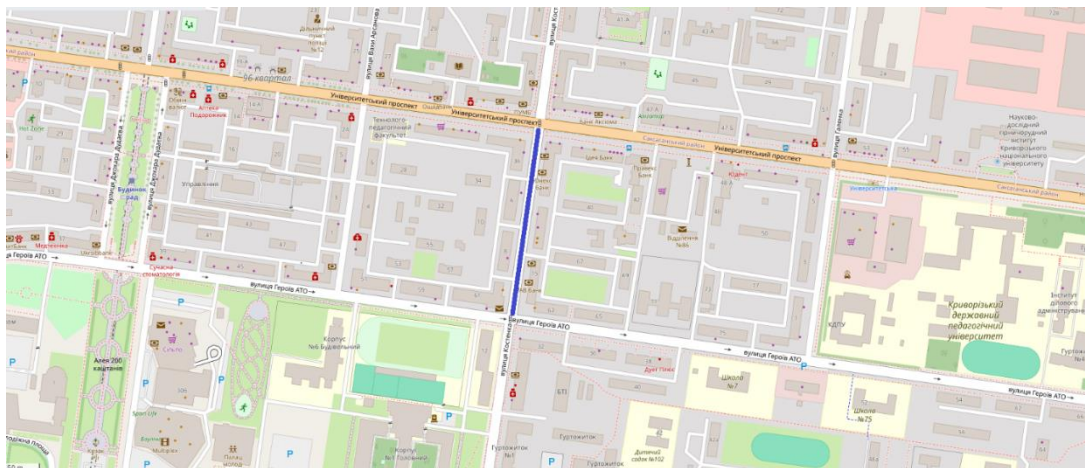


Рисунок 4.1 – Ділянка дорожнього покриття м. Кривого Рогу, яка освітлюється LED-світильниками

Блок містить 10 освітлювальних установок вздовж вулиці. Така ділянка дороги типова для міст. Вдень рух по ній достатньо жвавий, а вночі – поодинокий. Обабіч цієї дороги вже встановлені консольні LED-світильники з двома COB-матрицями сумарною потужністю 100 Вт. Напруга живлення складає 230 В. Струм номінальний освітлювального пристрою

$$I_{LED} = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{230 \text{ В}} = 0,435 \text{ А.}$$

ЗО дороги, а не пішохідної зони або двору, є

більш вагомим ураховуючи більшу потужність і кількість освітлювальних установок на одиницю площі вулично-дорожніх мереж. Зважаючи на аналіз літератури входами системи НЛВ Мамдані будуть освітленість і рух автотранспорту до яких додається ще тариф на електроенергію.

Керування джерелами світла реалізується LED-драйвером, який підтримує постійний струм на світлодіодах і регулює освітленість широтно-імпульсною модуляцією напруги. Так як драйвер LED-світильника регулює освітленість ШІМ напруги, то першим виходом системи керування буде «шпаруватість ШІМ». Ураховуючи, що живлення освітлювальної установки можна здійснювати або від електромережі або від акумуляторів, які зберігають енергію вироблену сонячною панеллю вдень, тому система має визначати, яке джерело живлення раціонально використовувати в даний момент. Тому другим виходом буде «джерело живлення».

#### **4.2 Розробка системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення**

На рис. 4.2 показана нечітка система керування зовнішнім освітленням НСКЗО.

Вона містить силову частину, яка представлена освітлювальними приладами з LED-драйверами, двома джерелами живлення – електромережею і акумуляторами (останні показані узагальнено, так як можуть бути як групами, так і індивідуальні) та комутаційним апаратом, що переключає те чи інше джерело до освітлювальних установок; вимірювальну частину, котра включає датчики освітленості (IL) біля кожного LED-світильника і датчики інтенсивності руху автотранспорту (TR) біля світлофорів з обох кінців дороги; керуючу частину, яка представлена не тільки системою НЛВ Мамдані, а й блоками узагальнення інформації про освітленість (БУО) і дорожній трафік (БУІДР), що надходять з датчиків, базою даних тарифів на електричну енергію (БДТЕЕ) і блоком оцінювання заряду акумулятора (БОЗА).

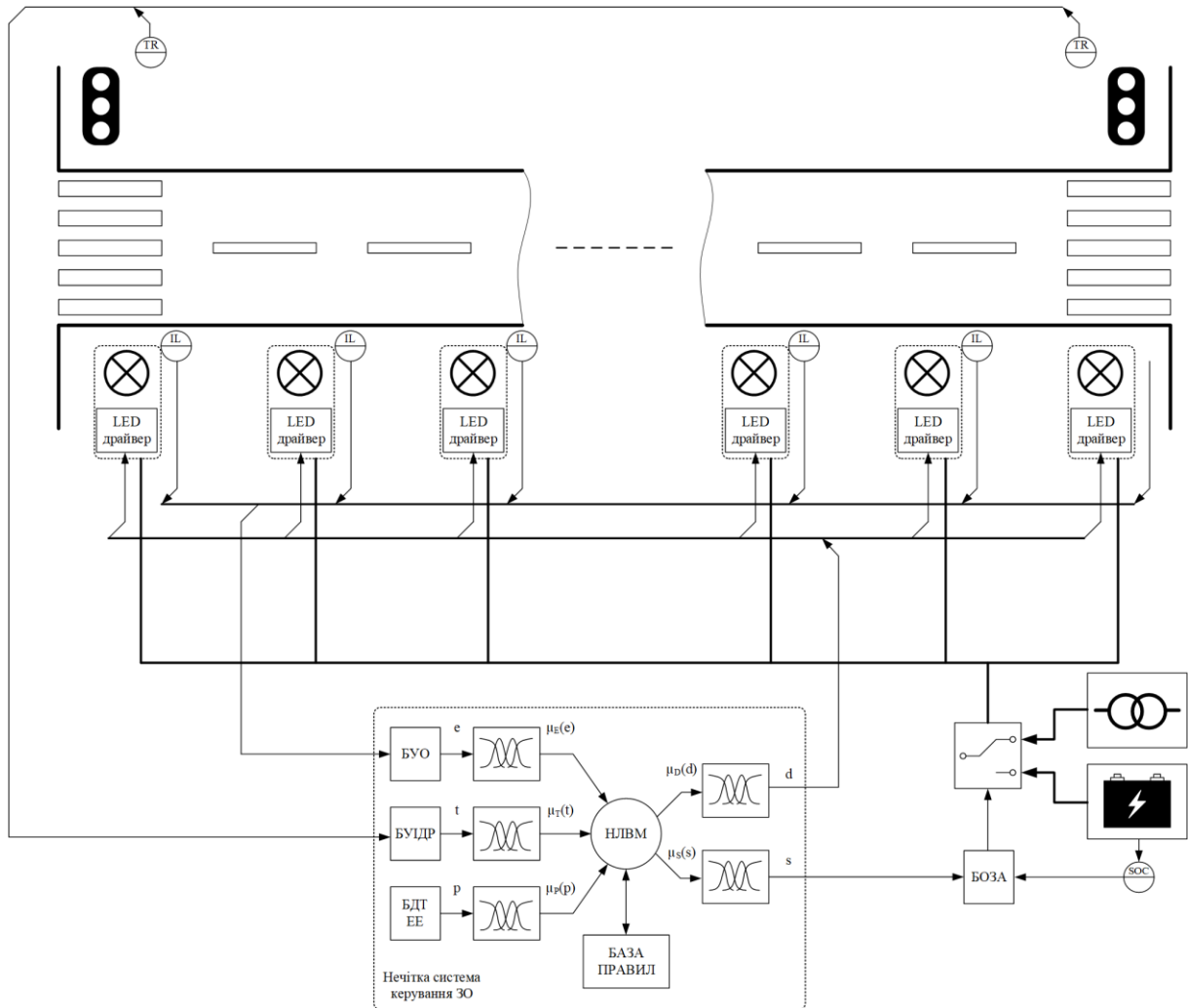


Рисунок 4.2 – Нечітка система керування зовнішнім освітленням: БУО – блок узагальнення освітленості; БУІДР – блок узагальнення інтенсивності дорожнього руху; БДТЕЕ – база даних тарифів на електроенергію; БОЗА – блок оцінювання заряду акумулятора; ІЛ – датчик освітленості; ТР – датчик інтенсивності руху автотранспорту

НСКЗО працює так. Значення освітленості й інтенсивності руху автотранспорту виміряні відповідними датчиками ІЛ та ТР подаються в блоки для узагальнення БУО і БУІДР, які далі, разом з тарифом на електричну енергію для даної години з відповідної бази даних (БДТЕЕ), передаються в систему НЛВ Мамдані. Проводиться НЛВ, який видає значення шпаруватості ШІМ для LED-драйверів освітлювальних приладів та рекомендацію на ви-



користання того чи іншого джерела живлення. Якщо рекомендовано підключити акумулятор, то у блоці оцінювання заряду акумулятора (БОЗА) визначається стан заряду, якщо він достатній для живлення освітлювальних приладів, то акумулятор підключається, якщо ні рекомендація НЛВ ігнорується.

#### 4.2.1 Фазифікація

Ядром НСКЗО є система НЛВ Мамдані. Від неї залежить якість керування електротехнічного комплексу ЗО. Тому приведемо логістику стадій розбудови цієї частини системи.

Фазифікація функцій приналежності до множин лінгвістичної змінної «освітленість» ( $E$ ) провадиться таким чином. Під час розробки НСКЗО недоцільно брати до уваги рівні освітленості, котрі відповідають ясному або похмурому дню. Так як у такому варіанті в застосуванні освітлювальних установок немає потреби. Включати ЗО потрібно з настанням сутінок. У [129] показані значення освітленості для різних часів доби. Сутінкам відповідає значення 10 лк, а дуже похмурому дню – 100 лк. Освітленість при якій потрібно освітлювати дороги повинно бути десь між цими двома значеннями, тому прийнято 50 лк. З іншого боку, освітленість може бути близькою до нуля, проте не може бути від'ємною. Отже обмежимо кінцеву множину  $E$  значеннями  $0 \leq e \leq 100$  лк. Виділимо тут чотири нечіткі множини: «дуже похмурий день», «нормована освітленість», «сутінки», «повний місяць». Середні значення для функцій приналежності до цих множин взяті з [129] і становлять 50, 20, 10, 0,267 лк, відповідно. Нормована освітленість для доріг прийнята за вимогами ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [130]. Графіки функцій приналежності (табл. 4.1) наведені на рис. 4.3 а.

Таблиця 4.1 – Функції приналежності до множин змінної «Освітленість»

Нечітка множина	Тип функції приналежності	Функція приналежності
«Похмурий день» (OD)	Сигмоїд	$MF_{OD}(x a=0,2,c=50) = \frac{1}{1 - \exp[-0,2(x-50)^2]}$
«Нормована освітленість» (NR)	Гаусс	$MF_{NR}(x \sigma=7,\hat{x}=20) = \exp\left[\frac{-(x-20)^2}{2 \cdot 7^2}\right]$
«Сутінки» (TW)	Гаусс	$MF_{TW}(x \sigma=7,\hat{x}=10) = \exp\left[\frac{-(x-10)^2}{2 \cdot 7^2}\right]$
«Повний місяць» (FM)	Гаусс	$MF_{FM}(x \sigma=7,\hat{x}=0,267) = \exp\left[\frac{-(x-0,267)^2}{2 \cdot 7^2}\right]$

Використовувати додатково значення освітленості з [129], а саме такі як-то «глибокі сутінки» (1 лк) або «зоряне сяйво» ( $2 \cdot 10^{-3}$  лк), недоцільно через практично повне співпадіння середніх значень функцій приналежності, що у розглянутих межах освітленості призводить до їх незначної відмінності та може викликати неоднозначність у встановленні приналежності результатів вимірювання до нечітких множин при НЛВ.

При керуванні освітленням потрібно враховувати наявність транспорту або людей в області дії освітлювальної установки. Достатньо поширеним є підхід, коли проводять індивідуальне керування світильниками, коли фіксується присутність об'єктів. Разом з тим, при такому підході можлива часта зміна рівня освітленості світлоточками через постійну появу або зникнення об'єктів. У випадку транспортної магістралі це може викликати зоровий дискомфорт, перенапруження водіїв та призвести до аварії.

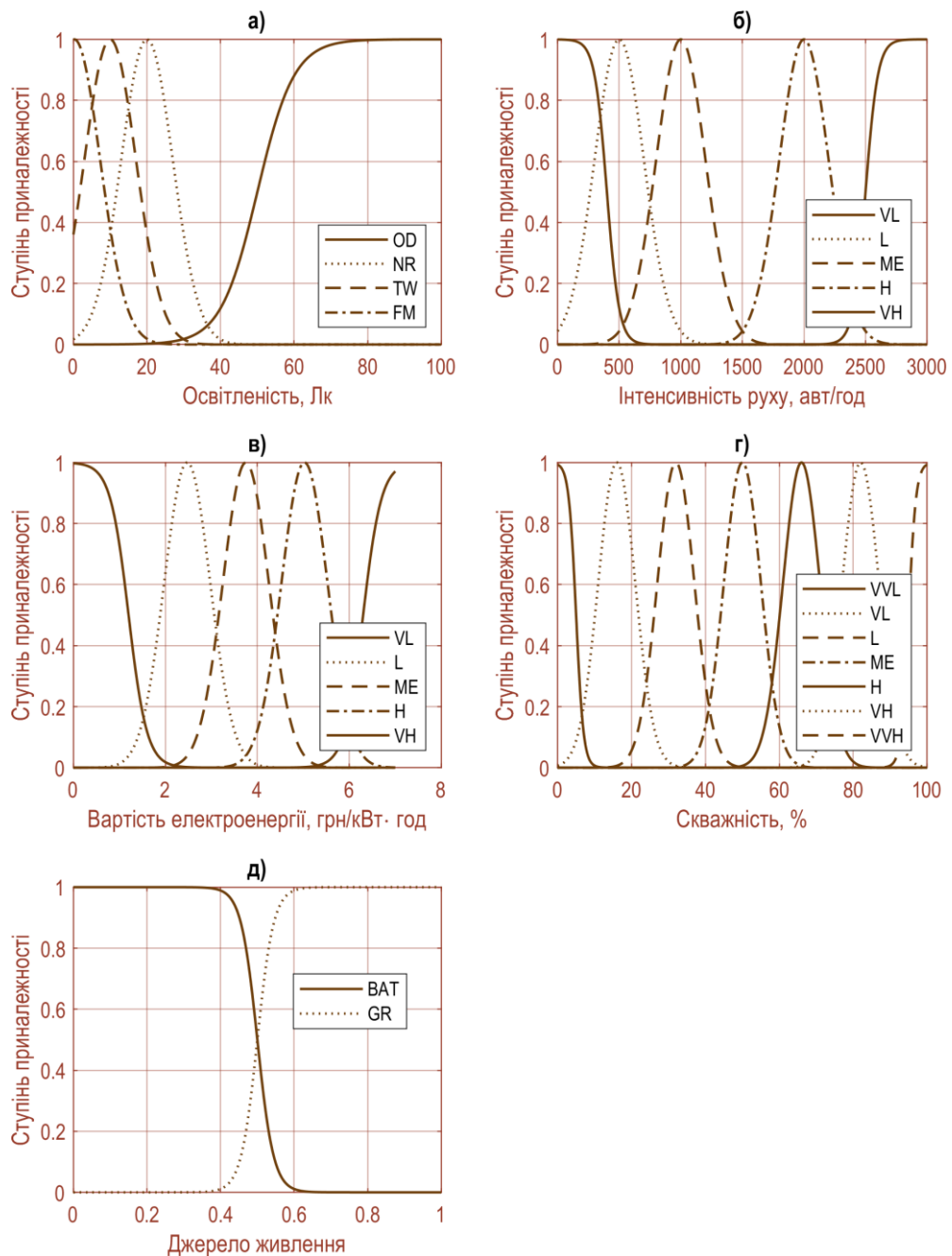


Рисунок 4.3 – Функції приналежності до множин змінних: а) «освітленість»; б) «інтенсивність руху автотранспорту»; в) «тариф на електричну енергію»; г) «шпаруватість ШІМ-контролера» д) «джерело живлення»

Тому більш доцільним буде використовувати як керуючу дію інтенсивність руху автотранспорту між двома світлофорами або двома перехрестями. Тобто проводити блочне керування освітлювальними установками. При фазифікації лінгвістичної змінної «інтенсивність руху автотранспорту»

(Т) скористаємося вимогами до освітлення вулиць і доріг із регулярним рухом з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [130]. Кінцеву множину Т обмежимо значеннями  $0 \leq t \leq 3000$  авто/годину. Вона буде описана п'ятьма нечіткими множинами: «дуже висока інтенсивність» (VL), «висока інтенсивність» (L), «середня інтенсивність» (ME), «низька інтенсивність» (H), «дуже низька інтенсивність» (VH). Їх середні значення становлять 400, 500, 1000, 2000, 2500 авто/годину. Графіки функцій приналежності (табл. 4.2) наведені рис. 4.3 б.

Таблиця 4.2 – Функції приналежності до множин змінної «Інтенсивність руху автотранспорту»

Нечітка множина	Тип функції приналежності	Функція приналежності
«Дуже низька» (VL)	Сигмоїд	$MF_{VL}(x a = -0,02, c = 400) = \frac{1}{1 - \exp[-(-0,02)(x - 400)^2]}$
«Низька» (L)	Гаусс	$MF_L(x \sigma = 200, \hat{x} = 500) = \exp\left[\frac{-(x - 500)^2}{2 \cdot 200^2}\right]$
«Середня» (ME)	Гаусс	$MF_{ME}(x \sigma = 200, \hat{x} = 1000) = \exp\left[\frac{-(x - 1000)^2}{2 \cdot 200^2}\right]$
«Висока» (H)	Гаусс	$MF_H(x \sigma = 200, \hat{x} = 2000) = \exp\left[\frac{-(x - 2000)^2}{2 \cdot 200^2}\right]$
«Дуже висока» (VH)	Сигмоїд	$MF_{VH}(x a = 0,02, c = 2500) = \frac{1}{1 - \exp[-0,02(x - 2500)^2]}$

Для фазифікації лінгвістичної змінної «тариф на електричну енергію» проаналізуємо сучасний стан питання розрахунків між електропостачальними компаніями та споживачами. На сьогодні діє система погодинної

зміни тарифу на електричну енергію. Підприємство попередньо за добу робить замовлення на обсяг потужностей, які протягом наступного дня будуть споживатися. Це відрізняється від того, як розрахунки проводились раніше. Тоді тарифи хоча і були диференційованими за періодами доби, але практично не змінювалися день від дня. Тільки в моменти їх перегляду. Розглянувши дані про тарифи на електричну енергію виділяються різні рівні, як-то коли він дуже високий, високий, середній, низький або дуже низький. Тому лінгвістичну змінну «тариф на електричну енергію» опишемо п'ятьма аналогічними нечіткими множинами з середніми значеннями 1,2, 2,475, 3,75, 5,025 і 6,3 грн/кВт·год. Сама її кінцева множина вона буде обмежена значеннями  $0 \leq p \leq 7$  грн/кВт·год. Графіки функцій приналежності (табл. 4.3) наведені рис. 4.3, в.

Таблиця 4.3 – Функції приналежності до множин змінної «Тариф на електричну енергію»

Нечітка множина	Тип функції приналежності	Функція приналежності
«Дуже низький тариф» (VL)	Сигмоїд	$MF_{VL}(x a = -5, c = 1,2) = \frac{1}{1 - \exp[-(-5)(x - 1,2)^2]}$
«Низький тариф» (L)	Гаусс	$MF_L(x \sigma = 0,5, \hat{x} = 2,475) = \exp\left[\frac{-(x - 2,475)^2}{2 \cdot 0,5^2}\right]$
«Середній тариф» (ME)	Гаусс	$MF_{ME}(x \sigma = 0,5, \hat{x} = 3,75) = \exp\left[\frac{-(x - 3,75)^2}{2 \cdot 0,5^2}\right]$
«Високий тариф» (H)	Гаусс	$MF_H(x \sigma = 0,5, \hat{x} = 5,025) = \exp\left[\frac{-(x - 5,025)^2}{2 \cdot 0,5^2}\right]$
«Дуже високий тариф» (VH)	Сигмоїд	$MF_{VH}(x a = 5, c = 6,3) = \frac{1}{1 - \exp[-5(x - 6,3)^2]}$

Шпаруватість ШІМ може змінюватися від 0 до 100 %, тобто від значення, котрі відповідають з одного боку відсутності напруги, з іншого максимально можливому рівню напруги, тому кінцеву множину **D** для такої вихідної лінгвістичної змінної обмежимо так:  $0 \leq d \leq 100\%$ . Для більш точного регулювання освітленості лінгвістична змінна «шпаруватість ШІМ-контролера» під час фазифікації буде описана сімома нечіткими множинами: «дуже-дуже низька» (VVL), «дуже низька» (VL), «низька» (L), «середня» (ME), «висока» (H), «дуже висока» (VH), «дуже-дуже висока» (VVH). Графіки функцій приналежності (табл. 4.4) наведені на рис. 4.3, г.

Таблиця 4.4 – Функції приналежності до множин змінної «Шпаруватість ШІМ-контролера»

Нечітка множина	Тип функції приналежності	Функція приналежності
«Дуже-дуже низька» (VVL)	Сигмоїд	$MF_{VVL}(x a = -1, c = 5) = \frac{1}{1 - \exp[-(-1)(x - 5)^2]}$
«Дуже низька» (VL)	Гаусс	$MF_L(x \sigma = 5, \hat{x} = 16) = \exp\left[\frac{-(x - 16)^2}{2 \cdot 5^2}\right]$
«Низька» (L)	Гаусс	$MF_L(x \sigma = 5, \hat{x} = 32) = \exp\left[\frac{-(x - 32)^2}{2 \cdot 5^2}\right]$
«Середня» (ME)	Гаусс	$MF_{ME}(x \sigma = 5, \hat{x} = 50) = \exp\left[\frac{-(x - 50)^2}{2 \cdot 5^2}\right]$
«Висока» (H)	Гаусс	$MF_H(x \sigma = 5, \hat{x} = 66) = \exp\left[\frac{-(x - 66)^2}{2 \cdot 5^2}\right]$
«Дуже висока» (VH)	Гаусс	$MF_L(x \sigma = 5, \hat{x} = 82) = \exp\left[\frac{-(x - 82)^2}{2 \cdot 5^2}\right]$
«Дуже-дуже висока» (VVH)	Сигмоїд	$MF_{VH}(x a = 1, c = 95) = \frac{1}{1 - \exp[-1(x - 95)^2]}$

Усі функції з табл. 4.4 є функціями гладкими. Середні значення для

них становлять 5, 16, 32, 50, 66, 82 і 95 %, відповідно.

Лінгвістична змінна «джерело живлення» містить тільки дві нечіткі множини – «електрична мережа» і «акумулятор». У принципі, для цей вихід системи описується чіткою логікою – або жити від акумуляторної батареї, або ні. Проте для того, щоб не гібридизувати НЛВ також її фазифікуємо. Кінцеву множину  $S$  обмежимо значеннями  $0 \leq s \leq 1$ . Параметри функцій (табл. 4.5) підібрані таким чином (див. рис. 4.3 д), щоб гладкі функції приналежності були максимально подібні до чіткого логічного представлення. Значення 0,5 є своєрідним пороговим значенням в такому випадку. Якщо НЛВ Мамдані встановлює на виході число, що вище або дорівнює 0,5, то живлення здійснюється від електромережі міста, якщо менше – то від акумулятора.

Таблиця 4.5 – Функції приналежності до множин змінної «Джерело живлення»

Нечітка мно- жина	Тип функції приналежно- сті	Функція приналежності
«Акумулятор» (BAT)	Сигмоїд	$MF_{BAT}(x a = -45, c = 0,5) =$ $= \frac{1}{1 - \exp[-(-45)(x - 0,5)^2]}$
«Електрична мережа» (GR)	Сигмоїд	$MF_{VH}(x a = 0,5, c = 45) =$ $= \frac{1}{1 - \exp[-0,5(x - 45)^2]}$

#### 4.2.2 База правил

Для функціонування математичної моделі НЛВ необхідно сформулювати експертну базу знань нечітких правил, яка містить лінгвістичні правила-залежності у вигляді [128]:

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j}\theta_j, x_2 = \tilde{a}_{1j}\theta_j \dots \theta_j x_n = \tilde{a}_{nj}) \Rightarrow Y = d_j, j = 1, m, \quad (4.1),$$

де  $\tilde{a}_{lj}$  – нечітка множина, якою оцінюється змінна  $x_i$  в  $j$ -му правилі;  
 $\theta_j$  – логічна операція, що пов'язує фрагменти  $j$ -го правила;  
 $m$  – кількість правил у базі.

Розглянемо принципи створення бази правил НСКЗО.

Головною якісною характеристикою системи ЗО є рівень освітленості певної частини вулиці, дорожнього покриття тощо. Тобто основною лінгвістичною змінною по якій буде наповнюватися база правил буде саме «освітленість». Зростання пріоритетності правил відбуватиметься зі зменшенням величини освітленості, тобто від нечіткої множини «похмурий день» до нечіткої множини «повний місяць». При чому найвагомішими будуть правила для множини «повний місяць», так як при ній ЗО виконує свою мету роботи. Для множини «похмурий день» визначена відповідність нечіткій множині «дуже дуже низька» лінгвістичної змінної «шпаруватість ШІМ-контролера» без врахування інтенсивності руху автотранспорту і тарифу на електроенергію. Цей блок правил показаний нижче.

**IF**  $u_1 = i_{VOD}$  **AND** ( $u_2 = t_{VL}$  **OR**  $u_2 = t_L$  **OR**  $u_2 = t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH}$ ) ...  
**AND**  $u_3 = p_{VL}$  **THEN**  $y_1 = d_{VVL}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$

**IF**  $u_1 = i_{VOD}$  **AND** ( $u_2 = t_{VL}$  **OR**  $u_2 = t_L$  **OR**  $u_2 = t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH}$ ) ...  
**AND**  $u_3 = p_L$  **THEN**  $y_1 = d_{VVL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

**IF**  $u_1 = i_{VOD}$  **AND** ( $u_2 = t_{VL}$  **OR**  $u_2 = t_L$  **OR**  $u_2 = t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH}$ ) ...  
**AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_{VVL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

**IF**  $u_1 = i_{VOD}$  **AND** ( $u_2 = t_{VL}$  **OR**  $u_2 = t_L$  **OR**  $u_2 = t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH}$ ) ...  
**AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_{VVL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

**IF**  $u_1 = i_{VOD}$  **AND** ( $u_2 = t_{VL}$  **OR**  $u_2 = t_L$  **OR**  $u_2 = t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH}$ ) ...  
**AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{VVL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

Для нечітких множин «нормована освітленість», «сутінки», «повний місяць» значення по іншим входам системи вже береться до уваги. Значення «шпаруватості ШІМ-контролера» змінюється з «дуже низької» при «нормованій освітленості» до «дуже дуже високої» при «повному місяці». При чому чим вище інтенсивність руху автотранспорту тим вища яскравість



освітлювального приладу досягається. Проте, коли лінгвістична змінна «тариф на електричну енергію» належить до нечітких множин «високий» і «дуже високий», то застосовуються або попередня, або поза попередня до максимально застосованої при поточній освітленості нечіткі множини змінної «шпаруватість ШІМ-контролера».

НЛВ про вибір джерела живлення проводиться на основі оцінки тарифу на електроенергію, коли вона середня, висока і дуже висока, то дається рекомендація на підключення акумулятора, коли низька і дуже низька – на живлення від електромережі міста.

**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND** ( $u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L$ ) **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_{VL}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{VVL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND** ( $u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L$ ) **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{VL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND** ( $u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L$ ) **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_H$  **AND** ( $u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L$ ) **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_H$  **AND** ( $u_3 = p_{MD}$  **OR**  $u_3 = p_H$ ) **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_H$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VH}$  **AND** ( $u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L$ ) **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VH}$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VH}$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{NR}$  **AND**  $u_2 = t_{VH}$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

При прийнятті рішення про джерело живлення береться до уваги НЛВ НСКЗО, проте підключення акумуляторної батареї здійснюється за умови наявності достатнього рівня заряду. Тобто нечітка логіка поєднується з класичною. Якщо рівень освітленості й інтенсивність руху низькі, то потужність освітлювального пристрою залишаємо низькою.

**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $(u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_{VL}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{VL}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $(u_2 = t_L$  **OR**  $u_2 = t_{MD})$  **AND**  $(u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = (t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H)$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = (t_{MD}$  **OR**  $u_2 = t_H)$  **AND**  $u_3 = p_H$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{TW}$  **AND**  $(u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH})$  **AND**  $(u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

Завжди при високій освітленості дорожнього покриття, котра відповідає дуже похмурому дню, тобто від 50 лк і більше, шпаруватість ШІМ дуже низька. Тариф на електроенергію та інтенсивність руху автотранспорту тут до уваги не беруться, тому що згідно норм [130] освітленість має бути 20 лк або нижче. Також враховуючи низький рівень енергоспоживання освітлювальним приладом у цьому випадку живлення може здійснюватися від акумулятора і тільки коли вартість електроенергії дуже низька можна переключитися на мережу.

При низькому рівні освітленості «повний місяць» і трафіку вище середнього, якщо є можливість жити освітлювальний пристрій від акумуляторної батареї то це потрібно робити, так як у цьому випадку буде найвище енергоспоживання і тому жити від електромережі недоцільно через високі витрати на покупку електроенергії.

Від мережі живлення відбувається коли середня вартість електроенергії. Якщо вартість електроенергії або електропоживання високі тоді доцільно вводити в дію акумулятори.

**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $(u_2 = t_{VL}$  **OR**  $u_2 = t_L)$  **AND**  $u_3 = p_{VL}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $(u_3 = p_L$  **OR**  $u_3 = p_{MD})$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{VL}$  **AND**  $(u_3 = p_H$  **OR**  $u_3 = p_{VH})$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_L$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{GR}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $(u_3 = p_{MD}$  **OR**  $u_3 = p_H)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_L$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_L$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_{VL}$  **THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_L$  **THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $(u_3 = p_{MD}$  **OR**  $u_3 = p_H)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{MD}$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_{MD}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $(u_2 = t_H$  **OR**  $u_2 = t_{VH})$  **AND**  $(u_3 = p_{VL}$  **OR**  $u_3 = p_L)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_H$  **AND**  $(u_3 = p_{MD}$  **OR**  $u_3 = p_H)$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_H$  **AND**  $u_3 = p_{VH}$  **THEN**  $y_1 = d_H$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{VH}$  **AND**  $u_3 = p_{MD}$  **THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$   
**IF**  $u_1 = i_{FM}$  **AND**  $u_2 = t_{VH}$  **AND**  $(u_3 = p_H$  **OR**  $u_3 = p_{VH})$  ...  
**THEN**  $y_1 = d_{VH}$  **AND**  $y_2 = s_{BAT}$

Вихідні поверхні для НЛВ Мамдані наведені на рис. 4.4.

Для оцінки енергоефективності нечіткого керування ЗО потрібно змоделювати роботу створеної системи. Здійснимо генерування тестових сигналів, які будуть відповідати фактичним умовам роботи.

Вхідний тестовий сигнал за освітленістю складається з трьох частин. Перша і третя частини відповідають природнім сутінкам, котрі настають під час заходу або сходу сонця. Ці дві ділянки мають експоненціальні форми.

Вночі освітленість дорівнює 20 лк, що відповідає нормованому значенню штучного ЗО для дорожніх покриттів. Зміна освітленості покриття, наприклад, від світла фар автомобілів, імітується додаванням випадкової величини, як описано нижче.

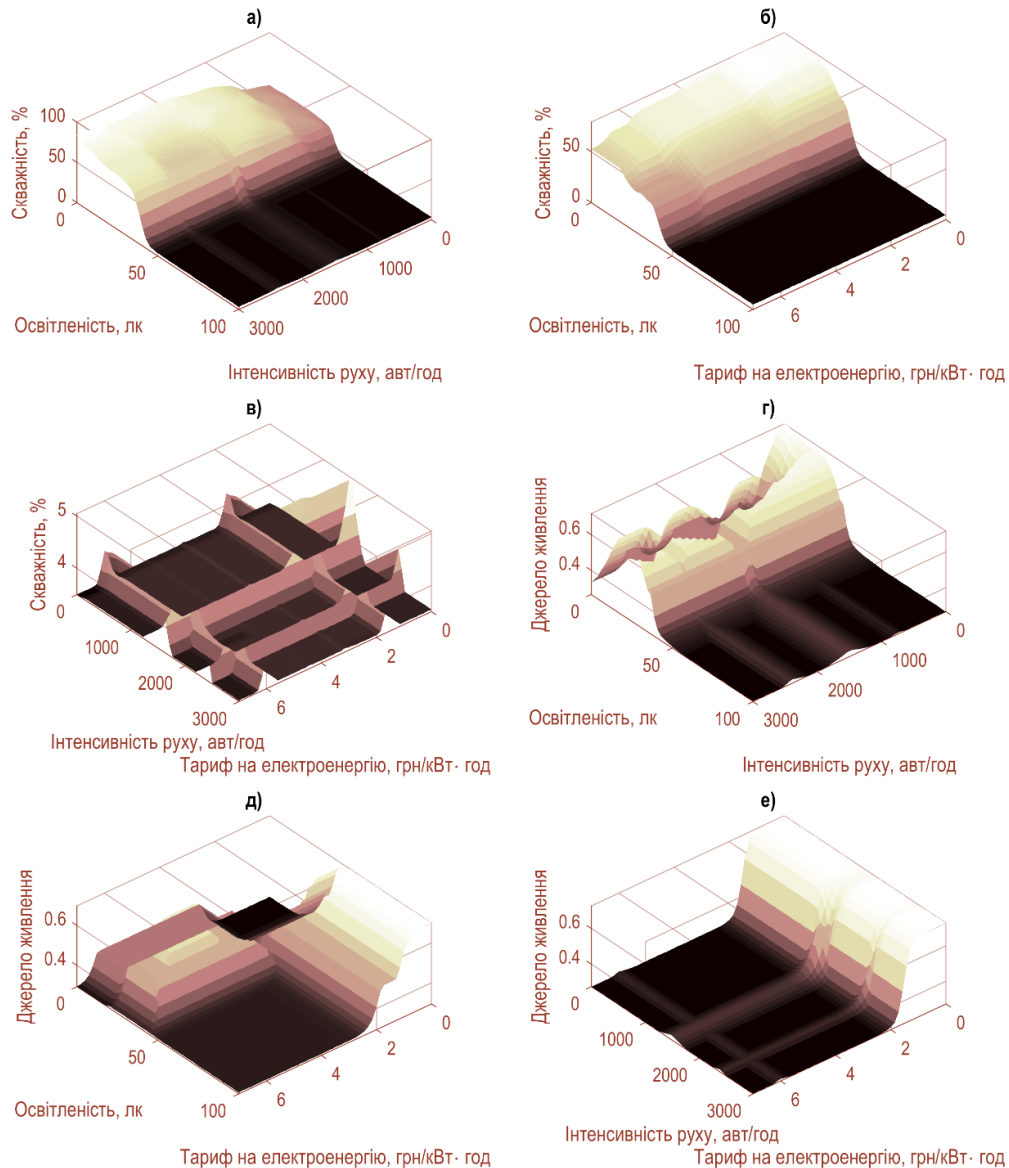


Рисунок 4.4 – Вихідні поверхні системи НЛВ Мамдані

### 4.3 Умови проведення моделювання системи керування зовнішнім освітленням

Для генерації основної форми сигналу в літню та зимову пори року взяті дані по схід і захід сонця за періоди 14.01.2024 – 15.01.2024 і 14.07.2024 – 15.07.2024. 15.01.2024 сутінки починаються о 16.55 і тривають до настання ночі о 17.34, тобто 39 хвилин. Сама ніч триває до 06.19, тобто 765 хвилину.

Потім починається світанок, який триває 38 хвилин до повного сходу сонця о 06.57. 15.01.2024 сутінки починаються о 21.21 і тривають до настання ночі о 22.14, тобто 52 хвилини. Сама ніч триває до 03.32, тобто 318 хвилину. Потім починається світанок, який триває 53 хвилини до повного сходу сонця о 04.25. До основного сигналу додається випадкова величина зі стандартним відхиленням 20 лк, яка змінює значення на кожному системному дискретному відліку. Мінімальне значення сумарного сигналу обмежується 0 лк, так як освітленість негативною бути не може. Приклади вхідних сигналів для зимового часу наведені на рис. 4.5, а (дискретний крок 5 хв) і рис. 4.6, а (дискретний крок 10 хв), для літнього – на рис. 4.7, а (дискретний крок 5 хв) і рис. 4.8, а (дискретний крок 10 хв).

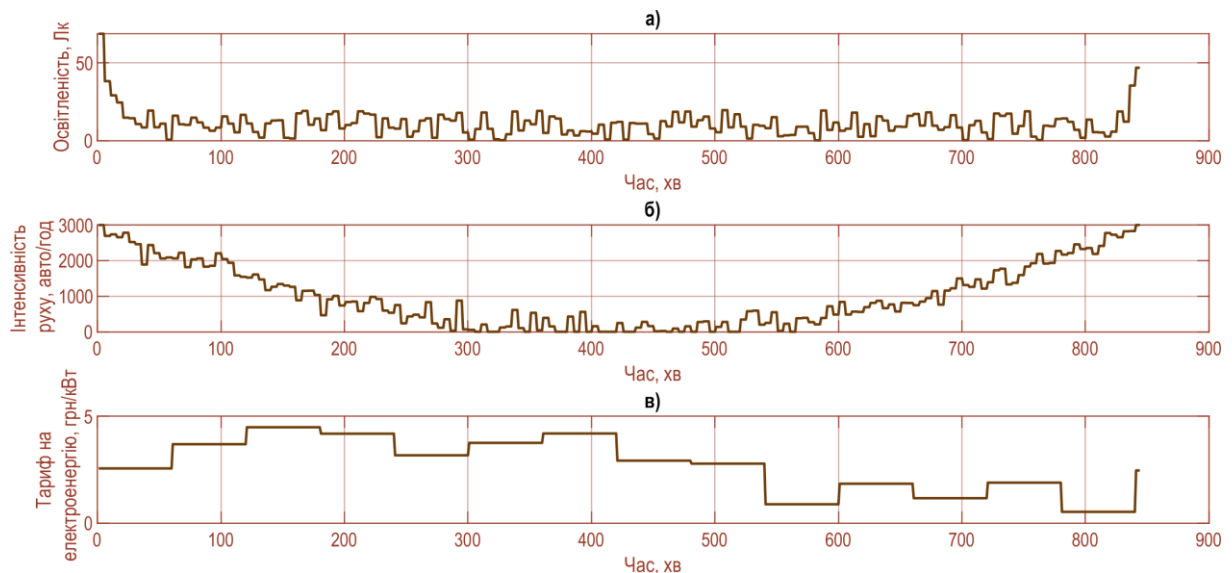


Рисунок 4.5 – Тестові сигнали для моделювання роботи НСКЗО у зимову ніч (дискретний крок 5 хв)

Як показують дослідження [27, 131–134] у нічний період доби дорожній трафік являє собою опуклу функцію. Приблизно о 19-20 годині кількість автотранспорту на дорогах починає знижуватись і досягає мінімуму десь в середині ночі, а потім збільшується до 6-8 години. Це пов'язано з необхідністю ввечері та зранку добиратися з роботи додому і навпаки, а також відсутністю робочих переїздів у нічний час. Така залежність спостерігається

для доріг у різних містах і країнах. При цьому графіки інтенсивності руху автотранспорту не демонструють сезонного характеру. І це очікувано, так як дорожній рух прямо корелює з робочими годинами [132], а вони завжди постійні не дивлячись на зиму або літо. Інтенсивність трафіку буде мати більший вплив на роботу системи у тих сезонах, коли тривалість ночі більша, тому що в цьому випадку буде охоплювати як періоди з високою так і низькою інтенсивністю руху. У інший час, особливо влітку, освітлення буде більше працювати в час з низькою інтенсивністю руху. Для моделювання вхідного сигналу за автотрафіком використовуємо параболічну залежність [134] до якої додаємо випадкові величини. Приклади вхідних сигналів для зимового часу наведені на рис. 4.5, б (дискретний крок 5 хв) і рис. 4.6, б (дискретний крок 10 хв), для літнього – на рис. 4.7, б (дискретний крок 5 хв) і рис. 4.8, б (дискретний крок 10 хв).

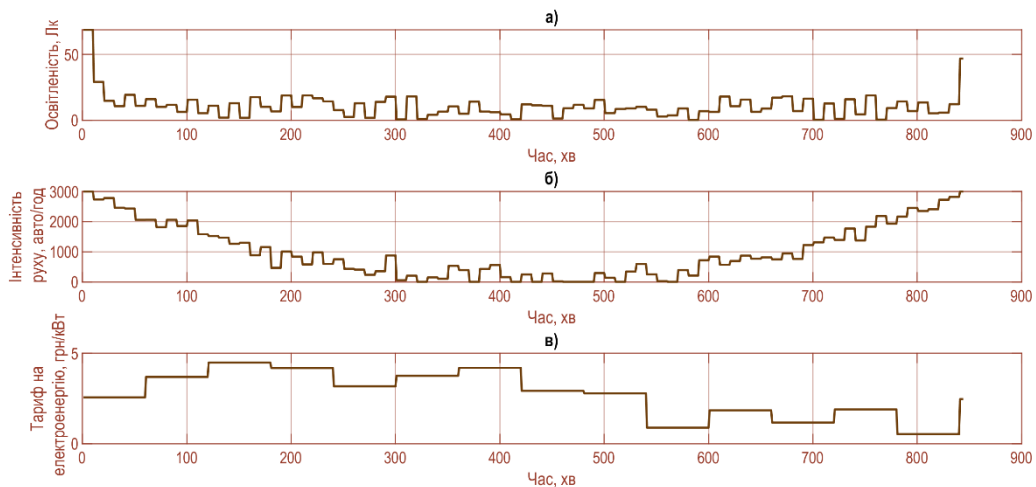


Рисунок 4.6 – Тестові сигнали для моделювання роботи НСКЗО у зимову ніч (дискретний крок 10 хв)

Вхідний тестовий сигнал за тарифом на електричну енергію генеруємо беручи за основу ринкові дані до яких додаємо випадкову величину розподілену за нормальним законом зі стандартним відхиленням 0,5 грн/кВт·год. Для аналізу роботи ЗО в зимовий період взято дані про тарифи з 17:00 14.02.2024 по 08:00 15.02.2024, в літній період – з 21:00 17.04.2024

по 08:00 18.04.2024. У останньому варіанті взята інформація за квітень 2024, так як брати за 2023 вже не дуже актуально, а реальні тарифи для дати 15.07.2024 на момент виконання дослідження ще не відома. Приклади вхідних сигналів для зимового часу наведені на рис. 4.5, в (дискретний крок 5 хв) і рис. 4.6, в (дискретний крок 10 хв), для літнього – на рис. 4.7, в (дискретний крок 5 хв) і рис. 4.8, в (дискретний крок 10 хв).

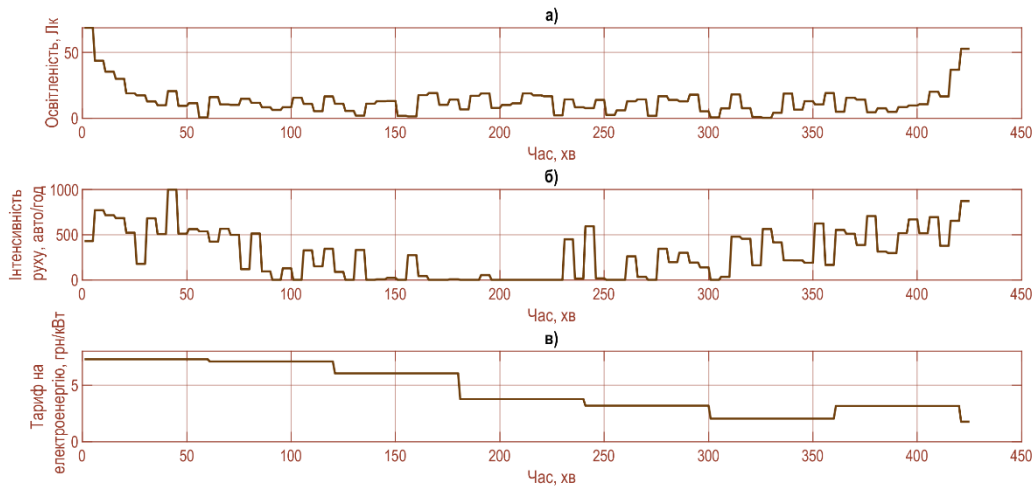


Рисунок 4.7 – Тестові сигнали для моделювання роботи НСКЗО у літню ніч (дискретний крок 5 хв)

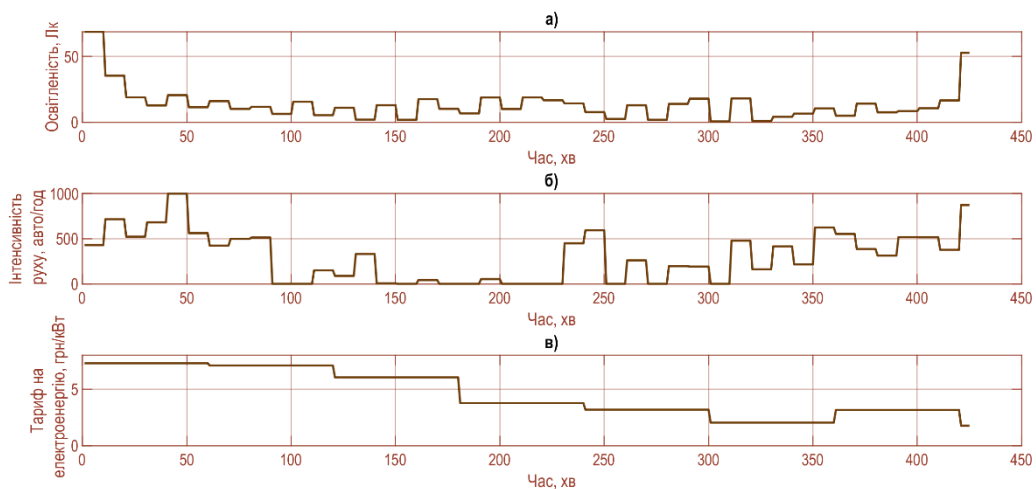


Рисунок 4.8 – Тестові сигнали для моделювання роботи НСКЗО у літню ніч (дискретний крок 10 хв)

#### 4.4 Моделювання системи керування зовнішнім освітленням

У зимовий час споживання електроенергії в системі без керування обчислюється за графіком роботи ЗО в місті Кривий Ріг. Тобто з урахуванням того, що з моменту заходу сонця і до 23.00 та після 05.00 і до повного світанку освітлення працює на повну потужність, а між 23.00 і 05.00 освітлювальні установки або споживають 50% від загальної потужності, або освітлювальна мережа не працює. Для літнього часу прийнято, що зважаючи на те, що початкова стадія сутінок починається вже о 02.19 (дані за 15.07.2024) і повністю світає вже о 04.25, час відключення ЗО становить 3 години: з 23.00 по 02.00, так як до 05.00 потреби в ЗО вже немає. Аналізуємо два випадки роботи освітлення без керування у нічний час: освітлювальні установки споживають 50% від загальної потужності; освітлювальна мережа не працює.

Обчислення електроспоживання при залученні НСКЗО провадилося для декількох варіантів налаштування дискретного кроку (5 і 10 хвилин) між вимірюваннями освітленості та інтенсивністю руху автомобільного транспорту і джерел живлення освітлювальних установок (тільки від електромережі та від електромережі або акумулятора). Прийнято, що акумулятор має достатній заряд для живлення освітлювальної установки протягом того часу, коли НСКЗО рекомендує отримувати енергію від неї. У реальному випадку це, звісно, не так, але для оцінки енергоефективності цього достатньо.

Проаналізуємо результати моделювання роботи НСКЗО для літньої та зимової ночі і десятих LED-світильників, наведені у табл. 4.6. Графіки роботи системи НЛВ Мамдані взимку і влітку показані на рис. 4.9 – 4.12.



Таблиця 4.6 – Результати моделювання роботи НСКЗО

Крок, хв	Конфігурація системи	Споживання електрое- нергії, Вт·год	
		Взимку	Влітку
-	Без керування / 50% потужності	11033.3	5533.33
	Без керування / Відключено	8033.33	4033.33
10	Нечітка система керування з живленням від електромережі	7959.55	2613.57
5	Нечітка система керування з живленням від електромережі	7936.19	2571.66
10	Нечітка система керування з живленням від електромережі /акумулятора	2162.34	1365.95
5	Нечітка система керування з живленням від електромережі /акумулятора	2462.89	1387.04

Як і очікувалося електропостачання освітлювальних установок від двох джерел живлення зменшує споживання електричної енергії більш значно. Так, у зимову ніч при живленні тільки від електромережі споживання скорочується на 0.92% і 1.21%, для дискретних кроків 10 і 5 хвилин, якщо співставляти з системою без керування коли освітлювальна мережа відключається на 6 годин, якщо ж вночі протягом 6 годин споживається тільки 50% потужності освітлювальними установками, то ці відсотки дорівнюють 27.85% і 28.07%. Якщо дивитися на живлення від електромережі або акумулятора, то має місце скорочення на 73.08% і 69.34% та на 80.4% і 77.68%, відповідно. Для літньої ночі ситуація така сама. Живлення керованої системи тільки від електромережі дає скорочення споживання на 35.2% і 36.24%, якщо співставляти з системою без керування і відключенням освітлювальної мережі на 3 години, якщо співставляти з 50% споживанням потужності, то на 52.77% і 53.52%. Якщо дивитися на живлення від електромережі або акумулятора, то має місце скорочення на 66.13% і 65.61% та на 75.31% і 74.93%, відповідно.

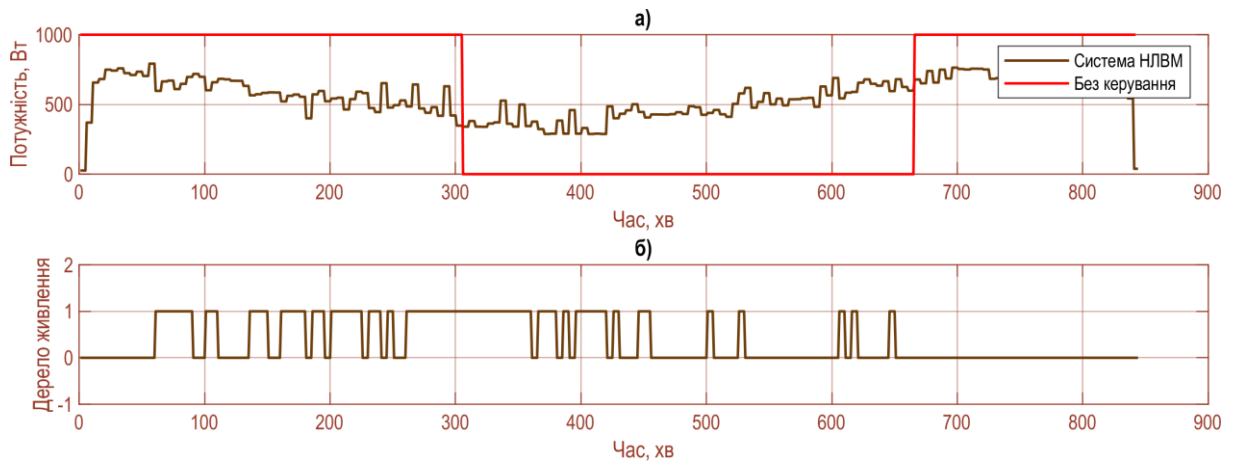


Рисунок 4.9 – Моделювання НСКЗО з 10 LED-світильниками у зимову ніч (крок 5 хв)

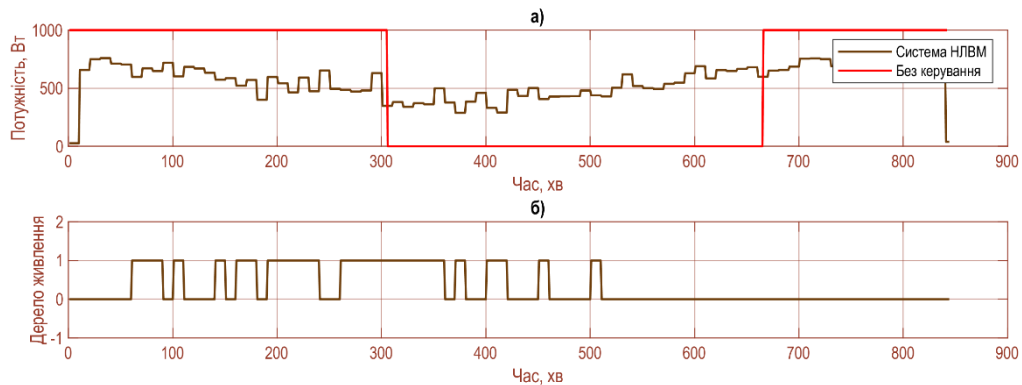


Рисунок 4.10 – Моделювання НСКЗО з 10 LED-світильниками у зимову ніч (крок 10 хв)

Звернемо увагу на те, що скорочення споживання електроенергії в зимову ніч, в системі з нечітким керуванням і живленням тільки від електромережі не дуже велике, якщо співставляти з системою без керування і повним відключенням ЗО, тобто тільки 0,92% або 1,21% залежно від дискретного кроку. Це зумовлюється більшим часом нульового енергоспоживання освітлювальними приладами взимку ніж влітку. Проте економія невелика, але вона є, і тому сама система може використовуватися.

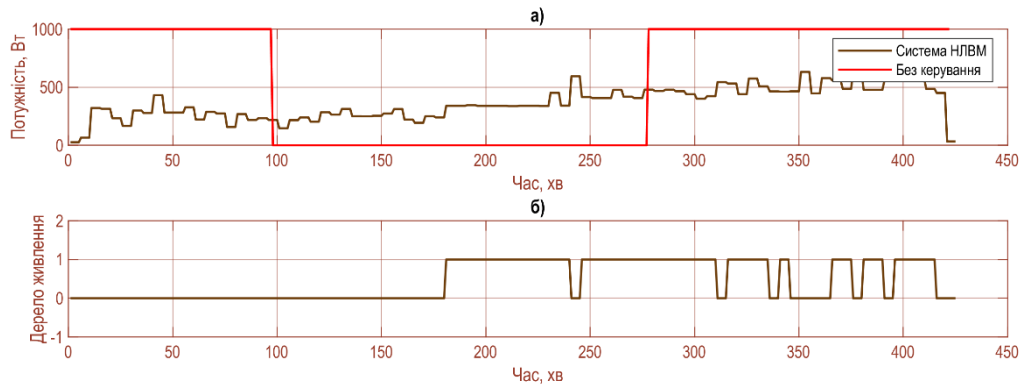


Рисунок 4.11 – Моделювання НСКЗО з 10 LED-світильниками у літню ніч  
(крок 5 хв)

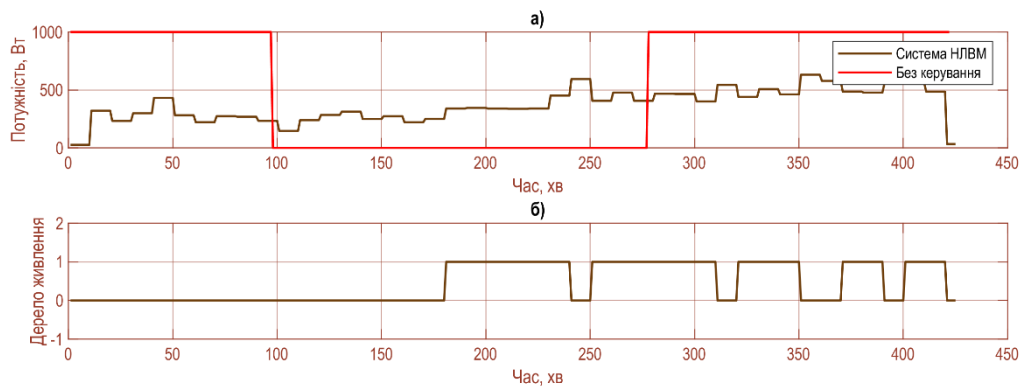


Рисунок 4.12 – Моделювання НСКЗО з 10 LED-світильниками у літню ніч  
(крок 5 хв)

Дискретний крок практично не має впливу, у більшій частині змодельованих варіантів роботи НСКЗО, на споживання електроенергії. Так, наприклад, при живленні тільки від електромережі різниця становить тільки 0,29% для освітлення в зимову ніч та 1,04% в літню. При живленні від акумулятора або електромережі для літньої ночі різниця для різних дискретних кроків становила тільки 0,52%. Тільки, коли було розглянуто живлення від акумулятора або електромережі для зимової ночі, різниця між налаштуваннями дискретного кроку 5 і 10 хвилин була значнішою – 3,72%. Це дані якщо порівнювати розглянуті системи з системою без керування і нульовим споживанням освітлювальною мережею протягом 6 годин ночі. Для системи без керування з 50% споживанням вночі відсотки не дуже різняться. Така

ситуація виникає, тому що за такі кроки освітленість та інтенсивність руху автотранспорту дуже кардинально не міняється.

Можна підсумувати, що НСКЗО є енергоефективною. Також рекомендується спеціалізованим підприємствам населених пунктів, у сфері відповідальності яких знаходиться освітлювальна мережа, більше уваги приділяти не тільки заміні джерел світла на нові більш енергоефективні, а й впровадженню альтернативних джерел живлення освітлювальних установок, котрі дозволяють заряджати акумулятори в світлий час, як-то, наприклад, сонячних панелей. Це, разом з залученням розглянутої НСКЗО, дасть можливість ще більше зекономити на витратах на електроенергію, що дуже актуально в сучасних умовах.

#### **4.5 Висновки до розділу 4**

1. Вдосконалена нечітка систему керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення міст і населених пунктів, окрім рівня освітленості (як основної величини) та інтенсивності руху автотранспорту, враховує також тариф на електричну енергію при генерації величини керуючої дії за напругою або струмом (залежно від типу LED-драйвера). Також система надає рекомендацію щодо вибору джерела живлення для освітлювальної установки, якщо також можливе підключення до акумулятора.

2. Моделювання системи нечіткого керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення, котре здійснено на прикладі частини дороги, що освітлюється десятьма LED-світильниками потужністю 100 Вт для літньої та зимової ночі з різними дискретними кроками керування, підтверджує можливість досягнення ефективності зовнішнього освітлення при застосуванні пропонуємого варіанту керуваності.

3. Ефективнішою є керована система з комбінованим живленням. Вона дозволяє знизити споживання електроенергії в літню ніч на 75,31% і

74,93%, в зимову – на 80,4% і 77,68% якщо співставляти зі звичайним варіантом зовнішнього освітлення, коли освітлювальна мережа на ніч або відключається повністю, або працює тільки на 50% потужності, відповідно. При живленні тільки від електромережі споживання знижується в літню ніч на 28,07% і 1,21%, в зимову – на 53,52% і 36,24%.

4. Дискретний крок практично не має впливу на енергоефективність нечіткої системи керування зовнішнім освітлення. При живленні тільки від електромережі різниця дорівнює 0,29% для освітлення в зимову ніч та 1,04% в літню між двома дискретними кроками 5 і 10 хвилин. При живленні від накопичувача енергії (акумулятора) або електромережі для літньої ночі різниця для різних дискретних кроків дорівнювала тільки 0,52%.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання з теоретичного обґрунтування та розбудови методів пошуку, оцінювання та розробки сучасних енергоорієнтованих шляхів підвищення технологічної і електроенергетичної ефективності, надійності та безперебійності мереж зовнішнього освітлення міст і населених пунктів як у штатних, так і в екстремальних режимах їх функціонування. В результаті виконання дисертаційної роботи отримано наступні узагальнюючі наукові висновки:

1. Існуючі структури та режими функціонування електричних мереж зовнішнього освітлення міст і населених пунктів України в сучасному баченні необхідних рівнів досяжності функціонування являють собою зразки електроенергетичних систем із недостатньою електроенергоефективністю та низьким рівнем надійності як у тривіальних режимах їх функціонування, так, що особливо актуально, – у діючих на часі в державі умовах.

2. Формалізовані, за результатами проведеного аналізу та оцінювання варіантів структур потенційно ефективних комплексів зовнішнього освітлення, напрямки досліджень і підходи до форматування алгоритмів ефективного керування ними дають можливість визначити основні шляхи розбудови варіантів енергоспрямованих, технологічно достатніх і досяжно ефективних освітлювальних систем з витриманням належного рівня мегакомфарту для мешканців міст і населених пунктів.

3. Обґрунтовано і покращено, у порівнянні з перфектними та існуючими зразками систем керування зовнішнім освітленням, нове бачення у вирішенні проблеми, котра аналізується шляхом розробки концепції, яка базується на теорії розбудови синергетичних електроенергетичних систем, що дозволяє отримати новий значимий позитивний результат у сфері енергоефективності, надійності та безперебійності живлення електричних мереж

зовнішнього освітлення міст і населених пунктів як у варіативності штатних, так і нештатних режимах їх функціонування.

4. Аналітично визначені фактори впливу на ефективність функціонування електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення, основними з яких визнано рівень освітленості в функції активності руху пішоходів і транспорту, що сприяє розробці формату вхідних і вихідних параметрів для створення енергоефективної інтелектуальної системи керування зовнішнім освітленням з прийняттям адаптивних управлінських рішень.

5. Теоретично обгрунтовані та запропоновані для інтеграції до системи електропостачання комплексів зовнішнього освітлення населених пунктів варіант з джерелом розосередженої генерації, що дасть можливість забезпечити підвищення надійності та ефективності функціонування електротехнічних систем, що аналізуються в цілому.

6. Запропонована та апробована модель керування світловим потоком зовнішнього освітлення, котра передбачає моніторинг і контроль рівня освітлення контрольованих ділянок з послідуною адаптивністю визначення та передачі управляючих команд, сприяє інтелектуалізації системи керування зовнішнім освітлювальним комплексом і водночас створить умови для інтеграції системи Micro Smart і Grid Smart City в процес функціонування відповідної автоматизованої системи керування.

7. Запропонований, обгрунтований і рекомендований для реалізації агрегативний підхід до побудови інтелектуальних електротехнічних комплексів зовнішнього освітлення населених пунктів, які можуть і будуть забезпечувати роботу освітлювальних мереж, на основі застосування нечіткого логічного виводу в керуванні роботою освітлювальних пристроїв дозволить адаптивно керувати процесом регулювання рівнем випроміненого освітлення та споживанням електроенергії. Це дозволить забезпечити безпечні умови дорожнього руху, а також безпеку пішоходів, що значно поліпшить архітектурну, туристичну і комерційну привабливість міст України.

8. Вдосконалено відомі варіанти і рекомендовано для практичної реалізації новий формат нечіткої системи керування електротехнічним комплексом зовнішнього освітлення міст і населених пунктів, яка базується на інформації про освітленість, інтенсивність руху автотранспорту та тариф на електричну енергію, шляхом нечіткого логічного виводу визначає рекомендовані керуючі сигнали за шпаруватістю широтно-імпульсної модуляції для драйвера освітлювального приладу та джерелом живлення освітлювальної установки.

9. Моделювання нечіткої системи керування зовнішнім освітленням дозволило визначити, що більш і достатньо енергоефективною в порівнянні з іншими, є система живлення з розсосередженою генерацією електричної енергії. Вона дозволяє знизити споживання електроенергії в літню ніч на 75,31% і 74,93%, в зимову – на 80,4% і 77,68% якщо співставляти з наявними алгоритмами регулювання зовнішнього освітлення, коли освітлювальна мережа на ніч або відключається повністю, або працює тільки на 50% потужності, відповідно. При живленні тільки від централізованої електромережі споживання знижується в літню ніч на 28,07% і 1,21%, в зимову – на 53,52% і 36,24%. Також відзначено, що дискретний крок при керуванні не впливає на енергоефективність електротехнічного комплексу. При живленні тільки від централізованої електромережі різниця між кроками п'ять і десять хвилин дорівнює 0,29% для освітлення в зимову ніч та 1,04% в літню. При живленні від автономного джерела енергії – акумулятора, або електромережі для літньої ночі різниця для різних кроків дорівнює 0,52%.

10. Аналіз очікуваної економічної ефективності запропонованого комплексу зовнішнього освітлення населених пунктів і системи керування їх роботою, показав, що конвертування отриманих у процесі виконання дисертаційної роботи теоретичних викладів і практичних рекомендацій у сучасну логістику процесу проектування: розробка – монтаж – експлуатація



цих видів електротехнічних комплексів, дозволить досягти терміну окупності проєкту 1 рік 4 місяці, що є достатнім для сприйняття показником у впровадженні розробок енергетичної галузі (Додаток І).

11. Науково-практичні результати дисертаційної роботи передано спеціалізованому підприємству з розробки, проектування та монтажу освітлення вулиць населених пунктів ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж» (м. Кривий Ріг) для впровадження їх у практику роботи даного підприємства з метою подальшого використання як основи процесу модернізації та інтелектуалізації системи зовнішнього освітлення, що підтверджено відповідним актом упровадження (Додаток Й). Результати досліджень даної дисертаційної роботи використовуються також при читанні відповідних лекцій та проведенні практичних і лабораторних занять для студентів Криворізького національного університету спеціальності «141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Державна служба статистики України*. [Електронний ресурс]. [Вільний доступ. 06.05.2023]. [http://ukrstat.gov.ua/operativ2018/energy/pve/ach\\_pve\\_u.htm](http://ukrstat.gov.ua/operativ2018/energy/pve/ach_pve_u.htm).
2. Амоша О. І. Людина та навколишнє середовище: економічні проблеми екологічної безпеки виробництва. Київ: Наукова думка, 2002. 296с.
3. Поліщук О. Ю. Підвищення ефективності систем зовнішнього освітлення вулиць та магістралей міст: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.07 / Харків. нац. ун-т міськ. господар. ім. О. М. Бекетова. Харків, 2014. 24 с.
4. Гончар О. Л. Розвиток нормативної бази зовнішнього освітлення в містах України. *Містобудування та територіальне планування*. 2003. №16. С. 45–52.
5. Салтиков В. А., Соколов В. Ф., Федун Т. В. Підвищення надійності систем електропостачання установок зовнішнього освітлення. *Комунальне господарство міст*: наук.-техн. зб. 2000. Вип. 21. С. 122–125.
6. Салтиков В. А., Соколов В. Ф., Федун Т. В. До питання енергозбереження в установках зовнішнього освітлення. *Комунальне господарство міст*: наук.-техн. зб. 1998. Вип. 17. С. 91–92.
7. Горшков. В. В., Сінчук О. М. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку систем штучного зовнішнього освітлення в Україні. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. Вип. 1(57). С. 55–60.
8. Пилипчук Р. В., Щиренко В. В. Більше світла – менше спожитої електроенергії. Енергоощадність в освітленні. *Електроінформ*. 2002. №3. 2003. №1.
9. Федун. Т. В. До будівництва систем діагностики та управління установками зовнішнього освітлення. *Вісник Харківського політехнічного університету*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 1999. Вип. 75. с. 106–108.
10. Говоров П. П., Говоров В. П., Кіндінова А. К. Автоматизація керу-

вання режимами систем електропостачання та освітлення міст. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 5. С. 58–63.

11. Говоров П. П., Перепечений В. О., Говоров В. П. Освітлювальні електричні системи та мережі: навч. посібник для студентів спеціальності «Світлотехніка та джерела світла». Харків: Харківська національна академія міського господарства, 2009. 227 с.

12. Горшков В. В. Особливості побудови систем керування електротехнічних систем вуличного освітлення. *Modern scientific research: achievements innovations and development prospects: 12th International scientific and practical conference, Berlin, Germany, May 22-24, 2022. Berlin, Germany, 2022.* P. 195.

13. Вейнерт Дж. Світлодіодне освітлення: принципи роботи, переваги і області застосування. Philips Solid-State Lighting Solutions, 2010. 156 с.

14. Сінчук О. М., Горшков В. В. Сучасний стан розвитку систем штучного зовнішнього освітлення в Україні. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, м. Кривий Ріг, 03–07 жовтня, 2022 р. Кривий Ріг, 2022.* С. 43.

15. Головка В. М., Денисюк П. Л., Кириленко В. М. Аналіз принципів побудови локальних систем енергозабезпечення на базі відновлювальних джерел енергії. *Відновлювана енергетика XXI століття: IX Міжнар. конф., 15–19 вересня, 2008 р. АР Крим, 2008.* С. 124–125.

16. Сінчук О. М., Бойко С. М. Нейронні мережі і управління процесом управління електропостачанням об'єктів від комбінованих електричних мереж. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 53–55.

17. Білодід В. Д., Таранець К. В. Мала енергетика та її значення в регіональних системах майбутнього. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. № 18. с. 40–47.

18. Кудря С. О., Морозов Ю. П., Кузнєцов М. П. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для

отримання водню при електролізі води. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях*: тези доп. наукової звітної сесії НАН України. Київ, 2013. С. 30

19. Журахівський А. В., Засідкович Н. Р., Яцейко А. Я. Оптимізація режимів електроенергетичних систем: навч. посібник для студ. електроенергет. спец. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 140 с.

20. Жаркин А. Ф., Денисюк С. П., Попов В. А. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации: монография. Киев: Наукова думка, 2017. 230 с.

21. Підвищення показників якості кореляційних систем / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. В. Сайко. *Сучасні тенденції розвитку технологій в комунікаціях та освіті*: матеріали VIII наук. конф., м. Київ, 24–25 листопада, 2011 р. Київ: ДУІКТ, 2011. С. 226–231.

22. «Розумне» освітлення міст. URL: <https://5watt.ua/uk/blog/statti/rozumne-osvitlennya-mist> (дата звернення: 27.11.2022).

23. Alattar, E. M., Elwasife, K. Y., & Radwan, E. S. The Effect of Light-Emitting Diode Light on the Physical Traits of Chicks. *Journal of Animal Sciences*. 2019. 9. PP.481-491.

24. Alvino, G. M., Archer, G. S., & Mench, J. A. Behavioural time budgets of broiler chickens reared in varying light intensities. *Applied Animal Behaviour Science*. 2009. 118(1-2). PP. 54-61.

25. Сінчук І. О., Бойко С. М. Світлотехнічні установки та системи: курс лекцій. Кременчук, 2015. 199 с.

26. Сінчук О., Горшков В. Управління електротехнічним комплексом вуличного освітлення за допомогою нечіткого регулятора. *Технічні науки та технології*. 2022. № 2(28). С. 138–145. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-138-145](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-138-145).

27. Popa V., Lavric A. A Traffic Prediction Algorithm for Street Lighting

Control Efficiency. *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*. 2013. Vol. 7, no. 15. PP. 13–17.

28. Carli R., Dotoli M., Pellegrino R. A decision-making tool for energy efficiency optimization of street lighting. *Computers & Operations Research*. 2018. No. 96. PP. 223–235.

29. Collantes-Duarte J., Rivas-Echeverria F. Time series forecasting using ARIMA, Neural Networks and Neo Fuzzy Neurons. Proceedings of the WSEAS Multiconference: *Neural Network and Applications, Fuzzy Sets and Fuzzy Systems, Evolutionary Computations*, Interlaken, Switzerland, February 11–15, 2002. Interlaken, 2002. PP. 4641–4646. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/switzerland2002/papers/464.pdf> (дата звернення: 28.04.2016).

30. Archer, G. S. Comparison of incandescent, CFL, LED and bird level LED lighting: Growth, fear and stress. *International Journal of Poultry Science*. 2015. 14(8). P. 449.

31. Archer, G. S. Comparison of raising broiler chickens under light emitting diode or incandescent light at differing intensities on growth, stress and fear. *International Journal of Poultry Science*. 2016. 11. PP. 425-431.

32. Arowolo, M. A., He, J. H., He, S. P., Adebowale, T. O. The implication of lighting programmes in intensive broiler production system. *World's Poultry Science Journal*. 2019. 75(1). PP. 17-28.

33. Горшков В. В. Енергоефективний електротехнічний комплекс з елементами інтелектуального керування процесом освітлення вулиць населених пунктів: монографія. Варшава: iScience, 2023. 94 с.

34. Про благоустрій населених пунктів: Закон України від 06.09.2005 № 2807-IV. *Відомості Верховної Ради України*. 2005. № 49. ст.517.

35. Світлорегулюючий сенсор для реєстрації та аналізу освітленості (Gira 057200). URL: <https://knx24.com/catalog/goods/22432/> (дата звернення: 27.11.2022).

36. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. Чинний з 2006-10-01. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2016. 78 с.

37. Харченко В. Ф., Якунін О. А., Воропай В. Г. Електропостачання міст та промислових підприємств: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, професійне спрямування «Електротехнічні системи електроспоживання»). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 238 с.

38. Назаренко В.М., Назаренко М.В., Смірнова Н.В., Купін А.І. Шляхи збереження та розвитку потенціалу вітчизняних ІТ-технологій / *Вісник КТУ, Кривий Ріг*. 2005. №. 9. С. 95–100.

39. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / за загальною редакцією А. І. Шевченка. Київ, 2023. 305 с.

40. Щокін В. П. Інтелектуальні системи керування: аналітичний синтез та методи дослідження. Кривий Ріг, 2010. 264 с.

41. Blatchford, R. A., K. C. Klasing, H. L. Shivaprasad, P. S. Wakenell, G. S. Archerand, J. A. Mench. The effect of light intensity on the behavior, eye and leg health, and immune function of broiler chickens. *Poultry Science*. 2009. 88. PP. 20–28.

42. Baxter, M., Joseph, N., Osborne, V. R., & Bedecarrats, G. Y. Red light is necessary to activate the reproductive axis in chickens independently of the retina of the eye. *Poultry Science*. 2014. 93(5), PP. 1289-1297.

43. Road Lighting Installation Design to Optimize Energy Use by Genetic Algorithms / A. Covitti, G. Delvecchio, F. Neri, A. Ripoli, M. S. Labini. *EUROCON 2005 – The International Conference on «Computer as a Tool»*, Belgrade, Serbia, 2005. PP. 1541–1544. DOI: [10.1109/EURCON.2005.1630259](https://doi.org/10.1109/EURCON.2005.1630259).

44. An Intelligent System for Street Lighting Control and Measurement / G. W. Denardin, C. H. Barriquello, R. A. Pinto, M. F. Silva, A. Campos, R. N. do Prado. *2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Houston, TX,

USA, 2009. PP. 1–5. DOI: [10.1109/IAS.2009.5324800](https://doi.org/10.1109/IAS.2009.5324800).

45. Mahoor M., Salmasi F. R., Najafabadi T. A. A Hierarchical Smart Street Lighting System With Brute-Force Energy Optimization. *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 17. PP. 2871–2879. DOI: [10.1109/JSEN.2017.2684240](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2684240).

46. Popa M., Cepisca C. Energy consumption saving solutions based on intelligent street lighting control system. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*. 2011. Vol. 73, Iss. 4. PP. 297–308.

47. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC / A. Sittoni, D. Brunelli, D. Macii, P. Tosato, D. Petri. *2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2)*, Guadalajara, Mexico, 2015. PP. 1–6. DOI: [10.1109/ISC2.2015.7366195](https://doi.org/10.1109/ISC2.2015.7366195).

48. Advanced Street Lighting Control through Neural Network Ensembling / F. Moretti, S. Pizzuti, M. Annunziato, S. Panzieri. *SMART 2013 – The Second International Conference on Smart Systems, Devices and Technologies*, Rome, Italy, June 23–28, 2013. PP. 76–81.

49. Wojnicki I., Kotulski L. Street lighting control, energy consumption optimization. *Artificial Intelligence and Soft Computing: 16th International Conference ICAISC 2017*, Zakopane, Poland, June 11–15, 2017. PP. 123–127. DOI: [10.15439/2017F389](https://doi.org/10.15439/2017F389).

50. Miki M., Hiroyasu T., Imazato K. Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, Singapore, 2004. Vol. 1. PP. 520–525. DOI: [10.1109/ICCIS.2004.1460469](https://doi.org/10.1109/ICCIS.2004.1460469).

51. Department for Environment Food and Rural Affairs (DeFRA) A Review of Local Authority Road Lighting Initiatives Aimed at Reducing Costs, Carbon Emissions and Light Pollution. Temple Group Ltd; London: 2011.

52. Beyer, F.R., Ker, K. Street lighting for preventing road traffic injuries. *Cochrane Database of Systematic Reviews Issue*, 2009. 1. Art. No.: CD004728. DOI: [10.1002/14651858.CD004728.pub2](https://doi.org/10.1002/14651858.CD004728.pub2).

53. Claudio L. Switch on the night: policies for smarter lighting. *Environ.*

Health Perspect. 2009;117:A28–A31.

54. Bluetooth Smart Based Attendance Management System / R. Lodha, S. Gupta, H. Jain, H. G. Narula. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 45. PP. 524–527. DOI: [10.1016/J.PROCS.2015.03.094](https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2015.03.094).

55. Derges J., Lynch R., Clow A., Petticrew M., Draper A. Complaints about dog faeces as a symbolic representation of incivility in London, UK: a qualitative study. *Crit. Public Health*. 2012;22(4):419–425.

56. Wang Y., Dasgupta P. Designing an adaptive lighting control system for smart buildings and homes. IEEE: 12th *International Conference on Networking, Sensing and Control*, Taipei, Taiwan, 2015. PP. 450–455. DOI: [10.1109/ICNSC.2015.7116079](https://doi.org/10.1109/ICNSC.2015.7116079).

57. Yoomak S., Ngaopitakkul A. Feasibility Analysis of Different Energy Storage Systems for Solar Road Lighting Systems. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. PP. 101992–102001. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2926105](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926105).

58. Nasser M., Hassan H. Assessment of standalone streetlighting energy storage systems based on hydrogen of hybrid PV/electrolyzer/fuel cell/desalination and PV/batteries. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106985>.

59. Design Optimization of Standalone PV-Battery System for LED Street Lighting in Magetan Indonesia / D. Warindi, M. Nizam, F. Adriyanto, M. Anwar, A. Ramelan, J. S. Saputro, I. Inayati. *E3S Web of Conf*. 2023. Vol. 465. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346502051>.

60. Assessment of LiFePO<sub>4</sub> Battery Performance in Stand Alone Photovoltaic Street Light System / A. Jamaluddin, A. N. Aini, E. Adhitama, A. Purwanto. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 170. PP. 503–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.080>.

61. Сапрыка А. В. Повышение энергоэффективности осветительных комплексов с учетом качества электрической энергии: монография. Харьков: ХНАМГ, 2009. 126 с.

62. Falchi F., Cinzano P., Elvidge C.D., Keith D.M., Haim A. Limiting the



impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *J. Environ. Manag.* 2011;92(10):2714–2722.

63. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» (для студентів денної і заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології») / П. П. Говоров, В. П. Говоров, В. О. Перепечений, О. В. Король. Харків: ХНАМГ, 2012. 221 с.

64. Тарасенко М. Г., Козак К. М. Гранично можливі світлові віддачі джерел світла. *Світлотехніка та електроенергетика.* 2016. № 3. С. 8–13.

65. Говоров П. П., Король О. В., Носан Н. І., Романова Т. І. Система динамічного освітлення на основі світлодіодного світла. *Світло Люкс.* 2011. № 6. С. 46–50.

66. Назаров В. В. Концепція Smart Grid та реальної енергії. *Енергетика та електрифікація: наук.-вироб. журн.* 2013. № 6 (356). С. 12–15.

67. Green J., Thorogood N. Sage; London: 2014. *Qualitative Methods for Health Research.*

68. Назаренко Л. А., Зубков Д. П., Рева С. А. Методи вимірювання сили світла та світлового потоку світлодіодів. *Український метрологічний журнал.* 2010. № 3. С. 29–33.

69. Економія електричної енергії в мережах електропостачання / укладачі: О. І. Соловей, О. М. Суходоля, В. П. Розен, А. В. Чернявський. Київ: ПП «Кажан плюс», 2004. 60 с.

70. Огляд аналітичних робіт міжнародних енергетичних організацій щодо стану та сценаріїв розвитку світової енергетичної сфери з прогнозом інвестування в енергоефективність. Київ: НЕК «Укренерго», 2018. 95 с.

71. Енергоефективні системи освітлення для промислових та комунально-побутових споживачів: навч. посіб. / П. Г. Плєшков, А. Ю. Орлович, С. В. Серебренніков та ін.; ред. П. Г. Плєшков. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 246 с.

72. Моніторинг та контроль електроспоживання комунально-побутових споживачів / П. Плєшков та ін. *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані*

*техному господарстві (AKIT-2022)*) : Міжнар. науково-техн. конф., м. Кропивницький, 10–11 листоп. 2022 р. 2022. С. 80–81.  
URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12436>.

73. Оптимальне керування режимами розподільних електричних мереж з сонячними електростанціями при несиметричному навантаженні / А. І. Саченко, С. П. Плешков, П. Г. Плешков, В. В. Зінзура // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки* : зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. Вип. 6(37). Ч. 1. С. 37-44. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.37-44](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.37-44).

74. Hölker F., Moss T., Griefahn B., Kloas W., Voigt C.C., Henckel D., Hänel A., Kappeler P.M., Völker S., Schwoppe A. The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecol. Soc.* 2010;15(4):13.

75. Jones A.J.H. Ashgate Publishing Limited; Farnham: 2014. *On the South Bank: The Production of Public Space*.

76. Трунова І. М., Волотка Л. Ю., Наседкіна Т. Л. Вдосконалення методики енергетичного аудиту системи освітлення. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Вип. 130: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. Харків: ХНТУСГ, 2012. С. 33–35.

77. Martland S.J. Progress illuminating the world: street lighting in Santiago, Valparaiso and La Plata, 1840–90. *Urban Hist.* 2002;29(2):223–238.

78. McFadden E., Jones M.E., Schoemaker M.J., Ashworth A., Swerdlow A.J. The relationship between obesity and exposure to light at night: cross-sectional analyses of over 100,000 women in the breakthrough generations study. *Am. J. Epidemiol.* 2014;180:245–250.

79. Alhamwi A., Unaichi C., Medjroubi W. Modeling Urban Street Lighting Infrastructure Using Open Source Data Sets. *ETG Congress 2021*. 2021. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9469640>.

80. Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor

Platform / S. Kumar et al. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, no. 12. P. 4981–4994. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2552249>.

81. Liu Y. Research on the Innovation of Urban Street Visualization Light Monitoring System based on GIS Technology. *4th International Conference on Machinery (MACMC)*. 2018. P. 19–22. URL: <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.5>.

82. Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT / A. Omar et al. *Journal of Sensors*. 2022. Vol. 4. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/5249187>.

83. Design and Implement IoT-Based Intelligent Manageable Smart Street Lighting Systems for Future Smart City / M.H. Kabir et al. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 56, no. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15535>.

84. Balazs L., Braun F., Lengyel J. Energy Saving Potential of Traffic-Regulated Street Lighting. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 8. 6750. URL: <https://doi.org/10.3390/su15086750>.

85. Smart Street Light Control: A Review on Methods, Innovations, and Extended Applications / F. Agramelal et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 21. 7415. URL: <https://doi.org/10.3390/en16217415>.

86. Yan P., Wang J. Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Algorithm. *Academic Journal of Computing & Information Science*. 2022. Vol. 5, no. 4. P. 35–40. URL: <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050406>.

87. Wang J., Yan P. Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Algorithm. *Academic Journal of Computing & Information Science*. 2022. Vol. 5, no. 7. P. 27–32. URL: <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050705>.

88. Satam I.A. Fuzzy-based smart system for controlling road lights. *Vojnotehnicki glasnik*. 2022. Vol. 70, no. 2. P. 297–313. URL: <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-36670>.

89. Intelligent Street Lamp Control System with Dynamic Light Control

Function / J. Zeng et al. *17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*. 2018. P. 181–183. URL: <https://doi.org/10.1109/DCABES.2018.00054>.

90. Wu H., Li C., Duan G. Research on a fuzzy algorithm for intelligent power-saving control of urban street lamps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Smart Infrastructure and Construction*. 2024. Vol. 177, no. 1. P. 3–14. URL: <https://doi.org/10.1680/jsmic.23.00010>.

91. Ai M., Wang P., Ma W. Research and application of smart streetlamp based on fuzzy control method. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 183. P. 341–348. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.069>.

92. Shadli A., Hanafi D. Development of a n Intelligence Street Light Using Fuzzy Logic in Control System. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 1, no. 1. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.30880/eeee.2020.01.01.001>.

93. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Київ: Міненерговугілля, 2017. 617 с.

94. Салтиков В.О. Освітлення міст: навч.посібник. Харків: ХНАМГ, 2019, 221 с.

95. Зовнішнє освітлення. *Офіційний портал Києва*: веб-сайт. URL: [https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie\\_seredovyshe\\_mista/vulychne\\_osvitlen-nia/zovnishnie\\_osvitlennia](https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie_seredovyshe_mista/vulychne_osvitlen-nia/zovnishnie_osvitlennia) (дата звернення: 10.04.2024).

96. У Полтавській громаді змінили графік зовнішнього освітлення. *Суспільне Полтава*: веб-сайт. URL: <https://suspilne.media/poltava/540495-v-poltavskij-gromadi-zminili-grafik-zovnisnogo-osvitlenna> (дата звернення: 10.04.2024).

97. З 1 жовтня у Кривому Розі змінять графік зовнішнього освітлення вулиць. *Рудана*: веб-сайт. URL: <https://rudana.com.ua/news/z-1-zhovtnya-u-kryvomu-rozi-zminyat-grafik-zovnishnogo-osvitlennya-vulyc> (дата звернення: 10.04.2024).

98. Довгий С.О., Іванченко В.В., Коржнев М.М., Трофимчук О.М.,

Яковлев С.О. та ін. Дослідження екологічного стану територій пост - майнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення. Ніка Центр, 2021. 196 с.

99. Сінчук О.М., Михайленко О.Ю., Горшков В.В. Нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення населених пунктів. *Центральноукраїнський науковий Вісник*, № 9(40), ч. I, 2024, с. 205-217.

100. S. Nakamura, M.R. Krames History of gallium–nitride-based light-emitting diodes for illumination Proc. IEEE, 120 (2013), p. 2211

101. Статистична обробка даних: монографія / В. Бабак та ін. Київ : МІВВЦ, 2001. 388 с.

102. Петергеря Ю. С., Жуйков В. Я., Терещенко Т. О. Інтелектуальні системи забезпечення енергозбереження житлових будинків: навч. посіб. Київ : Медіа-ПРЕС, 2008. 255 с.

103. Shaw R. Streetlighting in England and Wales: new technologies and uncertainty in the assemblage of streetlighting infrastructure. *Environ. Plan. A*. 2014;46(9):2228–2242.

104. Shaw R. Controlling darkness: self, dark and the domestic night. *Cult. Geogr.* 2014.

105. Shuboni D., Yan L. Nighttime dim light exposure alters the responses of the circadian system. *Neuroscience*. 2010;170(4):1172–1178.

106. The Royal Commission of Environmental Light Pollution . The Stationary Office; London: 2009. Artificial Light in the Environment.

107. Vohra S. Trafford LED Street Lighting Programme Health Impact Assessment. IOM Centre for Health Impact Assessment; Edinburgh: 2013.

108. Design of Battery System for Solar Powered Street Light / M. Parameswari, A. Kowsika, M. Priyadharshini, S. Priyanka, M. Udhaya Priya. *International Journal of Advanced Trends in Engineering and Technology*. 2021. Vol. 6, Issue 1. PP. 13–16.

109. Mykhailenko O. Modeling and simulating dynamics of lithiumion

batteries using block-oriented models with piecewise linear static nonlinearity. E3S Web Conf.: *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters*. 2021. Vol. 280. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128005004>.

110. Bai H., Song Z.(2023). Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems. *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 580. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2023.233426](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426).

111. Comparison the Economic Analysis of the Battery between Lithium-ion and Lead-acid in PV Stand-alone Application / S. Anuphapparadorn, S. Sukchai, C. Sirisamphanwong, N. Ketjoy. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 56. PP. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.07.167>.

112. Wang X., Adelman P., Reindl T. Use of LiFePO<sub>4</sub> Batteries in Stand-Alone Solar System. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 25. PP. 135–140. DOI: [10.1016/j.egypro.2012.07.018](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.018).

113. Poullikkas A. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 27(C). PP. 778–788. DOI: [10.1016/j.rser.2013.07.017](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.017).

114. Battery technologies: exploring different types of batteries for energy storage / E. Rakhimov, D. Khoshimov, S. Sulstonov, F. Jamoldinov, A. Imyaminov, B. Omonov. *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 84. DOI: [10.1051/bioconf/20248405034](https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405034).

115. Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювальна енергетика: підручник / О. М. Сінчук та ін. Кременчук, 2017. 217 с.

116. Elejoste, P., Angulo, I., Perallos, A., Chertudi, A., Zuazola, I. J. G., Moreno, A., Azpilicueta, L., Astrain, J. J., Falcone, F., & Villadangos, J. (2013). An Easy to Deploy Street Light Control System Based on Wireless Communication and LED Technology. *Sensors*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/s130506492>

117. Горшков В.В. Оцінювання необхідності залучення інтелектуального управління до автоматизації керування вуличним освітленням міст та населених пунктів. *Міжнародна науково-технічна конференція “Розвиток промисловості та суспільства” (23-24 травня 2024 р.)*. Криворізький національний університет. Кривий Ріг, 2024. С. 86.

118. Ali, M., Orabi, M., Abdelkarim, E., Qahouq, J. A. A., & Aroudi, A. E. (2011). Design and development of energy-free solar street LED light system. 2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISGT-MidEast.2011.6220812>

119. Lagorse, J., Paire, D., & Miraoui, A. (2009). Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery. *Renewable Energy*, 34(3), 683–691. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.030>

120. Azzollini, I. A., Felice, V. D., Fraboni, F., Cavallucci, L., Breschi, M., Rosa, A. D., & Zini, G. (2018). Lead-Acid Battery Modeling Over Full State of Charge and Discharge Range. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6422–6429. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2850049>

121. Cowern, N. E. B. (2012). 1—Silicon-based photovoltaic solar cells. In J. A. Kilner, S. J. Skinner, S. J. C. Irvine, & P. P. Edwards (Eds.), *Functional Materials for Sustainable Energy Applications* (pp. 3–22e). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096371.1.1>

122. Smart Grid. (n.d.). Energy.Gov. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.energy.gov/smart-grid>

123. Smart energy. (n.d.). IEC. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.iec.ch/energies/smart-energy>

124. Smart Grids. (n.d.). Netl.Doe.Gov. Retrieved May 15, 2024, from <https://netl.doe.gov/smartgrids>

125. The Leaders in Smart Grid Technology—IEEE Smart Grid. (n.d.). Retrieved May 16, 2024, from <https://smartgrid.ieee.org/>

126. Battaglini, A., Lilliestam, J., Haas, A., & Patt, A. (2009). Development

of SuperSmart Grids for a more efficient utilisation of electricity from renewable sources. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 911–918. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.006>

127. Kaygusuz, A., Tuttokmağı, Ö., Keleş, C., & Alagöz, B. B. (2018). Possible Contributions of Smart Grids to Regional Development of Countries. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), 1–4. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620772>

128. Желдак Т.А. Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навч. посіб. / за ред. С.А. Ус. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 387 с.

129. Radiometry and photometry in astronomy. URL: <https://www.stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html> (дата звернення: 10.04.2024).

130. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00078> (дата звернення: 10.04.2024).

131. He, H., Wang, J., Wei, H., Ye, C., & Ding, Y. (2016). Fractal behavior of traffic volume on urban expressway through adaptive fractal analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 443, 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.10.004>

132. Venkatanarayana, R., Smith, B. L., & Demetsky, M. J. (2007). Quantum-Frequency Algorithm for Automated Identification of Traffic Patterns. *Transportation Research Record*, 2024(1), 8–17. <https://doi.org/10.3141/2024-02>

133. Järv, O., Ahas, R., Saluveer, E., Derudder, B., & Witlox, F. (2012). Mobile Phones in a Traffic Flow: A Geographical Perspective to Evening Rush Hour Traffic Analysis Using Call Detail Records. *PLOS ONE*, 7(11), e49171. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049171>

134. Zambrano-Martinez, J. L., Calafate, C. T., Soler, D., Cano, J.-C., & Manzoni, P. (2018). Modeling and Characterization of Traffic Flows in Urban Environments. *Sensors*, 18(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/s18072020>