

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

ПРОЦЮК Андрій Богданович

Автоматизована система керування освітленням теплиць / Automated
greenhouse lighting control system

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ-41
А.Б. Процюк

Науковий керівник
к.е.н., доцент А.М. Шевчук

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: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

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
Процюк Андрію Богдановичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизована система керування освітленням теплиць / Automated greenhouse lighting control system

Керівник роботи: к.е.н., доцент Шевчук А.М.

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 теплиць.

2. Способи керування спеціалізованим обладнанням та розробка адаптивних алгоритмів роботи освітлювального обладнання.

3. Технічні засоби автоматизації об'єкта управління.

4. Адаптація методу синтезу цифрового регулятора з еталонним фільтром низької частоти для автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз складової та технічних засобів автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства.

2. Реалізація структури та алгоритму роботи автоматизованої системи керування освітленням та обґрунтування вибору технічних засобів реалізації запропонованої системи.

3. Моделювання роботи системи автоматичного управління з вхідними цифровими регуляторами освітлення теплиць.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема автоматизованої системи керування освітленням теплиць.

2. Блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Шевчук А.М.		
2	Шевчук А.М.		
3	Шевчук А.М.		

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)

Процюк А.Б.

Керівник роботи

(підпис)

к.е.н., доцент Шевчук А.М.

АНОТАЦІЯ

Процюк А.Б. Автоматизована система керування освітленням теплиць. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна (наукова) програма - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі досліджено автоматизовані системи керування освітленням теплиць, проаналізовано загальні характеристики та складові таких систем, визначено їх функціональні, структурні та архітектурні особливості, що дозволяє забезпечити технологічний процес вирощування агрокультур. Проведена специфікація вибору технічних засобів автоматизації і управління основними апаратно-програмними засобами автоматизованої системи, проаналізовано технічну базу системи та обґрунтовано вибір засобів автоматизації. Розроблено структурну та схему, а також проведено адаптацію методу синтезу цифрового регулятора з еталонним фільтром низької частоти для запропонованої автоматизованої системи.

ABSTRACT

Procyuk A.B. Automated greenhouse lighting control system. - Manuscript.

Research for the degree of Bachelor in specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional (scientific) program - Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work investigates automated greenhouse lighting control systems, analyzes the general characteristics and components of such systems, determines their functional, structural and architectural features, which allows ensuring the technological process of growing crops. The specification of the choice of technical means of automation and control of the main hardware and software of the automated system is carried out, the technical base of the system is analyzed and the choice of automation means is justified. The structural and schematic diagram is developed, and the method of synthesis of a digital regulator with a reference low-frequency filter for the proposed automated system is adapted.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	9
1.1 Загальний аналіз та основні характеристики автоматизованих систем освітлення тепличних господарств	9
1.2 Огляд складових автоматизованих систем підтримки світлового режиму вирощування рослин у промислових теплицях	16
1.3 Особливості застосування засобів моніторингу параметрів освітленості за допомогою інтелектуальних сенсорів IoT	20
2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	27
2.1 Реалізація структурної схеми автоматизованої системи керування освітленням теплиць	27
2.2 Розробка алгоритму функціонування усіх рівнів автоматизованої системи керування освітленням	33
2.3 Обґрунтування вибору програмовано-логічного контролера керуючої підсистеми та сенсорів польового рівня	39
2.4 Вибір виконавчих вузлів та засобів автоматизації системи керування освітленістю	47
3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	53
3.1 Адаптація методу синтезу цифрового регулятора з еталонним фільтром низької частоти для автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства	53

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Процюк А.Б.			Автоматизована система керування освітленням теплиць / Automated greenhouse lighting control system	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Шевчук А.М.					4	73
Консульт.		Шевчук А.М.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		
Н. Контр.		Заставний О.М.						
Затверд.		Сегін А.І.						

3.2 Моделювання роботи системи автоматичного управління з вхідними цифровими регуляторами освітлення теплиць	60
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69
ДОДАТОК А	73

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу важливого значення набуває впровадження автоматизованих технологій, спрямованих на підвищення ефективності вирощування рослин, покращення якості продукції та зменшення витрат енергетичних ресурсів. Одним із ключових факторів, що визначає продуктивність тепличного господарства, є забезпечення оптимального світлового режиму, оскільки рівень освітленості, спектральний склад випромінювання та тривалість світлового періоду безпосередньо впливають на процес фотосинтезу та розвиток рослин.

У промислових теплицях природне освітлення постійно змінюється залежно від пори року, погодних умов та часу доби, тому виникає необхідність використання систем штучного освітлення. Традиційні способи керування, що базуються лише на годинних графіках увімкнення та вимкнення світильників, не забезпечують ефективної адаптації до реальних умов вирощування. Це може призводити до надлишкового споживання електроенергії або недостатнього рівня освітлення рослин.

Актуальним рішенням цієї проблеми є створення автоматизованої системи управління освітленням теплиць на основі сучасних програмовано-логічних контролерів, інтелектуальних сенсорів та енергоефективних LED-технологій. Використання таких систем дозволяє здійснювати постійний моніторинг параметрів світлового середовища, включаючи рівень освітлення, фотосинтетичного активного випромінювання (PAR), густину фотонного потоку (PPFD) та спектральні характеристики світла.

Застосування PLC-контролерів у поєднанні з технологіями Інтернету речей (IoT) забезпечує можливість реалізації адаптивних алгоритмів управління, дистанційного моніторингу, аналізу отриманих даних та автоматичного регулювання інтенсивності освітлення відповідно до потреб

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рослин. Це дозволяє підтримувати стабільні умови вирощування незалежно від зовнішніх факторів.

Таким чином, розробка автоматизованої системи управління освітленням теплиць є актуальним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, точності підтримання світлового режиму та продуктивності тепличного виробництва. Використання сучасних засобів автоматизації створює основу для реалізації концепції «розумної теплиці», яка забезпечує оптимальне використання ресурсів та підвищення ефективності аграрних технологій.

Мета кваліфікаційної роботи. Актуалізація розробки автоматизованої системи керування освітленням теплиць. У представленій кваліфікаційній роботі проаналізовано аналогічні та сумісні автоматизовані системи керування та наведено структуру і способи включення засобів автоматизації рівня штучного зонального освітлення теплиць. Пріоритетними задачами розробки автоматизованої системи керування рівнем освітлення з використанням інтегрованих програмно-технічних засобів та промислових програмовано-логічних контролерів, що є на сьогоднішній день невід'ємним елементом для автоматизованих систем різного ступеня складності.

Основними задачами кваліфікаційної роботи є:

- аналіз автоматизованих систем керування освітленням різного рівня на виробничому підприємстві, та пристроїв і засобів їх автоматизації;
- розробка структури технічних засобів та пристроїв, що входять до загальної схеми автоматизованої системи;
- розробка алгоритму роботи автоматизованої системи керування рівнем зонального штучного освітлення теплиць тепличного господарства;
- обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації;
- адаптація методу синтезу цифрового регулятора з еталонним фільтром низької частоти для автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства;

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

- моделювання роботи системи автоматичного управління з вхідними цифровими регуляторами освітлення теплиць.

Автоматизована система керування рівнем освітлення теплиць є актуальною розробкою та вирішує ряд нагальних задач ефективності вирощування овочів та дотримання технологічних процесів ведення тепличного господарства. Пошук проблемних рішень задачі такого типу є поєднання сучасних програмно-технічних засобів автоматизації з принципово новими алгоритмами та математичними методами у енергетичній промисловості.

Предметом дослідження є методи та алгоритми управління автоматизованою системою керування рівнем освітлення тепличного господарства.

Об'єктом дослідження є система автоматичного управління рівнем штучного зонального освітлення теплиць.

Методи дослідження – аналіз та огляд актуальних електронних ресурсів і літературних джерел, порівняльний аналіз конкуренто спроможних розробок в галузі енергетичних освітлювальних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Базується на тому, що запропоновані методи та технічні рішення по проектуванні та розрахунку систем автоматизованого управління, які мають практичні можливості підвищити їх надійність та ефективність 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.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Загальний аналіз та основні характеристики автоматизованих систем освітлення тепличних господарств

Автоматизована система освітлення тепличного господарства є сукупністю технічних та програмних засобів, призначених для автоматичного підтримання заданих параметрів освітлення в зоні вирощування рослин (рисунок 1.1).

Основною метою функціонування такої системи є забезпечення оптимального світлового режиму для конкретних видів культур за мінімальних витрат електричної енергії.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд елементів автоматизованої системи освітлення тепличного господарства

До основних функцій автоматизованої системи освітлення належать:

- вимірювання рівня природного освітлення;
- контроль тривалості світлового дня;
- автоматичне вмикання та вимикання джерел штучного освітлення;

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- регулювання інтенсивності світлового потоку;
- підтримка необхідного фотоперіоду;
- контроль споживання електроенергії;
- аварійна сигналізація та діагностика обладнання;
- архівування технологічних параметрів;
- дистанційний моніторинг та управління.

Використання автоматизованих систем дозволяє забезпечити рівномірний розподіл освітленості по всій площі теплиці та підтримувати оптимальний рівень фотосинтетичної активної радіації (PAR), необхідної для ефективного зростання рослин.

Робота автоматизованої системи освітлення базується на неперервному контролі параметрів довкілля та порівнянні їх із заданими значеннями. Основними контрольованими параметрами є [1]:

- рівень освітленості;
- тривалість світлового дня;
- інтенсивність сонячного випромінювання;
- температура повітря;
- година доби;
- сезони року.

Інформація від сенсорів надходить до програмованого логічного контролера (ПЛК), який виконує обробку отриманих даних відповідно до закладених алгоритмів управління. Якщо рівень природного освітлення зменшується нижче встановленого значення, контролер автоматично подає команду на ввімкнення додаткових світильників. У разі збільшення природної освітленості потужність штучного освітлення поступово зменшується або освітлювальні прилади виключаються. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип енергозбереження та забезпечити необхідні умови для фотосинтезу рослин.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Типова автоматизована система освітлення тепличного комплексу включає наступні основні елементи: сенсори освітленості, програмовано-логічний контролер, виконавчі пристрої (механізми), операторську панель.

Сенсори освітленості призначені для вимірювання рівня природного та штучного освітлення. Найбільш поширеними на ринку є (рисунок 1.2): фотодіоди, фототранзистори, люксметри, PAR-сенсори, квантові сенсори.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд сенсорів освітленості

PAR-сенсори забезпечують вимірювання фотосинтетично активної радіації в діапазоні довжин хвиль 400–700нм, що є найважливішим для рослин.

ПЛК є центральним елементом системи автоматизації. Основними функціями контролера є:

- збір інформації від сенсорів;
- обробка даних;
- реалізація алгоритмів управління;
- формування команд управління;
- передача інформації оператору;
- ведення архівів та журналів подій.

У тепличних господарствах широко використовуються найпопулярніші моделі провідних світових виробників даної галузі, а саме контролери:

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Siemens S7-1200, Siemens LOGO! 8, Schneider Electric Modicon, Allen-Bradley MicroLogix, Delta DVP, OВЕН ПЛК.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд найпопулярніших ПЛК орієнтованих для автоматизованих систем освітлення тепличних господарства

Виконавчі механізми є важливою складовою автоматизованих систем освітлення тепличних господарств, оскільки забезпечують безпосередню реалізацію команд управління, що надходять від програмованого логічного контролера. До основних виконавчих пристроїв належать (рисунок 1.4) [2]: електромагнітні реле, контактори, твердотільні реле, LED-драйвери, димери та частотні перетворювачі. Їх основним призначенням є комутація, регулювання потужності та управління режимами роботи освітлювального обладнання залежно від рівня природної освітленості, години доби та технологічних вимог вирощування рослин.

У сучасних тепличних комплексах найбільшого поширення набули світлодіодні драйвери з функцією димування, які дозволяють плавно змінювати інтенсивність світлового потоку та підтримувати необхідний рівень фотосинтетичної активної радіації. Застосування виконавчих механізмів забезпечує високу точність регулювання освітлення, зменшення енергоспоживання, підвищення надійності роботи системи та створення оптимальних умов для зростання та розвитку тепличних культур. Крім того,

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

сучасні виконавчі пристрої можуть інтегруватися в промислові мережі передачі даних, що дозволяє реалізувати функції дистанційного моніторингу, діагностики та автоматичного управління освітленням у складі комплексної системи автоматизації тепличного господарства.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд виконавчих механізмів і пристроїв автоматизованих систем освітлення тепличних господарства

Панель оператора (HMI – Human Machine Interface) є важливим елементом автоматизованої системи освітлення тепличного господарства, що забезпечує взаємодію обслуговуючого персоналу з технологічним обладнанням та системою управління. Основним призначенням HMI є візуалізація поточних параметрів роботи системи освітлення, відображення рівня освітленості, стану світильників, режимів роботи контролера, показників енергоспоживання та повідомлень про аварійні ситуації. За допомогою операторської панелі користувач може змінювати технологічні уставки, задавати графіки роботи освітлювальних установок, контролювати роботу окремих груп світильників та переглядати архівні дані. Сучасні HMI-панелі оснащуються кольоровими сенсорними дисплеями, підтримують промислові протоколи обміну даними (Modbus RTU/TCP, Profinet, Ethernet/IP) та забезпечують інтеграцію з ПЛК та SCADA-системами. Використання панелі оператора значно підвищує зручність експлуатації автоматизованої системи освітлення, спрощує процес налаштування

ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	13

обладнання, забезпечує оперативне реагування на відхилення технологічних параметрів та сприяє підвищенню ефективності функціонування тепличного господарства в цілому.

Ефективність автоматизованої системи значною мірою залежить від типу використовуваних світильників. Протягом тривалого періоду основним джерелом штучного освітлення теплиць були натрієві лампи високого тиску. Основними перевагами їх була: висока світловіддача, великий ресурс роботи щодо низької вартості. Але й у свою чергу були значні недоліки, а саме: значне тепловиділення, високі експлуатаційні витрати, обмежені можливості регулювання.

На сьогоднішній день найперспективнішими є LED-світильники [3]. Їх основною перевагою є: низьке енергоспоживання, тривалий термін служби, можливість плавного регулювання потужності, мінімальне тепловиділення, формування необхідного спектрального складу випромінювання. Світлодіодні системи дозволяють створювати оптимальні спектри для різних фаз розвитку рослин. Для стимулювання фотосинтезу використовуються:

- синій спектр (430-470 нм);
- червоний спектр (620-670 нм);
- білий спектр широкого діапазону.

У сучасних теплицях використовуються різні методи автоматичного керування. Порогове управління - найпростіший спосіб управління. При зменшенні освітленості нижче за заданий рівень світильники вмикаються, а при перевищенні порога – вимикаються. Перевагами такого методу є: простота реалізації, низька вартість. Відповідно недоліками є: часті перемикавання обладнання, нестабільність освітленості.

Ступінчасте регулювання передбачає ввімкнення кількох груп світильників залежно від рівня природного освітлення. До основних переваг такого методу є: підвищення енергоефективності, рівномірніше регулювання.

Плавне регулювання реалізується за допомогою димерів чи LED-драйверів. Перевагами такого способу регулювання є: висока точність

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримки освітленості, економія електроенергії, відсутність частих комутацій.

Інтелектуальне управління передбачає використання нечіткої логіки та адаптивних алгоритмів, що реалізуються за допомогою нейронних мереж і технологій Інтернету речей (IoT). Такі системи здатні прогнозувати зміну освітленості та автоматично коригувати режими роботи обладнання.

Впровадження автоматизованих систем освітлення забезпечує: енергетичну ефективність, підвищення врожайності, автоматизацію технологічних процесів, дистанційних контроль. Енергетична ефективність забезпечує зменшення споживання електроенергії на 20–40% за рахунок оптимального використання природного світла та плавного регулювання потужності світильників.

Підвищення врожайності сприяє: оптимальний світловий режим, прискорення зростання рослин, покращення якості продукції, автоматизацію технологічних процесів, знижується вплив людського фактора та підвищується стабільність технологічного процесу.

Дистанційний контроль за допомогою сучасних систем дозволяє здійснювати моніторинг через: SCADA-системи, веб-інтерфейси, мобільні за стосунки, хмарні платформи.

Незважаючи на значні переваги, автоматизовані системи освітлення мають певні недоліки, а саме: висока початкова вартість обладнання, необхідність кваліфікованого обслуговування, складність проектування великих систем, залежність від стабільності електроживлення, потреба в періодичному калібруванні сенсорів. Особливо актуальним є питання резервування живлення, оскільки відмова системи освітлення може негативно вплинути на біологічні процеси розвитку рослин.

Подальший розвиток автоматизованих систем освітлення пов'язаний із впровадженням технологій Інтернету речей, штучного інтелекту та енергоощадних LED-комплексів, що дозволить ще більше підвищити ефективність функціонування сучасних тепличних господарств.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Огляд складових автоматизованих систем підтримки світлового режиму вирощування рослин у промислових теплицях

Світло є одним із ключових факторів, що визначає інтенсивність росту та розвитку рослин. На відміну від відкритого ґрунту, де рівень освітлення залежить виключно від природних умов, у промислових теплицях виникає необхідність постійного керування світловим режимом. Така необхідність обумовлена сезонними коливаннями тривалості світлового дня, змінами інтенсивності сонячного випромінювання, хмарністю, конструктивними особливостями тепличних споруд та специфікою вирощуваних культур.

Для більшості овочевих культур, зокрема томатів, огірків, перцю та зелені, недостатній рівень освітленості призводить до сповільнення процесу фотосинтезу, зниження швидкості накопичення біомаси та погіршення товарних характеристик продукції. Саме тому сучасні тепличні комплекси оснащуються автоматизованими системами підтримки світлового режиму, які забезпечують цілодобовий контроль параметрів освітлення та автоматично адаптують роботу освітлювального обладнання до поточних умов.

На відміну від звичайних систем освітлення, що працюють за принципом «увімкнено-вимкнено», автоматизовані комплекси враховують широкий спектр параметрів, серед яких рівень природного світла, фотоперіод, стадія розвитку рослин, сезон та навіть прогнозовані погодні умови. Сучасна система підтримки світлового режиму є багаторівневою структурою, в якій кожен компонент виконує визначену функцію в загальному алгоритмі управління (рисунок 1.5) [4].

На нижньому рівні розташовані польові пристрої, які безпосередньо взаємодіють із технологічним процесом. Саме вони здійснюють вимірювання параметрів освітлення та реалізують команди управління.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середній рівень представлений засобами локальної автоматизації, які виконують обробку інформації, аналіз отриманих даних та формування керуючих впливів.

Верхній рівень включає системи диспетчеризації, операторські станції та програмне забезпечення моніторингу, що забезпечують централізоване управління всім тепличним комплексом.



Рисунок 1.5 – Ієрархічна структура автоматизованої системи керування штучним освітленням тепличного господарства

Така ієрархічна структура дозволяє забезпечити високу надійність роботи системи, масштабованість та можливість інтеграції з іншими підсистемами мікроклімату.

Однією з особливостей сучасних промислових теплиць є інтеграція системи освітлення з іншими технологічними комплексами. Рівень освітлення безпосередньо впливає на температуру повітря, вологість, швидкість випаровування вологи та інтенсивність споживання вуглекислого газу рослинами. З цієї причини система освітлення працює не ізольовано, а в тісній взаємодії з [4, 5]:

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

- системою вентиляції;
- системою опалення;
- системою зрошення;
- системою подачі CO₂;
- системою енергоменеджменту.

Наприклад, збільшення інтенсивності штучного освітлення автоматично викликає необхідність коригування режимів вентиляції для відведення надлишкового тепла. Аналогічно зміна тривалості світлового дня впливає на графік поливу та режим внесення поживних речовин. Таким чином забезпечується комплексне управління технологічним процесом вирощування рослин.

Розвиток світлодіодних технологій кардинально змінив підходи до організації штучного освітлення у тепличному господарстві. Якщо раніше основним завданням було забезпечення необхідного рівня освітленості, то сьогодні значна увага приділяється формуванню спектрального складу випромінювання. Дослідження показують, що різні ділянки спектра впливають на окремі фізіологічні процеси рослин, а саме:

- синій спектр стимулює розвиток кореневої системи;
- червоний прискорює фотосинтез;
- далеке червоне випромінювання впливає на процеси цвітіння;
- білий спектр забезпечує природний розвиток рослин.

Сучасні системи дозволяють автоматично змінювати спектральний склад освітлення залежно від стадії розвитку культури. Такий підхід отримав назву «динамічне спектральне управління» і є одним із перспективних напрямів розвитку тепличної автоматизації.

Однією з головних тенденцій розвитку автоматизованих систем підтримки світлового режиму є впровадження інтелектуальних алгоритмів управління. Традиційні системи працювали за наперед заданими часовими графіками. Однак такий підхід не враховував фактичних умов освітлення. Сучасні алгоритми використовують: адаптивне керування, прогнозування

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

погодних умов, математичні моделі росту рослин, технології машинного навчання, елементи штучного інтелекту. Завдяки цьому система може не лише реагувати на поточні зміни освітленості, а й прогнозувати їх наперед, забезпечуючи максимально ефективно використання електроенергії.

Особливо ефективними є алгоритми, що враховують накопичену добову світлову інтеграцію (DLI — Daily Light Integral), яка характеризує загальну кількість світлової енергії, отриманої рослиною протягом доби.

Освітлення є одним із найбільших споживачів електроенергії у тепличних господарствах. У зимовий період витрати на штучне освітлення можуть становити понад 40–60 % загального енергоспоживання підприємства. Саме тому автоматизовані системи підтримки світлового режиму розглядаються не лише як засіб покращення умов вирощування рослин, а й як інструмент підвищення енергоефективності. Основними напрямками економії електроенергії є:

- використання LED-технологій;
- зональне керування освітленням;
- плавне регулювання яскравості;
- компенсація природного освітлення;
- оптимізація графіків роботи світильників.

Практика експлуатації сучасних тепличних комплексів показує, що впровадження автоматизованих систем освітлення дозволяє скоротити витрати електроенергії на 25–45 % порівняно з традиційними методами управління.

Подальший розвиток систем підтримки світлового режиму пов'язаний із впровадженням концепцій цифрового сільського господарства та технологій Інтернету речей. У сучасних теплицях дедалі частіше використовують бездротові сенсорні мережі, хмарні платформи моніторингу та аналітичні системи, що дозволяють збирати великі обсяги даних про стан рослин та умови їх вирощування.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Перспективним напрямком є створення самонавчальних систем управління, які на основі накопиченої статистики автоматично підбирають оптимальні режими освітлення для конкретних культур. Такі рішення забезпечують максимальну врожайність при мінімальних енергетичних витратах та формують основу концепції «розумної теплиці» (Smart Greenhouse) [6].

Автоматизовані системи підтримки світлового режиму в промислових теплицях є складними багаторівневими комплексами, що забезпечують оптимальні умови для зростання та розвитку рослин. Їх ефективність визначається не лише якістю окремих технічних засобів, а насамперед рівнем інтеграції між підсистемами мікроклімату, використанням сучасних світлотехнічних технологій та інтелектуальних алгоритмів управління. Саме комплексний підхід до організації світлового середовища дозволяє досягти високої врожайності, енергоефективності та стабільності технологічного процесу в умовах сучасного промислового тепличного виробництва.

1.3 Особливості застосування засобів моніторингу параметрів освітленості за допомогою інтелектуальних сенсорів IoT

Розвиток сучасного тепличного господарства нерозривно пов'язаний із впровадженням цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів та забезпечення оптимальних умов вирощування рослин. У попередньому підрозділі було розглянуто загальну структуру автоматизованих систем підтримки світлового режиму та принципи взаємодії їх основних компонентів. Наступним етапом розвитку таких систем стало впровадження технологій IoT, які дозволяють суттєво розширити функціональні можливості моніторингу та управління освітленням.

Технологія IoT передбачає об'єднання великої кількості інтелектуальних пристроїв в єдину інформаційну мережу, що забезпечує

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безперервний обмін даними між сенсорами, контролерами, серверами обробки інформації та програмними комплексами диспетчеризації [7]. У тепличних господарствах така концепція дозволяє організувати постійний контроль світлового середовища, оперативно реагувати на зміни зовнішніх умов та автоматично адаптувати режими роботи освітлювального обладнання відповідно до біологічних потреб рослин.

На відміну від традиційних локальних систем автоматизації, IoT-рішення забезпечують розподілення інформації з великої кількості вимірювальних точок та створюють умови для побудови інтелектуальних систем управління нового покоління.

Одним із ключових елементів концепції IoT є інтелектуальні сенсори, які виконують не лише функцію вимірювання фізичних величин, але й забезпечують попередню обробку інформації, самодіагностику, цифрову передачу даних та взаємодію з іншими компонентами автоматизованої системи.

У системах підтримки світлового режиму такі сенсори використовуються для визначення:

- рівня освітленості;
- інтенсивності фотосинтетичної активної радіації;
- спектрального складу світлового потоку;
- тривалості світлового дня;
- густини світлового потоку;
- енергетичних характеристик освітлення.

На відміну від класичних аналогових сенсорів, інтелектуальні сенсори здатні самостійно виконувати цифрову фільтрацію сигналів, компенсацію температурних впливів та калібрування вимірювальних каналів. Це значно підвищує точність отриманих даних та зменшує вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливо важливим є те, що сучасні IoT-сенсори можуть функціонувати у складі бездротових мереж, що суттєво спрощує їх інтеграцію до існуючої інфраструктури тепличних комплексів.

Ефективність функціонування системи освітлення значною мірою залежить від правильного вибору контрольованих параметрів. Одним із основних показників є освітленість, яка характеризує кількість світлової енергії, що потрапляє на поверхню рослин. Проте для оцінювання ефективності фотосинтезу цього параметра недостатньо. У сучасних теплицях додатково контролюються [8]:

- фотосинтетичну активну радіацію (PAR);
- фотонну густину потоку PPFD;
- добову світлову інтеграцію DLI;
- спектральний склад випромінювання;
- коефіцієнт рівномірності освітлення.

Особливе значення має показник DLI (Daily Light Integral), який визначає сумарну кількість світлової енергії, отриманої рослиною протягом доби. Саме цей параметр найкраще характеризує умови фотосинтезу та безпосередньо впливає на продуктивність рослин.

Використання інтелектуальних сенсорів дозволяє здійснювати безперервне накопичення даних про світлову інтеграцію та автоматично коригувати режими роботи освітлювальних установок.

Типова архітектура IoT-системи моніторингу освітлення складається з кількох взаємопов'язаних рівнів (рисунок 1.6). На польовому рівні розміщуються інтелектуальні сенсори, які безпосередньо виконують вимірювання параметрів світлової середовища.

Наступний рівень утворюють шлюзи передачі даних (Gateway), які забезпечують збір інформації від локальних сенсорних мереж та її передачу до центрального сервера.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

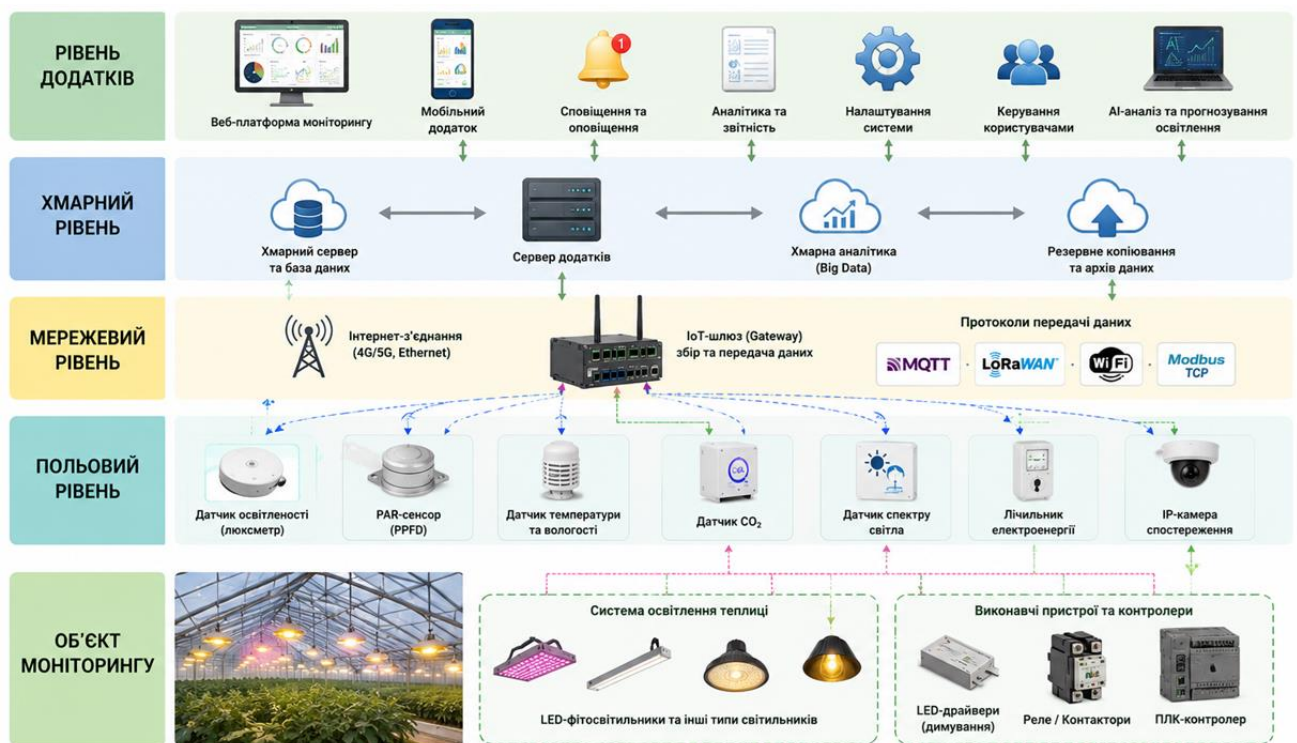


Рисунок 1.6 – Загальний вигляд архітектура IoT-системи моніторингу освітлення

На серверному рівні виконуються: накопичення даних, статистичний аналіз, формування звітів, прогнозування режимів освітлення, архівування технологічної інформації.

Верхній рівень представлений програмними платформами моніторингу та диспетчеризації, через які оператор отримує доступ до інформації про поточний стан системи. Завдяки такій архітектурі забезпечується можливість одночасного контролю великої кількості тепличних зон незалежно від їхнього територіального розташування.

Однією з головних переваг IoT-систем є використання бездротових каналів зв'язку. У сучасних тепличних комплексах застосовуються [9]:

- Wi-Fi;
- ZigBee;
- LoRaWAN;
- NB-IoT;
- Bluetooth Low Energy;

- GSM/4G/5G.

Для великих тепличних господарств особливий інтерес становить технологія LoRaWAN, яка дозволяє передавати дані на відстань декількох кілометрів при мінімальному енергоспоживанні сенсорних вузлів. Використання бездротових мереж суттєво спрощує монтаж обладнання та дозволяє легко масштабувати систему без прокладання додаткових кабельних трас. Крім того, відсутність значної кількості комунікаційних кабелів підвищує надійність експлуатації обладнання в умовах підвищеної вологості теплиць.

Важливою особливістю IoT-систем є можливість не лише збирати інформацію, а й виконувати її інтелектуальний аналіз. Отримані від сенсорів дані використовуються для:

- виявлення тенденцій зміни освітленості;
- прогнозування потреб рослин у додатковому освітленні;
- оцінювання ефективності роботи світильників;
- контролю енергоспоживання;
- виявлення несправностей обладнання.

Сучасні аналітичні платформи здатні автоматично визначати оптимальні режими роботи світильників залежно від поточних умов та накопиченої статистики. Наприклад, при прогнозуванні похмурої погоди система може завчасно збільшити потужність штучного освітлення, підтримуючи необхідний рівень добової світлової інтеграції.

Подальше розвиток IoT-технологій призвело до появи хмарних сервісів моніторингу тепличних комплексів. В даному випадку всі дані від сенсорів передаються до віддалених серверів, де виконується їх обробка та зберігання. Основними перевагами хмарних рішень є:

- доступ до інформації з будь-якої точки світу;
- необмежені можливості архівування;
- автоматичне резервне копіювання;
- масштабованість системи;

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- централізоване адміністрування.

Оператор може контролювати роботу теплиці за допомогою комп'ютера, планшета або смартфона, одержуючи інформацію про рівень освітлення в режимі реальної часу.

Одним із найбільш вагомих результатів впровадження інтелектуальних сенсорів є зниження витрат електричної енергії. Завдяки безперервному контролю параметрів освітлення система може автоматично:

- компенсувати нестачу природного освітлення;
- відключати надлишкові групи світильників;
- регулювати яскравість LED-систем;
- оптимізувати графіки роботи обладнання.

В результаті зменшується кількість непродуктивних витрат електроенергії та підвищується загальна ефективність функціонування тепличного комплексу. Практичний досвід експлуатації сучасних Smart Greenhouse показує можливість зниження енергоспоживання систем освітлення на 20–40 % без погіршення умов вирощування рослин [10, 11].

Подальший розвиток автоматизованих систем підтримки світлового режиму пов'язаний із впровадженням штучного інтелекту, цифрових двійників та технологій Big Data. У перспективі інтелектуальні сенсори зможуть не лише вимірювати параметри освітлення, а й аналізувати стан рослин за допомогою вбудованих алгоритмів машинного навчання.

Очікується, що майбутні системи будуть здатні самостійно формувати оптимальні режими освітлення для кожної окремої культури з урахуванням її фізіологічних особливостей, стадії розвитку та поточних умов довкілля. Це дозволить перейти від традиційного автоматичного керування до повністю автономних інтелектуальних тепличних комплексів нового покоління.

Застосування інтелектуальних сенсорів IoT у системах моніторингу параметрів освітленості відкриває нові можливості для підвищення ефективності функціонування промислових теплиць. Використання бездротових сенсорних мереж, хмарних платформ та інтелектуальної

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналітики забезпечує високоточний контроль світлового середовища, своєчасне реагування на зміни зовнішніх умов та оптимізацію енергоспоживання. Інтеграція IoT-технологій із сучасними системами автоматизації формує основу концепції «розумної теплиці» та створює передумови для подальшого розвитку високопродуктивного та енергоефективного тепличного виробництва.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Реалізація структурної схеми автоматизованої системи керування освітленням теплиць

Запропонована автоматизована система освітлення тепличного господарства побудовано за ієрархічним принципом відповідно до сучасних вимог автоматизації технологічних процесів та концепції Smart Greenhouse. Основною метою системи є забезпечення оптимального світлового режиму для вирощування рослин шляхом автоматичного контролю параметрів освітлення, аналізу стану довкілля та управління освітлювальним обладнанням в режимі реальної години. Структура запропонованої автоматизованої системи представлена на рисунку 2.1.

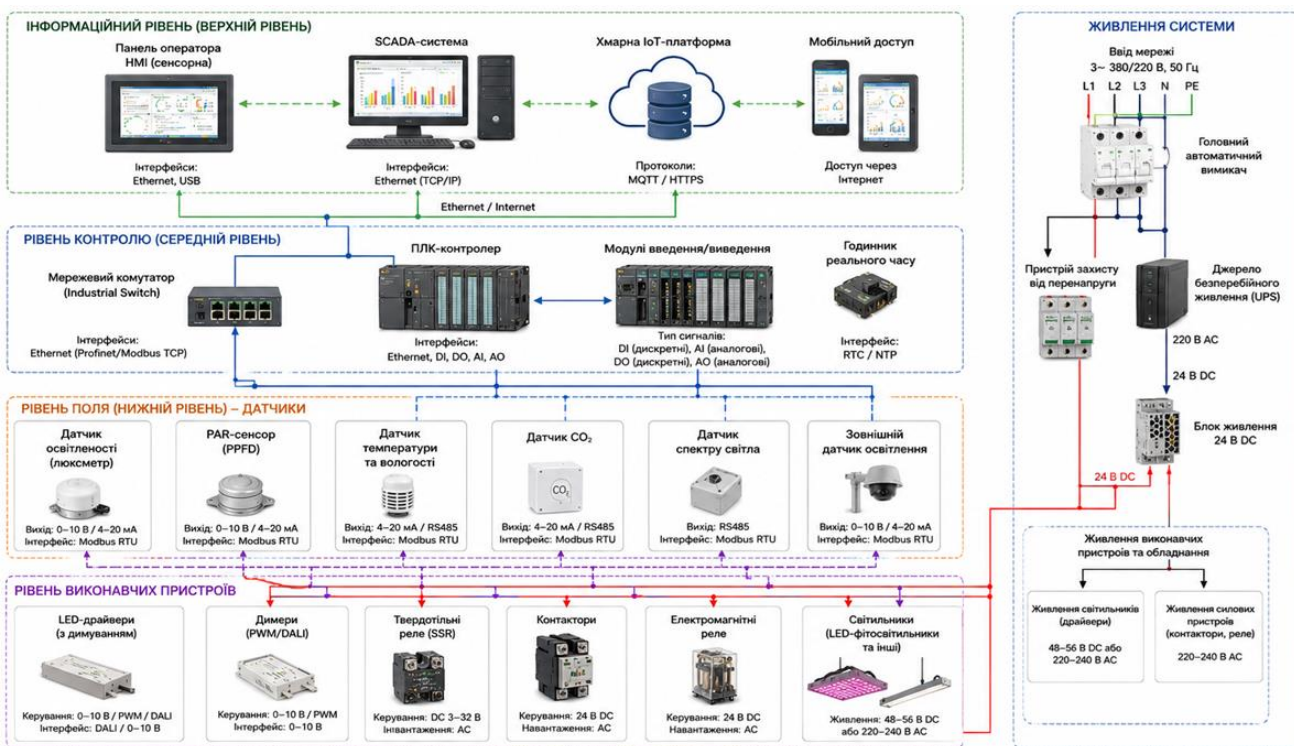


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизована система освітлення тепличного господарства

Структура системи складається з чотирьох взаємопов'язаних рівнів:
- інформаційного рівня;

					ДП.АКТТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- рівня контролю;
- польового рівня датчиків;
- рівня виконавчих пристроїв.

Кожен із зазначених рівнів виконує окремі функції та забезпечує обмін інформацією через стандартизовані промислові інтерфейси зв'язку. Особливістю запропонованої структури є поєднання класичних засобів промислової автоматизації з технологіями Інтернету речей, що забезпечує високий рівень гнучкості, надійності та функціональної масштабованості системи.

Верхній рівень структури призначений для візуалізації технологічних процесів, архівування даних, аналітичної обробки інформації та дистанційного управління тепличним комплексом. До його складу входять: панель оператора HMI, SCADA-система, хмарна IoT-платформа, мобільні клієнти моніторингу [11].

Панель оператора забезпечує локальну взаємодію персоналу з автоматизованою системою. З її допомогою здійснюється відображення поточного стану обладнання, рівня освітленості, режимів роботи світильників, аварійних повідомлень та енергетичних показників.

SCADA-система виконує функції централізованого моніторингу та диспетчеризації. У ній реалізуються мнемосхеми технологічного процесу, журнали подій, графіки зміни параметрів освітлення та модулі формування звітності.

Хмарна IoT-платформа використовується для віддаленого доступу до системи через мережу Internet. Вона дозволяє накопичувати великі обсяги технологічної інформації, здійснювати статистичний аналіз роботи обладнання та прогнозувати режими функціонування теплиці.

Мобільні додатки надають оператору можливість контролювати стан освітлення в режимі реального часу незалежно від місця перебування. Обмін даними між компонентами верхнього рівня здійснюється за допомогою протоколів: MQTT, HTTP/HTTPS, Modbus TCP, OPC UA, Profinet.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Центральне місце в структурі займає рівень контролю, основою якого є програмований логічний контролер. Саме ПЛК забезпечує збір інформації від сенсорів, виконання алгоритмів управління та формування команд для виконавчих пристроїв. Взаємодію з операторськими системами та архівування параметрів технологічного процесу виконується автоматичному режимі. Для реалізації системи можуть використовуватися наступні контролери: Siemens S7-1200, Siemens S7-1500, Schneider Electric Modicon, Delta DVP, ОВЕН ПЛК210.

До контролера підключаються модулі вводу-виводу, які забезпечують прийом аналогових та дискретних сигналів від польових пристроїв. У структурі використовуються такі типи сигналів як: 4-20 мА, 0-10 В, дискретні сигнали 24 В DC, інтерфейс RS-485, Ethernet [12]. Наявність мережевого комутатора дозволяє створювати розподілену архітектуру та підключати додаткові вузли автоматизації без внесення змін до базової структури системи. Окремим елементом є годинник реального часу, який використовується для реалізації фотоперіодичного управління освітленням в залежності від доби та пори року.

На польовому рівні розташовуються інтелектуальні сенсори, що забезпечують безперервний контроль параметрів світлового середовища. На відміну від традиційних систем, де контролюється лише рівень освітленості, запропонована структура дозволяє одержувати комплексну інформацію про умови вирощування рослин. До складу автоматизованої системи входять: сенсори освітленості, PAR-сенсори, сенсори температури та вологості, сенсори концентрації CO₂, сенсори спектрального складу світла, зовнішні сенсори освітлення.

Сенсори освітленості використовуються для вимірювання освітленості в люксах та визначення рівня природного світла всередині теплиці. PAR-сенсори вимірюють фотосинтетичну активну радіацію у діапазоні 400–700нм. Саме цей параметр безпосередньо впливає на інтенсивність фотосинтезу. Сенсори температури та вологості забезпечують контроль

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів мікроклімату, які впливають на ефективність роботи освітлювального обладнання. Сенсори концентрації CO₂ використовуються для оцінки інтенсивності фотосинтетичних процесів. Датчики спектрального складу світла дозволяють контролювати співвідношення синьої, червоної та білої складових світлового потоку. Зовнішні сенсори освітлення використовуються для визначення інтенсивності сонячного випромінювання за межами теплиці та прогнозування режимів роботи освітлення. Інтелектуальні сенсори можуть передавати дані як у провідних мережах Modbus RTU, так і через бездротові канали зв'язку LoRaWAN або Wi-Fi.

Виконавчий рівень забезпечує безпосередню реалізацію керуючих команд, сформованих PLC-контролером. До його складу входять: LED-драйвера, димери твердотільні реле, контактори, електромагнітні реле, освітлювальне обладнання.

LED-драйвера забезпечують живлення та плавне регулювання яскравості світлодіодних світильників. Керування здійснюється через: DALI, PWM, 0-10 В. Димери використовуються для регулювання інтенсивності освітлення окремих зон теплиці. Твердотільні реле забезпечують швидке та безконтактне комутування навантажень. Контактори використовуються для включення потужних груп світильників. Електромагнітні реле застосовуються для реалізації допоміжних функцій управління.

Освітлювальне обладнання у запропонованій системі використовується [13]:

- LED-фітосвітильники;
- міжрядні LED-світильники;
- верхні LED-системи освітлення;
- натрієві світильники високого тиску;
- комбіновані світлотехнічні комплекси.

Окрему увагу у запропонованій структурі приділено системі електроживлення. Живлення системи здійснюється від трифазної мережі - 380/220, 50 Гц. До складу силової частини входять: головний автоматичний

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимикач, пристрої захисту від імпульсних перенапруг, блоки живлення 24 В DC, джерела безперебійного живлення UPS, автоматичні вимикачі окремих ліній.

UPS забезпечує неперервну роботу контролера, мережевого обладнання та систем моніторингу під час короткочасного зникнення електроживлення. Розділення ліній живлення на силові та інформаційні контури дозволяє зменшити рівень електромагнітних завад та підвищити надійність функціонування системи.

Принцип роботи системи базується на неперервному циклі збору, аналізу та обробки інформації. На початковому етапі інтелектуальні сенсори здійснюють вимірювання параметрів світлового середовища та передають отримані дані до PLC-контролера.

Контролер виконує порівняння фактичних значень із заданими технологічними уставками та визначає необхідність коригування режиму освітлення. Під час обробки враховуються:

- рівень природного освітлення;
- значення PAR;
- добова світлова інтеграція DLI;
- час доби;
- пора року;
- стадія розвитку рослин.

За результатами аналізу PLC формує керуючі сигнали для LED-драйверів, димерів та контакторів. У разі недостатньої освітленості система автоматично збільшує потужність світильників або активує додаткові групи освітлення. При надлишковому природному освітленні виконується зменшення потужності штучного освітлення для зниження енергоспоживання. Вся інформація передається до SCADA-системи та IoT-платформи для подальшого аналізу та зберігання.

Однією з головних переваг запропонованої структури є її модульність. У разі збільшення площі тепличного комплексу до системи можуть

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додатково підключатися: нові секції сенсорів, додаткові шафи керування, нові групи світильників, розподілені модулі вводу-виводу, нові тепличні блоки. При цьому не виникає потреби змінювати архітектуру центрального контролера. Завдяки використанню Ethernet-мереж та промислових протоколів зв'язку можливе об'єднання кількох теплиць в єдину систему диспетчеризації підприємства.

Структура передбачає значний потенціал подальшої модернізації. У майбутньому до системи можуть бути інтегровані:

- модулі штучного інтелекту;
- системи прогнозування врожайності;
- камери технічного зору;
- бездротові сенсорні мережі LoRaWAN;
- цифрові двійники теплиці;
- системи енергетичного менеджменту;
- сонячні електростанції;
- акумуляторні системи накопичення енергії.

Крім того, можлива інтеграція системи освітлення з підсистемами вентиляції, опалення, поливу та внесення добрив, що дозволить створити єдиний автоматизований комплекс управління мікрокліматом тепличного господарства.

Запропонована структура автоматизованої системи освітлення тепличного господарства є сучасним багаторівневим комплексом, який поєднує промислові засоби автоматизації та технології Інтернету речей. Її архітектура забезпечує високоточний контроль параметрів освітлення, енергоефективне керування світлотехнічним обладнанням, можливість віддаленого моніторингу та подальшого розширення функціональних можливостей. Модульний принцип побудови, використання відкритих промислових протоколів та підтримка сучасних цифрових технологій створюють передумови для масштабування системи та її модернізації

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідно до концепції інтелектуального тепличного господарства майбутнього.

2.2 Розробка алгоритму функціонування усіх рівнів автоматизованої системи керування освітленням

Алгоритм функціонування автоматизованої системи освітлення тепличного господарства розроблений з урахуванням необхідності створення адаптивного середовища вирощування рослин, у якому параметри штучного освітлення автоматично змінюються відповідно до реальних умов технологічного процесу. На відміну від класичних систем із фіксованим графіком увімкнення світильників, запропонований алгоритм базується на динамічному аналізі параметрів освітлення та формуванні оптимальних керуючих впливів.

Основним завданням алгоритму є забезпечення балансу між потребами рослин у світловій енергії та економічно ефективним використанням електроенергії (додаток А) [14]. Для цього система працює не лише з миттєвими значеннями освітленості, а виконує накопичення та аналіз інформації протягом усього циклу вирощування культури.

Особливістю запропонованого алгоритму є використання багатопараметричного керування, коли рішення про зміну режиму роботи освітлювального обладнання приймається не за одним параметром, а на основі комплексного аналізу:

- рівня природного світлового потоку;
- необхідної кількості світлової енергії для рослин;
- поточного етапу розвитку культури;
- добового циклу освітлення;
- ефективності використання електроенергії;
- стану виконавчого обладнання.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином формується інтелектуальна система підтримки світлового середовища, здатна автоматично пристосовуватися до змін зовнішніх умов.

Після запуску автоматизованої системи виконується перехід у режим підготовки до роботи (рисунк 3.2). На цьому етапі програмований логічний контролер формує початковий стан усіх програмних модулів та перевіряє готовність обладнання до виконання технологічного циклу. Відбувається завантаження параметрів, які визначають подальший режим роботи системи:

- тип вирощуваної культури;
- потрібна тривалість світлового періоду;
- допустимі межі освітленості;
- режими роботи окремих зон теплиці;
- параметри енергозбереження.

Оскільки різні культури мають різні вимоги до освітлення, система використовує технологічні профілі або так звані «рецепти вирощування». У них зберігаються оптимальні параметри світлового режиму для кожного виду рослин.

Наприклад, у фазі проростання рослина може потребувати одного співвідношення інтенсивності та тривалості освітлення, а в період активного зростання — зовсім іншого. Автоматизована система враховує ці особливості без необхідності постійного втручання оператора.

Наступним етапом алгоритму є створення актуальної інформаційної моделі стану тепличного середовища (рисунк 2.2). Для цього контролер виконує періодичне опитування сенсорної мережі та отримує поточні технологічні параметри.

Особливістю сучасних автоматизованих систем є те, що інформація аналізується не окремими значеннями, а у вигляді взаємопов'язаного набору даних [14, 15]. Наприклад, однаковий рівень освітленості може вимагати різних керуючих дій залежно від:

- години доби;
- погодних умов;

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- температури всередині теплиці;
- накопиченої кількості світла протягом дня.

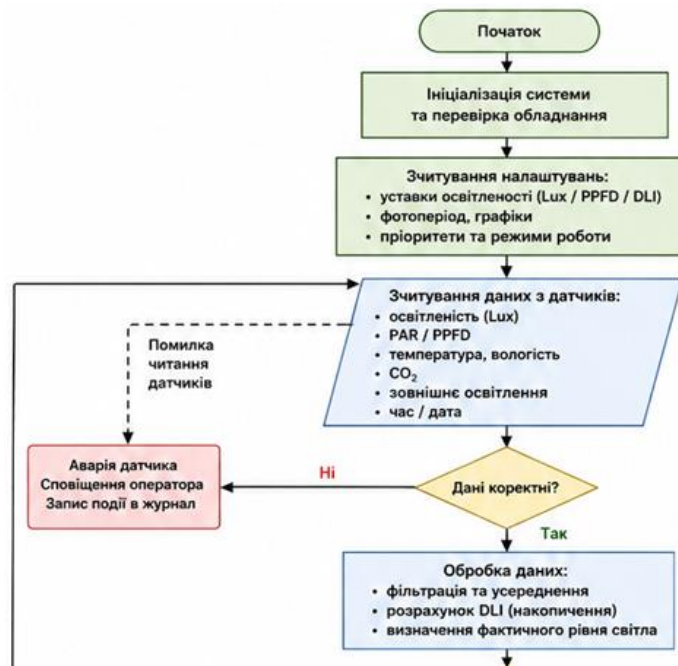


Рисунок 2.2 – Початковий етап функціонування
або підготовчий режим роботи

Отримані дані проходять попередню програмну обробку, а саме: усунення випадкових коливань сигналу, усереднення вимірянних значень, перевірку відповідності допустимим межам, перетворення сигналів у технологічні одиниці. Завдяки цьому контролер отримує стабільну та достовірну інформацію для подальшого формування команд управління.

Основний блок прийняття рішень алгоритму виконує визначення фактичної потреби рослин у додатковому світловому потоці (рисунок 2.3). На цьому етапі система порівнює фактичний стан світлової середовища з необхідними технологічними параметрами. Можливі три основні ситуації.

Недостатній рівень освітлення, якщо кількість природного світла є недостатньою, контролер визначає величину необхідної компенсації. При цьому система не просто включає всі світильники одночасно, а поступово збільшує їх потужність. Послідовність дій є наступна:

- збільшення яскравості працюючих LED-модулів;

- підключення додаткових світлових зон;
- корекція спектрального складу світла.

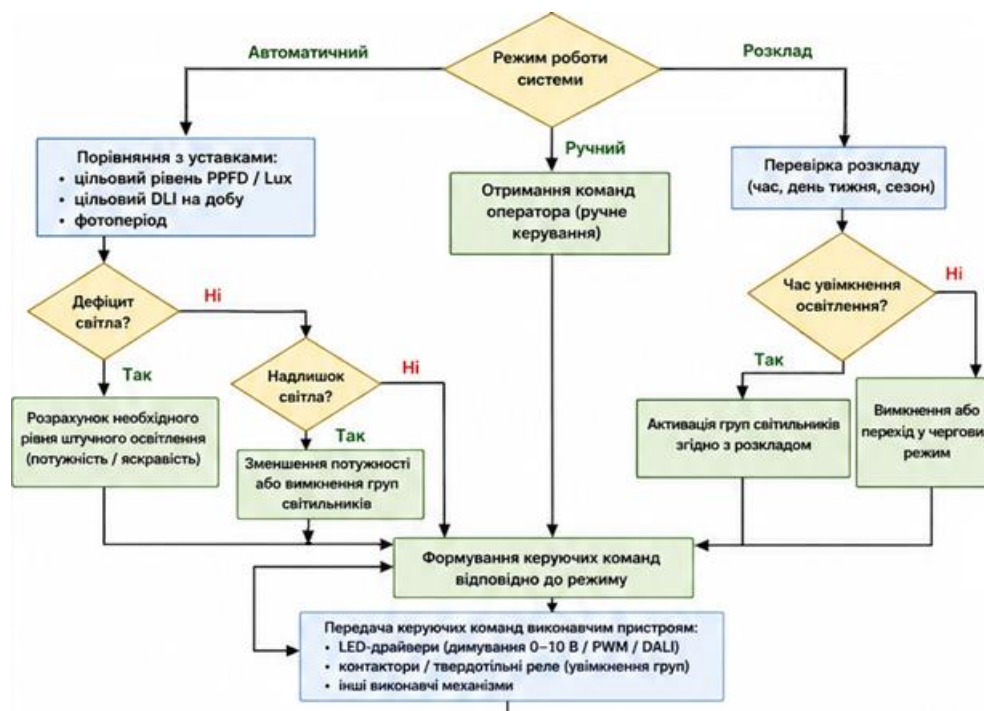


Рисунок 2.3 - Основний блок прийняття рішень алгоритму

Такий принцип дозволяє уникнути різких змін умов вирощування та зменшити пікового навантаження на електромережу.

Оптимальний рівень освітлення, якщо параметри світлового середовища знаходяться у заданому діапазоні, система підтримує поточний режим. У цьому стані контролер лише: контролює стабільність процесу, накопичує статистичні дані, виконує моніторинг обладнання. Додаткові зміни у роботу світильників не вносяться.

Надлишкове освітлення, при достатній кількості природного світла система переходить до режиму енергетичної оптимізації. Алгоритм поступово: знижує рівень димування, переводить частину світильників в режим очікування, відключає непотрібні групи освітлення. Такий режим є особливо важливим у весняно-літній період, коли природне сонячне випромінювання може забезпечити значну частину потреб рослин.

Після визначення необхідного режиму роботи система переходить до формування керуючих впливів. Особливістю алгоритму є зональний

принцип управління. Вся площа теплиці може бути розділена на окремі ділянки, для кожної з яких підтримується свій режим освітлення. Це дозволяє [15]:

- одночасно вирощувати різні культури;
- компенсувати нерівномірність природного освітлення;
- зменшити загальні витрати електроенергії.

Керування світильниками може здійснюватися за кількома принципами:

- дискретне керування — увімкнення або вимкнення окремих груп;
- ступінчасте керування — зміна кількості активних освітлювальних блоків;
- плавне керування - регулювання інтенсивності світлового потоку.

Найбільш ефективним є комбінований метод, коли контролер одночасно використовує декілька способів регулювання.

Важливою частиною алгоритму є постійний контроль правильності виконання команд (рисунки 2.4). Після зміни режиму освітлення система перевіряє, чи відповідає фактичний результат очікуваному. Наприклад, якщо після збільшення потужності світильників рівень освітленості не змінився, система може визначити:

- несправність LED-модуля;
- пошкодження драйвера;
- відсутність живлення;
- помилку каналу управління.

У цьому випадку виконується: локалізація несправності, формування аварійного повідомлення, запис події та перехід до резервного алгоритму роботи. Це дозволяє підтримувати стабільність технологічного процесу навіть при часткових відмовах обладнання.

У процесі роботи алгоритм забезпечує постійний інформаційний обмін із верхнім рівнем автоматизації. У систему диспетчеризації передаються:

- поточні параметри освітлення;

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- режими роботи світильників;
- енергетичні показники;
- статистика роботи обладнання;
- аварійні повідомлення.

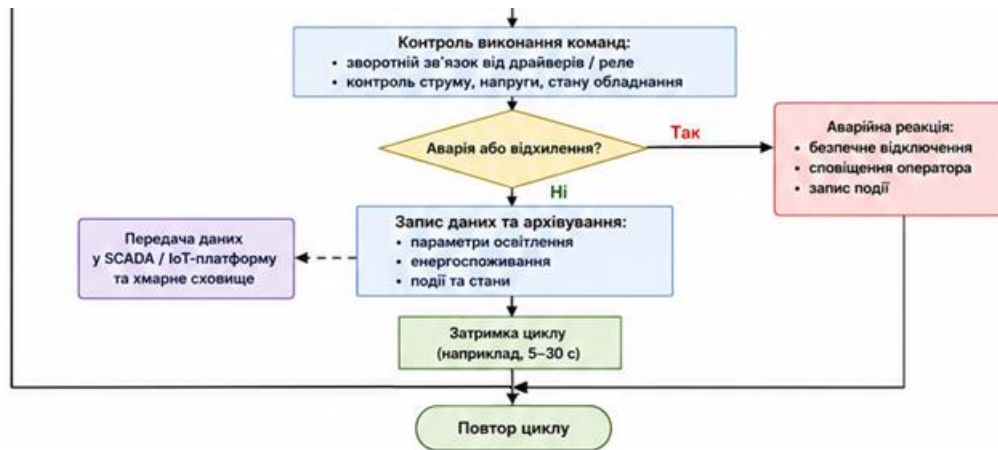


Рисунок 2.4 – Блок алгоритму, що відповідає за постійний контроль правильності виконання команд

Оператор через HMI або SCADA-систему має можливість: контролювати технологічний процес, змінювати параметри, переглядати історію роботи, аналізувати ефективність системи. За використання IoT-платформи ці дані можуть передаватися до хмарного середовища для подальшої аналітики.

Після виконання всіх операцій алгоритм не завершується, а повертається до початку циклу вимірювання. Таким чином реалізується неперервний принцип управління: вимірювання → аналіз → прийняття рішення → регулювання → контроль результату.

Період повторення циклу може змінюватися залежно від умов роботи [16]:

- швидкий режим - при різких змінах освітлення;
- стандартний режим - під час стабільної роботи;
- економічний режим - у нічний період.

Це дозволяє оптимально використовувати ресурси контролера та забезпечувати потрібну швидкість реакції системи.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Запропонований алгоритм роботи автоматизованої системи освітлення тепличного господарства реалізує принцип адаптивного керування, при якому параметри освітлення змінюються відповідно до реальних потреб рослин та умов навколишнього середовища. На відміну від традиційних систем із фіксованим графіком роботи, такий підхід забезпечує інтелектуальне регулювання світлового потоку, оптимізацію енергоспоживання та підвищення стабільності технологічного процесу.

Використання багаторівневої логіки управління, зонального регулювання, автоматичної діагностики та інтеграції із системами моніторингу дозволяє створити ефективну платформу для реалізації сучасної концепції «розумної теплиці». Запропонований алгоритм може бути легко адаптований до тепличних комплексів різного масштабу та модернізації шляхом впровадження прогнозованих моделей, штучного інтелекту та технологій IoT.

2.3 Обґрунтування вибору програмовано-логічного контролера керуючої підсистеми та сенсорів польового рівня

Ефективність функціонування автоматизованої системи управління освітленням тепличного господарства значною мірою визначається правильним вибором технічних засобів автоматизації, що забезпечують збір, обробку та передачу інформації, а також реалізацію керуючих впливів. Вибір програмовано-логічного контролера та сенсорів польового рівня необхідно здійснювати з урахуванням особливостей технологічного процесу вирощування рослин, умов експлуатації обладнання та можливості подальшого розширення системи.

На відміну від простих систем управління освітленням, сучасні промислові теплиці потребують не тільки автоматичного ввімкнення та вимкнення світильників, а й реалізації адаптивного регулювання параметрів освітлення залежно від стану рослин, рівня природного світла та

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергетичних показників. Тому керуюча підсистема повинна забезпечувати обробку великої кількості вхідних параметрів, взаємодію з інтелектуальними сенсорами та підтримку промислових мереж передачі даних.

При виборі апаратної платформи для автоматизованої системи освітлення тепличного комплексу враховуються такі основні критерії [17]:

- кількість та тип каналів вводу-виводу;
- можливість підключення аналогових та цифрових сенсорів;
- швидкість обробки технологічної інформації;
- підтримка промислових протоколів зв'язку;
- стійкість до умов експлуатації;
- можливість інтеграції з HMI та SCADA-системами;
- простота програмування та обслуговування;
- можливість подальшого масштабування.

Оскільки система освітлення теплиці може містити велику кількість світових зон, сенсорів та виконавчих механізмів, доцільним є використання промислового програмованого логічного контролера модульного типу. Для реалізації керуючого рівня автоматизованої системи освітлення тепличного господарства є доцільним використання контролера Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Даний контролер належить до сучасного покоління компактних промислових PLC та призначений для побудови систем автоматизації середнього рівня складності. Вибір даного контролера обумовлений його високою надійністю, модульністю, широкими комунікаційними можливостями та підтримкою сучасних алгоритмів управління. До основних технічних характеристик Siemens S7-1200 CPU 1214C належить:

- напруга живлення - 24В DC;
- дискретні входи - 14DI;
- дискретні виходи - 10 DO;
- аналогові входи - 2 AI;
- робоча пам'ять - 100 КБ;
- швидкість виконання операцій до 0,08 мкс;
- інтерфейс зв'язку PROFINET Ethernet;
- можливість розширення сигнальних та комунікаційних модулів;
- програмування TIA Portal;
- робоча температура 0...+55 °С.

Контролер має достатню продуктивність для реалізації алгоритмів управління освітленням в режимі реального часу. Наявність вбудованого Ethernet-інтерфейсу дозволяє організувати зв'язок із операторською панеллю, сервером диспетчеризації та IoT-шлюзом.

У запропонованій автоматизованій системі PLC виконує функції центрального пристрою управління. До основних завдань контролера належить: приймання інформації від сенсорів освітлення, аналіз параметрів світлової середовища, розрахунок необхідної інтенсивності штучного освітлення, формування сигналів керування LED-драйверами, контроль стану виконавчих пристроїв, передача інформації оператору.

Для підключення додаткових пристроїв до контролера можуть використовуватись модулі розширення - SM 1231 Analog Input, призначений для підключення аналогових сенсорів по 0-10 В і 4-20 мА. Основними характеристиками є: 4 або 8 аналогових входів, роздільна здатність 13 біт,

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримка промислових сенсорів. Даний модуль використовується для підключення сенсорів освітленості, температури та вологості.

SM 1223 DI/DO використовується для збільшення кількості цифрових каналів. Основними характеристиками є: 16 цифрових входів, 16 цифрових виходів, рівень сигналу 24 DC. Через даний модуль можуть керуватися контактори, реле та сигнальні пристрої.

SM1241 RS-485 забезпечує підключення цифрових сенсорів через Modbus RTU. Використовується для: PAR-сенсорів, IoT-шлюзів, вимірювальних модулів. Таким чином, Siemens S7-1200 забезпечує необхідну гнучкість для побудови як невеликої теплиці, так і масштабного промислового комплексу.

Польовий рівень автоматизованої системи відповідає за здобуття достовірної інформації про стан світлового середовища. Вибір сенсорів здійснюється таким чином, щоб забезпечити контроль не лише загальної освітленості, а й параметрів, які безпосередньо впливають на фотосинтез рослин.

Для вимірювання загального рівня освітлення доцільним є застосування промислового сенсора освітленості Autonics BL13R-TDT (рисунок 2.6). Основним завданням сенсора освітленості Autonics BL13R-TDT в автоматизованій системі управління освітленням тепличного господарства є забезпечення неперервного контролю рівня світлового потоку у робочій зоні вирощування рослин та формування інформаційного сигналу для програмовано-логічного контролера. Сенсор здійснює визначення зміни інтенсивності природного та штучного освітлення, що дозволяє системі оцінювати фактичні умови світової середовища в теплиці. На основі отриманих даних PLC-контролер приймає рішення щодо необхідності корекції роботи освітлювальних установок: збільшення потужності LED-світильників при недостатньому рівні природного світла або їх частинного вимкнення при надмірному освітленні.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд сенсора освітленості Autonics BL13R-TDT

Основні характеристиками сенсора Autonics BL13R-TDT є: тип сенсора – фотоелектричний; напруга живлення - 12–24 В DC; вихід – транзисторний; година реакції до 1 мс; захист корпусу - IP65; температура роботи - -10...+55°C.

Для точного контролю світлової енергії, доступної рослинам, використовується PAR-сенсор Apogee SQ-521 (рисунок 2.7) [18]. Даний сенсор вимірює фотосинтетично активне випромінювання, яке є основним параметром оцінки ефективності освітлення рослин. Основним завданням PAR-сенсора Apogee SQ-521 в автоматизованій системі управління освітленням теплиць є точне вимірювання рівня фотосинтетично активного випромінювання (PAR) та густини потоку фотонів (PPFD), які безпосередньо визначають кількість світлової енергії, доступної рослинам для процесу фотосинтезу. Отримані від сенсора дані передаються до PLC-контролера, де використовуються для аналізу фактичної потреби рослин у додатковому освітленні та автоматичного регулювання інтенсивності роботи LED-світильників.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд сенсора PAR-сенсор Apogee SQ-521

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Застосування Apogee SQ-521 дозволяє підтримувати оптимальний світловий режим, уникати недостатнього або надлишкового освітлення, підвищувати ефективність зростання рослин та забезпечувати економне використання електроенергії в тепличному господарстві. До основних технічних характеристик відносять: діапазон спектру 389-692 нм; діапазон вимірювання 0–4000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$; живлення 5–24В DC; інтерфейс USB/цифровий; похибка вимірювань - $\pm 5\%$.

Для контролю якості світлового потоку використовується спектральний сенсор AMS AS7341 (рисунок 2.8). Основним завданням спектрального сенсора AMS AS7341 в автоматизованій системі управління освітленням теплиць є контроль спектрального складу світлового потоку, який надходить до рослин від природних та штучних джерел освітлення. Сенсор здійснює вимірювання інтенсивності окремих ділянок спектру (синього, зеленого, червоного та ближнього інфрачервоного випромінювання), що дозволяє PLC-контролеру оцінювати якість освітлення, а не лише його загальну потужність. Отримані дані використовуються для автоматичного коригування роботи LED-фітосвітильників зі змінним спектром, забезпечуючи оптимальні умови фотосинтезу на різних стадіях розвитку рослин.

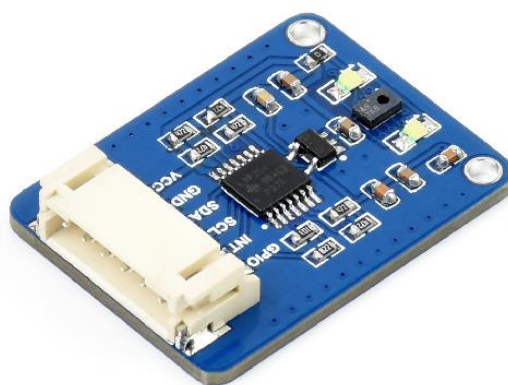


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд спектрального сенсора AMS AS7341

Використання AMS AS7341 підвищує точність формування світлового середовища, сприяє покращенню ростових процесів культур та забезпечує більш ефективне використання енергоресурсів тепличного господарства. До

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основних параметрів AMS AS7341 можна віднести: 11 каналів вимірювання спектру; діапазон 350-1000 нм; цифровий інтерфейс I²C; низьке енергоспоживання.

Оскільки робота освітлення впливає на тепловий режим теплиці, необхідним є контроль параметрів мікроклімату. Для цього використовується сенсор вологості Sensirion SHT35 (рисунок 2.9). Основним завданням сенсора Sensirion SHT35 в автоматизованій системі управління освітленням теплиць є високоточний контроль параметрів мікроклімату, а саме температури та відносної вологості повітря, які безпосередньо пов'язані з режимами роботи освітлювального обладнання.



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд сенсора вологості Sensirion SHT35

Оскільки LED-світильники та інші джерела штучного освітлення впливають на тепловий баланс теплиці та процес випаровування вологи рослинами, дані від SHT35 використовують PLC-контролер для комплексного аналізу умов вирощування. Це дозволяє автоматично коригувати режими освітлення з урахуванням температурних змін, запобігати перегріву рослин, підтримувати стабільний мікроклімат та підвищувати ефективність роботи всієї автоматизованої системи тепличного господарства. Технічні характеристики SHT35 є: температура -40...+125 °C; помилка температури $\pm 0,1$ °C; вологість 0-100% RH; похибка вологості $\pm 1,5$ %; інтерфейс I²C [19].

Інтенсивність фотосинтезу залежить не лише від освітлення, а й від концентрації вуглекислого газу. Для контролю CO₂ використовується сенсор Senseair S8 (рисунок 2.10). Основним завданням сенсора концентрації CO₂

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Senseair S8 в автоматизованій системі управління освітленням теплиць є контроль рівня вуглекислого газу в повітряному середовищі, який є одним із ключових факторів ефективності процесу фотосинтезу рослин. Сенсор забезпечує неперервне вимірювання концентрації CO₂ та передає отримані дані до PLC-контролера для оцінки відповідності умов вирощування заданим параметрам. Оскільки інтенсивність освітлення безпосередньо впливає на швидкість споживання рослинами вуглекислого газу, інформація від Senseair S8 використовується для узгодження режимів роботи LED-освітлення та систем підтримки мікроклімату.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд сенсора Senseair S8

Застосування даного сенсора дозволяє підвищити ефективність фотосинтезу, оптимізувати використання енергоресурсів та забезпечити стабільні умови зростання культур у тепличному господарстві. Характеристики сенсора Senseair S8 є наступні: принцип роботи - NDIR; діапазон 0-5000 ppm; точність ± 40 ppm; інтерфейс UART/Modbus.

Усі сенсори польового рівня об'єднуються в єдину інформаційну систему. Передача сигналів здійснюється через: аналогові канали 4–20 мА; інтерфейс RS-485; Modbus RTU; Ethernet. Отримані параметри використовують PLC-контролер для формування адаптивного алгоритму управління. Такий принцип забезпечує автоматичну зміну режиму освітлення без участі оператора.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Для реалізації керуючої підсистеми автоматизованого освітлення тепличного господарства обґрунтовано використання програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C, який забезпечує необхідну продуктивність, підтримку промислових інтерфейсів та можливість подальшого розширення системи.

Використання комплексу інтелектуальних сенсорів освітленості, PAR-випромінювання, спектрального складу світла та параметрів мікроклімату дозволяє отримувати повну інформацію про умови вирощування рослин. Такий підхід забезпечує реалізацію адаптивного управління освітленням, підвищення енергоефективності та створення сучасної автоматизованої системи відповідно до концепції Smart Greenhouse.

2.4 Вибір виконавчих вузлів та засобів автоматизації системи керування освітленістю

Виконавчі вузли автоматизованої системи управління освітленням тепличного господарства є кінцевою ланкою процесу автоматичного регулювання, що забезпечує практичну реалізацію керуючих команд, сформованих програмовано-логічним контролером. Якщо сенсорна підсистема відповідає за отримання інформації про стан світлового середовища, то виконавчі пристрої забезпечують безпосередню зміну параметрів освітлення відповідно до технологічних потреб рослин.

Особливістю сучасних промислових теплиць є необхідність не тільки вмикання або вимикання джерел світла, а й плавного регулювання їхньої потужності, формування необхідного спектрального складу випромінювання, розподілу світлового потоку за зонами вирощування та оптимізації енергоспоживання. Тому вибір виконавчих вузлів повинен здійснюватися з урахуванням надійності, швидкодії, сумісності з PLC-контролером та можливості роботи у складних умовах експлуатації [20].

Основними критеріями вибору виконавчих пристроїв є:

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- відповідність потужності підключеного навантаження;
- можливість плавного керування світловим потоком;
- підтримка стандартних сигналів керування;
- висока комутаційна здатність;
- тривалий ресурс роботи;
- захист від перевантаження та короткого замикання;
- можливість інтеграції у промислові мережі;
- енергоефективність.

Для реалізації автоматизованої системи освітлення тепличного комплексу доцільним є використання комплексу виконавчих пристроїв, що включає LED-драйвери, димери, твердотільні реле, контактори та сучасні фітосвітильники.

Одним з основних виконавчих пристроїв системи є LED-драйвер, який забезпечує стабілізоване живлення світлодіодних світильників та можливість регулювання їх світлового потоку. Для реалізації системи запропоновано промисловий LED-драйвер Mean Well HLG-240H-48B (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Загальний вигляд LED-драйвера Mean Well HLG-240H-48B

Даний пристрій призначений для живлення потужних світлодіодних освітлювальних систем і широко застосовується у промислових та агротехнічних установках. Основні технічні характеристики LED-драйвера: потужність 240 Вт; вхідна напруга 90–305 В AC; вихідна напруга 48 В DC; КПД до 94%; регулювання 0-10 В, PWM; захист корпусу IP67; робоча температура -40 ... +80 °C. Основним завданням LED-драйвера в системі є

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворення керуючих сигналів ПЛК у зміну інтенсивності світлового потоку. Через аналоговий сигнал 0–10 В контролер може плавно збільшувати або зменшувати потужність світильників залежно від показників сенсорів.

Застосування Mean Well HLG-240H дозволяє реалізувати адаптивне керування освітленням, при якому рослини отримують необхідне кількість світлової енергії без лишніх витрат електроенергії.

Для плавного керування групами світильників необхідно використовувати цифрові димери, які забезпечують зміну яскравості освітлення без механічного перемикавання навантаження. Як приклад використовується рекомендований Mean Well DAP-04 DALI Controller (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Загальний вигляд димера Mean Well DAP-04 DALI Controller

Дане пристрій забезпечує цифрове керування освітлювальними системами через промисловий інтерфейс DALI. Технічні характеристики Mean Well DAP-04 DALI Controller: інтерфейс DALI; канали керування – 4; живлення 12–24В DC; тип управління – цифровий; монтаж - DIN-рейка. У тепличному комплексі такий пристрій дозволяє організувати зональне освітлення, коли різні частини теплиці працюють незалежно одна від одної. Наприклад, ділянки з меншим кількістю природного світла можуть отримувати більшу інтенсивність штучного освітлення, тоді як інші будуть працювати в режимі економії.

Для швидкого та надійного перемикавання електричних навантажень у системі освітлення використовуються твердотільні реле. На відміну від електромеханічних пристроїв вони не мають рухомих контактів, що значно

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

збільшує ресурс роботи. Для реалізації системи рекомендовано Omron G3NA-240B (рисунок 2.13). Основні характеристики це: тип пристрою - SSR реле; напруга навантаження 24–240В АС; максимальний струм 40А; керуючий сигнал 5–24 В DC; час перемикання <10 мс; ресурс понад 10 млн циклів.



Рисунок 2.13 – Загальний вигляд твердотільного реле Omron G3NA-240B

Основні завдання твердотільного реле Omron G3NA-240B це: комутація груп LED-світильників; швидке перемикання режимів роботи; захист виходів контролера; підвищення ресурсу системи. Використання Omron G3NA особливо доцільне при частих змінах режиму освітлення, характерних для адаптивних систем керування.

Для управління потужними освітлювальними лініями та забезпечення електричного розподілу керуючої та силової частини застосовуються контактори. Оптимальним рішенням для даної задачі є Schneider Electric TeSys D LC1D25 (рисунок 2.14). Технічні характеристики є наступні: номінальний струм 25 А; напруга керування 24 В DC / 230 В АС; потужність навантаження до 11 кВт; кількість полюсів 3; механічний ресурс до 15 млн циклів. Основне призначення контактора: включення великих груп світильників; аварійне відключення навантаження; розподіл силових ліній; захист обладнання. У системі освітлення теплиці контактори використовують для управління основними освітлювальними зонами та резервного відключення обладнання.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50



Рисунок 2.14 – Загальний вигляд контактора Schneider Electric TeSys D LC1D25

Основним виконавчим елементом, який безпосередньо впливає на рослини, є світильники. Для промислових тепличних систем рекомендовано використовувати Philips GreenPower LED Toplighting Compact (рисунок 2.15). Даний світильник розроблений спеціально для агротехнічного застосування. Основними характеристиками є: потужність 520-800 Вт; ефективність до 3,6 $\mu\text{mol/J}$; напруга живлення 200–400 В АС; ресурс роботи понад 50 000 годин; регулювання – цифрове. Основним завданням світильника є: забезпечення необхідного PAR-випромінювання; підтримання фотосинтезу; збільшення врожайності; створення необхідного спектра [21]. LED-світильники такого типу дозволяють одержати максимальний рівень світлової енергії при мінімальному споживанні електроенергії.



Рисунок 2.15 – Загальний вигляд фіто світильника Philips GreenPower LED Toplighting Compact

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Для живлення контролерів, сенсорів та допоміжних пристроїв автоматизованої системи використовується промисловий блок живлення Siemens SITOP PSU100S 24V/5A (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Загальний вигляд промислового блока живлення Siemens SITOP PSU100S 24V/5A

До основних характеристик Siemens SITOP PSU100S 24V/5A можна віднести: вхідна напруга 120/230 В AC; вихідна напруга 24 В DC; струм 5 А; КПД 90%; захист від перевантаження та КЗ. Основні завдання запропонованого блока живлення є: живлення ПЛК; живлення сенсорів; стабілізація напруги; підвищення надійності.

Для реалізації виконавчого рівня автоматизованої системи управління освітленням тепличного господарства обґрунтовано використання комплексу сучасних промислових пристроїв: LED-драйверів Mean Well HLG, цифрових контролерів освітлення DALI, твердотільних реле Omron G3NA, контакторів Schneider Electric TeSys D та спеціалізованих LED-фітосвітильники Philips GreenPower.

Запропоновані компоненти забезпечують точне регулювання світлового потоку, високу надійність, сумісність із ПЛК-керуванням та можливість подальшої модернізації системи відповідно до вимог сучасних інтелектуальних тепличних комплексів.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Адаптація методу синтезу цифрового регулятора з еталонним фільтром низької частоти для автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства

Запропонований метод надання одноконтурній замкнутій системі автоматичного керування необхідних фільтруючих властивостей може бути ефективно адаптований для автоматизованої системи керування освітленням тепличного господарства, оскільки процес регулювання освітлювального середовища має властивості інерційного технологічного об'єкта та потребує стабільної підтримки заданих параметрів за наявності зовнішніх збурень. У такій системі об'єктом керування виступає комплекс «LED-драйвер – світильник – освітлювальне середовище теплиці – рослина», а керованою величиною є рівень освітлення, фотосинтетичного активного випромінювання (PAR) або густина потоку фотонів PPFD [21].

Особливістю тепличного середовища є наявність постійних випадкових збурень, пов'язаних зі зміною природного сонячного випромінювання, хмарністю, температурним впливом, старінням світлодіодних модулів та нерівномірністю розподілу світлового потоку. Тому використання класичних алгоритмів регулювання не завжди забезпечує необхідну якість керування, оскільки швидкі зміни сигналу керування можуть призводити до частого перемикання світильників, збільшення енергоспоживання та зменшення ресурсу виконавчих пристроїв.

Для усунення таких недоліків доцільним є застосування цифрового регулятора із вхідним обмежувачем швидкості зміни сигналу та еталонним фільтром низької частоти. У структурі автоматизованої системи освітлення вхідний обмежувач виконує функцію формування плавної зміни заданого рівня освітленості. Це дозволяє уникнути різні переходи між режимами

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

роботи світильників, наприклад, при швидкій зміні зовнішнього освітлення внаслідок появи або зникнення хмарності.

Структурно така система може бути представлена у вигляді замкненого контура, що має наступний вигляд: задане значення освітлення → обмежувач швидкості → цифровий регулятор → LED-драйвер → світильник → сенсор освітленості → зворотний зв'язок. Як об'єкт автоматичного керування система освітлення теплиці може бути апроксимована послідовним з'єднанням аперіодичних ланок. Перше ланка характеризує динаміку LED-драйвера та електронної частини світильника, а друга — процес зміни та стабілізації світлового середовища у просторі теплиці.

Дослідження одноконтурної замкнутої системи автоматичного управління (САУ) із цифровим регулятором (ЦР) показали, що при дії високочастотних сигналів (що перевищують смугу пропускання системи) виникають незатухаючі коливання і відбувається спонтанний вихід системи з стану рівноваги. Застосування вхідних цифрових формуючих пристроїв (ЦФП) дозволяє стабілізувати роботу САУ при впливі сигналів будь-якої частоти. Водночас використання ЦФП призводить до збільшення тривалості перехідного процесу при відпрацюванні ступінчастих впливів та до виникнення фазового запізнення при відпрацюванні гармонійних впливів. Ці недоліки можуть значно погіршувати роботу високодинамічних систем стеження та стабілізації.

Для вирішення поставленої задачі використано метод, що дозволяє надати САУ необхідні фільтруючі властивості, який надалі буде представлений. Метод базується на синтезі спеціального ЦР, який використовується разом із вхідним обмежувачем швидкості (ОШ). Вхідний ОШ забезпечує відпрацювання ступінчастих сигналів великої амплітуди, а ЦР формує необхідну смугу пропускання та показники якості роботи САУ [22]. Структурна схема САУ, що реалізує даний метод, наведена на рисунку 3.1.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для синтезу спеціального ЦР пропонується використовувати еталонну модель фільтра низьких частот (ФНЧ) за умови, що

$$N(s) = F(s), \text{ где } N(s) = \frac{G(s)W(s)}{1 + G(s)W(s)}$$

це є передавальна функція замкнутої системи, $G(s)$ – передавальна функція об'єкта управління, $W(s)$ – передатна функція коригуючого пристрою, $F(s)$ – передавальна функція еталонного ФНЧ.

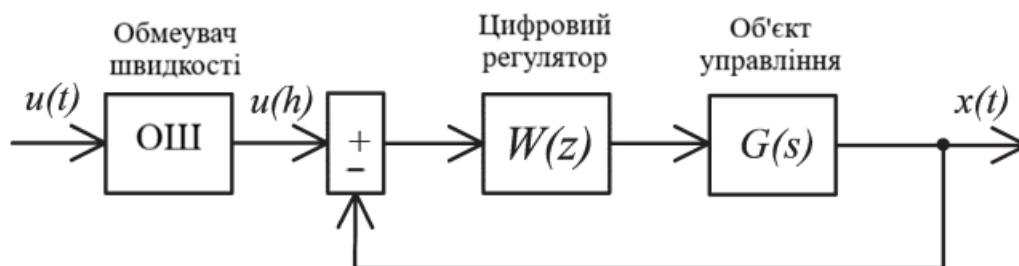


Рисунок 3.1 – Структурна схема САУ з ЦР і ОШ

З урахуванням виконання даної умови отримаємо вираз для визначення передавальної функції пристрою, що коригує в аналоговому вигляді, яка забезпечує необхідну смугу пропускання САУ

$$W(s) = \frac{F(s)}{G(s)[1 - F(s)]} . \quad (1)$$

В якості еталонного фільтр $F(s)$ можна використовувати будь-які ФНЧ, у тому числі отримані за допомогою передавальних функцій елементарних ланок.

Для відпрацювання САУ ступінчастих сигналів великої амплітуди вхідний ОШ повинен обмежувати швидкість зміни вхідних сигналів до величини, що визначається виразом: $v_{\text{обм}} = A_{\text{л}} \cdot \omega_{\text{пр}}$, де $A_{\text{л}}$ – амплітуда лінійної зони регулювання; $\omega_{\text{пр}}$ – гранична частота смуги пропускання.

Структурна схема ОШ наведено на рисунку 3.2 і містить блоки: віднімання, U - обчислення, I – цифровий інтегратор.

На виході блоку віднімання утворюється сигнал $u_{\Sigma}(t) = u(t) - u(h)$. Блок обчислення виконує операцію згідно з виразом

$$u'(t) = \begin{cases} v_{огр}, & \text{при } u_{\Sigma}(t) \geq v_{огр}; \\ -v_{огр}, & \text{при } u_{\Sigma}(t) \leq -v_{огр}. \end{cases}$$

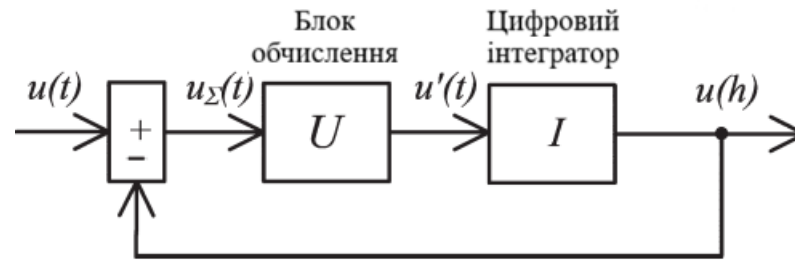


Рисунок 3.2 – Структурна схема ОШ

Цифровий інтегратор перетворює аналоговий сигнал $u'(t)$ на цифровий $u(h)$ і має передавальну функцію

$$u(h) = \frac{h(1 + z^{-1})}{2(1 - z^{-1})},$$

де h - крок квантування.

Реалізацію методу представлено на прикладі САУ, що містить об'єкт управління (ОУ) третього порядку. Для дослідження обраний астатичний ОУ з двома аперіодичними ланками, що має передавальну функцію наступного вигляду:

$$G(s) = \frac{\alpha}{s(s + a)(s + b)}, \quad (2)$$

де $\alpha = k/T_1 T_2 = 4971,15 \text{ c}^{-3}$, $\alpha = 1/T_1 = 1,415 \text{ c}^{-1}$, $b = 1/T_2 = 48,54 \text{ c}^{-1}$.

Для порівняльного аналізу використано цифровий ПД-регулятор, який працює разом із вхідним ЦФП. Цифровий ПД-регулятор має передавальну функцію наступного вигляду [23]:

$$W_{\text{пд}}(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}, \quad (3)$$

де $K_0 = 19,0$, $b_1 = -1,921053$, $b_2 = 0,921053$, $h = 0,01 \text{ c}$.

Початкове встановлення коефіцієнтів цифрового ПД-регулятора здійснено за допомогою методу Зіглера-Нікольса, а остаточне налаштування проведено з використанням блоку Signal Constraint з розширення Simulink

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Design Optimization пакета прикладних програм MATLAB, що містить інструменти динамічної оптимізації параметрів проєктованих систем управління.

Слід зазначити, що САУ з об'єктом управління $G(s)$ та цифровим ПД-регулятором $W_{\text{ПД}}(z)$ при синусоїдальному $x = A \sin \omega t$ дії амплітуди $A = 50$ поділок забезпечує граничну частоту смуги пропускання $\omega_{\text{пр}} = 24 \text{ с}^{-1}$.

В якості вхідного ЦФП вибрано еліптичний цифровий фільтр низьких частот розрахунок якого здійснено з використанням функції `ellip` з параметрами ($N = 4$; $R_p = 0,1 \text{ дБ}$; $R_p = 48 \text{ дБ}$; $F_{\text{pn}} = 0,01368 \text{ с}^{-1}$; $F_p = 3,82 \text{ с}^{-1}$; $h = 0,002 \text{ с}$) та отримана передавальна функція фільтра:

$$F(z) = K_0 \frac{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + c_4 z^{-4}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4}}, \quad (4)$$

де $K_0 = 0,0039196$, $c_1 = -3,9761558$, $c_2 = 5,9523864$, $c_3 = -3,9761558$, $c_4 = 1$, $d_1 = -3,9566343$, $d_2 = 5,8714188$, $d_3 = -3,8729063$, $d_4 = 0,9581221$, $h = 0,002 \text{ с}$.

Відповідно до рекомендацій порядок еталонного фільтра має бути вищим або відповідати передавальній функції ОУ. З урахуванням, що ОУ має третій порядок, представлено дві моделі еталонних ФНЧ, що використовуються для реалізації методу: ФНЧ 1 у вигляді аперіодичної ланки третього порядку та ФНЧ 2 у вигляді аперіодичної та коливальної ланок. Коефіцієнт передачі елементарних ланок ФНЧ на граничній частоті смуги пропускання САУ слід вибирати з умови $N \geq \sqrt[n]{1/\sqrt{2}}$, де n – кількість елементарних ланок.

Еталонна модель ФНЧ 1, що містить аперіодичну ланку третього порядку, має передавальну функцію [24]:

$$F_1(s) = \frac{1}{(T_3 s + 1)^3}. \quad (5)$$

Аперіодична ланка на частоті сполучення $\omega = 1/T_3$ має фазовий зсув -45° . Використовуючи амплітудну характеристику аперіодичної ланки, отримано вираз для визначення сталої часу

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$T_3 = \frac{1}{\omega_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{1}{N_1^2} - 1},$$

де $\omega_{\text{пр}}$ - гранична частота смуги пропускання САУ. З урахуванням забезпечення параметрів ($\omega_{\text{пр}} = 24 \text{ с}^{-1}$, $N_1 = \sqrt[3]{1/\sqrt{2}} = 0,890899$), знайдено $T_3 \approx 0,021243 \text{ с}$.

Використовуючи еталонну модель (5) та вираз (1), отримано передавальну функцію коригуючого пристрою в аналоговому вигляді:

$$W_1(s) = C_0 \frac{s^2 + c_1 s + c_2}{s^2 + d_1 s + d_2},$$

де $C_0 = 20,985372 \text{ с}^{-1}$, $c_1 = 49,955 \text{ с}^{-1}$, $c_2 = 68,6841 \text{ с}^{-1}$, $d_1 = 141,225277 \text{ с}^{-1}$, $d_2 = 6648,192983 \text{ с}^{-1}$.

Застосовуючи білінійну апроксимацію (перетворення Тастина)

$$s \approx \frac{2}{h} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}},$$

де h - крок квантування, отримано передавальну функцію ЦР 1:

$$W_1(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}. \quad (6)$$

де $K_0 = 10,273647$, $b_1 = -1,318534$, $b_2 = 0,336771$, $a_1 = -0,217857$, $a_2 = 0,082080$, $h = 0,02 \text{ с}$.

Еталонна модель ФНЧ 2, що містить аперіодичну та коливальну ланки, має передавальну функцію:

$$F_2(s) = \frac{1}{(T_4 s + 1)(T_5^2 s^2 + 2\xi T_5 s + 1)}. \quad (7)$$

З урахуванням забезпечення параметрів ($\omega_{\text{пр}} = 24 \text{ с}^{-1}$, $N_2 = \sqrt{1/\sqrt{2}} = 0,840896$), для аперіодичної ланки знайдено $T_4 \approx 0,026817 \text{ с}$.

Коливальна ланка на частоті сполучення $\omega = 1/T_4$ має фазовий зсув -90° та відхилення асимптотичної логарифмічної амплітуди частотної характеристики ЛАЧХ не перевищують 3 дБ, якщо значення коефіцієнта

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

відносного згасання ξ знаходиться у межах $0,38 \leq \xi < 0,7$. Використовуючи амплітудну характеристику коливальної ланки, отримано вираз визначення сталої часу

$$T_5 = \frac{1}{\omega_{r\delta}} \sqrt{1 - 2\xi^2 + \sqrt{4\xi^2(\xi^2 - 1) + \frac{1}{N_2^2}}}.$$

З урахуванням забезпечення параметрів ($\omega_{пр} = 24 \text{ с}^{-1}$, $N_2 = \sqrt{1/\sqrt{2}} = 0,840896$, $\xi = 0,7$) знайдено $T_5 \approx 0,033950 \text{ с}$.

Використовуючи еталонну модель (7) та вираз (1), отримано передавальну функцію коригувального пристрою в аналоговому вигляді [25]:

$$W_2(s) = C_0 \frac{s^2 + c_1 s + c_2}{s^2 + d_1 s + d_2},$$

де $C_0 = 6,508147 \text{ с}^{-1}$, $c_1 = 49,955 \text{ с}^{-1}$, $c_2 = 68,6841 \text{ с}^{-1}$, $d_1 = 78,527409 \text{ с}^{-1}$, $d_2 = 2405,337691 \text{ с}^{-1}$. Застосовуючи перетворення Тастина, отримано передавальну функцію ЦР 2:

$$W_2(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}, \quad (8)$$

де $K_0 = 4,839547$, $b_1 = -1,318534$, $b_2 = 0,336771$, $a_1 = -0,749710$, $a_2 = 0,224730$, $h = 0,02 \text{ с}$.

Цифрові регулятори ЦР 1 та ЦР 2 забезпечують хорошу роботу САУ у лінійній зоні регулювання, а при відпрацюванні ступінчастих сигналів великої амплітуди підвищують тривалість перехідного процесу. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування обмежувача вхідної швидкості ОС, параметри якого повинні бути узгоджені з параметрами системи. Для системи (рисунок 3.1) забезпечує параметри ($A = 50 \text{ под}$, $\omega_{пр} = 24 \text{ с}^{-1}$), доцільно вибрати рівень обмеження швидкості $v_{обм} = A\omega_{пр} = \pm 1200 \text{ под/с}$ [26].

Перевірку ефективності роботи розрахованих пристроїв можна здійснити за допомогою імітаційного моделювання. В результаті проведеної адаптації методу синтезу цифрового регулятора встановлено доцільність

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

його застосування для автоматизованої системи управління освітленням тепличного господарства, яка функціонує в умовах постійних зовнішніх збурень та зміни параметрів природного освітлення. Використання цифрового регулятора з еталонним фільтром низької частоти та вхідним обмежувачем швидкості дозволяє забезпечити необхідні динамічні характеристики замкнутої системи автоматичного регулювання, підвищити стійкість роботи та зменшити вплив високочастотних коливань вимірювальних сигналів. Запропонований підхід забезпечує плавну зміну керуючих сигналів для LED-драйверів, знижує кількість різких перемикачів виконавчих пристроїв та дозволяє підтримувати стабільний рівень освітленості відповідно до технологічних вимог вирощування рослин.

3.2 Моделювання роботи системи автоматичного управління з вхідними цифровими регуляторами освітлення теплиць

Для перевірки роботи представленого методу було складено схему моделювання у середовищі Simulink пакету програм MATLAB, яка представлена на рисунку 3.3. Схема (рисунка 3а) складається із трьох САУ 1-3, виконаних за типовою схемою (рисунка 3.1) і містять один і той же ОУ.

Схема ОУ (рисунок 3.3б) представлена блоками Transfer Fcn, що реалізують вираз (2) та блоком Saturation із параметрами $u = \pm 255$ поділок для реалізації нелінійності типу «насичення». САУ містить 1 цифровий ПІД-регулятор та ЦФП на основі еліптичного ФНЧ. Схема ПІД-регулятора реалізована (рисунок 3.3в) за допомогою блоків Gain і Discrete Filter з параметрами виразу (3). САУ 2 містить ЦР 1, а САУ 3 - ЦР 2. Схеми регуляторів ЦР 1 та ЦР 2 реалізовані (рисунок 3.3г, д) за допомогою блоків Gain та Discrete Filter з параметрами виразів (6, 8). Схема вхідного ОШ містить суматор Sum, два джерела постійного сигналу Constant 1, 2, два підсилювачі Gain 1, 2, блок динамічного обмеження Saturation Dynamic, дискретний інтегратор Discrete Filter. Блоки Constant 1, 2 імітують введення

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

обмеження швидкості, підсилювачі Gain 1, 2, які мають коефіцієнт передачі $k=h/2=0,005$, інтегратор Discrete Filter має крок квантування $h=0,01$ с. Схема еліптичного ФНЧ реалізована (рисунок 3.3ж) за допомогою блоків Gain і Discrete Filter з параметрами з виразу (4). В якості джерела вхідних впливів використовуються генератор ступінчастого сигналу Step, генератор синусоїдального сигналу Sine Wave і генератор синусоїдального сигналу лінійно-змінної частоти Chirp Signal [28]. Амплітуда вхідних дій встановлюється підсилювачем Gain.

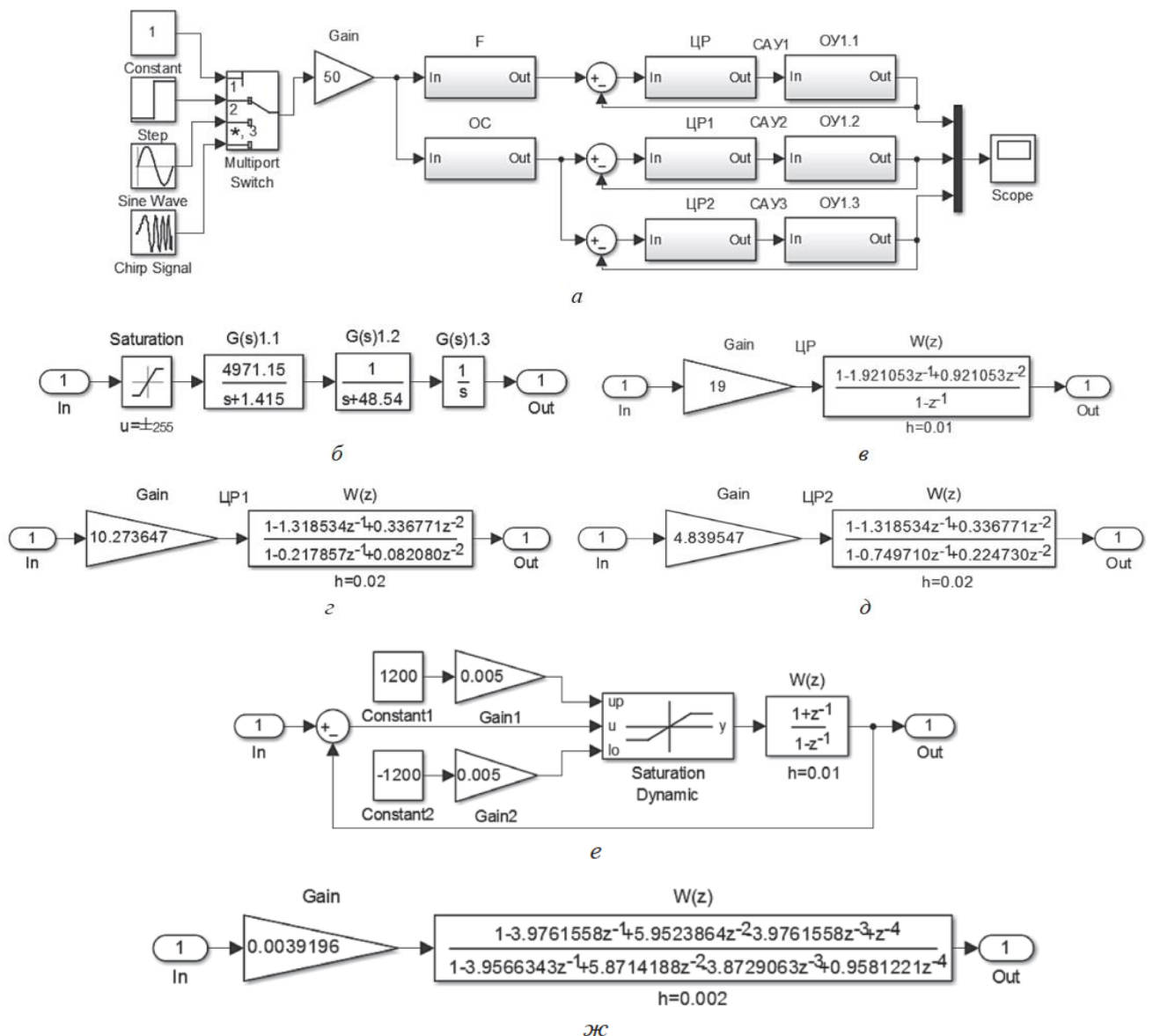


Рисунок 3.3 – Структурні схеми моделей: а – САУ; б - ОУ; в - ПД-регулятора; г - ЦР 1; д - ЦР 2; е – ОШ; ж – ЦФП

Моделювання та оцінка якості роботи САУ здійснені при різних впливах (ступінчастому $x = A$, синусоїдальному $x = A \sin \omega t$ $\omega = 1,57 \text{ с}^{-1}$ і лінійно-змінної частоти $\omega = 6,28\text{--}239 \text{ рад/с}$) різної амплітуди ($A = 50 \text{ под}$, $A = 150 \text{ под}$, $A = 500 \text{ под}$). Максимальна частота $\omega_{\max} = 239 \text{ рад/с}$ ($f_{\max} \approx 38 \text{ Гц}$) була обрана в 10 разів більше смуги пропускання САУ 1 [29].

Усі САУ забезпечують різні показники роботи, які наведено на рисунку 3.4 та у таблиці 3.1. Вид перехідного процесу при відпрацюванні ступінчастих $x = A$ впливів у різних САУ різних. У САУ 1 – тривалий та коливальний з перерегулюванням (при $A = 50 \text{ под}$) 15,37 поділок або 30,74%, у САУ 2 – близько аперіодичний, а САУ 3 – коливальний з перерегулюванням (при $A = 50 \text{ под}$) 4,94 под або 9,88%. Час регулювання при відпрацюванні ступінчастих впливів зафіксовано на рівні 5% відхилення від задаючого впливу. Відпрацювання синусоїдальних впливів ($x = A \sin \omega t$, $\omega = 1,57 \text{ с}^{-1}$) здійснюється з постійним запізненням та максимальною помилкою, які у САУ 1 значно більші (2,43-2,8 рази) ніж у САУ 2, 3.

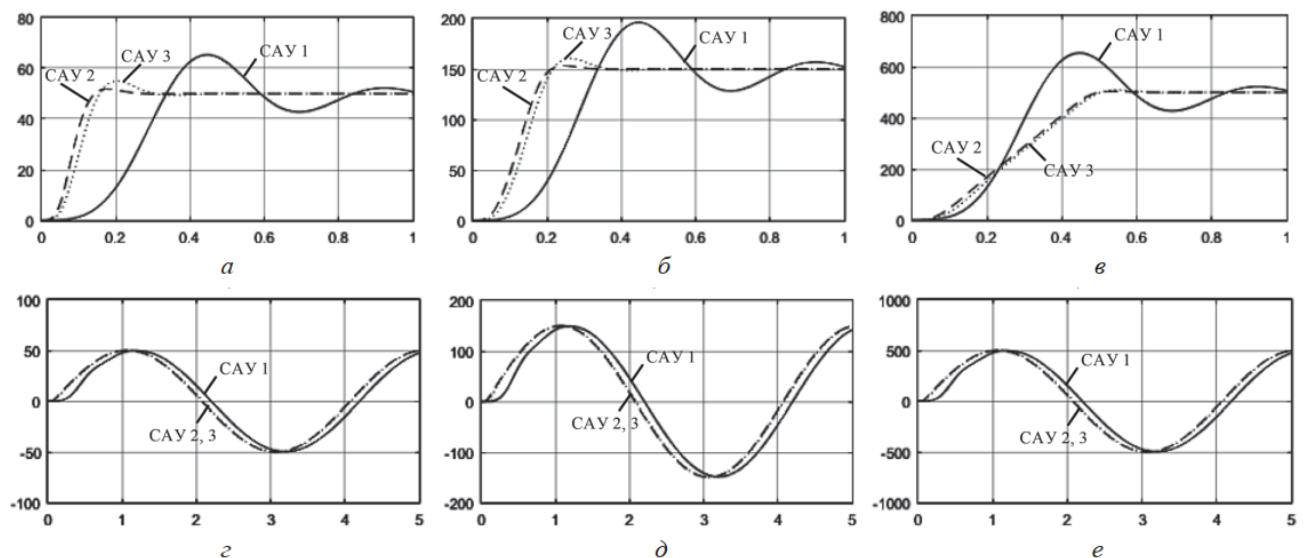


Рисунок 3.4 - Результати відпрацювання САУ ступінчастих та синусоїдальних впливів різної амплітуди: а, г – $A = 50 \text{ под}$; б, д – $A = 150 \text{ под}$; в, е – $A = 500 \text{ под}$.

При відпрацюванні синусоїдальних впливів $x = A \sin \omega t$ лінійно-змінної частоти $\omega = 6,28\text{--}239 \text{ рад/с}$, спостерігається стійка робота всіх САУ (рисунок

3.5). Величина окремих не зкомпенсованих збурень у САУ 2 та САУ 3, не перевищує 25 под або 50% лінійної зони регулювання [30, 31].

Таблиця 3.1 – Результати роботи різнотипних САУ

Тип САУ	Час регулювання в с, при відпрацюванні ступінчастих впливів різної амплітуди в поділках			Максимальна помилка поділок/запізнення в с, при відпрацюванні синусоїдальних впливів різної амплітуди в поділках		
Амплітуда	A=50	A=150	A=500	A=50	A=150	A=500
САУ 1	0,8	0,8	0,8	15,34/0,199	46,03/0,199	153,42/0,199
САУ 2	0,130	0,191	0,457	5,40/0,070	16,19/0,071	53,95/0,071
САУ 3	0,255	0,298	0,469	6,24/0,081	18,71/0,082	62,37/0,082

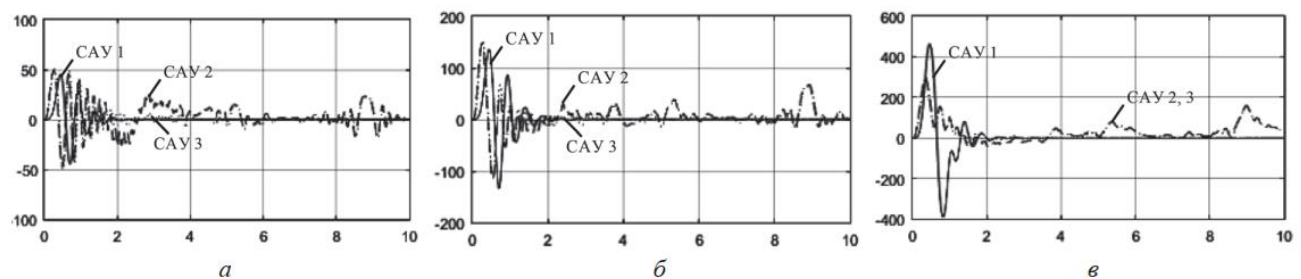


Рисунок 3.5 - Результати відпрацювання САУ синусоїдальних впливів лінійно-змінної частоти різної амплітуди: а - A=50 под; б - A=150 под; в - A=500 под.

Аналізуючи отримані результати (рисунок 3.5) можна відзначити, що реалізація методу дозволяє стабілізувати роботу САУ під впливом частот, що перевищують смугу пропускання системи. При цьому забезпечується мале фазове запізнення та час перехідного процесу порівняно з використанням ЦФП з урахуванням ФНЧ.

Запропоновано і представлено метод надання одноконтурній замкнутій САУ необхідних фільтруючих властивостей, які ґрунтуються на синтезі спеціального ЦР із входним ОШ, що забезпечує необхідну смугу пропускання системи.

В основу синтезу ЦР покладено використання еталонних моделей ФНЧ (отриманих за допомогою передавальних функцій елементарних ланок), параметри яких узгоджені з необхідною смугою пропускання САУ. На прикладі САУ, що містить ОУ третього порядку, з використанням еталонних ФНЧ 1 у вигляді аперіодичної ланки третього порядку та ФНЧ 2 у вигляді аперіодичної та коливальної ланок здійснено синтез ЦР 1, ЦР 2 та визначено параметри вхідного ОС.

Для оцінки роботи розрахованих пристроїв проведено імітаційне моделювання. Здійснено оцінку якості роботи САУ при різних вхідних впливах: ступінчастому та синусоїдальному фіксованої частоти та різної амплітуди. В результаті порівняльного аналізу встановлено, що застосування запропонованого методу забезпечує зменшення фазового запізнення та часу перехідного процесу у 2,43–2,8 рази порівняно із ЦФП на основі ФНЧ.

Таким чином, застосування запропонованого методу забезпечує необхідну смугу пропускання та стійку роботу системи при впливах високочастотних сигналів, не погіршує при цьому відпрацювання детермінованих (ступінчастих та синусоїдальних) сигналів.

Проведене імітаційне моделювання автоматизованої системи управління освітленням теплиць у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило ефективність застосування запропонованих цифрових регуляторів із еталонними фільтрами низької частоти. Аналіз перехідних процесів при різних видах вхідних впливів показав покращення якості регулювання порівняно з класичними методами управління, зокрема зменшення часу встановлення, фазового запізнення та величини перерегулювання. Отримані результати підтверджують, що використання спеціалізованого цифрового регулятора забезпечує більш стабільну роботу системи освітлення, ефективне пригнічення випадкових збурень, підвищення точності підтримання заданих параметрів світлового режиму та створює умови для реалізації енергоефективних алгоритмів управління сучасними тепличними комплексами.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ВИСНОВКИ

У запропонованій кваліфікаційній роботі було проведено розробку та дослідження автоматизованої системи управління освітленням тепличного господарства, призначеної для забезпечення оптимального світлового режиму вирощування рослин, підвищення ефективності технологічного процесу та зменшення витрат електричної енергії. Запропонована система базується на використанні сучасних засобів автоматизації, інтелектуальних сенсорів, програмовано-логічного керування та адаптивних алгоритмів регулювання параметрів освітлення.

У першому розділі роботи проведено аналіз технологічного процесу підтримки світлового режиму в тепличних господарствах як об'єкта автоматичного керування. Встановлено, що освітлення є одним із основних факторів, що визначає інтенсивність фотосинтезу, швидкість росту рослин, якість та кількість вирощеної продукції. Визначено, що традиційні системи освітлення, які працюють за фіксованими часовими режимами, не забезпечують необхідної гнучкості керування та не враховують зміну зовнішніх умов, що призводить до нераціонального використання енергоресурсів.

Розглянуто особливості функціонування сучасних автоматизованих систем освітлення промислових теплиць та встановлено, що найбільш ефективним підходом є застосування адаптивних систем керування, які забезпечують автоматичну зміну параметрів світлового потоку залежно від фактичних потреб рослин. Такі системи дозволяють здійснювати контроль не тільки загального рівня освітлення, а й параметрів, що безпосередньо впливають на процес фотосинтезу: фотосинтетичного активного випромінювання (PAR), густини потоку фотонів (PPFD), добової світлової інтеграції (DLI) та спектрального складу світла.

Проведено аналіз основних складових автоматизованих систем підтримки світлового режиму та визначено їх функціональне призначення у

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальній структурі управління. Встановлено, що ефективна реалізація сучасної тепличної автоматизації потребує комплексної взаємодії сенсорної підсистеми, програмовано-логічного контролера, виконавчих механізмів, освітлювального обладнання, операторських панелей та засобів диспетчеризації.

Окреме увагу приділено застосуванню інтелектуальних сенсорів IoT для моніторингу параметрів освітлення. Визначено, що впровадження технологій Інтернету дозволяє створювати розподілені системи збору даних, забезпечувати дистанційний контроль параметрів тепличного середовища, виконувати накопичення та аналіз технологічної інформації. Використання IoT-рішень створює передумови для переходу від класичних автоматизованих систем до концепції інтелектуальної теплиці (Smart Greenhouse).

В другому розділі кваліфікаційної роботи здійснено розробку структури автоматизованої системи управління освітленням тепличного господарства. Запропонована структура побудована за багаторівневим принципом та включає рівень вимірювальних пристроїв, рівень управління, виконавчий рівень та рівень операторського контролю. Такий підхід забезпечує високу надійність системи, можливість масштабування та подальшої модернізації відповідно до потреб конкретного тепличного комплексу.

Розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи, який забезпечує послідовне виконання процесів збору інформації, аналізу параметрів освітлення, прийняття керуючих рішень та формування сигналів для виконавчих пристроїв. Особливістю запропонованого алгоритму є реалізація замкненого циклу керування зі зворотним зв'язком, що дозволяє автоматично компенсувати вплив зовнішніх факторів, таких як зміна природного освітлення, погодних умов та сезонних коливань.

Виконано обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації для реалізації системи управління. Як основний керуючий пристрій

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запропоновано використання програмовано-логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200, який забезпечує необхідну продуктивність, підтримку промислових інтерфейсів передачі даних та можливість інтеграції з HMI та SCADA-системами. Його використання дозволяє реалізовувати адаптивні алгоритми регулювання освітлення та забезпечувати взаємодію між усіма рівнями автоматизованої системи.

Для забезпечення якісного збору інформації обґрунтовано вибір комплексу сенсорів польового рівня. Запропоновано використання сенсорів освітлення, PAR-сенсорів, спектральних сенсорів, сенсорів температури, вологості та концентрації CO₂. Застосування таких вимірювальних пристроїв дозволяє одержувати комплексну інформацію про стан середовища вирощування та формувати оптимальні режими роботи освітлювального обладнання.

Проведено вибір виконавчих вузлів автоматизованої системи, серед яких LED-драйвери, цифрові регулятори світлового потоку, твердотільні реле, контактори та енергоефективні LED-фітосвітильники. Використання даних пристроїв забезпечує плавне управління інтенсивністю освітлення, зональне регулювання світлового режиму та зменшення витрат електричної енергії при збереженні оптимальних умов для розвитку рослин.

У третьому розділі роботи виконано розрахунок системи автоматичного регулювання освітлення тепличного господарства. Для підвищення якості керування запропоновано адаптацію методу синтезу цифрового регулятора з використанням еталонного фільтра низької частоти та вхідного обмеження швидкості зміни сигналу. Даний підхід дозволяє надати системі необхідні фільтруючі властивості, зменшити вплив високочастотних збурень та забезпечити плавне регулювання світлового потоку.

Виконано представлення системи освітлення як об'єкта автоматичного керування із врахуванням інерційних властивостей LED-драйверів, освітлювальних пристроїв та процесів зміни світлового середовища теплиці.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання спеціалізованого цифрового регулятора дозволило забезпечити стабільну роботу замкненої системи управління, зменшити кількість різких змін керуючого сигналу та підвищити ресурс роботи виконавчого обладнання.

Для перевірки ефективності запропонованих рішень проведено імітаційне моделювання системи автоматичного управління у середовищі MATLAB/Simulink. Дослідження роботи системи при різних типах вхідних впливів підтвердило покращення показників якості регулювання порівняно з класичними методами управління. Зокрема забезпечено зменшення часу перехідного процесу, фазового запізнення та підвищення стійкості системи до зовнішніх збурень.

Отримані результати підтверджують ефективність використання запропонованої структури автоматизованої системи управління освітленням теплиць. Поеднання сучасних PLC-контролерів, інтелектуальних сенсорів IoT, енергоефективних LED-технологій та цифрових методів регулювання дозволяє створити гнучку, масштабовану та енергоефективну систему підтримки світлового режиму. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані при модернізації існуючих та створення нових промислових тепличних комплексів відповідно до концепції Smart Greenhouse.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кащенко П. С. Електричне освітлення та опромінення / П. С. Кащенко – НМЦ, 2003 . – 134 с.
2. G. M. Kozhushko, T. V. Sakhno, and V. I. Nazarenko, “Problems of designing lighting systems with the inclusion of invisible light effects” in Lighting and Power Engineering: History, Problems and Perspectives, Ternopil, Ukraine, May 29–31, 2024. Ternopil: TNTU, 2024, pp. 8–10.
3. A. Zelenkov and N. O. Vakula, “Dynamic modes of illumination in production terms,” Proceedings of National Aviation University, no. 3 (25), pp. 184–187, Mar. 2005, doi: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.25.1186>
4. S. Shpak, V. Martirosova, T. Sakhno, and G. Kozhushko, “Directions for improvement of standards on led technology and lighting with its use,” Municipal economy of cities, vol. 1, no. 154, pp. 57–66, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-57-66>
5. S. Fotios, C. Cheal, and P. R. Boyce, “Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: A review,” Lighting Research & Technology, vol. 37, no. 4, pp. 271–291, Dec. 2005. doi: <https://doi.org/10.1191/1365782805li139>
6. P. Valicek, T. Novak, J. Beseda, and K. Sokansky, “Modelling the behavior of lighting systems controlled at a constant level of illuminance,” in 2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, Czech Republic, Sep. 18–20, 2018. IEEE, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/lumenv.2018.8520993>
7. N. K. Kandasamy, G. Karunagaran, C. Spanos, K. J. Tseng, and H. Soong, “Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting,” Building and Environment, vol. 139, pp. 170–180, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.005>
8. M. Papinutto et al., “Saving energy by maximizing daylight and minimizing the impact on occupants: An automatic lighting system approach,” Energy and

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Buildings, vol. 268, May 2022, Art. no. 112176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112176>

9. A. Kaminska and A. Ożadowicz, “Lighting control including daylight and energy efficiency improvements analysis,” *Energies*, vol. 11, no. 8, Aug. 2018, Art. no. 2166, doi: <https://doi.org/10.3390/en11082166>

10. A. Zand, A. Houmansadr, G. Vigna, R. Kemmerer, and C. Kruegel, “Know your Achilles' heel,” in *31st Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '15)*, Los Angeles, CA, USA, Dec. 7–11, 2015. New York, New York, USA: ACM Press, 2015, pp. 41–50, doi: <https://doi.org/10.1145/2818000.2818012>

11. T. Kimura, A. Watanabe, T. Toyono, and K. Ishibashi, “Proactive failure detection learning generation patterns of large-scale network logs,” *IEICE Transactions on Communications*, E102.B, no. 2, pp. 306–316, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1587/transcom.2018ebp3103>

12. I. F. Kilincer, F. Ertam, O. Yaman, and A. Akbal, “Automatic fault detection with Bayes method in university campus network,” in *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, Sep. 16–17, 2017. IEEE, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/idap.2017.8090323>

13. A. K. Sangaiah, S. Rezaei, A. Javadpour, F. Miri, W. Zhang, and D. Wang, “Automatic fault detection and diagnosis in cellular networks and beyond 5G: Intelligent network management,” *Algorithms*, vol. 15, no. 11, Nov. 2022, Art. no. 432, doi: <https://doi.org/10.3390/a15110432>

14. Gonzalez, L. I. L., Troost, M., & Amft, O. (2013) Using a thermopile matrix sensor to recognize energy-related activities in offices. *Proceedings of Computer Science*, 19, 678–685. [In *The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013)*, the *3rd International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2013)*]. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.090>

15. Berson D. M. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock / D. M. Berson, F. A. Dunn, M. Takao // *Science*. - 2002. - Vol. 295. – P. 1070.

					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

16. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor / G. Brainard, J. Hanifin, J. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. Rollag // Journal of Neuroscience. – 2001. – Vol. 21. – No. 16. – P. 6405.
17. Thapan K. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans / K. Thapan, J. Arendt, D. Skene // J. Physiol. – 2001. – Vol. 535 (pt 1). – P. 261.
18. ДСТУ EN IEC 63128:2022 Інтерфейс управління освітленням для регулювання яскравості. Аналоговий інтерфейс регулювання напруги для електронних пристроїв управління джерелом струму
19. ДСТУ EN IEC 62386-105:2022 Цифровий адресний інтерфейс освітлення. Частина 105. Особливі вимоги до апаратури управління. Передавання мікропрограмного забезпечення (EN IEC 62386-105:2020, IDT; IEC 62386-105:2020, IDT).
20. Горшков В.В. Енергоефективний електротехнічний комплекс з елементами інтелектуального управління процесом освітлення вулиць населених пунктів: монографія. (під редакцією проф. О.М. Сінчука). – 2023. – 94 с.
21. 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.
22. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І. Клепач / Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.
23. 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.
24. Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і дог. К.: Либідь, 2007. — 656 с.

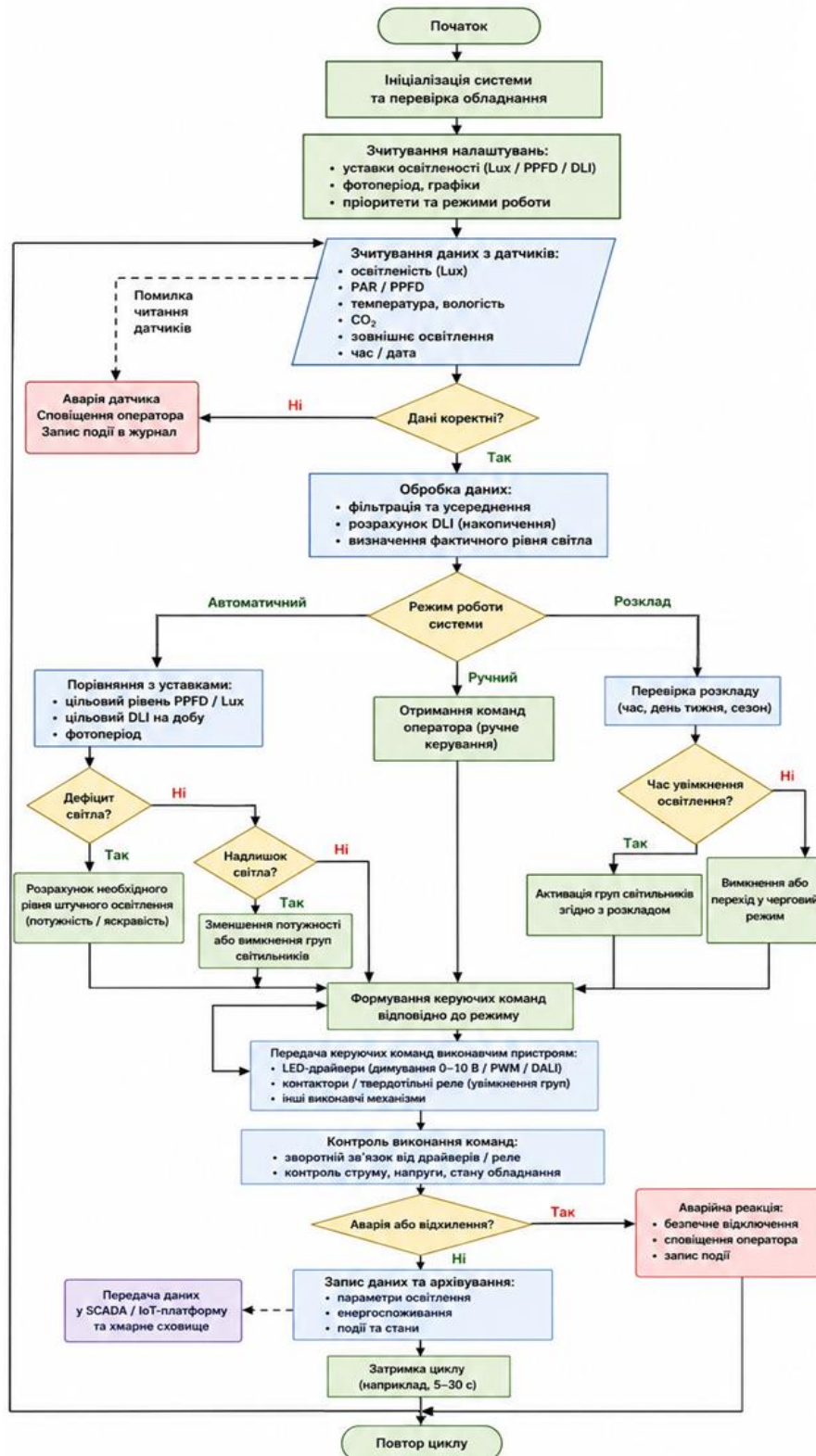
					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

26. 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.
27. Власов К. П. Теория автоматического управления / К. П. Власов – Харьков : Изд-во Гуманитарный центр, 2007. – 526 с.
28. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук – [2-ге вид., перероб. і доп.]. – Київ. : Либідь, 2007. – 656 с.
29. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування : підручник / – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 250 с.
30. І.А. Чуб, В.Є. Пустоваров, Г.Е. Винокуров, П.М. Бортнічук, Л.А. Клименко. Автоматизовані системи управління та зв'язок у сфері цивільного захисту: Навчальний посібник /За загальною редакцією Щербака Г.В. – Х., 2005.
31. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічний об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтег. технології/ М. В. Лукінюк. - К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 236 с.

					ДП.АКТ.11148982.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи керування освітленням теплиць



					ДП.АКІТ.11148982.00.00.0000 ПЗ		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування освітленням теплиць / Automated greenhouse lighting control system		
Розроб.	Процюк А.Б.						
Перевір.	Шевчук А.М.						
Консульт.	Шевчук А.М.						
Н. Контр.	Заставний О.М.						
Затверд.	Сегін А.І.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
						73	73
					ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		