

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем

ІВАНЧИШИНА Дарина Анатоліївна

Розробка автоматичного керування освітленням вулиць міста у вечірній та
нічний час / Development of automatic control of city street lighting in the
evening and at night

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Кваліфікаційна робота

Виконала студентка групи АКІТ-41

Д.А. Іванчишина

Науковий керівник

к.т.н., доцент І.Б. Албанський

Кваліфікаційну роботу допущено

до захисту:

«_____» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

А.І.Сегін

“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Іванчишиній Дарині Анатоліївні

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Розробка автоматичного керування освітленням вулиць міста у вечірній та нічний час / Development of automatic control of city street lighting in the evening and at night.

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025 р. № 894.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи: 25.05.2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Особливості побудови автоматизованих систем керування освітленням вулиць великих міст і нічний час.

2. Способи керування спеціалізованим обладнанням та освітлювальними засобами.

3. Технічні засоби автоматизації об'єкта управління.

4. Розрахунок робастної системи управління об'єктом, що включає електромагнітні пристрої та регулятори з спостерігачами стану.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз складової та технічних засобів автоматизованої системи керування освітленням вулиць міст у нічний час.

2. Реалізація структури автоматизованої системи керування освітленням вулиць міст у нічний час та обґрунтування вибору технічних засобів реалізації запропонованої системи.

3. Розробка структури цифрової системи керування комплексом технічних засобів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структура автоматизованої системи керування освітленням вулиць міст у нічний час.

2. Перехідні характеристики цифрової системи з спостерігачем стану, реалізованих в канонічних формах.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Албанський І.Б.		
2	Албанський І.Б.		
3	Албанський І.Б.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Специфікація вибору технічних засобів автоматизації	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Розрахунок системи автоматичного регулювання	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

(підпис)

Іванчишина Д.А.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доцент Албанський І.Б.

АНОТАЦІЯ

Іванчишина Д.А. Розробка автоматичного керування освітленням вулиць міста у вечірній та нічний час. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі досліджено системи керування освітленням великих міст у нічний час, тобто системи основне завдання яких підтримувати рівень освітлення на проїї частині, скверах, парках тобто враховуючи конкретні місця скупчення людей, визначено функціональні, структурні та архітектурні особливості систем, що забезпечують рівень освітлення, і управління основними технічними засобами контролю, проаналізовано технічну базу та обґрунтовано вибір засобів автоматизації, реалізації запропонованої системи. Розроблено структуру цифрової системи керування комплексом технічних засобів, а також розраховано робастність системи управління об'єктом, що включає електромагнітні пристрої та регулятори з спостерігачами стану.

ABSTRACT

Ivanchishina D.A. Development of automatic control of city street lighting in the evening and at night. - Manuscript.

Research for obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional (scientific) program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work investigates lighting control systems for large cities at night, i.e. systems whose main task is to maintain the level of lighting in the street, squares, parks, i.e. taking into account specific places of crowding, identifies the functional, structural and architectural features of systems that provide the level of lighting and control of the main technical means of control, analyzes the technical base and justifies the choice of automation means, implementation of the proposed system. The structure of a digital control system for a complex of technical means is developed, and the robustness of the object control system, which includes electromagnetic devices and regulators with state observers, is also calculated.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	8
1.1 Загальний аналіз та основні характеристика автоматизованих систем керування вуличним освітленням великих міст	8
1.2 Огляд ринку обладнання та технічних засобів автоматизованих систем керування освітленням	14
1.3 Опис контура регулювання та особливості побудови складних АСКВО	19
2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	27
2.1 Реалізація структури автоматизованої системи керування вуличним освітленням та функціональне представлення основних вузлів управління	27
2.2 Обґрунтування вибору модуля управління автоматизованої системи	32
2.3 Вибір апаратних засобів керування та комунікації багаторівневої розподіленої системи	37
3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	44
3.1 Розробка структури цифрової системи керування комплексом технічних засобів	44
3.2 Розрахунок робастної системи управління об'єктом, що включає електромагнітні пристрої та регулятори з спостерігачами стану	48
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Іванчишина Д.А.			Розробка автоматичного керування освітленням вулиць міста у вечірній та нічний час / Development of automatic control of city street lighting in the evening and at night	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Албанський І.Б.					4	62
Консульт.		Албанський І.Б.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		
Н. Контр.		Заставний О.М.						
Затверд.		Сегін А.І.						

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку міст значна увага приділяється підвищенню енергоефективності та раціональному використанню енергетичних ресурсів. Однією з найбільш енергоємних складових міської інфраструктури є система вуличного освітлення, яка функціонує переважно у вечірній та нічний час. Із розширенням міських територій та збільшенням кількості освітлювальних точок суттєво зростає споживання електроенергії, що обумовлює необхідність впровадження сучасних автоматизованих систем керування освітленням.

Традиційні системи вуличного освітлення, як правило, працюють за фіксованими графіками та не враховують реальні умови експлуатації, такі як рівень природного освітлення, погодні умови або інтенсивність руху транспорту і пішоходів. Це призводить до неефективного використання електроенергії та підвищення експлуатаційних витрат. Водночас сучасні підходи передбачають застосування автоматизованих та інтелектуальних систем керування, здатних адаптуватися до змін навколишнього середовища та забезпечувати оптимальні режими освітлення.

Впровадження автоматизованих систем керування освітленням дозволяє не лише значно знизити енергоспоживання, але й підвищити якість освітлення міського середовища. Такі системи використовують сенсори освітленості, часу, руху, а також сучасні засоби зв'язку і цифрові технології для регулювання рівня освітлення в реальному часі. Це забезпечує можливість динамічного керування освітленням залежно від фактичних потреб, що сприяє економії електроенергії та підвищенню ефективності роботи освітлювальних установок.

Крім того, системи освітлення міста є складними розподіленими технічними системами, які інтегруються в загальну структуру електроенергетичних мереж і потребують сучасних методів керування та оптимізації. Їх автоматизація дозволяє забезпечити узгоджену роботу з

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

іншими елементами енергосистеми, підвищити надійність функціонування та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Особливої актуальності набуває використання цифрових технологій, інтернету речей (IoT) та інтелектуальних алгоритмів, які дозволяють реалізувати адаптивне керування освітленням у реальному часі. Це відкриває можливості для створення «розумних міст», у яких системи освітлення є важливою складовою енергоефективної та екологічно безпечної інфраструктури.

Отже, розробка автоматизованої системи керування освітленням вулиць міста у вечірній та нічний час є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат, покращення умов безпеки та комфорту мешканців, а також розвиток сучасних інтелектуальних міських систем.

Мета кваліфікаційної роботи. Актуалізація розробки автоматизованої системи керування освітленням вулиць міст у вечірній і нічний час. У кваліфікаційній роботі розроблено та представлено автоматизовану систему керування освітленням вулиць міст у вечірній і нічний час на основі програмно-технічних засобів, а також проведено вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА) безпосередньо на об'єкті керування. Основним завданням створення автоматизованих систем освітлення з застосуванням інтегрованих технічних рішень «розумного міста», IoT та промислових програмованих контролерів, що є невід'ємними для автоматизованих систем різного ступеня складності.

Основним завданням кваліфікаційної роботи є:

- аналіз систем вуличного освітлення у містах і мегаполісах та автоматизація освітлювальних засобів у енергоефективні системи як об'єкт керування;
- розробка структури автоматизованої системи керування освітлювальними засобами;
- специфікація вибору технічних засобів автоматизації;

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розрахунок системи автоматичного регулювання.

Автоматизовані системи керування освітлювальними засобами є актуальним рішенням сучасних великих міст та мегаполісах. Рішенням такої задачі є компоновка найновіших сучасних програмно-технічних засобів автоматизації з принципово новими ідеями та алгоритмами безпеки.

Предметом дослідження є процес автоматизованого керування освітленням вулиць міст у вечірній і нічний час.

Об'єктом дослідження є автоматизована система керування освітлювальними засобами.

Методи дослідження – аналіз літературних джерел та електронних ресурсів, порівняння сучасних розробок в галузі вуличного освітлення та освітлювальних засобів, програмно-технічних засобів автоматизації.

Практичне значення одержаних результатів. Базується на тому, що запропоновані практичні та теоретичні рекомендації по розробці та розрахунку систем автоматизованого управління, які дають можливість підвищити їх надійність та ефективність роботи в рази.

Апробація. ІВАНЧИШИНА Д., БОГДАНОВИЧ С., ПІДГРЕБЛЯ Р., ПРОЦЮК А. Особливості функціонування автоматизованих систем безпеки на основі газоаналізаторів у складі промислового устаткування / Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С.159-164.

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Загальний аналіз та основні характеристика автоматизованих систем керування вуличним освітленням великих міст

Автоматизовані системи керування вуличним освітленням (АСКВО) є важливою складовою сучасної міської інфраструктури, що забезпечує ефективне, надійне та економічно доцільне функціонування мереж зовнішнього освітлення. У великих містах, де кількість освітлювальних точок може досягати сотень тисяч, традиційні методи керування (ручне або напівавтоматичне) стають неефективними через високі витрати енергії, складність обслуговування та низький рівень контролю.

Сучасні системи автоматизації дозволяють вирішити ці проблеми шляхом централізованого моніторингу, дистанційного керування та оптимізації режимів роботи освітлювальних установок. Основною метою їх впровадження є підвищення енергоефективності, надійності та якості освітлення міського середовища.

Автоматизована система керування вуличним освітленням — це комплекс технічних, програмних і комунікаційних засобів, що забезпечує автоматичне або дистанційне керування освітлювальними мережами відповідно до заданих алгоритмів і умов зовнішнього середовища [1, 2].

Основні функції таких систем:

- автоматичне вмикання/вимикання освітлення;
- регулювання рівня освітленості (димінг);
- дистанційний контроль стану обладнання;
- облік і аналіз енергоспоживання;
- діагностика аварійних ситуацій;
- оптимізація режимів роботи.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура автоматизованих систем керування вуличним, зовнішнім освітленням включає ієрархічну структуру, яка зазвичай складається з декількох рівнів (рисунк 1.1).

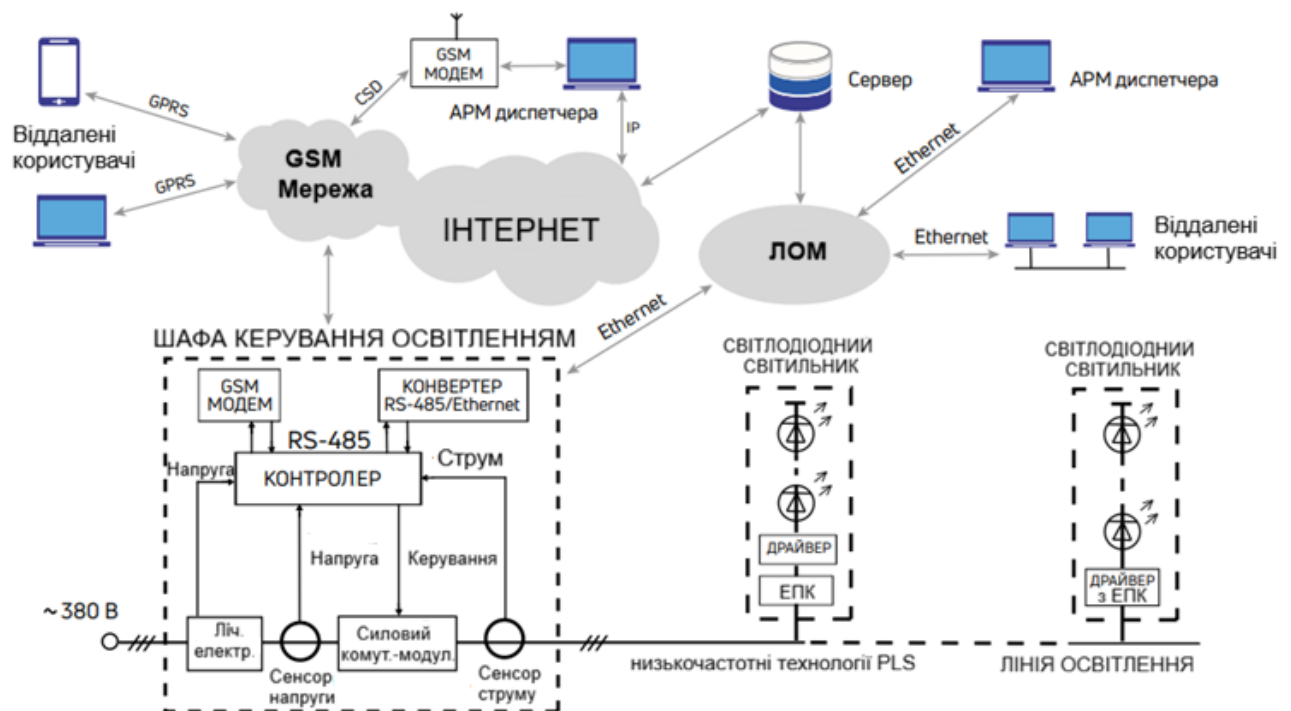


Рисунок 1.1 – Загальна структура автоматизованої системи керування вуличним освітленням

Верхній рівень зазвичай включає диспетчерський центр і підпорядковує під собою (рисунк 1.2) [3]:

- сервери управління;
- програмне забезпечення (SCADA-системи);
- автоматизовані робочі місця операторів.

До основних функцій верхнього рівня відносять: централізований моніторинг, формування графіків роботи, аналіз даних і звітність, передача команд нижчим рівням.

Середній рівень включає контролери та вузли управління, о підпорядковують під собою (рисунк 1.3):

- програмовані логічні контролери (PLC);
- шафи керування;

- вузли збору та передачі даних.



Рисунок 1.2 – Верхній рівень ієрархічної структури АСКВО

Основний функціонал середнього рівня це є:

- локальне керування освітленням;
- обробка сигналів від сенсорів;
- виконання команд диспетчерського центру;
- аварійне перемикання живлення (резервування).



Рисунок 1.3 - Середній рівень ієрархічної структури АСКВО

Нижній рівень включає польові пристрої, що безпосередньо розміщені у шафах керування та на самих освітлювальних пристроях (рисунок 1.4).

Сюди входять:

- світильники (LED, натрієві або інші);
- сенсори (освітленості, руху, температури);
- реле, димери;
- електричні лічильники.



Рисунок 1.4 - Нижній рівень ієрархічної структури АСКВО

Функціонал нижнього рівня це безпосереднє освітлення значної території або окремих секторів, а також збір параметрів середовища та виконання команд керування.

Для керування основними функціональними можливостями АСКВО використовує канали зв'язку для обміну даними, а саме [4, 5]:

- GSM/GPRS, LTE;
- PLC (передача даних по лініях електропередач);
- радіоканали;
- оптоволоконні мережі.

Це дозволяє інтегрувати всі рівні системи в єдину інформаційну мережу, що дає можливість оптимально керувати рівнями освітленості різних локальних зон (секторів). Інформаційна мережа автоматизованої системи має високу інформативність та продуктивність паралельно з енергоефективним функціонуванням.

Принципи функціонування систем АСКВО та їх робота базується на циклах: збору інформації, обробки даних, формування керуючих сигналів, зворотному зв'язку. Збір інформації відбувається за допомогою сенсорів, що фіксують наступні параметри:

- рівень природного освітлення;
- рух транспорту та пішоходів;
- погодні умови.

Обробка даних відбувається на рівні контролерів, що аналізують отримані дані та визначають необхідний режим освітлення. Формування керуючих сигналів відбувається відповідно до наступного алгоритму [6]:

- вмикається/вимикається освітлення;
- змінюється яскравість;
- активуються резервні режими.

За допомогою зворотного зв'язку система отримує інформацію про стан обладнання та коригує роботу. Такий принцип забезпечує адаптивність і ефективність функціонування.

Режими роботи в залежності локалізації АСКВО можуть бути найрізноманітніші. У великих містах застосовуються режими роботи характерні для мегаполісів, а саме:

- астрономічний режим — вмикання за часом заходу/сходу сонця;
- сенсорний режим — реагування на освітленість або рух;
- графіковий режим — робота за заданим розкладом;
- адаптивний режим — динамічна зміна освітлення залежно від умов.

Наприклад, часто використовується поділ на вечірній режим (максимальна освітленість) і нічний режим (зменшення потужності). А також експериментально можуть налаштовуватися нестандартні профілі режимів роботи в залежності від умов і енергоресурсів.

Особливості функціонування у великих містах диктує масштабність і розподіленість та структурованість апаратних засобів АСКВО. Мережі освітлення мають складну розгалужену структуру з багатьма центрами живлення, що ускладнює керування. Високі вимоги до надійності вимагають дорого-вартісного обладнання та підготовленого персоналу для його обслуговування. Відповідно системи повинні: працювати безперервно, мати резервні джерела живлення, автоматично відновлювати роботу при аваріях.

Енергоефективність, використання LED-технологій, димінгу та адаптивного керування дозволяє значно зменшити споживання електроенергії, що в свою чергу дозволяє економити бюджетні кошти міста.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція з Smart City дає можливість за допомогою глобальної мережі Інтернет параметризувати та віддалено керувати, діагностувати роботу АСКВО [6-8]. Системи освітлення інтегруються з: відеоспостереженням, транспортними системами, екологічним моніторингом. Використання технологій Інтернет речей (IoT) і штучних нейронних мереж або штучного інтелекту (ШІ) дозволить розширити функціонал та збільшити ефективність роботи таких автоматизованих систем. Сучасні рішення АСКВО вже ефективно застосовують:

- інтернет речей (IoT);
- машинне навчання для прогнозування навантаження та оптимізації режимів.

До основних переваг АСКВО відносять [8]:

- зниження енергоспоживання;
- зменшення експлуатаційних витрат;
- підвищення надійності;
- швидке виявлення несправностей;
- покращення якості освітлення;
- зменшення впливу людського фактору.

Як і будь-яка автоматизована система АСКВО має свої недоліки та проблеми впровадження попри значні переваги є і певні труднощі, а саме:

- висока вартість впровадження;
- необхідність модернізації старих мереж;
- складність інтеграції різних технологій;
- потреба у кваліфікованому персоналі;
- кібербезпека.

До перспектив і основних напрямків розвитку АСКВО відносять:

- повна цифровізація систем;
- впровадження Smart Lighting;
- використання штучного інтелекту;
- автономні енергосистеми (сонячні панелі);

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- інтеграція з іншими міськими сервісами.

Автоматизовані системи керування вуличним освітленням є невід’ємною частиною сучасних «розумних міст». Вони забезпечують ефективне використання енергоресурсів, підвищують рівень безпеки та комфорту мешканців, а також створюють основу для подальшого розвитку міської інфраструктури. Завдяки впровадженню новітніх технологій, таких як IoT та штучний інтелект, ці системи стають більш адаптивними, інтелектуальними та економічно вигідними.

1.2 Огляд ринку обладнання та технічних засобів автоматизованих систем керування освітленням

Ринок обладнання для автоматизованих систем керування вуличним освітленням є складовою глобального сегмента smart lighting (інтелектуального освітлення) та lighting control systems. Його розвиток тісно пов’язаний із концепціями Smart City, цифровізації інфраструктури та підвищення енергоефективності АСКВО (рисунк 1.5). Використовуючи сучасні технології, можна досягти максимальної гнучкості та функціональності при побудові системи управління зовнішнім освітленням, знижуючи витрати на електроенергію та витрати на обслуговування [9].

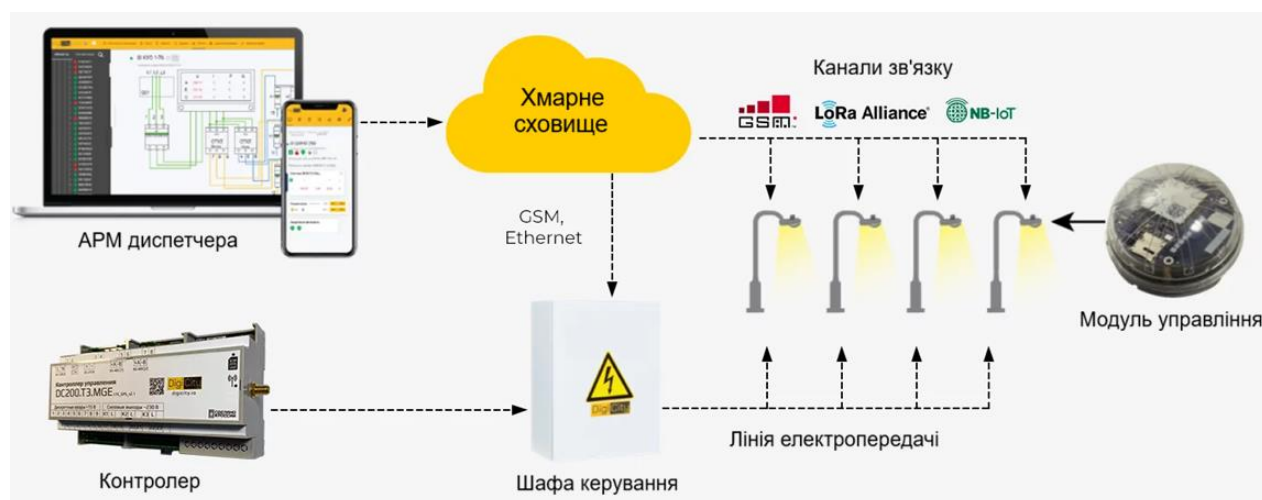


Рисунок 1.5 – АСКВО в концепції Smart City

За сучасними аналітичними оцінками:

- обсяг ринку систем керування освітленням у 2025 році становить близько 45,4 млрд дол. США з прогнозом зростання до 82,9 млрд дол. до 2030 року (CAGR $\approx$ 12,8%) ;
- сегмент IoT-орієнтованого освітлення оцінювався у 12,5 млрд дол. у 2024 році з прогнозом до 38,7 млрд дол. до 2034 року ;
- ринок smart lighting демонструє ще швидше зростання ($\approx$ 19–20% CAGR) .

Це свідчить про стійкий тренд до інтелектуалізації освітлювальної інфраструктури, особливо в міському середовищі. Структура ринку обладнання включає великий обсяг продукції провідних світових компаній виробників засобів автоматизації вуличного освітлення таких як: Signify N.V., Schneider Electric, Siemens AG, General Electric, OSRAM GmbH. Ринок технічних засобів АСКВО можна структурно поділити на три основні сегменти: апаратне забезпечення (Hardware), програмне забезпечення (Software), послуги (Services) [9, 10].



Рисунок 1.6 - Структура ринку обладнання АСКВО

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Апаратне забезпечення (Hardware) - це базовий і найбільший сегмент ринку, що включає наступні технічні засоби автоматизації та спеціального обладнання:

- світильники (переважно LED);
- драйвери та баласты;
- контролери (локальні та групові);
- сенсори (руху, освітленості, погодні);
- комунікаційні модулі (GSM, RF, PLC);
- шафи керування.

Домінування апаратного сегмента пояснюється масовим переходом від традиційних джерел світла до LED та потребою у фізичній модернізації інфраструктури і перевагою енергозберігаючого освітлювального обладнання.

Програмне забезпечення (Software) АСКВО на сьогоднішньому етапі розвитку включає ряд програмних продуктів та сервісів, що забезпечують ефективну роботу такого роду систем [11]. Сюди належать наступні програмні продукти:

- SCADA-системи;
- платформи диспетчеризації;
- аналітичні системи;
- хмарні сервіси.

Програмне забезпечення забезпечує централізоване керування та обробку великих масивів даних, що оптимізують режими освітлення.

Світовий ринок послуг (Services) включає:

- проєктування систем;
- монтаж і пусконаладження;
- технічне обслуговування;
- енергосервіс (ESCO-моделі).

Даний сегмент ринку активно розвивається у зв'язку з переходом до сервісних моделей експлуатації інфраструктури. Спеціалізовані виробники

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем керування освітленням адаптуються до найсучасніших технологічних умов і тенденцій світового ринку створюючи конкурентно спроможний продукт. Компанії, які фокусуються саме на системах керування, мережах і платформах це є:

- Telensa Limited - один із лідерів у сфері бездротового керування вуличним освітленням;
- Flashnet SRL - відомий продукт — система inteliLIGHT;
- Itron Inc. (Silver Spring Networks) - спеціалізується на IoT-мережах для енергетики та освітлення;
- DimOnOff Inc. - рішення для дистанційного керування світильниками;
- Twilight Citelum - розробник адаптивних систем освітлення.

Виробники світлотехнічного обладнання з функціями автоматизації це провідні компанії, що йдуть в ногу з розвитком сучасних технологій Smart City. Ці компанії виробляють світильники та інтегрують у них системи керування, а саме:

- Acuity Brands - рішення Sensus для підключеного освітлення;
- Zumtobel Group - європейський лідер у професійному освітленні;
- Schréder Group - спеціалізується на вуличному та архітектурному освітленні;
- Eaton Corporation - рішення для енергетики та освітлення;
- Cree Inc. - один із піонерів LED-технологій;
- Ledvance - продукти для smart lighting і smart building.

Телекомунікаційні та ІТ-компанії (IoT-платформи) такі компанії забезпечують мережеву інфраструктуру та цифрові платформи, а саме:

- Cisco Systems IoT - інфраструктура для Smart City;
- Huawei Technologies - рішення для підключених міських систем;
- Honeywell International - інтегровані системи автоматизації та управління.

Іншими важливими гравцями та інтеграторами є такі компанії як: Hubbell Lighting, Lutron Electronics, Thorn Lighting, Virtual Extension, Citelum,

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Zhejiang Pulelux Lighting, Guangdong Warmed Intelligent Technology. Ці компанії активно розвивають сегмент доступних smart-рішень, особливо для ринків, що розвиваються.

Узагальнена структура конкурентного середовища у напрямку АСКВО є складна і багатогранна (рисунок 1.7). Світовий ринок виробників засобів автоматизації вуличного освітлення має багаторівневу структуру, яка включає в себе наступні рівні:

- технологічні лідери (Signify, Schneider Electric, Siemens - вони формують стандарти ринку);
- спеціалізовані IoT/Lighting Control компанії (Telensa, Flashnet, Itron – інновації у керуванні та мережах);
- виробники світильників (Acuity Brands, Zumtobel, Schréder – інтеграція обладнання з контролем);
- ІТ та телеком (Cisco, Huawei - інфраструктура Smart City).



Рисунок 1.7 - Узагальнена структура конкурентного середовища у напрямку АСКВО за останні кілька років

Ринок автоматизації вуличного освітлення характеризується високою концентрацією глобальних технологічних лідерів та активною участю IoT-компаній у процесі адаптації нових технологій, а також зміщенням конкуренції від «світильників» до комплексних цифрових платформ, що виконують інтеграцію освітлення у ширші екосистеми Smart City. Ключова тенденція — перехід від виробництва обладнання до надання інтелектуальних сервісів освітлення (Lighting-as-a-Service).

1.3 Опис контура регулювання та особливості побудови складних АСКВО

Автоматизована система управління освітленням (АСУО) призначена для організації контролю та управління освітленням з метою підвищення ефективності освітлення населених пунктів, вулиць та проспектів великих міст, автомобільних доріг, будівель та споруд, пішохідних переходів, тунелів, естакад [11, 12]. Системою здійснюється діагностика устаткування автоматики, каналів передачі, кінцевого устаткування світлових приладів, і навіть для дистанційного збирання параметрів електричних мереж.

Автоматизована система управління освітленням може застосовуватися для керування такими системами як:

- системою зовнішнього висвітлення (це вулиці та двори, дороги та магістралі, пішохідні переходи, тунелі, спортивні споруди);
- системою архітектурно-мистецького підсвічування (це будівлі та споруди, пам'ятники, ландшафтні зони, фонтани, сквери та парки, мостові споруди та естакади);
- системою внутрішнього освітлення (це промислові та житлові приміщення, офіси);

Система АСУО є програмно-апаратним комплексом, що складається зі спеціалізованих шаф управління світловими приладами, що встановлюються на віддалених об'єктах, спеціалізованого програмного забезпечення та

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обладнання диспетчерського пункту. АСУО призначене для виконання функціональних задач моніторингу обладнання підключених ліній зовнішнього освітлення та архітектурно-художнього підсвічування з сервером централізованого збору та обробки даних, розташованому в експлуатуючої організації. Також до основного функціоналу входить передача даних та інформації до диспетчерської АСУО, стан світлової апаратури, комутаційного і керуючого обладнання, стану сенсорів охоронної сигналізації (це забезпечує гарантоване включення та відключення установок освітлення та мінімізацію часу виявлення місць аварій). Можливість ручного та автоматичного керування освітлювальними установками досягається контроль якості електропостачання на введенні. Передача даних про енергоспоживання для здійснення технічного та комерційного обліку дозволяє використання гнучкої SCADA-системи для відображення об'єктів зовнішнього освітлення та їх стану на АРМ диспетчера у графічній формі.

Впровадження АСУО дозволяє скоротити експлуатаційні витрати та підвищити якість роботи систем зовнішнього освітлення, реалізувати інноваційні підходи та сучасні технології енергозбереження та підвищення енергоефективності вуличного освітлення. Основним і невід'ємним елементом АСУО є шафа управління вуличним освітленням.

Шафа управління вуличним освітленням (ШУВО) – пристрій, необхідний для забезпечення ефективної роботи освітлення вулиць міст, населених пунктів на магістралях та автошляхах (рисунок 1.8). Він забезпечує автономну роботу електроустановок за розкладом, може підтримувати кілька графіків роботи та дозволяє отримувати інформацію про її стан. Також шафа відповідає за програмний контроль та автоматичну діагностику освітлювального обладнання, що особливо важливо у зовнішньому освітленні.

До основних функцій шафи керування входить контроль груп освітлювальних приладів. Їм передаються команди прямо через електричну

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережу, тобто дистанційно. Це може бути збільшення або зменшення інтенсивності світлового потоку, включення-виключення за розкладом.



Рисунок 1.8 – Загальний вигляд шафи управління вуличним освітленням

Також обладнання передбачає можливість вести облік споживаної електричної енергії, вимірювати струми та напруги, а також сигналізувати про включення аварійних режимів.

Загалом шафа керування вуличним освітленням дозволяє:

- в автоматичному режимі вмикати-вимикати освітлювальні прилади;
- розподіляти та вести облік електроенергії між споживачами;
- захистити обладнання від перевантажень, надструмів, імпульсних стрибків напруги.

ШУВО можна використовувати для різних задач, а саме:

- для управління ландшафтним та архітектурним підсвічуванням;
- контролю освітлювальних систем на міських та міжміських автошляхах;
- контролю систем світлофорного регулювання;
- автоматичної роботи системи охоронної сигналізації;
- контролю роботи енергозберігаючих мереж та систем зв'язку.

ШУВО багато в чому схожі із системами бездротового управління освітленням. Вони можуть працювати з електричною мережею напругою 220В або 380В при частоті 50-60 Гц [12]. Функціонують в автоматичному режимі або під контролем диспетчера, що знаходиться на відстані або в безпосередній близькості від пристрою. Диспетчер може змінити конфігурацію обладнання, у тому числі за допомогою дистанційного пульта.

Шафа управління освітленням складається з двох частин: з оболонки листової сталі навісного захищеного виконання з передніми дверима і виносного фотосенсора. Ящик і фотосенсор з'єднуються зі споживачем 2-жильним неекранованим контрольним кабелем, з перетином жили не менше 0,35 мм², довжиною не більше 50м.

Введення проводів та кабелів здійснюється через сальники (кабельовводи), що встановлюються зверху або знизу шафи (за заявкою замовника). На внутрішній поверхні дверей закріплено електричну схему ящика.

В середині ящика на панелі розміщено: силову частину - автоматичний вимикач та електромагнітний пускач; апаратура управління - фотореле, клемні колодки та програматор (таймер) режимів. У програматорі режимів роботи можливий автоматичний режим керування освітленням лише за часом, часом і рівнем освітленості і лише за рівнем освітленості. Вибір режимів автоматичного керування освітленням здійснюється перемикачами, а оперативне керування – кнопками, розташованими як правело на дверях ящика. Переведення керування з автоматичного режиму на ручний здійснюється за звичай перемикачем в ручному режимі. У схемі програма тора режимів можливий автоматичний режим керування освітленням лише за рівнем освітленості та ручний режим керування [13]. Дистанційне керування може здійснюватись від віддаленого комутаційного апарату диспетчерського пункту.

Універсальні ШУВО призначені для адресного управління режимами роботи (0–100% потужності) світлодіодних світильників та їхньої

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматичної діагностики. Команди управління від ШУВО подаються до лінії освітлення адресно. Формування команди відбувається за допомогою силового оптоелектронного комутатора-модулятора під керуванням контролера шафи. Контролер шафи може бути налаштований на включення/виключення лінії освітлення як за внутрішнім астрономічним розкладом, так і зовнішнім впливом: від сенсорів освітленості, руху або від автоматизованого робочого місця диспетчерського пункту.

Під час роботи ШУВО передає команди управління режимами роботи світильників, здійснює їх автоматичну діагностику, контролює рівень GSM-сигналу, веде облік споживаної електроенергії, вимірює значення фазних струмів і напруг у лінії освітлення, сигналізує про аварійні режими. У ШУВО передбачено захист від надструмів та перенапруг, здійснюється збір та передача інформації про технологічні параметри через GSM або конвертер RS-485/Ethernet мережу на сервер АСУВО. За потреби диспетчер може внести корективи до поточних налаштувань режимів або дистанційно керувати обладнанням.

Промисловий програмовано-логічний контролер (ПЛК) у шафі керування є ключовим елементом локального рівня автоматизації, який забезпечує автономне та дистанційне керування освітлювальною мережею. Керування режимами освітлення ПЛК реалізує алгоритми вмикання/вимикання зональне освітлення групи світильників або ступеневе чи плавне регулювання (димінг 0–10V, DALI) (рисунок 1.9).

Моніторинг та діагностику ПЛК виконує за допомогою функції збору та аналізу даних, а саме:

- контроль напруги, струму, потужності;
- контроль стану ліній (обрив, КЗ);
- визначення несправностей світильників;
- контроль температури в шафі;
- ведення журналу подій (логування).

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.9 – ПЛК SIMATIC S7-1200, S7-1500 для ШУВО

Енергетичний облік та оптимізація відбувається на основі: збору даних з електролічильників, аналізу споживання електроенергії, оптимізації режимів роботи, зниження пікових навантажень.

Дистанційне керування та диспетчеризація ПЛК забезпечує взаємодію з верхнім рівнем (SCADA / IoT-платформи) через прийом команд (on/off, димінг), передачу телеметрії та аварійні повідомлення (alarms). Робота та передача даних ПЛК здійснюється через: GSM/GPRS/LTE; Ethernet; LoRaWAN; NB-IoT [14].

Локальна автоматизація (автономна робота) у разі втрати зв'язку контролера переходить у автономний режим та виконує локальні алгоритми забезпечуючи безперервність освітлення.

Інтеграція з іншими системами Smart City відбувається через взаємодію контролера з системами відеоспостереження, сенсорами руху, екологічним моніторингом та транспортними системами.

Технічні вимоги до ПЛК для АСКВО для виконання зазначених задач ПЛК повинен мати достатню кількість дискретних та аналогових входів/виходів і підтримку протоколів (Modbus RTU/TCP, DNP3, IEC 60870-5-104), а також інтерфейси (RS-485, Ethernet, GSM). Також він повинен працювати в умовах температури $-40...+70^{\circ}\text{C}$ і мати високу надійність.

Узагальнена роль ПЛК у шафі керування виконує функції: керування, моніторингу, зв'язку, оптимізації та захисту. Варіанти рішень є: класичні ПЛК - (Siemens, Schneider, ABB); IoT-контролери - (Signify, Telensa); гібридні системи.

Промисловий контролер у шафі керування вуличним освітленням є ядром локальної автоматизації, що забезпечує як автономне функціонування мережі, так і інтеграцію в глобальні системи Smart City. Вибір конкретного ПЛК залежить від масштабу системи, вимог до функціональності, бюджету та необхідного рівня інтеграції.

Контур регулювання в автоматизованих системах вуличного освітлення будується за класичним принципом замкненої системи керування, де основними елементами є сенсори, контролер (ПЛК), виконавчі пристрої та канал зворотного зв'язку. Вхідною величиною виступають параметри зовнішнього середовища — рівень освітленості, інтенсивність руху, погодні умови, а також часові характеристики (астрономічний час). Ці дані надходять до контролера, який виконує їх обробку відповідно до заданих алгоритмів керування. На основі аналізу формується керуючий вплив — команда на вмикання, вимикання або зміну яскравості світильників. Виконавчими елементами виступають реле, контактори або електронні драйвери з підтримкою димінгу.

Зворотний зв'язок реалізується через моніторинг стану мережі — вимірювання струмів, напруг, потужності та діагностику справності світильників. Це дозволяє системі адаптувати свою роботу та забезпечувати стабільність параметрів освітлення. У складних АСУВО контур регулювання має багаторівневу ієрархічну структуру, де локальні контури (на рівні шаф або світильників) підпорядковуються центральному диспетчерському рівню [15]. Такий підхід забезпечує масштабованість і гнучкість системи.

Особливістю побудови складних АСУВО є використання розподілених систем керування з елементами IoT, що дозволяє реалізувати адресне керування кожним світильником. Широко застосовуються адаптивні

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритми, які змінюють рівень освітлення в залежності від реального навантаження (трафіку, пішохідної активності). Також характерною є інтеграція з іншими міськими системами, що розширює функціональність контуру регулювання. Значну роль відіграє використання бездротових каналів зв'язку, що спрощує розгортання системи. Важливою особливістю є наявність резервування та автономних режимів роботи, що підвищує надійність. У сучасних системах застосовуються елементи прогнозування та аналітики, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного керування. Таким чином, контур регулювання в АСУВО є складною кіберфізичною системою з високим рівнем автоматизації та адаптивності.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Реалізація структури автоматизованої системи керування вуличним освітленням та функціональне представлення основних вузлів управління

Автоматизована система керування вуличним освітленням у великих містах реалізується як багаторівнева розподілена система, що поєднує апаратні, програмні та комунікаційні компоненти в єдину інформаційно-керуючу мережу. Основною метою побудови такої структури є забезпечення ефективного, надійного та енергоощадного функціонування освітлювальної інфраструктури з можливістю централізованого моніторингу та керування.

Структура АСКВО формується за ієрархічним принципом, що дозволяє розділити функції між різними рівнями управління, зменшити навантаження на центральні вузли та забезпечити автономність локальних підсистем (рисунк 2.1). Типова архітектура включає три основні рівні: верхній (диспетчерський), середній (локальні вузли керування) та нижній (польові пристрої).

Верхній рівень системи представлений диспетчерським центром, який виконує функції централізованого управління та аналітики. Основними складовими цього рівня є сервери, автоматизовані робочі місця операторів та спеціалізоване програмне забезпечення (SCADA або IoT-платформи) [15, 16].

Функціональне призначення диспетчерського рівня включає:

- формування графіків роботи освітлення;
- централізоване керування режимами;
- збір, зберігання та обробку телеметричних даних;
- візуалізацію стану мережі в реальному часі;
- формування звітів та аналітичних показників;
- генерацію аварійних повідомлень.

На цьому рівні реалізується логіка стратегічного керування, зокрема оптимізація енергоспоживання, прогнозування навантажень та інтеграція з

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

іншими системами «розумного міста». Важливою функцією є забезпечення кібербезпеки та управління доступом користувачів.

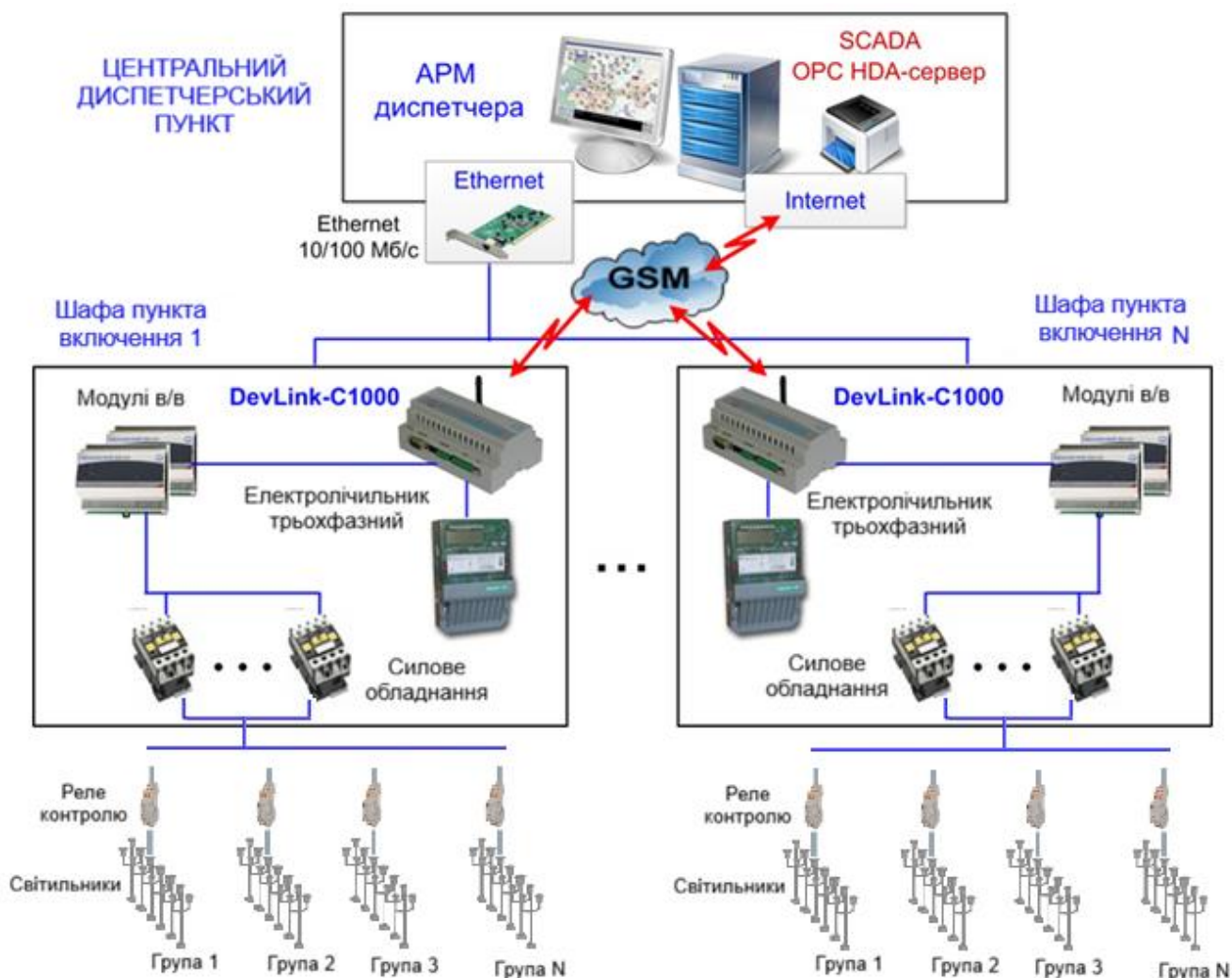


Рисунок 2.1 – Загальна структура АСКВО

Середній рівень представлений шафами керування, оснащеними промисловими контролерами, комунікаційними модулями та захисною апаратурою. Цей рівень є ключовим для реалізації локального керування освітлювальними мережами.

Основні функції середнього рівня [16]:

- виконання команд, отриманих від диспетчерського центру;
- обробка сигналів від сенсорів;
- реалізація алгоритмів керування освітленням;
- контроль стану електричних параметрів;

- локальна діагностика та аварійний захист;
- передача даних на верхній рівень.

Промисловий контролер у складі шафи керування виконує роль ядра системи. Він забезпечує як централізоване, так і автономне функціонування, що є критично важливим у разі втрати зв'язку з диспетчерським центром. У сучасних системах використовуються ПЛК із підтримкою промислових протоколів зв'язку та можливістю інтеграції в IoT-середовище.

Нижній рівень складається з безпосередніх виконавчих та вимірювальних елементів системи. До основних складових даного рівня належать:

- світильники (переважно світлодіодні);
- драйвери керування;
- сенсори освітленості, руху, температури;
- електрорічильники;
- реле та контактори.

Функціонально цей рівень забезпечує:

- реалізацію освітлення територій;
- збір первинної інформації про стан середовища;
- виконання команд керування.

Сучасні світильники часто оснащуються індивідуальними контролерами, що дозволяє реалізувати адресне керування кожною точкою освітлення. Це значно підвищує гнучкість системи та дозволяє впроваджувати адаптивні режими роботи.

Зв'язок між рівнями АСКВО забезпечується за допомогою різних каналів передачі даних. Вибір технології залежить від масштабу системи, умов експлуатації та економічної доцільності. Основні типи комунікацій:

- провідні (Ethernet, оптоволоконні мережі);
- PLC (передача даних по силових лініях);
- бездротові (GSM/GPRS, LTE, LoRaWAN, ZigBee).

Комунікаційна підсистема повинна забезпечувати:

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- надійну передачу даних;
- низьку затримку сигналів;
- захищеність від несанкціонованого доступу;
- масштабованість.

Функціональне представлення основних вузлів системи керування вуличного освітлення на нижньому рівні включає: ПЛМ – пристрій обробки вхідних даних і прийняття рішень; сенсори – контрольно-вимірювальні пристрої; виконавчі механізми – засоби керування увімкнення/вимкнення, режимів роботи освітлювальних пристроїв [17].

Промисловий контролер або ПЛК виконує наступні функції:

- обробка вхідних сигналів;
- реалізація алгоритмів керування;
- формування керуючих впливів;
- обмін даними з іншими вузлами;
- забезпечення автономної роботи.

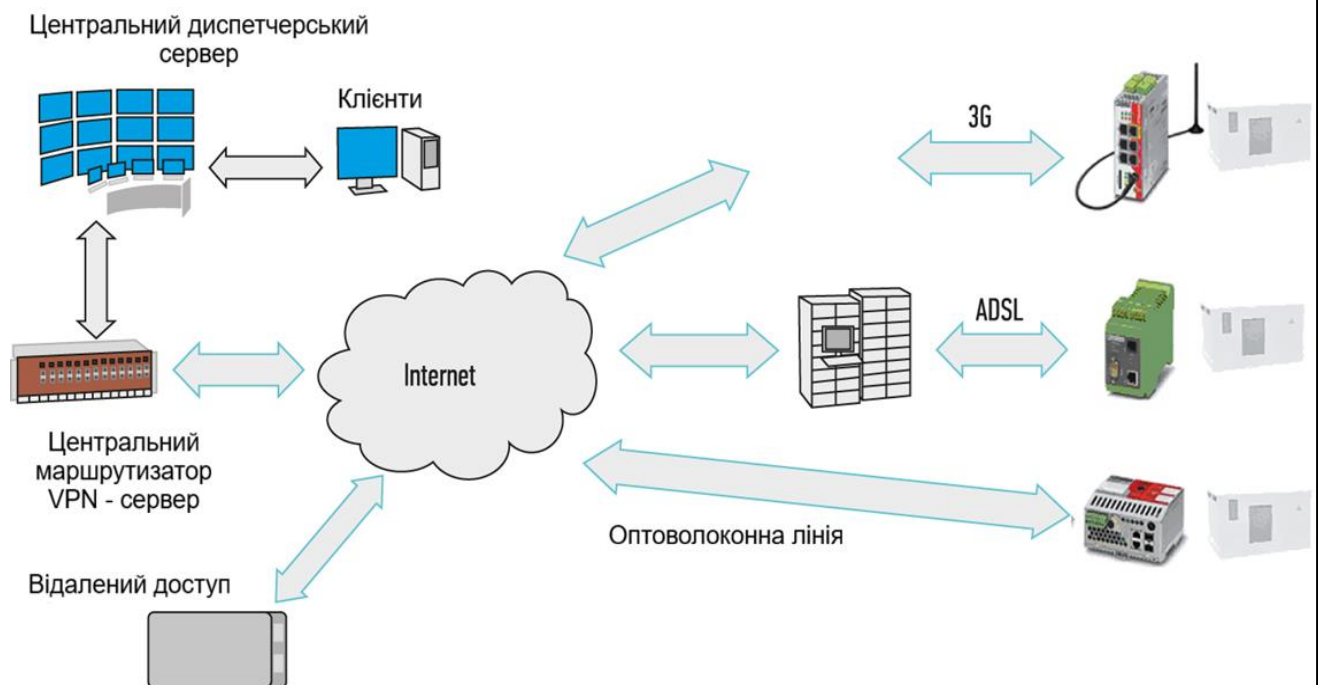


Рисунок 2.2 – Функціональне представлення основних вузлів системи керування вуличного освітлення

ПЛК є центральним елементом локального контуру регулювання АСКВО. Локально ПЛК знаходять у ШУВО того чи іншого сектора освітлення. Сенсори та вимірювальні пристрої забезпечують отримання інформації про:

- рівень освітленості;
- наявність руху;
- кліматичні умови.

Ці дані використовуються для адаптивного керування системою. Ефективність роботи такої системи напряму залежить від програмно-апаратних засобів та алгоритмів їх роботи.

Виконавчі пристрої засоби нижнього рівня ієрархічної структури до яких належать:

- світильники;
- димери;
- комутаційні апарати.

Ці засоби реалізують безпосередній вплив на освітлювальну мережу та ефективну роботу усіх її елементів. Серверна частина та програмне забезпечення забезпечують:

- диспетчеризацію;
- аналітику;
- візуалізацію;
- інтеграцію з іншими системами.

Серверна частина може бути реалізована як локально, так і у хмарному середовищі.

Особливості реалізації сучасних АСКВО включають рівень технологічних можливостей програмно-апаратних засобів та новітніх алгоритмів функціонування пристроїв керування [18, 19]. Сучасні системи мають ряд характерних особливостей:

- використання LED-технологій;
- впровадження IoT-рішень;

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- адресне керування світильниками;
- адаптивні алгоритми освітлення;
- інтеграція з іншими міськими системами;
- використання хмарних технологій;
- застосування аналітики та прогнозування.

Також важливою тенденцією є перехід до концепції Lighting-as-a-Service, що передбачає надання освітлення як сервісу. Надійність та резервування системи напряду залежить від розробленої структури та надійності засобів автоматизації. Для забезпечення безперервності роботи АСКВО застосовуються:

- резервні канали зв'язку;
- автономні режими роботи ПЛК;
- дублювання критичних вузлів;
- системи аварійного оповіщення.

Це дозволяє мінімізувати вплив відмов на функціонування системи. Реалізація структури автоматизованої системи керування вуличним освітленням базується на багаторівневій ієрархічній архітектурі, що забезпечує ефективне розподілення функцій між елементами системи. Ключову роль відіграють промислові контролери, які забезпечують локальне керування та інтеграцію з вищими рівнями.

Функціональне представлення основних вузлів показує, що система є складною кіберфізичною структурою, яка поєднує електротехнічні, інформаційні та телекомунікаційні компоненти. Сучасні тенденції розвитку спрямовані на підвищення інтелектуальності, енергоефективності та інтеграції АСКВО в екосистему «розумного міста» [20].

2.2 Обґрунтування вибору модуля управління автоматизованої системи

АСКВО відносять до класу розподілених кіберфізичних систем, у яких ключову роль відіграє модуль локального керування — промисловий

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролер. Саме цей елемент забезпечує реалізацію алгоритмів керування, обробку сигналів від сенсорів, формування керуючих впливів та взаємодію з диспетчерським рівнем.

Вибір контролера є критичним етапом проектування системи, оскільки він визначає:

- функціональні можливості всієї системи;
- рівень надійності та відмовостійкості;
- можливість масштабування;
- сумісність із сучасними протоколами зв'язку;
- економічну ефективність впровадження.

Для систем керування вуличним освітленням у великих містах до промислових контролерів висуваються підвищені вимоги, зумовлені складністю інфраструктури та необхідністю безперервної роботи.

Основні критерії вибору промислового контролера для АСКВО враховують технічні та експлуатаційні критерії, такі як: функціональні та комунікаційні можливості, надійність та умови експлуатації, масштабованість та гнучкість, економічна доцільність [21].

Функціональні можливості контролера повинні забезпечувати:

- підтримку алгоритмів автоматичного керування (таймери, астрономічні функції);
- реалізацію димування освітлення;
- обробку аналогових і дискретних сигналів;
- ведення журналів подій;
- підтримку аварійних режимів.

Комунікаційні можливості є важливою вимогою підтримки сучасних інтерфейсів та протоколів, таких як [22]:

- RS-485 (Modbus RTU);
- Ethernet (Modbus TCP, MQTT);
- GSM/GPRS/LTE;
- LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT).

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Надійність та умови експлуатації контролера у різних середовищах експлуатації повинні:

- працювати в широкому температурному діапазоні (від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$);
- мати захист від електромагнітних завад;
- забезпечувати безперервну роботу 24/7;
- мати промисловий ступінь захисту (IP).

Масштабованість та гнучкість проявляється в тому, що система повинна легко розширюватися, а саме:

- підключення нових вузлів;
- інтеграція з іншими системами Smart City;
- підтримка оновлення програмного забезпечення.

Економічна доцільність використання промислового контролера для даного спектру задач враховує ряд умов, а саме: вартість обладнання, витрати на впровадження, витрати на обслуговування, термін окупності.

Аналіз можливих рішень враховує умови і середовище експлуатації, функціональність та ефективність. На ринку представлено широкий спектр промислових контролерів (Siemens, Schneider Electric, ABB, WAGO тощо), однак їх використання у системах вуличного освітлення не завжди є оптимальним через:

- надлишкову функціональність;
- високу вартість;
- складність налаштування;
- потребу у спеціалізованому програмному забезпеченні.

У зв'язку з цим доцільним є використання спеціалізованих контролерів, орієнтованих саме на задачі енергетики та освітлення. Для реалізації АСКВО доцільно обрати контролер DevLink-C1000, який відповідає сучасним вимогам до систем автоматизації зовнішнього освітлення (рисунок 2.3).

Контролер DevLink-C1000 має наступні ключові характеристики [23]:

- підтримка протоколів: Modbus RTU/TCP, MQTT;

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- інтерфейси: RS-485, Ethernet, GSM/LTE;
- можливість інтеграції з IoT-платформами;
- вбудований астрономічний таймер;
- підтримка димування освітлення;
- енергонезалежна пам'ять;
- робота в промислових умовах;
- компактність і модульність.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд промислового контролера DevLink-C1000

Функціональні можливості контролера у складі АСКВО передбачає максимальну ефективність роботи і мінімальну надлишковість функціоналу. Контролер DevLink-C1000 забезпечує виконання всіх необхідних функцій локального рівня, а саме керування освітленням, моніторинг і діагностика, диспетчеризація, автономна робота. Керування освітленням відбувається з допомогою автоматичного вмикання/вимикання, а також керуванням за розкладом [23, 24]. У свою чергу також доступні функції адаптивного регулювання яскравості та зонального керування.

Моніторинг і діагностика дає можливість: контролю параметрів електромережі, виявленню аварійних ситуацій, передачі сигналів тривоги, ведення журналу подій. Диспетчеризація дозволяє передачу даних у SCADA

системі, також дистанційного керування і інтеграції з хмарними сервісами. Автономна робота автоматизованої системи керування супроводжується виконанням локальних алгоритмів зумовлену незалежністю від каналу зв'язку і підвищена надійність.

Переваги використання спеціалізованого промислового контролера DevLink-C1000 є: оптимізація під задачі освітлення, інтеграція з IoT, висока надійність, енергоефективність і економічна ефективність.

Оптимізація під задачі освітлення відображає те, що контролер спеціалізований для систем освітлення дозволяє уникнути надлишкових функцій. Інтеграція з IoT - підтримка MQTT та хмарних платформ забезпечує інтеграцію у Smart City. Висока надійність проявляється у промисловому виконанні, що гарантує стабільну роботу в складних умовах. Енергоефективність забезпечує оптимізацію режимів роботи освітлення. Економічна ефективність обумовлена нижчою вартістю порівняно з універсальними ПЛК при збереженні необхідного функціоналу.

Таким чином, DevLink-C1000 є більш оптимальним рішенням для АСКВО. Відповідно порівняння з альтернативними рішеннями представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння DevLink-C1000 з класичними ПЛК

Критерій	DevLink-C1000	Класичні ПЛК
Вартість	нища	вища
Спеціалізація	висока	зального призначення
Простота впровадження	висока	складніша
IoT інтеграція	вбудована	додаткова
Надлишковість функцій	відсутня	є

Особливості інтеграції в систему показує, що контролер легко інтегрується у структуру АСКВО, а саме [25]:

- взаємодіє з сенсорами та виконавчими пристроями;
- забезпечує зв'язок із диспетчерським центром;
- підтримує стандартні протоколи;

- може працювати в розподілених мережах.

Проведений аналіз показує, що вибір контролера є ключовим фактором ефективності автоматизованої системи керування вуличним освітленням. На основі технічних, функціональних та економічних критеріїв обґрунтовано доцільність використання контролера DevLink-C1000. Його застосування дозволяє:

- підвищити надійність системи;
- зменшити витрати на впровадження;
- забезпечити гнучкість і масштабованість;
- реалізувати сучасні концепції Smart City.

Отже, DevLink-C1000 є оптимальним вибором для побудови ефективної автоматизованої системи керування вуличним освітленням.

2.3 Вибір апаратних засобів керування та комунікації багаторівневої розподіленої системи

У структурі автоматизованої системи керування вуличним освітленням сенсори та виконавчі пристрої формують нижній (польовий) рівень, який безпосередньо взаємодіє з об'єктом керування. Саме цей рівень забезпечує збір первинної інформації про стан зовнішнього середовища та реалізацію керуючих впливів, сформованих контролером.

Раціональний вибір сенсорів і виконавчих елементів є визначальним фактором ефективності функціонування системи, оскільки від їх точності, надійності та сумісності залежить якість регулювання освітлення, енергоефективність і безпека експлуатації.

Шафа управління вуличним освітленням є ключовим елементом локального рівня автоматизованої системи керування, що забезпечує безпосереднє керування групами освітлювальних ліній, моніторинг параметрів електромережі та взаємодію з диспетчерським рівнем [26]. У великих містах одна шафа, як правило, обслуговує від декількох десятків до

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількох сотень світильників, що обумовлює підвищені вимоги до її функціональності, надійності та масштабованості.

Основною метою проектування ШУВО є забезпечення стабільної, безпечної та енергоефективної роботи освітлювальної мережі за умов змінних навантажень та зовнішніх впливів. До складу ШУВО автоматизованої системи керування освітленням великого міста входить комплекс апаратних і допоміжних засобів, що забезпечують прийом електроенергії, її розподіл, керування освітленням, захист і зв'язок із диспетчерським рівнем. Таким чином, до складу ШУВО входять такі ключові підсистеми, як:

- ввід і розподіл електроенергії;
- комутація навантаження;
- керування (ПЛК);
- вимірювання та облік;
- захист;
- зв'язок і передача даних;
- допоміжні системи.

Ввідно-розподільна частина забезпечує підключення до електромережі та розподіл енергії і включає в себе ввідний автоматичний вимикач (як правило 3-фазний), а також рубильник або вимикач навантаження (рисунки 2.4). Обв'язка зазначених пристроїв відбувається за допомогою розподільчих шин (L1, L2, L3, N, PE) та клемних колодок. Основне призначення ввідно-розподільної частини - прийом і первинний розподіл електроенергії.

Оптимальним рішенням вибору пристроїв ввідно-розподільної частини є [27]:

- автоматичний ввідний вимикач на струм 100–250 А;
- трифазна схема живлення;
- використання шинної системи розподілу.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір номіналу струму визначається кількістю підключених світильників (наприклад, 100–200 LED-світильників сумарною потужністю 10–20 кВт).



а)



б)

Рисунок 2.4 – Пристрої ввідно-розподільної частини: а) - ввідний автоматичний вимикач, б) - вимикач навантаження (рубильник).

Комутаційні засоби виконують безпосереднє керування лініями освітлення і включають в себе наступні пристрої (рисунок 2.5):

- контактори (за кількістю ліній);
- проміжні реле;
- автоматичні вимикачі на відхідні лінії;
- твердотільні реле (опційно).

Основні задачі комутаційних засобів вмикання/вимикання груп світильників. Обґрунтування вибору контакторів включає забезпечення надійного комутування навантаження та тривалий ресурс роботи при частих перемиканнях. Рекомендовані параметри зазначених пристроїв [28]:

- номінальний струм контакторів: 25–63 А;
- кількість ліній: 6–12;
- клас зносостійкості: не нижче АС-3.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд комутаційних засобів: а) – контактор, б) – проміжне реле, в) – автоматичний вимикач, г) – твердотільне реле.

Вимірювальні та облікові пристрої, що входять до складу ШУВО забезпечують перш за все контроль параметрів мережі. До таких пристроїв відносять (рисунок 2.6):

- багатофункціональний електролічильник;
- трансформатори струму;
- сенсори напруги;
- аналізатори якості електроенергії (опційно).

Основним призначенням вимірювальних та облікових пристроїв є облік електроенергії, контроль навантаження та діагностика стану мережі. Такі пристрої забезпечують також захист обладнання та підвищення надійності системи. Типовими параметрами їх є:

- точність обліку: клас 1.0;
- діапазон напруги: 160–260 В;
- імпульсна стійкість: до 6 кВ.



а)



б)



в)

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд вимірювальних та облікових пристроїв: а) – багатофункціональний лічильник електроенергії з аналізатором якості, б) – трансформатор струму, в) – сенсор напруги.

Комунікаційні засоби забезпечують зв'язок нижнього із верхнім рівнем за допомогою (рисунок 2.7):

- GSM/GPRS/LTE-модем;
- Ethernet-модуль або комутатор;
- антена (зовнішня);
- інтерфейси RS-485, RS-232.

Основне призначення комунікаційних засобів включає передачу даних, дистанційне керування та інтеграцію в SCADA/IoT. Загальними параметрами таких пристроїв є [29, 30]:

- швидкість передачі - до 100 Мбіт/с;
- підтримка VPN;
- віддалений доступ.

Обґрунтуванням основних функцій роботи це забезпечення:

- зв'язку із диспетчерським центром;
- передачу телеметрії;
- дистанційне керування.

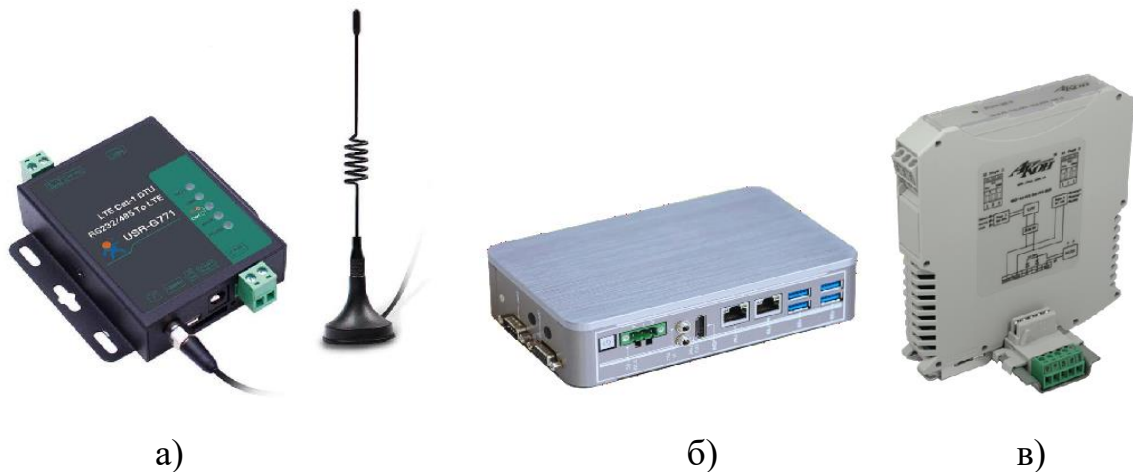


Рисунок 2.7 - Комунікаційні засоби АСУВО: а) - GSM/GPRS/LTE-модем, б) - Ethernet-модуль або комутатор, в) - інтерфейси RS-485, RS-232.

Джерело живлення забезпечує стабільну роботу низьковольтних пристроїв, що функціонують в ШУВО. До таких джерел живлення належать:

- імпульсний блок живлення (24 В DC);
- резервне живлення (UPS або акумулятор — опційно).

Основне призначення додаткових джерел живлення це стабільна робота контролера та сенсорів АСУВО. До загальних параметрів додаткових джерел живлення відносять:

- номінальна вихідна напруга (24 В DC);
- допустиме відхилення напруги ($\pm 1-3\%$);
- номінальний струм (2–10 А і більше);
- вихідна потужність (наприклад, 60–240 Вт);
- рівень пульсацій (ripple, мВ);
- стабілізація напруги при зміні навантаження;
- ємність акумулятора (А·год);
- енергетична ємність (Вт·год);
- час автономної роботи (наприклад, 1–8 год).

Правильний вибір імпульсного блоку живлення та резервного джерела є критично важливим для забезпечення безперервної роботи АСКВО. Врахування зазначених параметрів дозволяє гарантувати стабільне

функціонування контролера, комунікаційних модулів і датчиків навіть у випадку аварійних ситуацій в електромережі, що особливо важливо для систем вуличного освітлення великих міст.



а)



б)

Рисунок 2.8 – Джерела живлення для АСУВО: а) – блок живлення 24В DC, б) - резервне живлення UPS.

Шафа управління вуличним освітленням є комплексним технічним вузлом, що об'єднує електротехнічні, автоматизаційні та телекомунікаційні компоненти. Її склад визначається масштабом системи, вимогами до функціональності та рівнем автоматизації, але в будь-якому випадку має забезпечувати надійне, безпечне та ефективне керування освітленням у міських умовах.

У результаті проведеного аналізу обґрунтовано вибір апаратних засобів шафи управління вуличним освітленням для умов великого міста. Запропоновані технічні рішення відповідають сучасним вимогам до енергоефективності, надійності та автоматизації.

Застосування спеціалізованого контролера DevLink-C1000, сучасних комутаційних і захисних пристроїв, а також розвиненої комунікаційної інфраструктури дозволяє створити ефективну, гнучку та масштабовану систему керування вуличним освітленням.

3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Розробка структури цифрової системи керування комплексом технічних засобів

В умовах зростання вимог до якості керування об'єктами з електромагнітними пристроями при обмежених обчислювальних ресурсах мікропроцесорних систем, що застосовуються в режимі реального часу, стає актуальним застосування методів синтезу цифрових регуляторів із спостерігачами стану (РСС) за дискретними моделями.

Ключову роль у сучасній теорії та практиці автоматичного управління грає проблема забезпечення робастності, тобто збереження стійкості та прийнятної якості управління в умовах невизначеності параметрів САУ [30].

Як було показано раніше, значні можливості синтезу робастних систем містяться в класичному модальному управлінні, реалізованому з урахуванням регуляторів стану різного типу.

Щодо систем з РСС було показано, що зниження чутливості до варіацій параметрів об'єкта управління досягається формуванням такого розподілу полюсів характеристичного полінома, при якому зберігається мінімально-фазовий характер передавальної функції керуючого пристрою.

При цьому низька чутливість системи до варіацій власних параметрів РНС досягається шляхом вибору структури та формування темпу підстроювання, при якому виключається поява позитивних зворотних зв'язків як у основному контурі управління, і у контурі підстроювання спостерігача.

Разом з тим розробка та дослідження методів синтезу робастних систем з регуляторами стану виконувались здебільшого для безперервних моделей об'єктів з електромагнітними пристроями. Всебічне дослідження ефективності таких методів при синтезі цифрових систем керування з РСС для об'єктів з електромагнітними пристроями не проводилося.

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з особливостей цифрових методів синтезу САУ є неоднозначність переходу від безперервної моделі об'єкта управління до дискретної (Z-перетворення) [31]. При цьому, залежно від методу перетворення, що застосовується, можуть змінюватися властивості моделей об'єктів, у тому числі характеристики керованості та спостережуваності, а отже, і параметрична грубість синтезованої системи.

В даному розділі пропонується дослідження ефективності методів синтезу робастних цифрових систем з РСС за дискретною моделлю об'єкта управління з електромагнітними пристроями, а також впливу методів дискретизації на робастні властивості отриманих варіантів САУ.

Наведено варіанти цифрової системи управління з РСС, структурна схема якої наведено на рисунку 3.1, де прийнято наступні позначення: z – оператор дискретного перетворення; y_r , y і y_m – вхідний та вихідні сигнали об'єкта і спостерігача; U – керуючий вплив на об'єкт; x_m – вектор координат стану спостерігача; A_d , B_d і C_d – матриці стану, входу та виходу спостерігача з розмірностями $n \times n$, $1 \times n$ і $n \times 1$; K_d – матриця регулятора стану; L_d – матриця підстроювання спостерігача.

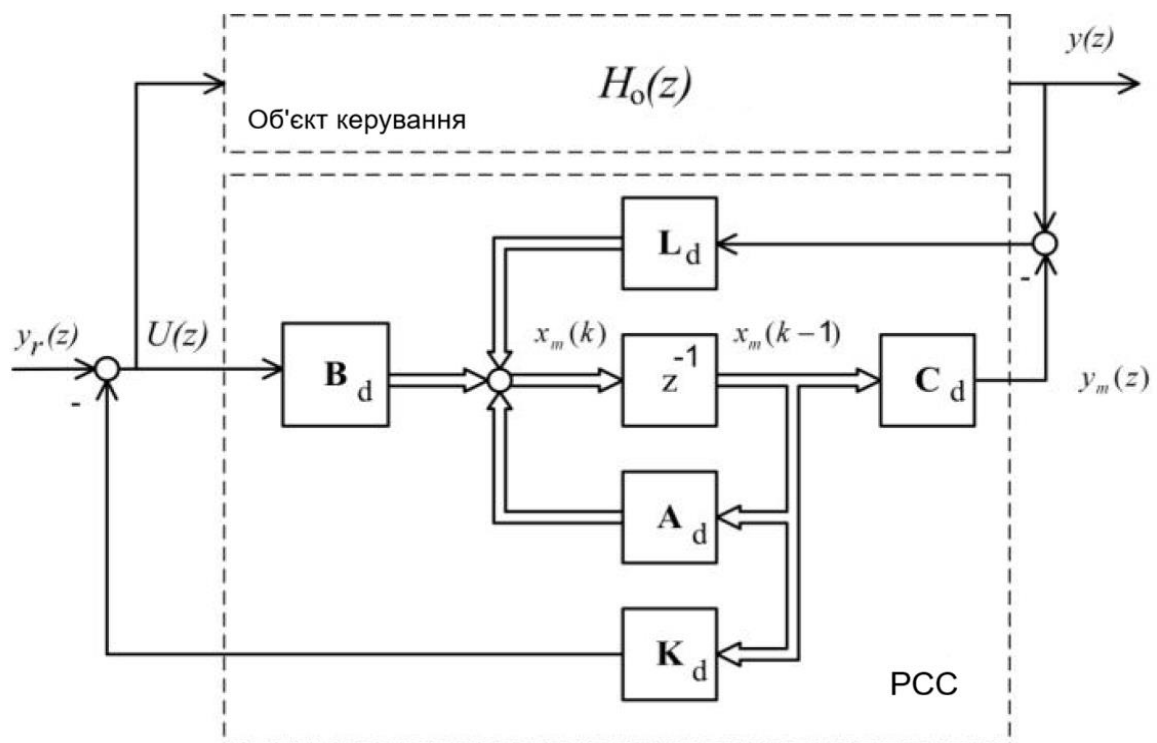


Рисунок 3.1 - Узагальнена структура цифрової системи керування з РСС

Синтез цифрової системи з РСС проводиться методом модального управління за методикою, аналогічною запропонованої раніше для безперервних систем, на основі дискретної передавальної функції об'єкта [32]:

$$H_o(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0},$$

де $m = \deg B(z)$, $n = \deg A(z)$ – ступеня поліномів чисельника та знаменника. Передбачається, що спостерігач станів може бути представлений у довільному координатному базисі, у тому числі в канонічних формах керованості (КФК) та канонічних формах спостережувальності (КФС).

Обчислення параметрів регулятора стану (матриці K_d) здійснюється на основі бажаного характеристичного полінома замкнутої цифрової системи з РСС $D(z) = z^n + d_{n-1} z^{n-1} + \dots + d_1 z + d_0$ згідно формул:

$$K_d = \overline{K_d} \cdot \overline{U_d} U_d^{-1};$$

$$\overline{K_d} = [d_0 - a_0, d_1 - a_1, \dots, d_{n-1} - a_{n-1}], \quad (1)$$

де $\overline{U_d} = [\overline{B_d} \quad \overline{A_d} \overline{B_d} \quad \overline{A_d^2} \overline{B_d} \dots \overline{A_d^{n-1}} \overline{B_d}]$ і $U_d = [B_d \quad A_d B_d \quad A_d^2 B_d \dots A_d^{n-1} B_d]$ – матриці керованості спостерігача в КФК та у його власних координатах відповідно; $\overline{K_d}$ – матриця регулятора стану для спостерігача, представленого у КФК.

Обчислення матриці підлатування спостерігача L_d здійснюється на основі бажаного характеристичного полінома $D^*(z) = z^n + d_{n-1}^* z^{n-1} + \dots + d_1^* z + d_0^*$ по аналогічним (дуальним) формулам:

$$L_d = \widetilde{L_d} \cdot \widetilde{V_d} V_d^{-1};$$

$$\widetilde{L_d} = [d_0^* - a_0, d_1^* - a_1, \dots, d_{n-1}^* - a_{n-1}], \quad (2)$$

де $\widetilde{V_d} = [\widetilde{C_d^T}, \widetilde{A_d^T} \widetilde{C_d^T}, \dots, (\widetilde{A_d^T})^{n-1} \widetilde{C_d^T}]$ і $V_d = [C_d^T, A_d^T C_d^T, \dots, (A_d^T)^{n-1} C_d^T]$ – матриці спостереження в КФС і у власних координатах спостерігача; $\widetilde{L_d}$ – матриця підлаштування спостерігача представленого в КФС.

Значення середногеометричних коренів (СГК) поліномів контура керування $D(z)$ і контура підстроювання $D^*(z)$, Ω_d і Ω_d^* відповідно, у цифровій системі управління можна визначити за формулами:

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Omega_d = \exp(-\Omega_o T_o);$$

$$\Omega_d^* = \exp(-\Omega_n T_o),$$

де Ω_o і Ω_n - СГК поліномів аналогового прототипу РСС, рад/с (відповідно до вимог поділу темпів рухів величину Ω_n вибирають у 2–3 більше, ніж Ω_o).

Потрібно синтезувати робастну цифрову систему управління, що зберігає стійкість при варіаціях параметрів об'єкта управління в заданих інтервалах: $a_i \pm \Delta a_i$, $b_j \pm \Delta b_j$, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ [33]. Задано, що цей об'єкт має властивість керованості і є мінімально-фазовим.

На основі представленого матеріалу вище, цифрова система управління володітиме робастними властивостями по відношенню до параметрів об'єкта управління, якщо регулятор є мінімально-фазною дискретною ланкою, тобто нулі і полюси його передавальної функції розташовані в межах кола одиничного радіусу [33, 34]. Розглянемо особливості синтезу робастної цифрової системи з РСС на основі даного твердження і досліджуючи фактори, що впливають на конфігурацію областей параметричної грубості САУ.

Як показує аналіз структури САУ, наведеною на рисунку 3.1, регулятор з спостерігачем стану є єдина динамічна ланка, тобто по суті керуючим пристроєм «входу-виходу», аналогічним поліноміальному регулятору. З огляду на це дискретна передавальна функція від входу до виходу РСС як єдиної динамічної ланки визначається матричною формулою:

$$H_{\text{РСС}}(z) = \frac{U(z)}{y(z)} = \frac{R(z)}{C(z)} = K_d(Iz - A_d + B_d K_d + L_d^T C_d)^{-1} L_d^T, \quad (3)$$

де $y(z)$ та $U(z)$ – сигнали на вході та виході РСС; I – одинична матриця.

Важливо відзначити, що значення поліномів регулятора $R(z)$ та $C(z)$ не залежать від форми подання спостерігача та визначаються видом поліномів $D(z)$ і $D^*(z)$ і значеннями їх середньгеометричних коренів Ω_d та Ω_d^* .

З метою забезпечення параметричної грубості цифрової системи управління з РСС рекомендується вибирати значення середньгеометричних коренів характеристичних поліномів $D(z)$ та $D^*(z)$ у межах зони робастності,

де передавальна функція регулятора (3) має мінімально-фазовий характер. Очевидно, межі цієї зони залежатимуть як від властивостей самого об'єкта управління, тобто розташування його нулів та полюсів, так і від застосовуваного методу Z-перетворення та значення періоду квантування.

Для отримання дискретних моделей об'єктів з електромагнітними пристроями, як правило, використовуються відомі методи Z-перетворення: імпульсної інваріантності (impulse); узгодженого перетворення (matched); перетворення з екстраполяторами нульового (zoh) та першого (foh) порядків; білінійного перетворення Тастина (Tustin) [34]. Всі ці методи реалізуються в середовищі MatLab за допомогою функції $\text{sysd} = \text{c2d}(\text{sys}, 'zoh')$, де sys і sysd – найменування безперервної та дискретної моделі лінійної системи, zoh – спосіб перетворення.

Для побудови областей робастності цифрових систем управління в залежності від застосовуваного методу Z-перетворення була розроблена програма в середовищі MatLab, що здійснює розрахунок параметрів РСС за формулами (1) та (2), що визначає нулі та полюси передавальної функції з використанням формули (3) та перевіряє умови параметричної грубості при варіації значень середньгеометричних коренів Ω_d та Ω_d^* .

3.2 Розрахунок робастної системи управління об'єктом, що включає електромагнітні пристрої та регулятори з спостерігачами стану

В даному підрозділі представлено синтез робастної цифрової системи з РСС на прикладі двомасової електромагнічної системи (ЕМС) з двигуном постійного струму, структура якої наведена на рисунку 3.2, де M – електромагнітний момент; M_y – момент пружності; Ω_1, Ω_2 – кутові швидкості 1-ї та 2-ї мас. Прийняті значення параметрів: $C = 0,16\text{Вб}$ – конструктивний параметр двигуна; $T_a = 0,11\text{с}$, $R_a = 3,15\text{Ом}$ – коефіцієнт часу та опір якорного ланцюга; $J_1 = 0,01$, $J_2 = 0,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – моменти інерції 1-ї та 2-ї мас; $C_{12} = 0,65\text{Н} \cdot \text{м}$ – коефіцієнт жорсткості; $K_E = 0,075\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ – коефіцієнт тертя;

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$K_{PC}=1$ та $T_{PC} = 0,001c$ – коефіцієнт та стала часу силового перетворювача [35].

Нехтуючи малою сталою часу силового перетворювача при синтезі робастної САУ, отримаємо наступну передавальну функцію безперервного об'єкта управління:

$$H_0(S) = \frac{\Omega_2(S)}{U(S)} = \frac{13,853s + 120,06}{s^4 + 16,891s^3 + 145,9s^2 + 616,76s + 19,209}.$$

Перетворення моделі об'єкта на дискретну форму при синтезі цифрового РСС здійснювалося засобами програмного комплексу MatLab з використанням функції `sysd = c2d (sys, '...')`.

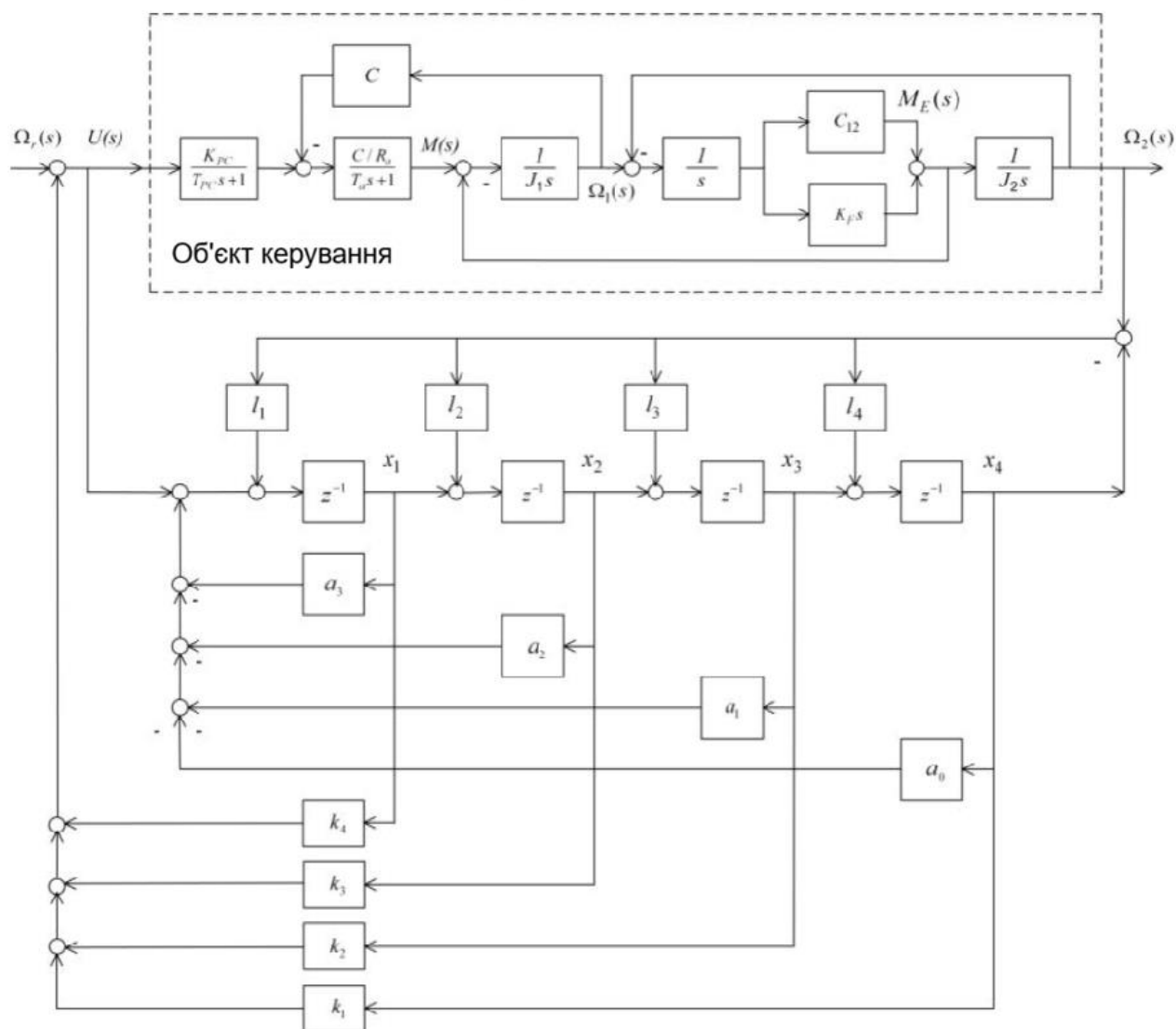


Рисунок 3.2 - Структура цифрової системи управління об'єктом, що включає електромагнітні пристрої з спостерігачем у КФК

З метою дослідження робастних властивостей цифрової системи з РСС синтез контуру управління проводився на основі бажаного полінома Ньютона, заданого у дискретній формі $D(z) = (z - \Omega_d)^4$ при варіації Ω_d , контуру підстроювання – на основі полінома $D^*(z) = (z - \Omega_d^*)^4$ при варіації Ω_d^* .

З використанням спеціально розробленої програми для цифрової системи управління з РСС, синтезованої по дискретній моделі двомасової ЕМС, були обчислені інтервали значень СГК, в межах яких дотримуються умови робастності. Значення отриманих інтервалів робастності для різних методів дискретизації неперервної моделі об'єкта управління, що реалізуються в середовищі MatLab наведено в таблиці 3.1 [36].

Таблиця 3.1 – Границі зон робастності цифрової системи управління з РСС

Метод Z-перетворення	Граничні зони робастності з залежності від темпу підстроювання РСС		
	$\Omega_H=25\text{рад/с}, \Omega_0 \in$	$\Omega_H=35\text{рад/с}, \Omega_0 \in$	$\Omega_H=75\text{рад/с}, \Omega_0 \in$
Аналоговий РСС	[5,2 ; 17,8]	[5,2 ; 15,3]	[5,2 ; 13,1]
'zoh'	[2,9 ; 3,8] U [6,2 ; 17,8]	[3,4 ; 4,1] U [5,9 ; 15,4]	[4,1 ; 4,3] U [5,7 ; 13,4]
'matched'	[2,9 ; 3,8] U [6,2 ; 17,8]	[3,4 ; 4,1] U [5,9 ; 15,4]	[4,1 ; 4,3] U [5,7 ; 13,4]
'impulse'	[2,8 ; 3,9] U [6,2 ; 17,6]	[3,3 ; 4,1] U [5,9 ; 15,3]	[4,0 ; 4,3] U [5,7 ; 13,3]
'foh'	[1,0 ; 2,5] U [5,1 ; 13,2]	[1,0 ; 2,5] U [4,6 ; 11,4]	[3,8 ; 9,4]
'tastin'	[5,9 ; 15,1]	[6,2 ; 12,7]	[6,3 ; 10,1]

Конфігурація одержаних областей робастності істотно залежить від методу перетворення, причому найкращі результати дають точні методи Z-перетворення: імпульсної інваріантності (Impulse); узгодженого перетворення (Matched); перетворення з екстраполяторами нульового (zoh) порядку. Для зазначених методів межі зон робастності цифрової системи з РСС наближаються до відповідних меж для аналогового регулятора, синтезованого за безперервною моделлю об'єкта.

Зокрема, для дискретної моделі об'єкта, перетвореної методом 'zoh' при $T_0 = 0,01\text{с}$, у зоні робастності при $\Omega_0 = 15\text{рад/с}$ та $\Omega_H = 75\text{рад/с}$ були отримані наступні параметри РСС:

$$K_d = [0,295 \ -0,970 \ 1,062 \ -0,388];$$

$$L_d = [1,488 \ 10^9 \ 1,364 \ 10^9 \ 1,251 \ 10^9 \ 1,147 \ 10^9].$$

Поза зоною робастності при $\Omega_0 = 30\text{рад/с}$ та $\Omega_H = 75\text{рад/с}$ були отримані такі параметри:

$$\mathbf{K}_d = [0,543 \ -1,894 \ 2,214 \ -0,868];$$

$$\mathbf{L}_d = [1,488 \ 10^9 \ 1,364 \ 10^9 \ 1,251 \ 10^9 \ 1,147 \ 10^9].$$

Графіки перехідних процесів у системі з РСС при дотриманні ($\Omega_0 = 15\text{рад/с}$) та порушенні ($\Omega_0 = 30\text{рад/с}$) умов робастності для $\Omega_H = 75\text{рад/с}$ наведено на рисунку 3.3 а і б відповідно, де крива 1 відповідає номінальним параметрам об'єкта управління, криві 2 та 3 – варіації параметра $J_2 = 0,15 \pm 0,3\text{кг}\cdot\text{м}^2$. Як показує аналіз отриманих даних, у разі порушення умов робастності параметрична чутливість цифрової системи керування об'єктом що включає електромагнітні пристрої з РСС істотно зростає [37, 38].

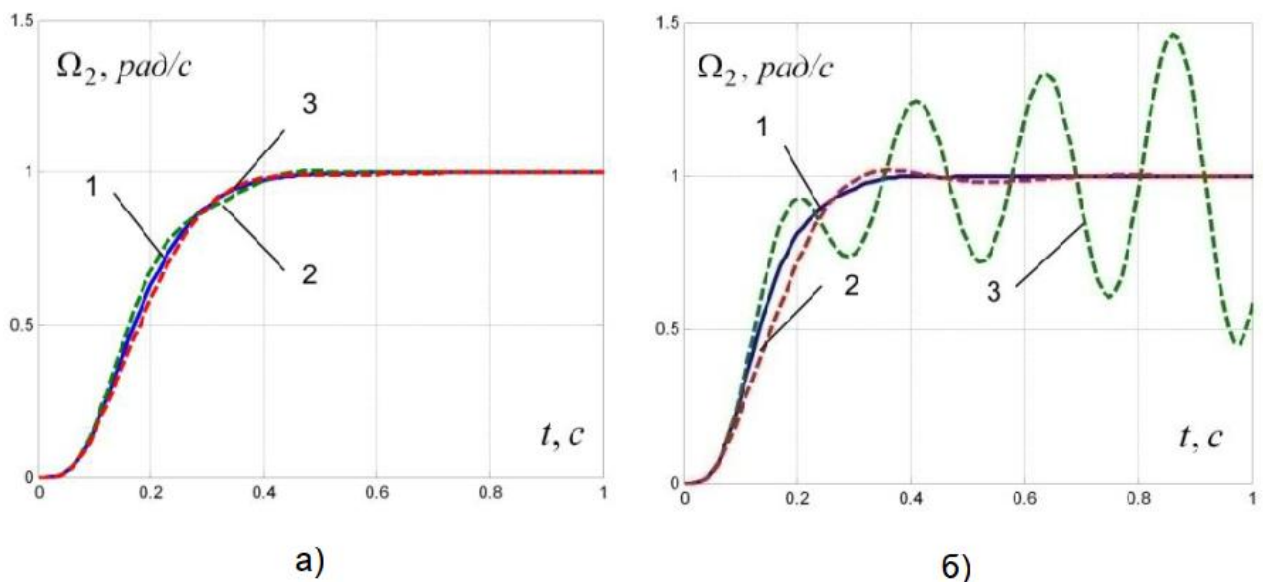


Рисунок 3.3 - Перехідні характеристики системи з РСС у зоні робастності (а) та за її межами (б)

Запитання чутливості РСС до варіацій власних параметрів не втрачають своєї актуальності навіть за цифрової реалізації, оскільки обмежена розрядна сітка обчислювача, квантування сигналів за рівнем і часом можуть істотно затруднити практичну реалізацію такого пристрою та погіршити якість управління при низькому рівні його власної параметричної грубості.

Структурна схема на рисунка 3.1 наочно показує, що сукупність асимптотичного спостерігача і регулятора стану є самостійна динамічна система з двома комплексами зворотних зв'язків, що утворюються елементами матриці K_d за координатами стану НС і елементами матриці L – по його вихідній координаті.

На основі представлено опису вище для аналогових систем управління, РСС як єдина динамічна ланка яка має низьку чутливість до варіацій власних параметрів, якщо всі зворотні зв'язки за координатами стану (матриця K_d) та у вихідній координаті об'єкта управління (матриця L) є негативними. При цьому поява позитивних зворотних зв'язків вважається ознакою високої параметричної чутливості РСС, оскільки призводить до зниження запасу стійкості системи [39, 40].

Зазначені умови параметричної грубості аналогових РСС забезпечуються шляхом формування темпу процесу управління шляхом вибору значення СГК полінома $D(z)$ та темпу процесу підстроювання шляхом вибору значення СГК полінома $D^*(z)$ у межах відповідних зон робастності, що виключають появу позитивних коефіцієнтів матриць зворотних зв'язків K_d та L .

У разі цифрової реалізації спостерігача стану визначити характер зворотних зв'язків виявляється важко, оскільки навіть для мінімально-фазової ланки коефіцієнти дискретної передавальної функції можуть приймати негативні значення. У зв'язку з цим пропонується перетворити матриці цифрового спостерігача стану в безперервну форму та визначати зони робастності для аналогового прототипу РСС.

Для побудови областей робастності цифрових РСС було розроблено програму в середовищі MatLab, що здійснює перетворення спостерігача на безперервну форму з використанням функції `sys = d2c(sysd, 'zoh')`, розрахунок матриць контуру управління K_d і контуру підстроювання L при варіації значень СГК характеристичних поліномів та аналіз характеру зворотних зв'язків.

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Важливу роль в забезпеченні параметричної грубості РСС відіграє вибір форми структурного уявлення спостерігача, визначаючий переважно конфігурацію областей робастності, в межах яких гарантується відсутність позитивних зворотних зв'язків.

У разі тенденції до виродження передавальної функції об'єкта управління спостерігач у КФК втрачатиме спостережувальність, що призведе до формування позитивних зворотних зв'язків у контурі підстроювання, а спостерігач у КФС буде втрачати керованість, що приведе до формування позитивних зворотних зв'язків у контурі управління.

У цій ситуації раціональнішим найчастіше виявляється реалізувати спостерігача у формі об'єкта управління або інших формах, що володіють оптимальним (збалансованим) поєднанням властивостей керованості та спостережувальності.

Представлений вплив форми структурного подання спостерігача станів на чутливість цифрової системи управління до варіацій власних параметрів РСС на прикладі двомасової МС із двигуном постійного струму (рисунок 3.2).

Синтезуємо варіанти цифрової системи із спостерігачами станів різної структури (КФК, КФС і форма об'єкта) для значень СГК $\Omega_0 = 12,5 \text{ рад/с}$ та $\Omega_n = 25 \text{ рад/с}$, при яких аналоговий прототип системи має високу чутливість до варіацій власних параметрів РСС.

При реалізації РСС в координатах об'єкта управління для отримання матриць A_d , B_d та C_d у цифровій формі доцільно використовувати метод узгодженого Z-перетворення (matched), оскільки в цьому випадку структура спостерігача виходить найменш складною і в найбільшій степені відповідає структурі безперервного об'єкта.

Перехідні характеристики цифрової системи управління з РСС у формах КФК, КФС та у формі об'єкта наведені на рисунку 3.4 а), б) і в) відповідно, де крива 1 відповідає номінальним параметрам РСС, крива 2 – збільшення параметра k_1 на 0,1%, крива 3 – збільшення l_1 на 0,1%.

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Рисунок 3.4 - Перехідні характеристики цифрової системи з спостерігачем, реалізованих у КФК (а), у КФС (б) та у формі об'єкта (в)

Таким чином, формування характеристичного полінома САУ у межах області параметричної грубості, що забезпечує мінімально-фазовий характер передавальної функції РСС, дозволяє синтезувати робастну цифрову систему

керування. При цьому конфігурація зони параметричної стійкості цифрової системи відповідає зоні аналогового прототипу, синтезованого за безперервною моделлю об'єкта.

При тенденції об'єкта до виродження передавальної функції у цифровій системі з РСС зростає чутливість до варіацій власних параметрів регулятора, що ускладнює мікропроцесорну реалізацію керуючого пристрої. У цій ситуації раціональнішим виявляється реалізувати спостерігача у формі об'єкта управління або в інших формах, що володіють оптимальним поєднанням властивостей керованості та спостережувальності.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження та розробку автоматизована система керування вуличним освітленням для умов великого міста. Застосовані технічні засоби автоматизації дозволяють налаштовувати параметри системи та освітлювальних пристроїв, а також налаштовувати освітленість та силу світла (світловий спектр) на певних вулицях, перехрестях та проїзних частинах доріг підвищеною інтенсивністю руху. Розроблена АСКВО дає змогу оптимально контролювати загальний рівень освітленості, інтенсивність освітлення міняти режими роботи освітлювальних засобів на різних відгалуженнях.

Проведено загальний аналіз функціонування мереж вуличного освітлення в мегаполісах. Встановлено, що сучасне вуличне освітлення є стратегічно важливим об'єктом критичної інфраструктури, що безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху та рівень злочинності. Проте існуючі застарілі системи мають низку недоліків: значні витрати електроенергії, відсутність оперативного зворотного зв'язку про стан світильників та великі експлуатаційні витрати на ручні об'їзди мереж. Визначено, що основною характеристикою сучасної АСКВО має бути її інтеграція в концепцію Smart City, що передбачає гнучке димування та адаптивність до умов середовища.

Здійснено огляд світового та вітчизняного ринку обладнання. Аналіз показав поступовий перехід від натрієвих ламп високого тиску до енергоефективних LED-технологій. Було розглянуто рішення провідних виробників (таких як Philips, Schneider Electric, а також вітчизняних розробників). Виявлено, що ключовим рішенням є перехід від простого каскадного управління до індивідуального контролю кожної світлоточки за допомогою адресних контролерів. Це дозволяє не лише економити ресурси, а й створювати «цифровий двійник» мережі освітлення.

Описано структуру контуру регулювання складних АСКВО. Об'єкт керування визначено як територіально розподілену систему з нелінійними

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристиками, зумовленими параметрами ліній електропередач та пусковими режимами джерел світла. Особливістю побудови таких систем визначено необхідність багаторівневої архітектури, де критично важливим є забезпечення живучості системи — збереження працездатності периферійних вузлів у разі втрати зв'язку з центральним сервером.

Реалізовано трирівневу структуру АСКВО. Нижній рівень: інтелектуальні драйвери світильників з підтримкою протоколів DALI або 0-10V. Середній рівень: шафи управління освітленням, що виконують роль шлюзів та локальних інтелектуальних вузлів. Верхній рівень: хмарна платформа або локальний АРМ диспетчера для візуалізації даних та дистанційного керування. Така децентралізація дозволяє мінімізувати навантаження на канали зв'язку та підвищити швидкість реакції системи на аварійні події.

Обґрунтовано вибір головного модуля управління — промислового контролера з підтримкою технологій IoT. Вибір базувався на критеріях надійності, діапазону робочих температур (від -40 до $+70^{\circ}\text{C}$), наявності вбудованих енергонезалежних годинників реального часу та підтримки протоколів обміну даними Modbus TCP/RTU. Контролер обрано з урахуванням можливості подальшого масштабування системи без заміни базового апаратного забезпечення.

Обрано засоби комунікації. Для зв'язку між ШУВО та сервером обрано технологію 4G/LTE (з резервуванням), а для зв'язку всередині сегмента мережі між світильниками — технологію LoRaWAN або PLC (передача по силових лініях). Це забезпечує надійне покриття в умовах щільної міської забудови та дозволяє збирати діагностичну інформацію про енергоспоживання кожної фази та стан запобіжників у реальному часі.

Розроблено математичну модель та структуру цифрової системи керування. Основний акцент зроблено на алгоритмах адаптивного димування (за астрономічним календарем та датчиками руху/освітленості). Враховано дискретність цифрових сигналів та час затримки в каналах передачі даних.

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропонована структура дозволяє плавно змінювати світловий потік, що подовжує термін служби LED-модулів та запобігає засліпленню водіїв при різкій зміні яскравості.

Проведено синтез та розрахунок робастної системи управління. Оскільки параметри об'єкта (опір ліній, напруга живлення) можуть змінюватися в широких межах, було застосовано підхід, що базується на використанні регуляторів зі спостерігачами стану. Спостерігач стану дозволяє в реальному часі оцінювати внутрішні змінні системи, які недоступні для прямих вимірювань (наприклад, оцінка деградації світлодіода за непрямыми ознаками). Робастний регулятор забезпечує стійкість системи та збереження заданих показників якості (перерегулювання, час встановлення) навіть при значних зовнішніх збуреннях або похибках моделі. Математичне моделювання в середовищі (наприклад, MATLAB/Simulink) підтвердило, що розроблена система зберігає працездатність при коливаннях напруги мережі до $\pm 20\%$ та зміні навантаження, забезпечуючи при цьому стабільний світловий потік та оптимальний режим енергоспоживання.

Впровадження розробленої АСКВО дозволяє: знизити споживання електроенергії на 35–50% порівняно з неавтоматизованими системами; скоротити час реакції на аварійні ситуації з декількох годин до декількох секунд; забезпечити високу надійність керування завдяки застосуванню сучасних методів робастного управління та спостерігачів стану.

Проект відповідає сучасним вимогам енергоефективності та цифровізації міського господарства і має потенціал для практичного впровадження у муніципальних мережах освітлення.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rossi M. Circadian Lighting Design in the LED Era. Cham : Springer International Publishing, 2019. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11087-1>.
2. Caicedo, D., Li, S. , & Pandharipande, A. (2017). Smart lighting control with workspace and ceiling sensors. Lighting Research and Technology, 49(4), 446–460. <https://doi.org/10.1177/1477153516629531>.
3. Ломиш В.В. Енергоекономічна схема керування вуличним освітленням сільського населеного пункту/ В.В. Ломиш, С.Е. Потривай, В.Я. Жарков // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. -Донецьк: ДонНТУ.- 2011.- С.178-180.
4. Пат 63730 Україна, МПК (2011.01) H02B37/02. Електрична схема керування вуличним освітленням сільського населеного пункту/ В.Я. Жарков, В.В. Ломиш, С.Е. Потривай.- Опубл.25.10.2011.-Бюл. № 20.
5. Пат.72097 Україна МПК (2011.01) H02B37/02. Комбінована електрична система керування вуличним освітленням сільського населеного пункту/ В.В. Ломиш, В.Я. Жарков. - Опубл. 10.08.2012.-Бюл. №15.
6. Енергоефективне електричне освітлення: навчальний посібник / [Гвоздєв С.М., Панфілов Д.І., Т.К. Романова та ін]; під. ред. Л.П. Варфоломєєва. - М.: Видавничий дім MEI, 2013. - 288с.
7. Neida, B. V., Manicria, D., & Tweed, A. (2001). An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems. Journal of the Illuminating Engineering Society, 30(2), 111–125.
8. ДСТУ EN IEC 63128:2022 Інтерфейс управління освітленням для регулювання яскравості. Аналоговий інтерфейс регулювання напруги для електронних пристроїв керування джерелом струму
9. ДСТУ EN IEC 62386-105:2022 Цифровий адресний інтерфейс освітлення. Частина 105. Особливі вимоги до апаратури керування. Передавання мікропрограмного забезпечення (EN IEC 62386-105:2020, IDT; IEC 62386-105:2020, IDT)

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

10. Kun-Che Ho, Shun-Chung Wang and Yi-Hua Liu. Dimming Techniques focusing on the improvement in luminous efficiency for High-brightness LED's// Electronics 2021. №10, P.2161.
11. Системи автоматичного керування освітленням будівель [електронний ресурс]: режим доступу: <http://electricalschool.info/main/409-sistemy-avtomaticheskogo-upravlenija.html>.
12. Robert J. Orr, Gregory D. Abowd ,The smart floor: a mechanism for natural user identification and tracking // CHI EA '00 CHI '00 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, ACM New York, NY, USA ©2000, [Електронний ресурс].-Режим доступу: dl.acm.org.
13. Горшков В.В. Энергоефективный электротехнический комплекс с элементами интеллектуального управления процессом освещения улиц населенных пунктов: монография. (под редакцией проф. О.М. Сінчука). - 2023. - 94 с.
14. Philips Hue. (2012). The definition of smart lighting. Available at: <https://www.google.com/search?q=philips+hue&ie=utf8&oe=utf-8&client=firefox-b> (Retrieved: October 25, 2018).
15. Davila J. The Impact of Artificial Intelligence (AI) in LED Lighting /J .Davila// ISSUU from designing lighting. April 2021.
16. Візір Ю. С. Штучний інтелект у системах управління освітленістю / Ю. С. Візір // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2024. Вип. 1. С. 7-12.
17. Іоффе К. І. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування світлотехнічними пристроями» (для магістрів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (спеціалізація «Світлотехніка і джерела світла»)) / К. І. Іоффе, О. Л. Черкашина; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 57 с

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Повышение показателей качества корреляционных систем / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. В. Сайко // Матеріали VIII наук. конф. «Сучасні тенденції розвитку технологій в комунікаціях та освіті» (Київ, 24-25 листопада 2011 р.). – Киев. : ДУІКТ, 2011. – С. 226 – 231.
19. Беліхмайер М.Я., Гончаров В.І. Синтез коригувальних пристроїв систем автоматичного управління на основі рівномірного наближення // Автоматика та телемеханіка, 1997. №5, С. 3-11.
20. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І. Клепач / Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.
21. Говоров П. П. Освітлювальні електричні системи та мережі / П. П. Говоров, В. О. Перепечений, В. П. Говоров // ХНАМГ. – Харків : 2009. – 227с.
22. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування. Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. 153 с.
23. Бурбело М.Й., Бірюков О.О., Мельничук Л.М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків. Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2011. 204 с.
24. Шестеренко Є.В. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця : Нова книга, 2004. 655 с.
25. Бурбело М.Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання. Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2017. 123 с.
26. Букович Н. В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем. Львів : Вища шк., 2008. 248 с.
27. Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання. Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. 597 с.
28. Нестерович В.В. Електромагнітні перехідні процеси. Маріуполь: ПДТУ, 2007 с.

					ДП.АКТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту : навч. посіб. / Б.В. Клименко. – Харків : Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
30. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін. – Київ: Каравела, 2007. – 688 с.
31. А.А. Малиновський Основи електропостачання: навч. посібник/ Малиновський А.А., Хохулін Б.К. – Львів: Львівська політехніка, 2005. – 324с.
32. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
33. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І. Клепач / Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.
34. Луцька Н.М. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / Н.М. Луцька – Київ, 2006. – 180С.
35. Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і догі. К.: Либідь, 2007. — 656 с.
36. Сердюк, О. О. Проектування систем автоматизації Simatic : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / О. О. Сердюк, О. В. Разживін. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 208 с.
37. Власов К. П. Теория автоматического управления / К. П. Власов – Харьков : Изд-во Гуманитарный центр, 2007. – 526 с.
38. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук – [2-ге вид., перероб. і доп.]. – Київ. : Либідь, 2007. – 656 с.
39. Папушин Ю. Л. Основи автоматизації гірничого виробництва / Ю. Л. Папушин, В. С. Білецький – Донецьк : Східний видавничий дім, 2007. – 168 с.
40. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування : підручник / – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 250 с.

					ДП.АКІТ.10658656.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		