

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

МЕРВА Максим Андрійович

Автоматизована система керування поливом тепличного господарства /
Automated greenhouse irrigation 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
М.А. Мерва

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
МЕРВІ Максиму Андрійовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизована система керування поливом тепличного господарства / Automated greenhouse irrigation 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 технологічними процесами тепличних господарств.

2. Способи та технічні засоби керування системою поливу та іригації теплиць.

3. Технічні засоби автоматизації об'єкта управління.

4. Розрахункова ефективність системи автоматичного управління основними і контрольними засобами об'єкта керування.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз складової та технічних засобів автоматизованої системи поливу та іригації у тепличних господарствах.

2. Реалізація структури автоматизованої системи поливу та обґрунтування вибору технічних засобів реалізації запропонованої системи.

3. Розробка функціональної схеми комплексу технічних засобів автоматизації.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структура автоматизованої системи керування поливом та іригацією теплиць.

2. Графічні залежності перехідних процесів відносно заданих параметрів.

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)

Мерва М.А.

Керівник роботи

(підпис)

к.е.н., доцент Шевчук А.М.

АНОТАЦІЯ

Мерва М.А. Автоматизована система керування поливу тепличного господарства. – 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 системи автоматичного керування поливом та іригацією тепличних господарств, проаналізовано загальні характеристики та складові таких систем, визначено функціональні, структурні та архітектурні особливості систем, що забезпечують якісне та надійне зрошування. Проведена специфікація вибору технічних засобів автоматизації і управління основними апаратно-програмними засобами автоматизованої системи, проаналізовано технологічну базу системи поливу та обґрунтовано вибір технічних засобів реалізації. Розроблено структуру та функціональну схеми, а також проведено синтез та моделювання цифрових нелінійних систем з електромеханічним приводом.

ABSTRACT

Merva M.A. Automated greenhouse irrigation 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 automatic control systems for watering and irrigation of greenhouse farms, analyzes the general characteristics and components of such systems, determines the functional, structural and architectural features of systems that provide high-quality and reliable irrigation. 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 technological base of the irrigation system is analyzed and the choice of technical means of implementation is justified. The structure and functional scheme are developed, and the synthesis and modeling of digital nonlinear systems with an electromechanical drive are carried out.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	9
1.1 Загальний аналіз та основні характеристика автоматизованих систем тепличних господарств	9
1.2 Огляд складової автоматизованих систем підтримки технологічних процесів вирощування рослин у промислових теплицях	16
1.3 Особливості застосування засобів моніторингу основних параметрів за допомогою інтелектуальних сенсорів IoT	22
2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	30
2.1 Реалізація структури автоматизованої системи поливу та іригації тепличного господарства	30
2.2 Обґрунтування вибору програмовано-логічного контролера керуючої підсистеми	37
2.3 Вибір первинних перетворювачів фізичних величин та сенсорів автоматизованої системи поливу теплиць	42
2.4 Вибір виконавчих вузлів та засобів автоматизації системи поливу та іригації	48
3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	54
3.1 Розробка загальної структури автоматизованої системи керування та визначання основних елементів регулювання	54
3.2 Синтез цифрової нелінійної системи керування поливом і іригацією теплиць з електромеханічним приводом	60

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мерва М.А.			Автоматизована система керування поливом тепличного господарства / Automated greenhouse irrigation control system	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Шевчук А.М.					4	78
Консульт.		Шевчук А.М.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		
Н. Контр.		Заставний О.М.						
Затверд.		Сегін А.І.						

3.3 Моделювання роботи електромеханічного приводу насосної установки САУ поливу теплиць	68
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток аграрного сектору характеризується зростанням вимог до ефективності використання ресурсів, зокрема води, енергії та добрив. У зв'язку з цим особливого значення набуває впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами в тепличному господарстві. Одним із ключових факторів, що визначають врожайність та якість продукції, є оптимальний режим зволоження ґрунту. Неправильна організація поливу призводить до перевитрати водних ресурсів, зниження врожайності та погіршення стану рослин.

Традиційні методи керування поливом, які базуються на ручному контролі або простих таймерних системах, не забезпечують необхідної точності та оперативності реагування на зміну умов середовища. Це особливо актуально в умовах змін клімату, коли параметри мікроклімату можуть швидко змінюватися. Автоматизовані системи керування дозволяють здійснювати безперервний моніторинг вологості ґрунту та інших параметрів і забезпечують своєчасне коригування режимів поливу.

Використання сучасних технічних засобів, таких як промислові програмовані логічні контролери, сенсори вологості, виконавчі механізми та системи збору даних, дозволяє створювати вискоєфективні системи автоматичного регулювання. Такі системи здатні працювати в реальному часі, враховуючи як внутрішні, так і зовнішні збурення, що впливають на стан об'єкта керування.

З точки зору теорії автоматичного управління, система поливу теплиці є складним динамічним об'єктом з вираженою інерційністю та нелінійними властивостями. Це ускладнює процес синтезу регулятора та потребує використання сучасних методів моделювання та аналізу. Розробка адекватної математичної моделі об'єкта та вибір ефективної структури регулятора є важливими етапами створення надійної системи керування.

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Актуальність теми також обумовлена необхідністю зменшення впливу людського фактору на процес керування поливом. Автоматизація дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу, зменшити витрати праці та забезпечити більш раціональне використання ресурсів. Крім того, впровадження таких систем сприяє підвищенню енергоефективності та екологічності виробництва.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування поливом тепличного господарства є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе практичне значення та спрямоване на підвищення ефективності сучасного аграрного виробництва.

Мета кваліфікаційної роботи. У представленій кваліфікаційній роботі проаналізовано автоматизовані системи поливу та іригації, представлено структуру запропонованої системи і функціональне представлення основних вузлів управління, а також проведено вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА) безпосередньо на об'єкті керування. Основними задачами розробки автоматизованої системи поливу з використанням інтегрованих програмно-технічних засобів та логічних рішень на базі промислових контролерів, що є на сьогоднішній день невід'ємним елементом для автоматизованих систем керування.

Основними задачами кваліфікаційної роботи є:

- аналіз автоматизованих систем керування поливом, та пристроїв, засобів їх автоматизації;
- розробка структури автоматизованої системи поливу і іригації та функціональне представлення основних вузлів управління;
- обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації;
- розробка загальної структури автоматизованої системи керування та визначання основних елементів регулювання;
- синтез та моделювання цифрової нелінійної системи керування поливу з електромеханічним приводом.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматизована система поливу та іригації є актуальною розробкою та вирішенням нагальним проблем зволоження та внесення рідких добрив у ґрунт. Рішенням задач керування технологічними процесами в тепличних господарствах є симбіоз сучасних програмно-технічних засобів автоматизації з новими алгоритмами та математичними методами у аграрному секторі.

Предметом дослідження є процес автоматизованого поливу та іригації.

Об'єктом дослідження є система автоматичного управління, технологічними процесами збору даних і керування секторним поливом.

Методи дослідження – аналіз та огляд актуальних електронних ресурсів і літературних джерел, порівняльний аналіз конкуренто спроможних розробок в промислово-аграрному секторі.

Практичне значення одержаних результатів. Основане на тому, що запропоновані методи та технічні рішення по проектуванні та розрахунку систем автоматичного керування, які мають практичні можливості підвищити їх надійність та ефективність в рази.

Апробація. Албанський І., Мерва М., Рудковський О., Солтис Д. Взаємодія автоматизованих систем керування з інтелектуальними сенсорами технології IoT / Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С.97-102.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Загальний аналіз та основні характеристика автоматизованих систем тепличних господарствах

Сучасна автоматизація теплиць є квантовим стрибком у ефективності сільського господарства, перетворюючи традиційні методи вирощування в точні керовані середовища. Інтелектуальні системи автоматизації поєднують сенсори, контролери та виконавчі механізми для створення автоматизованих екосистем, які оптимізують зростання рослин, мінімізуючи споживання ресурсів та трудовитрати.

Такі складні системи контролюють та регулюють одночасно безліч параметрів навколишнього середовища, створюючи ідеальні умови вирощування, які неможливо підтримувати вручну (рисунок 1.1). Внаслідок цього підвищується врожайність, знижуються експлуатаційні витрати, а якість урожаю залишається незмінною незалежно від зовнішніх погодних умов.



Рисунок 1.1 – Автоматизовані системи контролю параметрів теплиць

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні компоненти систем автоматизації ряд складових, які в кінцевому результаті впливають на кінцевий результат – продукцію. Комплексна система автоматизації теплиці складається із взаємозалежних компонентів, які працюють разом для створення оптимальних умов вирощування. Розуміння цих компонентів необхідне для розробки та впровадження ефективних рішень з автоматизації [1].

Сенсори та моніторинг навколишнього середовища це перш за все розуміння стану рослин та умов вирощування, сюди входять:

- сенсори температури (контроль кількох зон з точністю $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ для точного керування кліматом);
- сенсори вологості (відстеження рівня вологості в режимі реального часу для запобігання утворенню конденсату та хвороб);
- сенсори світла (вимірювання фотосинтетично активного випромінювання (ФАВ) для оптимального керування освітленням);
- сенсори CO_2 (моніторинг рівня вуглекислого газу для підвищення швидкості фотосинтезу);
- сенсори вологості ґрунту (вологість у кореневій зоні для точного планування поливу);
- сенсори рН та ЕС (моніторинг поживних розчинів для гідропонних систем).

До систем управління та привідних систем (виконавчих механізмів) відносять сукупність електричних, електро-механічних, механічних, гідравлічних та пневматичних механізмів. Системи управління служать "мозком" автоматизованих систем, обробляючи дані сенсорів та активуючи відповідні умови за допомогою різних виконавчих механізмів та механічних систем. Системи управління (керування) включають в себе:

- програмовані логічні контролери (ПЛК) (контролери промислового класу для складних технологічних процесів автоматизації);
- частотно-регульовані приводи (ЧРП) (точне керування двигунами для вентиляторів, насосів та іншого обладнання);

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- моторизовані вентиляційні системи (автоматичне керування дахом та бічними вентиляційними отворами в залежності від температури та вологості);
- контролери зрошення (точні системи подачі води та поживних речовин з контролем за конкретною зоною);
- приводи клімат-контролю (інтеграція систем опалення, охолодження та вентиляції).

Автоматизація керування кліматом є невід’ємним елементом успішного введення тепличного господарства. Автоматизований клімат-контроль є основою інтелектуальних тепличних систем, що підтримують оптимальні умови вирощування завдяки постійному моніторингу та регулюванню температури, вологості та циркуляції повітря.

Системи керування температурою є однією з найскладніших задач ефективного вирощування та мінімізації затрат ресурсів для досягнення позитивних результатів. Складні системи контролю температури підтримують точні умови вирощування, поєднуючи кілька джерел нагрівання та охолодження з інтелектуальними алгоритмами управління, які передбачають та запобігають коливанням температури.

Інтеграція системи опалення для тепличних господарств включає в себе [1, 2]:

- поетапне керування нагріванням (декілька джерел опалення, що включаються послідовно залежно від потреби);
- температура для конкретної зони (індивідуальний контроль площі різних потреб у культурі тої чи іншої рослини);
- алгоритми прогнозування (погодне прогнозування опалення для запобігання пониженню температури);
- оптимізація енергоспоживання (автоматичний вибір найефективніших джерел опалення).

Ще одним етапом ефективного функціонування тепличного господарства є автоматизація охолодження та вентиляції, що включає:

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- управління природною вентиляцією (автоматичний режим вентиляції на основі різниці температур);
- примусова циркуляція повітря (модуляція швидкості вентилятора для оптимального руху повітря);
- випарне охолодження (автоматизовані системи накладок та вентиляторів для зниження температури);
- інтеграція системи затінення (автоматичне розгортання тіні у періоди високої температури).

Контроль вологості та запобігання утворенню конденсату є важливим етапом роботи автоматизованої системи в цілому. Підтримання оптимального рівня вологості запобігає розвитку хвороб та забезпечує ідеальні умови для вирощування. Автоматизовані системи контролю вологості балансують додавання та видалення вологи для підтримки заданого рівня.

Стратегії управління вологістю є невід'ємною складовою автоматизованої системи, що відповідає за технологічний процес вирощування різнотипних культур і включає:

- системи осушення повітря (автоматичне видалення вологи в періоди підвищеної вологості);
- контроль на основі вентиляції (стратегічний повітрообмін для регулювання рівня вологості);
- інтеграція опалення (узгоджене опалення та вентиляція для запобігання утворенню конденсату);
- моніторинг транспірації рослин (коригування на основі моделей виділення вологи рослинами);

Автоматизація іригації та фертигації виконуються автоматизованою системою поливу подаючи точну кількість води та поживних речовин залежно від потреб рослин, стану ґрунту та факторів навколишнього середовища [2]. Ці системи виключають припущення та забезпечують постійне живлення рослин.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Точне керування зрошенням у сучасних автоматизованих системах зрошення виходить за рамки простих таймерів і включає сенсори вологості ґрунту, погодні дані і стадії росту рослин для оптимізації подачі води. Інтелектуальний іригатор до основних функцій відносить:

- планування на основі вологості ґрунту (полив за фактичними потребами рослин, а не за таймером);
- інтеграція погоди (автоматичне регулювання на основі прогнозів вологості та температури);
- контроль за конкретною зоною (індивідуальне планування зрошення для різних сільськогосподарських культур);
- економія води (мінімізація відходів завдяки точній доставці та виявленню витоків).

Автоматизовані системи фертигації в комплексі системи зрошення та водопостачання є актуальними. Автоматизація фертигації поєднує подачу води з точним дозуванням поживних речовин, забезпечуючи рослини оптимальним живленням протягом усього циклу зростання. Компоненти управління живильними речовинами включають:

- резервуари для зберігання розчину (концентроване зберігання поживних речовин з автоматичними системами змішування);
- контролери рН та ЕС (постійний контроль та коригування поживних розчинів);
- інжекторні насоси (точне дозування поживних речовин залежно від потреб культур та стадії зростання);
- запобігання зворотному потоку (системи безпеки для запобігання забрудненню джерел водопостачання).

Управління та оптимізація освітленням відіграють значну роль в ефективності вирощування різних культур. Автоматизовані системи освітлення доповнюють природне сонячне світло та продовжують вегетаційний період завдяки інтелектуальному управлінню штучним освітленням відповідно до потреб рослин та міркувань енергоефективності.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція світлодіодного освітлення дозволяє значно ефективніше перерозподіляти світлові потоки в залежності від видів рослин. Сучасні світлодіодні системи освітлення забезпечують точний контроль спектру та енергоефективність, що робить їх ідеальними для автоматизованого освітлення теплиць. Розширені можливості освітлення включають [2, 3]:

- інтеграцію денного світла (автоматичне регулювання яскравості та інтенсивності в залежності від рівня природного освітлення);
- спектральний контроль (регульовані спектри світла для різних стадій росту та типів рослин);
- управління фотоперіодом (автоматизовані цикли день/ніч для оптимального розвитку рослин);
- оптимізація енергоспоживання (управління піковим попитом та планування тарифів на комунальні послуги).

Збір даних та аналітика дає можливість прогнозувати урожайність та планувати затрати по енергоресурсах. Комплексний збір даних забезпечує безперервну оптимізацію системи та дає уявлення про врожайність, використання ресурсів та ефективність роботи.

Системи моніторингу та звітності включають передові системи моніторингу, які щодня збирають та аналізують тисячі потоків даних, надаючи оперативні відомості для покращення роботи з вирощування. Можливості аналізу даних включають:

- приладові панелі в режимі реального часу (моніторинг усіх параметрів системи в режимі реального часу та попередження);
- історичні тенденції (довгостроковий аналіз даних для пошуку можливостей оптимізації);
- предиктивна аналітика (прогнозування потреб системи та потенційних проблем);
- бенчмаркінг продуктивності (порівняння поточних операцій з історичними даними).

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція та масштабованість системи є невід’ємним елементом будь-якої автоматизованої системи. Сучасні системи автоматизації розраховані на масштабованість та інтеграцію з існуючою інфраструктурою теплиць, що дозволяє поступово впроваджувати та розширювати систему. Протоколи зв'язку та можливості підключення є стандартизовані для таких видів систем. Стандартизовані протоколи зв'язку забезпечують сумісність між різними компонентами системи та дозволяють здійснювати віддалений моніторинг та керування. Варіанти підключення можуть бути різними:

- бездротові сенсорні мережі (сенсори з живленням від акумулятора та дальнім зв'язком);
- можливість підключення до Internet (віддалений моніторинг та керування за допомогою веб-інтерфейсів);
- мобільні програми (управління зі смартфона та планшета для керування в дорозі);
- інтеграція з хмарою (зберігання та аналіз даних у хмарних платформах).

Майбутня автоматизація теплиць – за штучним інтелектом, машинним навчанням та передовою робототехнікою, які дозволять ще більше скоротити втручання людини та оптимізувати умови вирощування [3]. Автоматизація нового покоління це в першу чергу:

- управління за допомогою штучного інтелекту (алгоритми машинного навчання, що адаптуються до умов, що змінюються);
- комп'ютерний зір (автоматизований моніторинг стану рослин та виявлення шкідників);
- роботизована інтеграція (автоматизовані завдання з посадки, збирання врожаю та обслуговування);
- інтеграція в блокчейн (відстеження ланцюжка поставок та забезпечення якості).

Інтелектуальна автоматизація теплиць є майбутнім сталого сільського господарства, забезпечуючи безпрецедентний контроль над середовищем

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

виращування при одночасному скороченні споживання ресурсів та експлуатаційних витрат. У міру розвитку технологій ці системи стануть все більш складними та доступними для фермерів будь-якого розміру.

1.2 Огляд складової автоматизованих систем підтримки технологічних процесів виращування рослин у промислових теплицях

Сучасні теплиці давно перетворилися на складні конструкції, насичені електронікою та обладнанням. Якщо власники хочуть максимально використовувати відведену площу і отримувати відмінний урожай овочів, фруктів і зелені, то їм доведеться йти в ногу з технічним прогресом. Автоматизація полягає у звільненні людини від рутини, економії часу та створенні оптимальних умов для зростання продукції, що виращується.

Види використовуваної автоматики на сьогоднішній день на світовому ринку представлено широким спектром та різними виробниками від стандартизованого обладнання до авторським розробок під вузькопрофільні тепличні господарства. Схеми ведення сучасного тепличного господарства поділяються на дві групи:

- автономні;
- енергозалежні.

У першому варіанті як джерело живлення використовується сонячна та теплова енергія. Системи повільно реагують на зміну обстановки, але обходяться дешевше. Другий тип кращий, оскільки має широкі можливості. Підключені до мережі пристрої виконують завдання, поставлені перед ними. Однак це рішення має і негативну сторону. При відключенні електроенергії в критичний момент: взимку в мороз або в грозу постраждає врожай. Крім того, енергозалежне обладнання обтяжує бюджет.

Автоматизована система керування (управління) АСК теплиці – основа високої врожайності та рентабельності виробництва (рисунок 1.2) [4]. Зростання та розвиток рослин безпосередньо залежать від умов

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

мікроклімату: температури та вологості повітря, освітлення, концентрації вуглекислого газу та вологості ґрунту. АСК служить для підтримки оптимальних умов росту та розвитку рослин, контролю параметрів, регулювання поливу, провітрювання та освітлення теплиці.

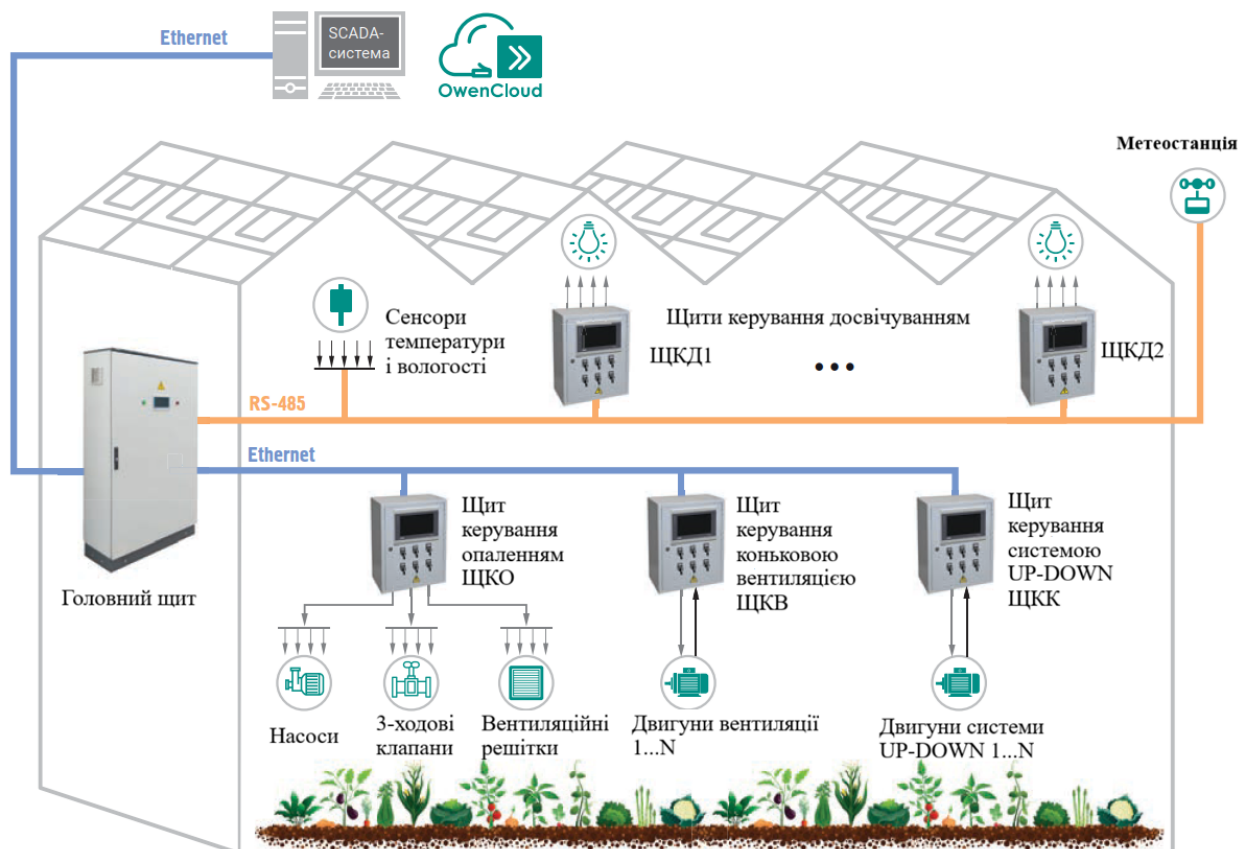


Рисунок 1.2 – Автоматизована система керування тепличним господарством

Поняття «розумна теплиця», як і «розумний дім», має на увазі систему управління інженерним обладнанням. У невеликих теплицях у літній період для відкривання кватирок та клапана поливу достатньо програмованого реле з сенсором температури та вологості.

Сучасна фермерська теплиця або великий тепличний комплекс – це конструкція із покриттям зі скла, плівки або полікарбонату. Для узгодженої роботи обладнання в теплицях встановлюються локальні системи керування:

- вентиляцією – кватиркова або припливно-витяжна;
- опаленням – водяне, повітряне або інше;

- зашторюванням – горизонтальне та вертикальне (5 видів: енергозберігаючі, затіняючі, комбіновані, затемнюючі, світлоповертальні);

- СВОД – система випарного охолодження та зволоження для зниження температури повітря на 5-10 °С та створення необхідної вологості в теплиці;

- штучним асиміляційним освітленням для збільшення тривалості світлового дня у теплиці;

- подачею CO₂ збільшення врожайності до 30 % за інших рівних умов.

Система поливу – найбільша в плані управління технологічним обладнанням – може включати [3-5]:

- розчинний вузол для змішування маткових розчинів добрив з водою та подачі в магістраль поливу;

- гравійний фільтр для попередньої підготовки води;

- теплообмінник для підігріву води;

- систему підготовки води ОСМОС;

- магістраль крапельну, зрошувальну або приплив-відлив;

- накопичувальні ємності для підготовленої води, збирання брудного та чистого дренажу;

- дезінфектор дренажу – термічний чи ультрафіолетовий.

Від злагодженої взаємної роботи локальних систем залежить мікроклімат у теплиці, отже, врожайність і кінцева прибутковість підприємства.

При великій кількості тепличного обладнання неможливо обійтися без автоматизації. Автоматизація відкриває нові можливості для тепличного господарства забезпечуючи високий рівень рентабельності виробництва. Системи автоматизованого контролю клімату підтримують необхідний температурно-вологісний режим, діагностують технічний стан обладнання, дозволяють економно витрачати воду, тепло та енергоресурси.

Функціональні можливості АСУ теплиці [5]:

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- автоматичне керування режимами роботи інженерних систем;
- підтримка заданих параметрів мікроклімату;
- відображення необхідної інформації на екрані контролера, монітора чи мобільного пристрою;
- контроль та діагностика стану виконавчого обладнання;
- віддалене керування в особистому кабінеті;
- своєчасне оповіщення персоналу про позаштатні ситуації.

Для контролю та керування тепличним обладнанням використовується диспетчерський пункт із SCADA-системою [5, 6]. Для менш масштабних об'єктів доцільніше організувати моніторинг та управління у хмарному сервісі OwenCloud, зв'язок з яким забезпечується через Ethernet або бездротовий зв'язок стандарту GSM або Wi-Fi (рисунок 1.2). У мобільному додатку OwenCloud на пристроях, підключених до Інтернету, можна контролювати стан об'єкта у будь-якій частині земної кулі.

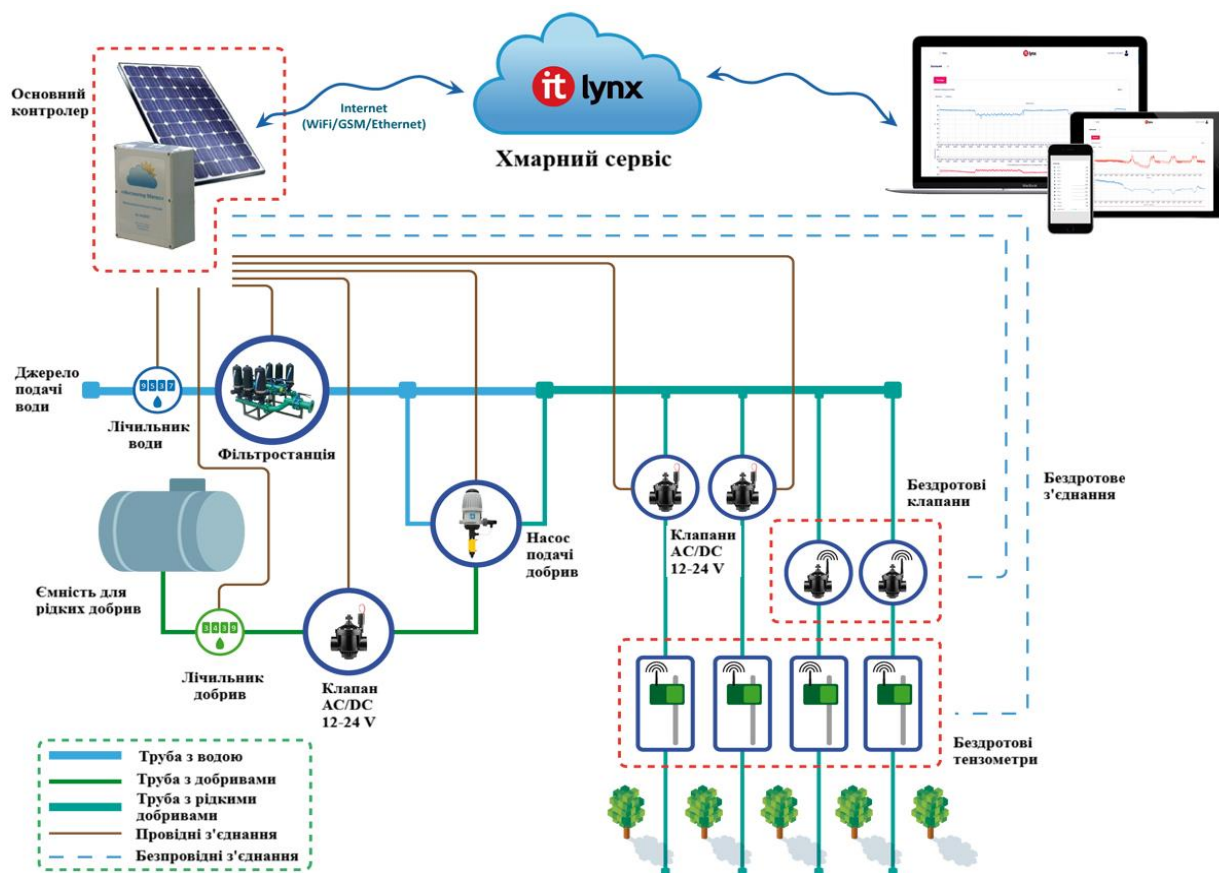


Рисунок 1.3 – Контроль та керування через диспетчерський пункт із SCADA-системою

Керування системою автоматизації здійснюється за допомогою програмного комплексу OptiSys, розробленого компанією IT-Lynx. Даний комплекс базується на сучасній веб-орієнтованій платформі, що забезпечує можливість створення як типових серійних рішень, так і індивідуальних, унікальних проєктів.

Користувачський інтерфейс системи доступний через стандартний веб-браузер, що дозволяє здійснювати керування з будь-якого пристрою — смартфона, планшета або персонального комп'ютера — за наявності підключення до мережі Інтернет, без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення.

Архітектура АСУ промислової теплиці характеризується багаторівневою, розподіленою та модульною структурою, що забезпечує інтеграцію великої кількості різнорідних сенсорів і виконавчих механізмів, реалізацію замкнених контурів керування мікрокліматом, а також підтримку віддаленого моніторингу та енергоефективних режимів функціонування.

Систему АСУ теплиці утворюють такі компоненти [6]:

- первинні перетворювачі температури, вологості, рівня CO₂, швидкості та напрямки вітру, сонячної радіації, освітленості, тиску, рівня та ін;
- сигналізатори досягнення граничних значень;
- блоки живлення, комутуюче та захисне обладнання, органи ручного управління;
- панелі оператора;
- програмовані контролери.

У системах управління мікрокліматом теплиць первинні перетворювачі служать для контролю зовнішніх і внутрішніх показників середовища, таких як температура, вологість, опади, швидкість та напрям вітру, освітленість та інших. Перетворювачі знімають показання та передають сигнали на контролер, з якого керуючі сигнали надходять на виконавчі механізми.

Сенсори, встановлені у теплиці, служать для достовірної оцінки умов мікроклімату реального часу. Якщо температура опускається нижче

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановленої межі, система закриває фрамуги для запобігання надходженню холодного повітря. Якщо цього недостатньо, то вводить у дію обігрів. Таким чином, всі дії автоматики спрямовані на запобігання згубним наслідкам рослин.

Не менш важливим є контроль зовнішніх показників середовища. Тому в більшості проектів використовується метеостанція з комплектом сенсорів для вимірювання температури та вологості повітря, швидкості та напрямку вітру, освітленості чи сенсор сонячної радіації, опадів. Основна функція метеостанції – це захист конструкції теплиці та рослин від зовнішніх факторів, а відтак і капіталовкладень інвестора.

Метеостанція кріпиться на щоглу на висоті 2-2,5 метра над верхньою точкою теплиці. При перевищенні допустимих показників, що надходять із сенсорів швидкості та напрямку вітру, контролер сигналізує про закриття вентиляційних фрамуг. Це запобігає їх пошкодженню від поривів вітру. Сенсор опадів дощу та снігу служить для запобігання потраплянню опадів усередину теплиці, що досягається регулюванням ступеня закриття вентиляційних фрамуг.

Крім конструктивних особливостей, у тепличному господарстві необхідно враховувати технологічні параметри, наприклад, такі як кількість вуглекислого газу, оскільки недолік CO₂ є важливим фактором, що обмежує зростання та розвиток рослин. У ґрунтових теплицях при недостатньому повітрообміні вміст вуглекислого газу може впасти настільки, що фотосинтез практично припиняється. Для контролю за кількістю вуглекислого газу встановлюються спеціальні сенсори.

САУ теплиці може працювати як в ручному, так і в автоматичному режимах. Система підключена до сервісу OwenCloud для віддаленого налаштування параметрів. Дані зберігаються на сервісі OwenCloud до трьох місяців [7].

Окрім основного завдання – підтримання оптимального мікроклімату, САУ забезпечує контроль можливих позаштатних ситуацій та несправностей

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

обладнання, у тому числі відключення живлення, відключення автоматів захисту, спрацювання теплових реле, вихід температури за допустимі межі, втрату зв'язку з сенсорами або модулями та інше. Отримавши аварійний сигнал, САУ оперативно сповістить персонал про всі позаштатні ситуації на об'єкті. Повідомлення про аварійні ситуації дублюється за кількома каналам: аварійна сирена у самій теплиці з виведенням інформації на панель оператора, розсилка повідомлень на електронні адреси відповідальних працівників, висновок інформації на комп'ютері оператора. Своєчасне повідомлення про позаштатну ситуацію дозволяє вчасно вжити заходів та уникнути виходу з ладу обладнання, загибелі врожаю, отже, і втрат бізнесу.

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

Технологія Інтернету речей (IoT) дозволила перевести моніторинг теплиць із ручного спостереження на безперервний автоматизований збір даних. Мережі сенсорів IoT дозволяють в режимі реального часу отримувати інформацію про кожен аспект середовища вирощування, забезпечуючи точне землеробство, що раніше було неможливо. Ці взаємопов'язані системи сенсорів створюють цифрового двійника вашої теплиці, фіксуючи мільйони точок даних, які дозволяють виявити закономірності, передбачити проблеми та оптимізувати умови вирощування. Результат - ефективніше використання ресурсів, підвищення врожайності та зниження операційних ризиків.

Сенсори IoT - це інтелектуальні пристрої, які збирають дані про навколишнє середовище та передають їх бездротовим зв'язком у центральні системи моніторингу (рисунк 1.4) [7, 8]. На відміну від традиційних сенсорів, IoT-пристрої можуть взаємодіяти один з одним та хмарними платформами, створюючи комплексні мережі моніторингу. Це дозволяє оптимізувати збір даних, подальшу обробку та прийняття рішень для приведення в готовність тих чи інших механізмів.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд сенсорів, які працюють на основі технологій IoT

Основні характеристики сенсорів IoT є [8]:

- бездротовий зв'язок (не потрібне прокладання проводів, що забезпечує гнучкість розміщення);
- низьке енергоспоживання (робота від акумулятора протягом кількох місяців чи років);
- передача даних у режимі реального часу (миттєві оповіщення та безперервний моніторинг);
- віддалений доступ (контролюйте умови будь-якого місця за допомогою смартфона або комп'ютера);
- масштабовані мережі (легке додавання нових сенсорів у міру зростання потреб).

Сенсори для моніторингу довкілля складають основу IoT-моніторингу теплиць, відстежуючи ключові параметри, що впливають на зростання та здоров'я рослин (рисунок 1.5). Ці сенсори надають дані, необхідні для автоматичного контролю та оптимізації клімату.



Рисунок 1.5 – Сенсори IoT для моніторингу довкілля

Системи моніторингу температури мають вирішальне значення для підтримки оптимальних умов вирощування та запобігання стресостійкості рослини. Сучасні IoT-сенсори температури мають високу точність і можуть контролювати кілька зон одночасно (рисунок 1.6). Удосконалений сенсор температури має наступні особливості:

- багатозональний моніторинг (індивідуальні сенсори для різних зон теплиці);
- висока точність (точність $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ для чутливих культур);
- аналіз тенденцій (історичні температурні моделі та прогнози).
- системи оповіщення (негайне повідомлення про перевищення температури).
- екрани від сонячної радіації (точні показання, які не піддаються впливу прямих сонячних променів).

Виявлення вологості та вогкості є актуальним для великих промислових тепличних господарств. Сенсори вологості контролюють вологість повітря та конденсацію вологи на поверхні, допомагаючи запобігти

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

розвитку хвороб підтримуючи оптимальні умови вирощування для різних видів культур (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Промисловий безпроводний IoT сенсор температури і вологості

До основних можливостей моніторингу вологості у великих промислових теплицях можна віднести [9]:

- вимірювання відносної вологості (безперервний контроль вологості повітря);
- розрахунок точки роси (оцінка та запобігання ризику утворення конденсату);
- дефіцит тиску пари (VPD) (оптимізація транспірації рослин);
- визначення вологості листя (профілактика хвороб за допомогою моніторингу вологості поверхні).

Моніторинг стану та росту рослин можна проводити за допомогою передових IoT-сенсорів, які можуть безпосередньо контролювати стан рослин, вимірюючи такі параметри, як вміст хлорофілу, швидкість росту та показники стресу, щоб оптимізувати умови вирощування та виявляти проблеми на ранній стадії.

Сенсори хлорофілу та життєздатності рослин це оптичні сенсори, що вимірюють вміст хлорофілу в рослинах та їхню загальну життєздатність, забезпечуючи ранні індикатори дефіциту поживних речовин, хвороб або

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стресу навколишнього середовища. В процесі моніторингу стану рослин можна виділити наступні особливості:

- вимірювання NDVI (нормалізований різницевий індекс рослинності для оцінки стану рослин);
- зміст хлорофілу (прямий вимір фотосинтетичної здатності);
- відстеження темпів зростання (автоматизований вимір розміру та розвитку рослин);
- виявлення стресу (системи раннього попередження про проблеми зі здоров'ям рослин);

Моніторинг ґрунту та кореневої зони проводять ґрунтові сенсори надаючи найважливішу інформацію про стан кореневої зони, дозволяючи точно керувати поливом та зрошенням, виходячи з фактичних потреб рослин, а не із запланованих (рисунок 1.7). Основними параметрами моніторингу ґрунту є:

- вміст вологи в ґрунті (об'ємний вміст води на різних глибинах);
- температура ґрунту (температура кореневої зони для оптимального зростання);
- електропровідність (ЕС) (концентрація поживних речовин та рівень солоності);
- моніторинг рН (кислотність ґрунту та наявність поживних речовин);
- рівень кисню (моніторинг стану коренів та аерації).



Рисунок 1.7 – Сенсор моніторингу ґрунту та кореневої зони

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Сенсори якості повітря контролюють гази, що впливають на зростання рослин і безпеку працівників, включаючи вуглекислий газ, що сприяє фотосинтезу, і потенційно шкідливі гази, що виділяються системами опалення або матеріалами, що розкладаються. Сенсори CO₂ дозволяють точно контролювати подачу вуглекислого газу, оптимізуючи темпи фотосинтезу та уникаючи витрати дорогих запасів CO₂. Переваги моніторингу CO₂ [7-9]:

- оптимізація фотосинтезу (підтримуйте ідеальний рівень CO₂ для максимального росту рослин);
- автоматизований додаток (точне впорскування CO₂ залежно від потреб рослин);
- енергоефективність (узгодження рівня CO₂ з освітленням та температурою);
- моніторинг безпеки (запобігає небезпечному накопиченню CO₂ у закритих приміщеннях).



Рисунок 1.8 – Сенсори якості повітря та контролю загазованості

Спеціалізовані сенсори можуть виявляти шкідливі гази, такі як етилен, аміак та сірчисті сполуки, які можуть зашкодити врожаю або створити небезпечні умови праці. До основних параметрів якості повітря можна віднести:

- виявлення етилену (контролюйте гази, що утворюються при дозріванні фруктів, які можуть впливати на інші культури);

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- моніторинг аміаку (виявлення шкідливих викидів від добрив чи систем опалення);
- тверді частки (продуктивність системи фільтрації повітря та якість повітря);
- летючі органічні сполуки (ЛОС) (раннє виявлення зараження шкідниками чи хворобами рослин).

Сенсори контролю води відстежують продуктивність іригаційної системи, якість води та характер її використання, щоб оптимізувати управління водними ресурсами та забезпечити рівномірний полив культур.

Сенсори потоку контролюють розподіл води в системі зрошення, виявляючи витoki, засмічення та забезпечуючи рівномірну подачу води у всі зони вирощування. Моніторинг іригаційних систем включає [9]:

- вимірювання швидкості потоку (відстеження використання води в режимі реального часу та виявлення витоків);
- контроль тиску (продуктивність системи та виявлення засорів);
- сенсор рівня води (моніторинг резервуарів та водосховищ для керування постачанням);
- зворотний зв'язок щодо положення клапана (підтвердження роботи зони зрошення).

Сенсори якості води забезпечують відповідність поливної води вимогам культур та виявляють забруднення, які можуть завдати шкоди рослинам або засмічувати іригаційні системи. До основних параметрів якості води належить:

- моніторинг рН та ЕС (якість поживних розчинів та сумісність з рослинами);
- розчинений кисень (якість води та здоров'я коренів);
- вимірювання каламутності (продуктивність системи фільтрації та чистота води);
- виявлення хлору (хімічний моніторинг очищення міських вод).

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Сенсори освітленості вимірюють природне та штучне освітлення для оптимізації росту рослин та ефективного управління системами додаткового освітлення. Сенсори PAR вимірюють конкретні довжини хвиль світла, використовувані рослинами для фотосинтезу, що дозволяє точно керувати освітленням та оптимізувати енергоспоживання. Основними можливостями моніторингу освітлення є:

- вимірювання PAR (фотосинтетично активна радіація у мкмоль/м²/с);
- добовий світловий інтеграл (DLI) (повне накопичення світла для оптимізації зростання);
- спектральний аналіз (оцінка якості освітлення на різних стадіях зростання);
- ультрафіолетовий моніторинг (відстеження корисного та шкідливого ультрафіолетового випромінювання).

Застосування технології Internet of Things в автоматизованих системах керування промисловими теплицями є обґрунтованим завдяки можливості реалізації розподіленого збору даних, підвищення точності контролю параметрів мікроклімату, забезпечення віддаленого моніторингу та впровадження енергоефективних режимів керування [10]. Використання ІоТ дозволяє створити гнучкі, масштабовані та економічно ефективні системи автоматизації з елементами інтелектуального аналізу.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Реалізація структури автоматизованої системи поливу та іригації тепличного господарства

У сучасних умовах інтенсифікації аграрного виробництва та переходу до високотехнологічних методів ведення господарства особливої значущості набуває впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами у тепличному господарстві. Одним із ключових елементів забезпечення стабільної продуктивності та якості рослинницької продукції є раціональна організація процесів поливу та іригації, які безпосередньо впливають на водний баланс рослин, швидкість фізіологічних процесів та ефективність засвоєння поживних речовин.

Актуальність розробки автоматизованих систем поливу зумовлена необхідністю переходу від екстенсивних до ресурсозберігаючих технологій, що відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки. Традиційні підходи до організації зрошення, які базуються на фіксованих часових інтервалах або ручному керуванні, не забезпечують адекватної реакції на динамічні зміни параметрів мікроклімату та стану ґрунтового середовища. Це призводить до перевитрат води, підвищеного енергоспоживання насосного обладнання та зниження загальної ефективності функціонування тепличного комплексу.

У цьому контексті особливого значення набуває застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК) як базового елементу системи керування, що забезпечує реалізацію алгоритмів у реальному часі, високу надійність та адаптивність до змінних умов функціонування. Використання ПЛК дозволяє інтегрувати сигнали від багатопараметричних сенсорних систем, зокрема сенсорів вологості ґрунту, температури, електропровідності та кислотності середовища, з метою формування керуючих впливів на

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконавчі механізми — насоси, електромагнітні клапани та системи дозування добрив.

Особливу актуальність набуває питання підвищення енергоефективності процесів іригації, що досягається шляхом оптимізації режимів роботи насосного обладнання, мінімізації кількості пусків та зупинок, а також реалізації адаптивних алгоритмів керування поливом залежно від поточного стану об'єкта [10]. Застосування інтелектуальних підходів до керування дозволяє не лише знизити споживання електроенергії, але й продовжити ресурс роботи обладнання, зменшуючи його зношування.

Крім того, впровадження автоматизованих систем поливу створює передумови для реалізації принципів точного землеробства в умовах закритого ґрунту, що передбачає диференційоване керування зрошенням у межах окремих зон теплиці. Це особливо важливо для великих промислових комплексів, де просторові неоднорідності параметрів середовища можуть суттєво впливати на ефективність виробництва.

Таким чином, розробка та дослідження автоматизованої системи керування поливом та іригацією на базі програмованих логічних контролерів, орієнтованої на забезпечення енергоефективного функціонування, є актуальним науково-прикладним завданням, що має важливе значення для підвищення ефективності тепличного господарства, раціонального використання природних ресурсів та впровадження сучасних технологій автоматизації у аграрному секторі.

Розробка оптимальної структурної схеми автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства є складним багатокритеріальним завданням, що передбачає послідовне виконання ряду взаємопов'язаних етапів. На початковому етапі здійснюється детальний аналіз об'єкта автоматизації, який включає визначення площі тепличного комплексу, кількості зон поливу, типу вирощуваних культур, особливостей технології зрошення (крапельний полив, дощування тощо), а також характеристик джерела водопостачання. Даний етап є визначальним,

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

оскільки дозволяє сформувати вихідні дані для подальшого синтезу системи керування.

Наступним кроком є формування критеріїв оптимальності, відповідно до яких здійснюється проектування системи. До основних критеріїв належать мінімізація витрат водних ресурсів та електроенергії, забезпечення рівномірності зволоження ґрунту, підвищення надійності функціонування системи та зниження експлуатаційних витрат. Визначення таких критеріїв дозволяє обґрунтовано оцінювати ефективність різних варіантів структурної побудови системи.

На основі проведеного аналізу здійснюється визначення керованих і контрольованих параметрів технологічного процесу, до яких, як правило, відносяться вологість ґрунту, температура навколишнього середовища, витрата води та тиск у трубопроводі. Саме ці параметри формують вимоги до вимірювальної підсистеми та визначають склад сенсорного обладнання.

Подальшим етапом є синтез функціональної структури автоматизованої системи, яка включає виділення основних рівнів: вимірювального (сенсори), керуючого (програмований логічний контролер), виконавчого (насоси, електромагнітні клапани, дозуючі пристрої) та рівня візуалізації (НМІ або SCADA-система). Такий підхід відповідає сучасним принципам побудови промислових систем автоматизації та забезпечує чіткий розподіл функцій між окремими елементами системи.

Після формування функціональної структури виконується розробка структурної (апаратної) схеми, яка передбачає вибір типу програмованого логічного контролера, визначення необхідної кількості та типів модулів вводу/виводу, побудову топології підключення сенсорів і виконавчих механізмів, а також проектування силової частини системи. На цьому етапі закладаються технічні рішення, що забезпечують фізичну реалізацію системи.

Важливим етапом є вибір і оптимальне розміщення сенсорів, яке повинно забезпечувати репрезентативність вимірювань при мінімальній

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кількості сенсорів. Особлива увага приділяється зональному розподілу вимірювань, що дозволяє враховувати неоднорідність умов у різних частинах теплиці та підвищує точність керування.

Далі здійснюється синтез алгоритму керування, який реалізується на базі програмованого логічного контролера. Алгоритм повинен забезпечувати своєчасне включення та вимкнення поливу залежно від значень контрольованих параметрів, враховувати обмеження за часом роботи обладнання, а також реалізовувати енергоефективні режими функціонування, зокрема оптимізацію роботи насосів і мінімізацію кількості їх пусків.

На етапі оптимізації структури системи проводиться аналіз різних варіантів побудови з метою досягнення оптимального співвідношення між вартістю, складністю та ефективністю. Зокрема, визначається доцільна кількість зон поливу, конфігурація виконавчих механізмів, а також структура керування (централізована або розподілена) [10, 11].

Окремо розробляється комунікаційна структура системи, яка визначає способи обміну даними між її елементами, вибір протоколів передачі інформації (наприклад, Modbus або інші промислові інтерфейси), а також інтеграцію з системами візуалізації та диспетчеризації.

Завершальними етапами є перевірка та валідація розробленої структури, що включає моделювання роботи системи, аналіз можливих аварійних ситуацій і оцінку надійності її функціонування. Після цього проводиться оцінка ефективності запропонованого рішення за визначеними критеріями, зокрема за показниками витрат води, енергоспоживання та стабільності підтримання технологічних параметрів.

Таким чином, процес розробки оптимальної структурної схеми автоматизованої системи керування поливом та іригацією є комплексним і передбачає послідовне виконання етапів від аналізу об'єкта до оцінки ефективності функціонування системи, що забезпечує досягнення високих показників ресурсозбереження, надійності та адаптивності в умовах сучасного тепличного виробництва.

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структурна схема автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства формується відповідно до принципів ієрархічної побудови систем автоматизації та передбачає інтеграцію вимірювальних, керуючих і виконавчих підсистем у єдиний технологічний комплекс (рисунок 2.1). Така схема забезпечує реалізацію замкненого циклу керування, що включає збір інформації про стан об'єкта, її обробку, формування керуючих впливів та контроль результатів їх виконання [11].

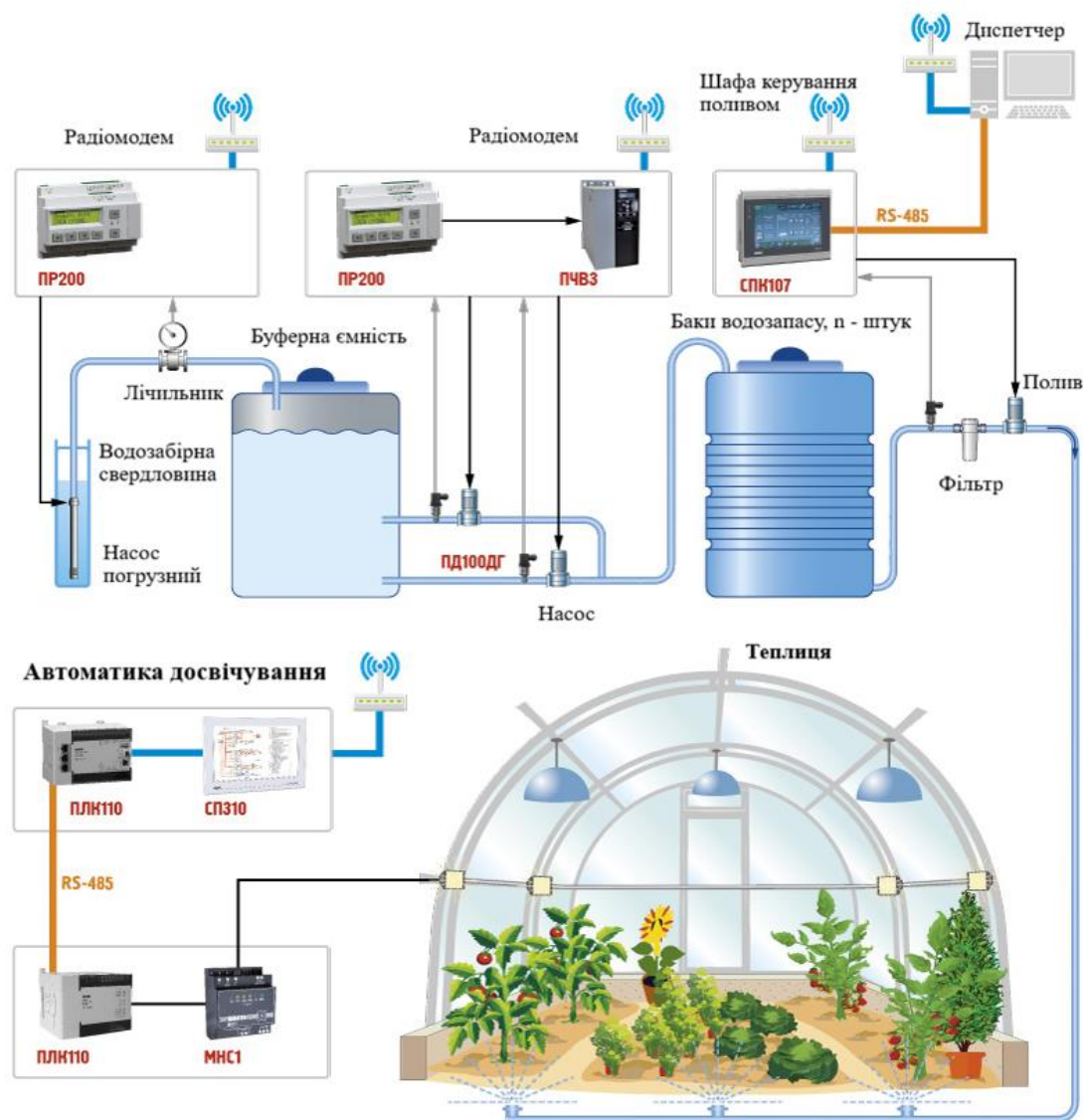


Рисунок 2.1 – Загальна структура автоматизованої системи керування поливом та іригацією теплиць

На нижньому рівні структурної схеми розташована вимірювальна підсистема, яка представлена сукупністю первинних перетворювачів

технологічних параметрів. До її складу входять сенсори вологості ґрунту, температури повітря, електропровідності (ЕС) та кислотності (рН) живильного розчину, а також, за необхідності, сенсори тиску і витрати води у трубопроводах (рисунок 2.2). Зазначені сенсори забезпечують безперервний моніторинг стану середовища вирощування та формують інформаційну базу для прийняття керуючих рішень. Сигнали з сенсорів надходять до модулів аналогового та дискретного вводу, де здійснюється їх перетворення у форму, придатну для подальшої обробки.

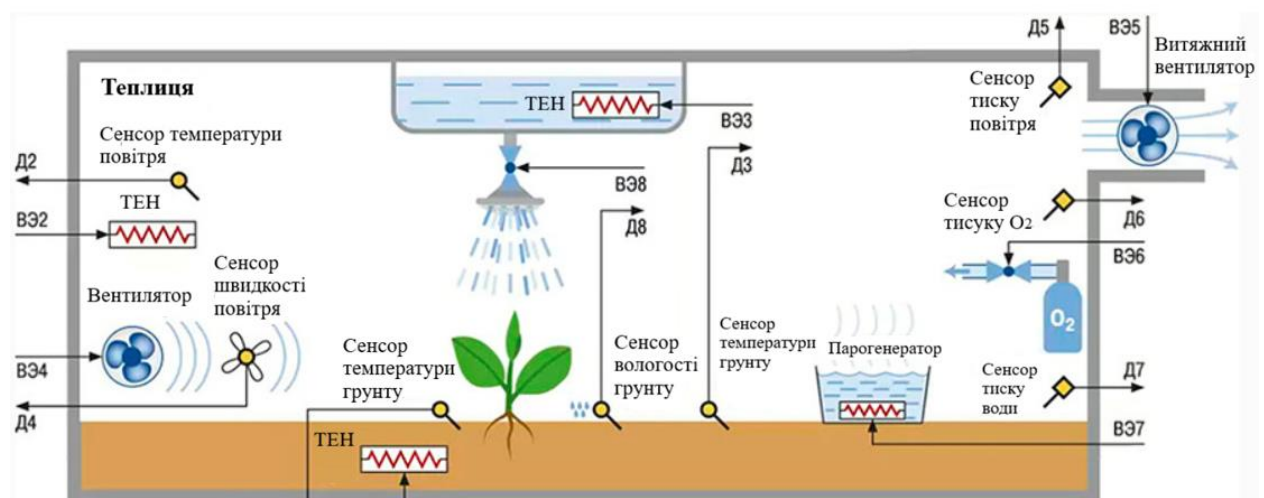


Рисунок 2.2 – Ілюстрована схема розміщення вимірювальної підсистеми в теплиці

Центральне місце у структурі системи займає керуюча підсистема, реалізована на базі програмованого логічного контролера. ПЛК виконує функції збору та обробки інформації, реалізації алгоритмів керування, а також координації роботи виконавчих пристроїв. У контролері реалізуються логічні та часові залежності, що визначають умови включення поливу, тривалість зрошення, а також обмеження, пов'язані з режимами роботи обладнання. Крім того, ПЛК забезпечує реалізацію енергоефективних алгоритмів, спрямованих на оптимізацію роботи насосного обладнання та зменшення кількості пусків, що позитивно впливає на ресурс системи.

Виконавча підсистема включає сукупність технічних засобів, безпосередньо задіяних у процесі поливу та подачі поживного розчину. До її

складу входять насоси, електромагнітні клапани, регулюючі елементи, а також дозуючі пристрої для фертигації (рисунок 2.3) [11, 12]. Керуючі сигнали від ПЛК надходять до модулів дискретного або аналогового виводу, які забезпечують комутацію силових ланцюгів за допомогою контакторів, реле або напівпровідникових ключів. Така організація дозволяє реалізувати зональне керування поливом, при якому кожна ділянка теплиці може обслуговуватися незалежно відповідно до заданих параметрів.

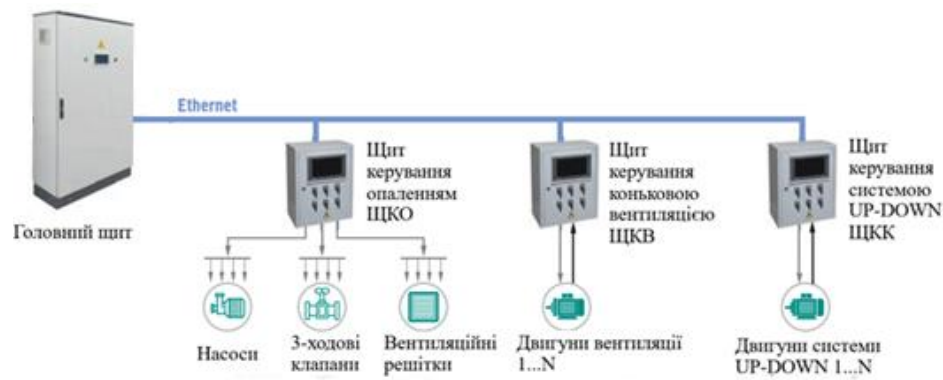


Рисунок 2.3 – Реалізація виконавчої підсистеми АСУ

Окремим елементом структурної схеми є гідравлічна підсистема, що включає трубопроводи, фільтри, редуктори тиску та розподільчі колектори. Вона забезпечує транспортування води або живильного розчину від джерела до споживачів та визначає фізичні характеристики процесу іригації. Взаємодія між гідравлічною та виконавчою підсистемами здійснюється через регулюючі органи, керовані ПЛК.

На верхньому рівні системи розташована підсистема візуалізації та диспетчеризації, яка реалізується за допомогою панелі оператора або SCADA-системи. Вона забезпечує відображення поточних значень технологічних параметрів, стану обладнання, сигналізацію аварійних ситуацій, а також надає можливість налаштування режимів роботи системи. Інтерфейс користувача дозволяє оператору здійснювати контроль та коригування параметрів процесу в режимі реального часу.

Комунікаційна підсистема забезпечує обмін даними між усіма рівнями структури та реалізується на базі промислових інтерфейсів і протоколів

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

передачі даних. Вона гарантує узгоджену роботу всіх компонентів системи та можливість інтеграції з іншими підсистемами тепличного господарства.

Таким чином, структурна схема автоматизованої системи керування поливом та іригацією теплиць є багаторівневою, функціонально завершеною системою, що об'єднує вимірювальні, керуючі та виконавчі компоненти в єдину інтегровану архітектуру. Такий підхід забезпечує високий рівень автоматизації процесу зрошення, підвищення ефективності використання водних та енергетичних ресурсів, а також адаптивність системи до змінних умов функціонування тепличного господарства.

2.2 Обґрунтування вибору програмовано-логічного контролера керуючої підсистеми

Вибір програмовано-логічного контролера для автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства є одним із ключових етапів проектування, оскільки саме контролер визначає функціональні можливості системи, її надійність, гнучкість та енергоефективність [12]. Особливості технологічного процесу зрошення, що характеризується необхідністю обробки багатопараметричної інформації, реалізації часових алгоритмів та керування розподіленими виконавчими механізмами, висувають специфічні вимоги до обчислювального ядра системи.

Застосування ПЛК у даній задачі обґрунтовується їх здатністю працювати у режимі реального часу, високою завадостійкістю, модульною структурою та можливістю інтеграції з широким спектром сенсорного і виконавчого обладнання. На відміну від мікроконтролерних або комп'ютерних систем, ПЛК забезпечують підвищену надійність функціонування в умовах підвищеної вологості, температурних коливань та електромагнітних завад, що є характерним для тепличного господарства.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Основними критеріями вибору ПЛК для системи поливу є кількість і типи входів/виходів, наявність аналогових каналів для підключення сенсорів вологості, температури та інших параметрів, підтримка промислових протоколів зв'язку, а також можливість реалізації енергоефективних алгоритмів керування. Важливим фактором є також можливість масштабування системи шляхом підключення додаткових модулів, що дозволяє адаптувати систему до збільшення площі теплиці або кількості зон поливу.

З огляду на необхідність оптимізації енергоспоживання, ПЛК повинен забезпечувати гнучке керування насосним обладнанням і електромагнітними клапанами, включаючи реалізацію алгоритмів мінімізації кількості пусків, контролю часу роботи та адаптивного регулювання режимів поливу залежно від показників сенсорів. Крім того, сучасні ПЛК мають підтримку мережевих технологій, що дозволяє інтегрувати систему з HMI/SCADA або IoT-платформами для віддаленого моніторингу та керування [12, 13].

Програмовано-логічний контролер, що використовується у складі автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства, повинен відповідати комплексу технічних, функціональних та експлуатаційних вимог, обумовлених специфікою об'єкта автоматизації та умовами його функціонування.

Функціональні вимоги такого ПЛК повинні забезпечувати:

- обробку сигналів від аналогових і дискретних сенсорів;
- реалізацію алгоритмів керування у реальному часі;
- підтримку часових функцій (таймери, лічильники);
- виконання логічних операцій та умовних переходів.

Обґрунтування в необхідності реалізації алгоритмів поливу, що базуються на значеннях вологості, температури та інших параметрів. До основних вимог входів/виходів контролера відносять те, що вони повинні мати:

- достатню кількість дискретних входів (сенсори стану, рівня);

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- дискретні виходи (керування клапанами, контакторами);
- аналогові входи (0–10 В, 4–20 мА) для сенсорів;
- можливість розширення I/O

Вимоги до надійності та стійкості мають обґрунтування в забезпеченості підключення всіх елементів системи та можливість масштабування. Запропонований ПЛК повинен:

- працювати у режимі 24/7;
- бути стійким до електромагнітних завад;
- витримувати підвищену вологість та температуру;
- мати захист від збоїв живлення.

Умови застосування такого ПЛК є агресивним для електроніки. Також середовище застосування диктує вимоги до швидкодії, тобто контролер повинен забезпечувати достатню швидкість обробки сигналів та мінімальні затримки виконання алгоритмів. В обґрунтуванні до даних вимог система повинна оперативно реагувати на зміну параметрів середовища.

Комунікаційні можливості ПЛК повинен підтримувати промислові протоколи (Modbus RTU/TCP, Ethernet), інтеграцію з HMI/SCADA та можливість підключення до мережі [13]. Також ставиться вимога необхідності моніторингу та віддаленого керування.

Модульність та масштабованість вимагає від зазначеного ПЛК підтримувати підключення додаткових модулів, забезпечувати розширення системи. В процесі масштабування площі теплиці та зон поливу збільшуватиметься і обладнання керування поливом та іригацією.

Енергоефективність керування обумовлене тим, що ПЛК повинно забезпечувати реалізацію алгоритмів оптимізації роботи насосів, обмеження частоти пусків та адаптивне керування поливом. Оптимізація енергоспоживання є ключовою вимогою до вибраного ПЛК.

Простота програмування та обслуговування контролера включає: підтримку стандартних мов програмування (Ladder, FBD), зручне програмне середовище та забезпечення діагностики. Відповідно сюди можна віднести

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вартісну ефективність, яка включає оптимальне співвідношення ціна/функціональність та не перевищує бюджет проекту.

Таким чином, програмовано-логічний контролер для автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства повинен відповідати вимогам функціональної повноти, надійності, масштабованості та енергоефективності. Вище перерахованим вимогам відповідає ПЛК Siemens S7-1200 (рисунок 2.4) [14]. Забезпечення зазначених характеристик дозволяє реалізувати ефективне керування технологічним процесом зрошення, мінімізувати ресурсні витрати та підвищити загальну продуктивність тепличного комплексу.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд програмовано-логічного контролера Siemens S7-1200

Ступінь захисту контролера S7-1200 – IP20, що передбачає монтаж у шафі чи іншому захисному корпусі. Допускається кріплення як на 35-міліметрову рейку, так і плоску монтажну панель. Гвинтові клеми «відстібаються» разом із кабелями, що дозволяє у разі виходу обладнання з ладу оперативно провести заміну, не відкручуючи дві дюжини проводів. Завантаження програми можливе і з комп'ютера, і через знімну карту пам'яті, що знову-таки максимально спрощує і прискорює заміну пристрою, що відмовив.

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Крім основної модифікації контролера, пропонується його так звана Fail-Safety (відмовостійка) версія, призначена для побудови систем протиаварійного захисту та забезпечення безпеки. Вона реалізована в рамках єдиної концепції компанії «Siemens» Totally Integrated Automation («Комплексна інтегрована автоматизація»), що дозволяє здійснювати її ефективну взаємодію зі стандартними системами автоматизації SIMATIC, використовувати F-системи як підсистеми стандартних систем автоматизації, покладати на них виконання як звичайних завдань управління, так і F-функцій. Крім того, у F-системах забезпечується підтримка стандартної концепції діагностики систем автоматизації SIMATIC S7. Контролери S7-1200F повністю програмно та апаратно сумісні зі своїми аналогами S7-1200, програмуються так само і з використанням ідентичного інструментарію, доповненого бібліотекою F-блоків, сертифікованих TÜV**.

У контролер впроваджено підтримку управління переміщенням з урахуванням відкритого стандарту PLCopen. Підтримується не тільки імпульсне керування кроковими двигунами без зворотного зв'язку, але й підключення мережевого приводів з інкрементальними сенсорами положення. Більш того, є можливість підключити приводи, керовані аналоговим сигналом плюс-мінус десять вольт, а інкрементальний сенсор підключити безпосередньо на швидкі входи контролера. Налаштування управління переміщенням виконано у вигляді зручних технологічних об'єктів, які мають вкладені екрани з повним набором параметрів та описів, таблицею технологічних змінних, які можна використовувати у своїй програмі, та інтегрованою діагностичною системою, яка вбудовується в штатну діагностику та полегшує використання технологічних функцій. Зрозуміло, що за швидкістю і точністю керування приводами контролер не може тягатися з повноцінними CNC-системами, але для простих застосувань його характеристик цілком достатньо. Особливо потрібна ця функціональність у верстатах для деревообробної промисловості, де

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікронна точність не потрібна, зате дуже вітається невисока вартість контролера.

Для роботи поза приміщеннями або в умовах підвищеної загазованості або наявності агресивних парів та газів існує модифікація SIPLUS. Вона повністю програмно та апаратно сумісна з лінійкою S7-1200 [15]. Фактично це той же контролер, але з посиленням захистом від зовнішніх впливів (зроблена герметизація плат спеціальним компаундом) і працює в розширеному температурному діапазоні (від -25 до +60 ° C).

Крім переваг самого обладнання важливий фактор - функціональність і зручність програмного середовища розробки. Зазвичай пропонується використовувати окремі програмні продукти для програмування контролерів, засобів операторського інтерфейсу та обміну даними. Об'єднання проектів всіх компонентів системи для спільної роботи – досить трудомісткий етап.

Вибір програмовано-логічного контролера для автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства повинен базуватися на вимогах до надійності, масштабованості, кількості вхідних і вихідних сигналів, а також можливості реалізації енергоефективних алгоритмів керування. Найбільш доцільним для побудови систем середнього рівня складності є використання модульних ПЛК, таких як Siemens S7-1200, що забезпечують оптимальне поєднання функціональних можливостей, гнучкості та вартості. Застосування сучасних контролерів дозволяє створити ефективну, надійну та масштабовану систему автоматизації поливу, здатну адаптуватися до змінних умов функціонування тепличного господарства.

2.3 Вибір первинних перетворювачів фізичних величин та сенсорів автоматизованої системи поливу теплиць

У сучасних автоматизованих системах керування поливом та іригацією тепличного господарства спостерігається тенденція до переходу від традиційних аналогових сенсорів до так званих “розумних” сенсорів (smart

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

sensors), які інтегрують у собі функції вимірювання, попередньої обробки сигналу та передачі даних. Такий підхід обумовлений необхідністю підвищення точності, надійності та інформативності систем керування.

Розумні сенсори відрізняються від класичних тим, що містять вбудовані мікропроцесорні модулі, які здійснюють обробку сигналу безпосередньо на рівні сенсора. Це дозволяє формувати стандартизовані вихідні сигнали (наприклад, 4–20 мА або цифрові інтерфейси), придатні для безпосереднього підключення до ПЛК без використання додаткових перетворювачів [15, 16].

Застосування таких сенсорів у системах поливу є особливо доцільним, оскільки процес іригації потребує високої точності вимірювання параметрів середовища, таких як вологість ґрунту, електропровідність, рН та температура. Вбудована обробка сигналів дозволяє зменшити вплив завад, підвищити стабільність показів та знизити похибки вимірювання.

ПЛК типу Siemens S7-1200 підтримують широкий спектр інтерфейсів, що забезпечує ефективну інтеграцію як класичних, так і “розумних” сенсорів. Основні способи підключення – аналогове та цифрове. Аналогове підключення розуміє під собою роботу з сигналами 4–20 мА, 0–10 В, а також підключення через аналогові модулі. Основними перевагами є висока завадостійкість, простота реалізації. А до недоліків можна віднести відсутність додаткової інформації (діагностика, калібрування). Цифрове підключення (Modbus RTU / RS-485) це пряме підключення “розумних” сенсорів, передача цифрових значень. До переваг відноситься висока точність, можливість підключення до 32 пристроїв на одній шині, стійкість до завад.

Підключення до промислових мереж (Ethernet, PROFINET) дозволяє інтегрувати з IoT і це дає можливість передачі великих обсягів даних, особливо актуально для “розумних теплиць” [16].

Використання “розумних” сенсорів у поєднанні з ПЛК дозволяє зменшити кількість проміжних пристроїв, а також спростити монтаж і в свою

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чергу підвищити надійність системи. З результаті реалізувати розподілену архітектуру буде набагато простіше і з меншою кількістю апаратного забезпечення. Також використання цифрових інтерфейсів (Modbus) дозволяє зменшити кількість кабельних ліній, що особливо важливо для великих тепличних комплексів.

До основних критеріїв вибору сенсорів для АСУ поливу відносять:

- точність та стабільність вимірювань (сенсори повинні забезпечувати мінімальну похибку та стабільність показів у часі, особливо важливо для сенсорів вологості ґрунту і рН та ЕС сенсорів);

- сумісність з ПЛК (сенсор повинен підтримувати 4–20 мА або 0–10 В та Modbus RTU/RS-485 і забезпечувати просту інтеграцію з ПЛК);

- стійкість до умов середовища (умови теплиці характеризуються підвищеною вологістю, перепадами температур і агресивним середовищем, а тому сенсори повинні мати високий ступінь захисту (IP65–IP67) і корозійну стійкість);

- час відгуку (сенсори повинні швидко реагувати на зміну параметрів і це критично для адаптивного керування поливом);

- надійність і довговічність (це тривалий термін служби і мінімальна потреба у калібруванні);

- можливість калібрування та діагностики (“розумні” сенсори забезпечують пер за все збереження калібрувальних параметрів і самодіагностику, це значно підвищує експлуатаційну надійність);

- енергоспоживання (особливо важливо для автономних систем і IoT-рішень);

- вартісна ефективність (необхідно забезпечити баланс ціни, точності, функціреальності).

Проаналізовано згідно вище заданих критеріїв ряд сенсорів для АСУ поливу та іригації теплиць з орієнтацією на практичну інтеграцію з ПЛК типу Siemens S7-1200. Підібрані рішення відповідають вимогам промислової автоматизації (точність, надійність, сумісність) [17].

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сенсор вологості ґрунту Vegetronix VH400 призначений для вимірювання об'ємної вологості ґрунту (рисунок 2.5). Характеризується виходом з параметрами 0–3 В (аналоговий), високою швидкістю та стійкістю до солоності ґрунту. Застосування в АСУ це базовий контроль поливу у простих та середніх системах. Інтеграція відбувається через аналоговий модуль (0-10В через масштабування).



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд сенсора вологості ґрунту Vegetronix VH400

Сенсор температури Pt100 (Class B) включає перетворювач 4–20 мА, призначений у складі АСУ для контролю температури повітря та ґрунту (рисунок 2.6). До основних характеристик можна віднести високу точність і промисловий стандарт. Основне застосування - компенсація поливу та контроль мікроклімату. Інтеграція відбувається через аналоговий вхід (4–20 мА).

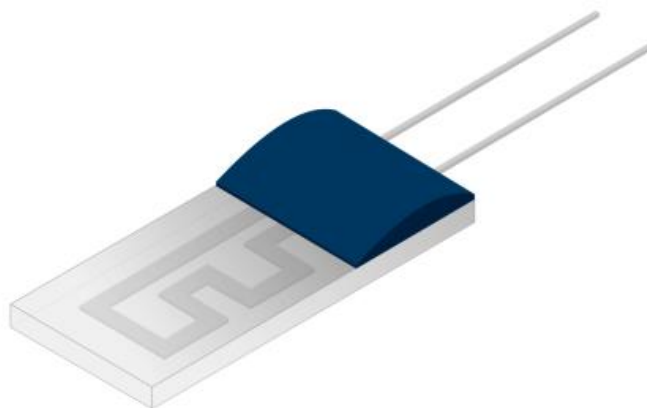


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд сенсора температури Pt100 (Class B)

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сенсор витрати води Siemens SITRANS F M MAG 5100W призначений для промислового контролю і обліку витрат води або водного розчину (рисунок 2.7). Характеризується виходом 4–20 мА/Modbus та високою точністю. Застосовується у великих тепличних комплексах, до основних переваг можна віднести енергоефективний контроль.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд сенсора витрати води Siemens SITRANS FM MAG 5100W

Сенсори pH та EC Atlas Scientific pH Kit призначенні для контролю кислотності та контролю концентрації добрив (рисунок 2.8). Характеризуються такі сенсори цифровим інтерфейсом (UART/I2C) і високою точністю [17, 18]. Застосування і призначення у складі АСУ поливу теплиць для задач фертигації, контролю живильного розчину, концентрації добрив та його якості.



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд сенсора pH та EC Atlas Scientific pH Kit

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Сенсор тиску WIKA A-10 призначений для контролю тиску в трубопроводі (рисунок 2.9). Характеризується виходом 4–20 мА та промисловим виконанням. Застосовується у складі АСУ та САУ для захисту насосів і стабілізації системи керування.



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд сенсора тиску WIKA A-10

Сенсор рівня Omron E2K-C25ME1 призначений для контролю рівня води у резервуарі та захисту від “сухого ходу” насоса, тип – безконтактний (рисунок 2.10). Характеризується напругою живлення 10-30 В DC, захищеним виконанням (клас захисту IP-66). Підходить для виявлення металів та неметалевих об’єктів, таких як скло, дерево, вода, пластик.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд сенсора рівня Omron E2K-C25ME1

Застосування “розумних” сенсорів у автоматизованих системах керування поливом та іригацією тепличного господарства є обґрунтованим з точки зору підвищення точності вимірювань, зменшення складності системи та забезпечення її масштабованості. Інтеграція таких сенсорів з

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

програмовано-логічними контролерами, зокрема Siemens S7-1200, дозволяє реалізувати сучасні підходи до побудови кіберфізичних систем керування, що забезпечують енергоефективне та адаптивне функціонування тепличного господарства. Раціональний вибір сенсорів на основі технічних, експлуатаційних та економічних критеріїв є необхідною умовою створення ефективної автоматизованої системи.

2.4 Вибір виконавчих вузлів та засобів автоматизації системи поливу та іригації

Виконавчі механізми є кінцевою ланкою автоматизованої системи керування поливом та іригацією, оскільки саме вони забезпечують фізичну реалізацію керуючих впливів на технологічний процес. У контексті тепличного господарства до таких впливів належать подача води, розподіл потоків, дозування поживних розчинів та регулювання гідравлічних параметрів системи.

Обґрунтування вибору виконавчих механізмів базується на необхідності забезпечення високої точності дозування, надійності роботи в умовах підвищеної вологості, а також енергоефективності функціонування. Особливості процесу поливу, зокрема циклічний характер роботи, наявність значної кількості зон та потреба у гнучкому регулюванні витрати води, визначають специфічні вимоги до конструкції та принципу дії виконавчих пристроїв [18, 19].

Функціональна відповідність обумовлює підбір професійного обладнання під конкретні задачі. Виконавчий механізм повинен забезпечувати необхідний технологічний вплив (відкриття/закриття, дозування, перекачування), а також відповідати типу системи поливу (крапельна, дощування). Для прикладу, клапани — для зонального керування, а насоси — для подачі води.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Продуктивність та пропускна здатність враховується для розрахунку гідросистеми комплексу теплиць. Необхідно враховувати: витрату води (л/хв), діаметр трубопроводів, кількість одночасно працюючих зон. В обґрунтуванні приводяться усі передумови, що дозволяють вирішити поставлені задачі.

Сумісність з ПЛК одна з основних умов ефективної роботи засобів автоматизації. Механізми повинні керуватися сигналами 24В DC / 220В AC та підтримувати релейне або транзисторне керування, це забезпечує інтеграцію з ПЛК (для прикладу, Siemens S7-1200).

Надійність та великий ресурс роботи вимога до всього обладнання, що враховує кількість циклів спрацювання, стійкість до зносу і захист від вологи. Особливо важливо при частих включеннях/виключеннях у системах поливу. Енергоефективність система напряму залежить від механізмів керування поливами, які повинні мати низьке енергоспоживання та підтримувати оптимальні режими роботи. Для прикладу частотне керування насосами.

Швидкодія виконавчих механізмів АСУ відповідає за швидкість відкриття/закриття клапанів та реакція системи. Впливає на точність дозування мінеральних та органічних добрив. Стійкість до агресивного середовища вимагає необхідного IP65–IP67 тобто корозійної стійкості при високій вологості.

Простота монтажу та обслуговування засобів автоматизації це перш за все стандартні з'єднання і доступність ремонту. При тому вартісна ефективність обчислюється співвідношенням ціна/ресурс, а також витратами на обслуговування.

Електромагнітні клапани ODE 21IH4K1V160 NC 1/2" є ключовими виконавчими елементами в автоматизованих системах керування поливом та іригацією теплиць, оскільки забезпечують точне керування подачею води до окремих зон (рисунок 2.11) [19]. Принцип їх роботи полягає у відкритті або закритті потоку рідини під дією електричного сигналу від контролера (ПЛК),

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

що дозволяє реалізувати повністю автоматизовані режими зрошення без участі оператора . Використання таких клапанів забезпечує високу швидкодію та точність дозування води, що сприяє зменшенню її перевитрат і підвищенню ефективності поливу.



Рисунок 2.11 – Загальний вигляд електроклапанів
ODE 21IH4K1V160 NC 1/2"

Конструктивно вони виконуються з корозійностійких матеріалів (пластик, латунь), що дозволяє експлуатувати їх у вологому та агресивному середовищі теплиць. Додатковою перевагою є можливість роботи від стандартних керуючих сигналів (зазвичай 24 В), що забезпечує їх сумісність із ПЛК та іншими системами автоматизації. Завдяки швидкому відкриттю/закриттю та можливості зонального керування вони є оптимальним рішенням для багатоконтурних систем поливу.

Відцентрові насоси Tarflo 65-230 є базовими виконавчими механізмами в автоматизованих системах керування поливом теплиць, оскільки забезпечують транспортування води від джерела до розподільчої мережі з необхідним тиском і продуктивністю (рисунок 2.12) [19, 20]. Їх застосування дозволяє реалізувати стабільний гідравлічний режим роботи системи, що є критично важливим для рівномірного зрошення всіх зон теплиці. Завдяки можливості інтеграції з частотними перетворювачами

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

відцентрові насоси забезпечують енергоефективне регулювання витрати води залежно від поточних потреб системи.



Рисунок 2.12 – Загальний вигляд відцентрового насоса Tarflo 65-230

У свою чергу, дозуючі насоси Seko Tekna EVO AKL 603 застосовуються для точного введення добрив у систему поливу (фертигація), що дозволяє автоматизувати процес живлення рослин і підтримувати оптимальні параметри поживного розчину (рисунок 2.13). Вони характеризуються високою точністю дозування, стабільністю роботи та можливістю керування від ПЛК у реальному часі. Поєднання відцентрових і дозуючих насосів у складі АСУ забезпечує комплексне керування як гідравлічними, так і агротехнологічними параметрами процесу іригації. Таким чином, їх використання є необхідною умовою побудови сучасних енергоефективних систем поливу тепличного господарства.



Рисунок 2.13 – Загальний вигляд дозуючого насоса Seko Tekna EVO AKL 603

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування відцентрових і дозуючих насосів у автоматизованих системах керування поливом забезпечує ефективну реалізацію процесів транспортування води та дозованого внесення добрив. Використання сучасних насосних агрегатів із можливістю інтеграції в системи автоматизації дозволяє підвищити енергоефективність, точність та надійність функціонування тепличного господарства.

Частотні перетворювачі (VFD) є важливим елементом автоматизованих систем керування поливом та іригацією теплиць, оскільки забезпечують плавне регулювання швидкості обертання електродвигунів насосів залежно від поточного навантаження (рисунок 2.14) [20]. Їх застосування дозволяє адаптивно змінювати продуктивність насосного обладнання відповідно до потреб системи, що забезпечує стабільний тиск і рівномірний розподіл води у всіх зонах поливу. Використання частотних перетворювачів суттєво підвищує енергоефективність, оскільки реалізується принцип регулювання витрати шляхом зміни швидкості, а не дроселювання потоку, що зменшує втрати енергії.



Рисунок 2.14 – Загальний вигляд частотного перетворювача Siemens SINAMICS V20

Сучасні перетворювачі, такі як Siemens SINAMICS V20, мають вбудовані режими енергозбереження (ECO mode, hibernation), які автоматично знижують споживання енергії при неповному навантаженні або

простої обладнання. Крім того, частотні перетворювачі забезпечують плавний пуск і зупинку насосів, що зменшує гідравлічні удари в системі та підвищує ресурс обладнання. Інтеграція з ПЛК (наприклад, через аналогові сигнали або Modbus) дозволяє реалізувати складні алгоритми керування поливом у реальному часі. Таким чином, застосування VFD є ключовим фактором підвищення надійності, енергоефективності та довговічності систем іригації теплиць.

В комплекс типової АСУ поливу теплиці входять основні апаратні засоби автоматизації:

- електромагнітні клапани — зональне керування;
- насос — подача води;
- частотний перетворювач — енергоефективність;
- дозуючий насос — фертигація;
- реле/контактори — силове керування.

Вибір виконавчих механізмів для автоматизованої системи керування поливом та іригацією повинен базуватися на вимогах технологічного процесу, умовах експлуатації та необхідності забезпечення енергоефективності. Оптимальним є використання електромагнітних клапанів, відцентрових насосів із частотним керуванням та дозуючих пристроїв, що дозволяє реалізувати точне, надійне та адаптивне керування процесом зрошення. Раціональний підбір виконавчих механізмів забезпечує підвищення ефективності використання водних та енергетичних ресурсів, а також стабільність функціонування тепличного господарства.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Розробка загальної структури автоматизованої системи керування та визначання основних елементів регулювання

Одним з головних і перспективних завдань розвитку країни полягає в наповненню внутрішнього ринку вітчизняною сільськогосподарською продукцією, і відмові від імпортування сільськогосподарських товарів та, тим самим, у скороченні витрат на транспортування, підвищення врожайності. Зберегти врожайність – це означає створити рослинам сприятливі умови для зростання, захистити їх від холоду, пекучого сонця та вітрів. І це стане можливим із застосуванням тепличних господарств.

Теплиця має ряд переваг над вирощуванням овочів у відкритих ґрунтах. Головне це автоматизований контроль та управління над процесом дозрівання. Аналізуючи наукові літературні джерела та інтернет ресурси можна зробити висновок, що розумні теплиці оснащені сучасним обладнанням, за допомогою якого відбувається контроль над всіма параметрами, необхідними для безболісного росту рослин та їх раннього дозрівання.

Система автоматизованого керування поливом та іригацією теплиці відноситься до класу замкнених, багатоконтурних (за наявності зонування) систем автоматичного регулювання (САР) та безперервно-дискретних (через використання ПЛК) нелінійних систем. З точки зору ТАУ (теорії автоматичного управління), система реалізує регулювання за відхиленням (принцип зворотного зв'язку) [20]. Зв'язок між вимогами до регулятора та загальними вимогами до системи автоматичного керування не є однозначним і залежить від характеристик конкретного об'єкта управління. Дослідження цієї залежності для різних типів об'єктів, зокрема таких як ґрунтово-рослинне середовище теплиці, розглядається у відповідних розділах теорії автоматичного управління.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Однією з ключових характеристик замкнених лінійних динамічних систем, до яких належить система автоматизованого поливу, є амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) умовно розімкненого контуру. Такий контур включає всі основні елементи системи — регулятор, виконавчі механізми, об'єкт керування (грунт і система зрошення), а також вимірювальні пристрої. Для більш повного аналізу динаміки системи також використовується амплітудно-фазова характеристика (АФХ).

У межах аналізу прийнято всі елементи, параметри яких не можуть довільно змінюватися (зокрема властивості ґрунту, гідравліка системи поливу, інерційність вологопереносу), відносити до об'єкта керування. Це дозволяє представити систему автоматизованого поливу у вигляді послідовного з'єднання двох основних частин — регулятора (реалізованого на базі ПЛК) та об'єкта керування, замкнених у контур зі зворотним зв'язком.

Для аналізу таких систем доцільно застосовувати апарат комплексних частотних характеристик, а також відповідний математичний інструментарій — перетворення Лапласа. У цьому випадку змінною є комплексний параметр s , а при дослідженні частотних властивостей використовується його уявна складова, що відповідає кутовій частоті. Типова структурна схема системи автоматичного керування поливом включає стандартні сигнали, які мають наступний фізичний зміст (рисунок 3.1) [20, 21]:

- $y(t)$ — фактична вологість ґрунту (вихід системи);
- $v(t)$ — задане значення вологості;
- $u(t)$ — керуючий вплив (сигнал на насос або клапани);
- $h(t)$ — збурення (випаровування, погодні умови, споживання води рослинами);
- $x(t)$ — стан об'єкта (вологість без урахування збурень);
- $e(t)$ — сигнал помилки регулювання;
- $p(t)$ — похибка вимірювання;
- $z(t)$ — виміряне значення вологості;

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- $q(t)$ — вихідний сигнал сенсора вологості.

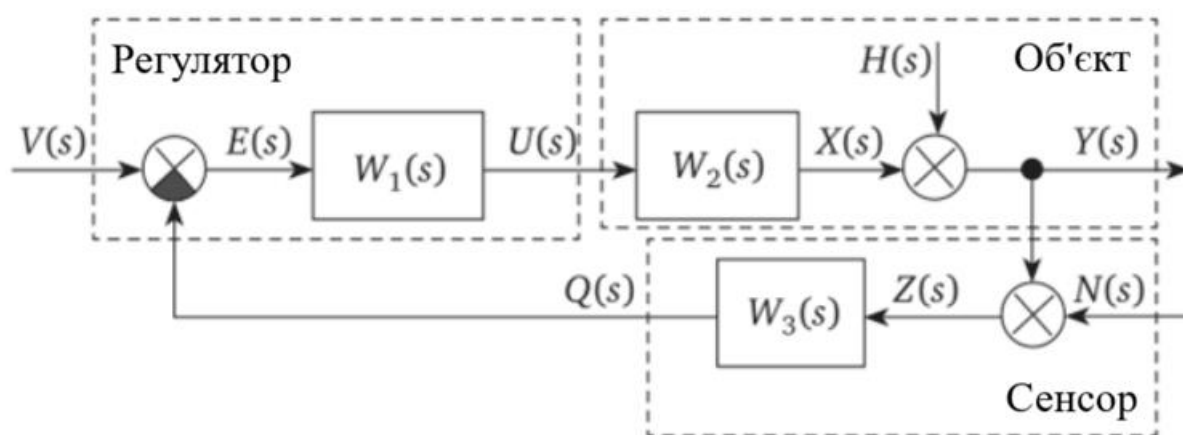


Рисунок 3.1 – Загальна структура автоматизованої системи керування поливу теплиць

При переході до операторної форми використовується стандартна заміна часових функцій на їх зображення у просторі Лапласа, наприклад:

$$v(t) \rightarrow V(s), y(t) \rightarrow Y(s).$$

Такий підхід дозволяє формалізувати процеси, що відбуваються в системі автоматичного поливу, та виконувати подальший аналіз її стійкості, точності та динамічних властивостей.

Зазначимо, що при використанні перетворення Лапласа стала величина у часовій області відповідає зображенню виду $1/s$. Однак у задачах аналізу автоматизованих систем керування поливом та іригацією, як правило, не виникає потреби безпосередньо оперувати абсолютними значеннями сигналів у операторній формі. Практичний інтерес становлять передусім відношення між сигналами, тобто передавальні функції окремих ланок і всієї системи.

У зв'язку з цим у теорії автоматичного управління набула поширення практика використання модифікованого варіанту — перетворення Лапласа–Карсона, яке отримується множенням стандартного зображення на s . У такому випадку зображення сталої величини також набуває вигляду сталої, що спрощує математичні перетворення та аналіз. Важливо підкреслити, що

застосування такого підходу не впливає на вигляд і властивості передавальних функцій, а отже не змінює результатів дослідження динаміки системи [21].

Структурна схема, наведена на рисунку 3.1, є наочним графічним поданням взаємодії сигналів в автоматизованій системі керування поливом та іригацією теплиці. Вона відображає зв'язки між заданим значенням вологості, керуючими впливами, станом об'єкта (грунту) та вимірювальними сигналами. Такий графічний опис може бути формалізований у вигляді системи математичних рівнянь, що характеризують динаміку всіх елементів системи:

$$\begin{aligned} E(s) &= V(s) - Q(s); \quad U(s) = W_1(s)E(s); \quad X(s) = W_2(s)U(s); \\ Y(s) &= X(s) + H(s); \quad Z(s) = Y(s) + N(s); \quad Q(s) = W_3(s)Z(s). \end{aligned}$$

Під час розв'язування цієї системи рівнянь відносно будь-якої внутрішньої змінної замкнутого контуру (наприклад, визначення залежності фактичної вологості ґрунту від заданого значення, збурень або похибок вимірювання) отримується вираз у вигляді раціонального дробу, складеного з передавальних функцій окремих ланок системи.

Це є характерною особливістю аналізу систем автоматичного управління, зокрема і для систем поливу теплиць, оскільки дозволяє описати вплив кожного елемента (регулятора, виконавчих механізмів, об'єкта керування та сенсорів) на загальну поведінку системи в компактній аналітичній формі.

Якщо у виразі передавальної функції замкнутої системи знаменник виду

$$1 + G(s),$$

набуває нульового значення, то вся функція прямує до нескінченності. З точки зору автоматизованої системи поливу теплиці це означає, що навіть незначні зміни вхідних сигналів (наприклад, незначне відхилення вологості або мале збурення) можуть викликати непропорційно великі зміни вихідної величини — тобто вологості ґрунту.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням фізичних обмежень реальної системи така ситуація проявляється у вигляді втрати стійкості: система не здатна утримувати заданий рівень вологості, а замість цього або переходить у режим максимального відхилення (надмірний полив або пересушування), або починає здійснювати коливання з максимально можливою амплітудою [22].

Саме для запобігання таким небажаним режимам і використовується регулятор, параметри якого повинні бути правильно підібрані. Процес його налаштування є ключовим етапом проєктування системи автоматичного керування поливом.

Для аналізу стійкості системи необхідно дослідити взаємодію динамічних моделей усіх її складових — регулятора, виконавчих механізмів, об'єкта керування (грунту) та вимірювальних елементів. Важливим є те, що системи, які описуються однаковими математичними моделями, за однакових вхідних впливів демонструють ідентичну поведінку. Це дозволяє використовувати математичне моделювання для дослідження реальних процесів.

Зокрема, спеціалізовані програмні засоби моделювання (наприклад, VisSim або аналогічні середовища) дають можливість реалізувати математичні моделі більшості типових динамічних ланок, поєднати їх у відповідну структурну схему та задати необхідні вхідні сигнали. У результаті імітаційного моделювання отримуються графіки перехідних процесів, які з достатньою точністю відображають поведінку реальної системи автоматизованого поливу, за умови адекватності моделей реальним фізичним елементам.

У таких моделях найчастіше використовуються лінійні динамічні ланки, які описуються раціональними передавальними функціями від комплексної змінної s , що значно спрощує аналіз і синтез системи керування.

Вибір структури регулятора в автоматизованій системі керування поливом та іригацією теплиці визначається як математичною моделлю об'єкта керування (грунту та системи зрошення), так і поставленими

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

задачами регулювання, зокрема вимогами до точності підтримки вологості, швидкодії та стійкості системи.

Найпростіший варіант структурної реалізації отримується у випадку, коли передавальну функцію сенсора вологості разом із пристроєм обробки його сигналу (наприклад, АЦП або нормуючого перетворювача) умовно приймають рівною одиниці [23]. У такому випадку поняття «регулятор» звужується лише до його основної частини — ланки, що формує керуючий вплив і включена послідовно в прямий канал системи.

Більш узагальнене представлення системи можливе, якщо, навпаки, розширити поняття регулятора, включивши до нього сигнали з різних точок системи, зокрема збурення, вимірювані параметри та внутрішні змінні. Такий підхід дозволяє врахувати більшу кількість факторів, що впливають на процес поливу.

Разом із тим, подібна ускладнена структура має певні обмеження (рисунок 3.2). По-перше, сигнал збурення (наприклад, інтенсивність випаровування або водоспоживання рослинами) у більшості випадків не може бути безпосередньо вимірюваний, а навіть якщо це частково можливо, точність таких вимірювань обмежена. По-друге, у практичних задачах основною метою є компенсація впливу цих збурень, тому їх часто розглядають опосередковано через відхилення вихідної величини від заданого значення [22-24].

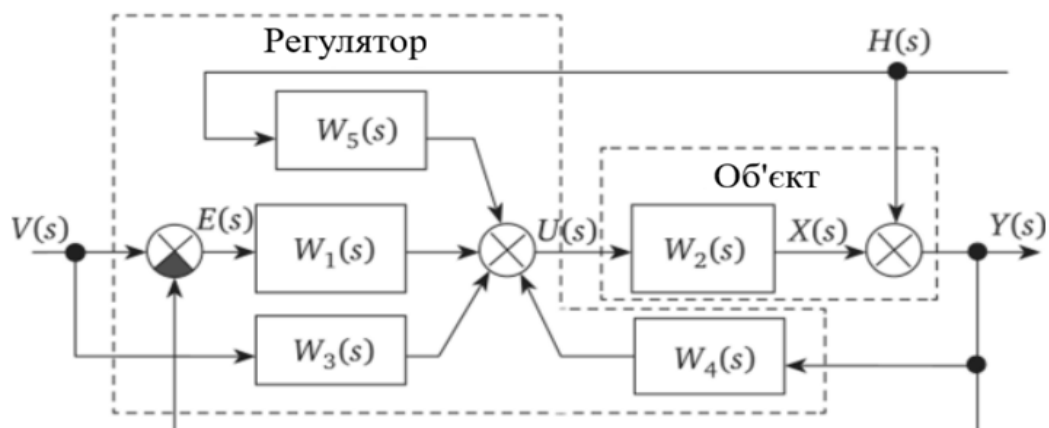


Рисунок 3.2 – Узагальнена структура з розширеним функціоналом регулятора

У зв'язку з цим окремі елементи розширеної структурної схеми, що пов'язані з прямим врахуванням збурень, можуть бути виключені без суттєвої втрати точності моделі. У результаті складна структура зводиться до більш простої, еквівалентної за своїми властивостями, що значно полегшує аналіз і синтез системи керування.

Слід також враховувати, що в реальних умовах вихідна величина — вологість ґрунту — не вимірюється безпосередньо, а визначається за допомогою сенсорів. Тому вимірювальний канал необхідно описувати відповідною передавальною функцією або більш складною моделлю. Для підвищення точності доцільно вводити додатковий перетворювач сигналу, який компенсує коефіцієнт передачі сенсора, щоб у контурі зворотного зв'язку використовувалося значення, максимально наближене до реальної вологості.

При такому підході сумарна передавальна функція сенсора та компенсуючого пристрою в області низьких частот наближається до одиниці, що дозволяє розглядати систему як систему з одиничним зворотним зв'язком. Водночас динамічні властивості сенсора часто не враховуються, якщо їх вплив є незначним порівняно з інерційністю об'єкта керування.

Якщо ж інерційність або похибки сенсора є співрозмірними з динамікою об'єкта, їх необхідно обов'язково враховувати в моделі, оскільки ігнорування цих факторів може призвести до некоректного розрахунку параметрів регулятора та погіршення якості роботи всієї системи автоматизованого поливу.

3.2 Синтез цифрової нелінійної системи керування поливом і іригацією теплиць з електромеханічним приводом

Найбільшого поширення в автоматизованих системах управління технологічними процесами набули цифрові регулятори. Проблема синтезу регуляторів систем управління - одна з основних предметних завдань теорії

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматичного управління. Методи синтезу регуляторів лінійних систем управління досить добре вивчені. В реальних системах управління в нашому випадку автоматизована система керування поливом і іригацією тепличного господарства як виконавчі механізми часто використовуються електромеханічні приводи (ЕМП), що мають ознаки не лінійності. Не лінійністю є, наприклад, обмеження енергетичних можливостей насосної установки.

ЕМП – тиск робочої рідини та продуктивності насоса – що призводить до не лінійності типу насичення або обмеження вихідних сигналів ЕМП. Впровадження мікропроцесорних систем керування у різних галузях, зокрема у тепличному господарстві передбачає вирішення прикладних завдань управління об'єктами. Автоматизація технологічних процесів у агросфері є актуальним напрямом підвищення ефективності господарської діяльності [24].

Тепличні господарства як об'єкти керування представляють собою складні автономні комплекси, що мають переважно ЕМП основних механізмів та характеризуються як динамічні системи. Для автоматизації таких комплексів використовуються централізовані та децентралізовані мікропроцесорні системи керування.

Методи аналізу та синтезу дискретних систем керування динамічними об'єктами розглянуто у багатьох дослідженнях. У доступних інтернет-ресурсах описується три можливі варіанти проектування цифрових систем управління. Для синтезу регулятора реальної системи управління в прикладній області найбільш зручним є метод синтезу цифрової частини системи безперервного прототипу (переобладнання безперервного регулятора).

Відомо, що безперервні змінні зручно використовувати для аналізу та синтезу пропорційно-інтегрально-диференціюючих (ПІД) регуляторів. Для технічної реалізації регулятора на основі контролера або комп'ютера, який оперує зі змінними, отриманими з аналогових сигналів після дискретизації за

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

часом та квантування за рівнем, необхідно перейти до дискретної форми рівнянь.

При правильному проектуванні систем автоматизованого управління (з достатньою розрядністю за АЦП/ЦАП) квантування за рівнем найчастіше можна знехтувати, якщо врахувати накопичення похибки, а квантування (дискретизацію) часу необхідно враховувати. У цьому випадку системи можуть розглядатися як імпульсні. Для таких систем є добре розроблений математичний апарат.

Завдання вибору періоду дискретизації є актуальним. Теоретичною основою всієї цифрової обробки, зберігання та передачі сигналів є теорема Котельникова (теорема Найквіста-Шеннона) [23, 24]. Для того, щоб безперервний сигнал зі спектром, обмеженим максимальною частотою $\omega_{\max}$, можна було точно відновити за послідовністю його дискретних значень, необхідно, щоб частота квантування ω_0 задовольняла умові $\omega_0 \geq 2\omega_{\max}$. Отже, для такту квантування T_0 відповідно до рівняння $\omega_0 = 2\pi/T_0$ має виконуватися наступна умова

$$T_0 \leq \frac{\pi}{\omega_{\max}}. \quad (1)$$

Отриманий результат є результатом теореми переривання, сформульованої Шенноном (у вітчизняній літературі — Котельниковим). Можна відзначити, що в системах управління та передачі на практиці безперервні сигнали з обмеженими спектрами не зустрічаються. Тим не менше, у теорії цифрового управління шенноновська частота $\omega_{\text{Sh}} = \omega_0/2 = \pi/T_0$, грає роль свого роду еталонної константи. Вона визначає смугу пропускання дискретної системи.

Слід наголосити, що в строго визначеному сенсі теорема Котельникова в практичних завданнях ніколи не виконується. Причина - обмеженість часового інтервалу обробки сигналів. Відомо, що досить велика кількість рекомендацій щодо призначення періоду квантування, що залежить від фізичного характеру керованих процесів та особливостей системи. На

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

практиці управління набуло поширення наступне правило: частота квантування має бути на порядок більшою за смугу суттєвих частот об'єкта.

В практичних матеріалах пропонується визначати діапазон можливого періоду дискретизації T_0 за формулою

$$T_0 \leq \frac{T_d}{4/10},$$

де T_d - стала часу диференціювання регулятора.

Раціональний вибір частоти квантування в системах із замкнутим контуром управління проводиться виходячи з ширини смуги пропускання або часу розгону системи. При керуванні можуть використовуватись відносно низькі частоти квантування, оскільки динамічні характеристики багатьох об'єктів невеликі, а їх сталі часу зазвичай більше часу розгону замкнутої системи у 3–5 разів:

$$T_{\text{ц}} \approx \frac{\sum T_i}{15/50},$$

де T_i - стала часу об'єкта управління, що моделюється.

У напрацюваннях в яких застосовуються мікроконтролери, у розділах де реалізується цифрову управління узагальнено теорію та практику вибору інтервалу дискретизації. Дано наступні рекомендації:

- якщо об'єкт управління має домінуючу складову часу, тоді інтервал дискретизації T для замкнутої системи можна вибрати з умови $T < T_p/10$;

- якщо для замкнутої системи керування є час встановлення перехідного процесу T_{ss} або власна частота ω_n , тоді інтервал дискретизації T вибирається з умови $T < T_{ss}/10$ і $\omega_s > 10\omega_n$, $\omega_s = 2\pi/T$, де ω_s - частота дискретизації.

У спеціалізованій літературі наголошується, що період (крок) дискретизації T_0 є вельми специфічним та важливим параметром цифрової системи керування, оскільки від нього залежить складність трансцендентним чином багато хто з коефіцієнтів дискретної моделі «незмінної частини» розімкнутої не коригованої системи управління, а отже, і показники якості.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Тому синтез цифрового алгоритму управління у загальному вигляді, при невідомому заздалегідь значенні T_0 , виявляється можливим лише у найпростіших, які мають практичного значення випадках. Зазвичай відповідно до будь-яких рекомендацій задають конкретне значення T_0 , а потім аналітичним або частотним методом динамічного синтезу цифрових систем автоматизованого управління (ЦСАУ) визначають передавальну функцію цифрового коригувального пристрою $W_{цк}(z)$. При необхідності (наприклад, якщо отримано надто складний вид $W_{цк}(z)$, не виконуються обмеження на показники якості) розрахунок повторюють багаторазово для інших змінених значень T_0 до отримання компромісного, прийняттого для практичної реалізації результату.

Існують різні рекомендації щодо вибору величини T_0 при синтезі ЦСАУ. Так, наприклад, у дослідженні рекомендовано як початкове наближення частоту дискретизації призначати приблизно в шість разів більше частоти зрізу безперервної частини ЦСАУ.

Дискретизація детермінованих сигналів з обмеженою енергією відповідно до теореми Котельникова-Шеннона отримала у 1960-х роках тверду теоретичну основу. Проте дискретизація випадкових сигналів досі не знайшла задовільного для прикладних цілей математичного обґрунтування, що призводить на практиці до неправомірного застосування теореми відліків та некоректних її інтерпретацій при цифровій обробці сигналів.

Визначення адекватної частоти вибірки для процесу управління є нетривіальною задачею і скоріше може розглядатися як спосіб, а ніж методика, що представляє собою компроміс між вимогами динаміки процесу та продуктивністю комп'ютера та інших технологічних механізмів.

З метою забезпечення якості перехідного процесу, близького до аперіодичного характеру зміни перехідної характеристики, потрібно розробити метод параметричного синтезу цифрового регулятора нелінійної системи керування лінійними об'єктами. Завдання синтезу цифрового регулятора вирішується в прикладній галузі систем управління ЕМП. При

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цьому необхідно врахувати значну інерційність систем ЕМП, що застосовуються у системах поливу та іригації теплиць. Розглядається нелінійна цифрова система управління із зворотним зв'язком, що включає одномірний лінійний об'єкт керування та дискретний регулятор.

Структурну схему системи управління з нелінійним приводом (ланка типу «обмеження») наведено на рисунку 3.3 [24]. Об'єкт регулювання має передавальну функцію $W_o(s)$ другого порядку

$$W_o(s) = \frac{b_0}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}.$$

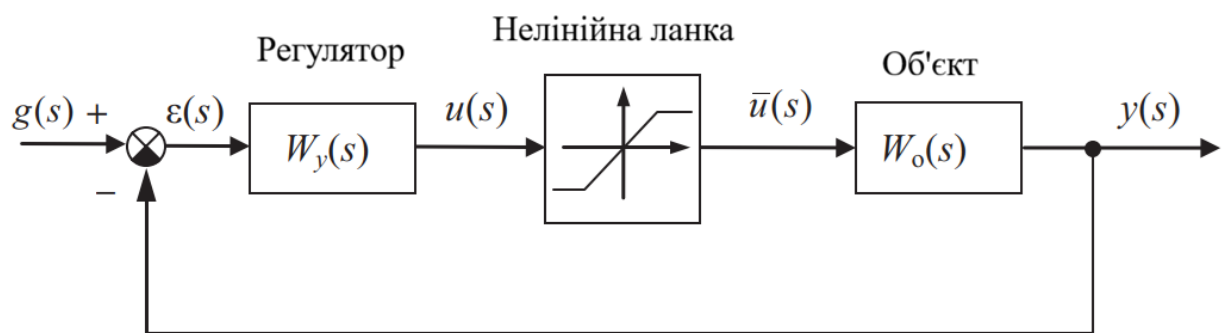


Рисунок 3.3 - Структурна схема нелінійної системи управління:

$W_o(s)$ - передавальна функція об'єкта регулювання; $W_y(s)$ - передатна функція регулятора; $g(s)$ – задаючий вплив; $\varepsilon(s)$ - помилка регулювання; $u(s)$ – керуючий вплив; $\bar{u}(s)$ - керуючий вплив з урахуванням впливу нелінійної ланки; $y(s)$ — вихідна регулююча величина.

Передавальна функція розімкнутого контуру лінійної системи з ПД-регулятором має вигляд

$$W(s) = W_y(s)W_o(s) = \frac{K_d b_0 s^2 + K_p b_0 s + K_i b_0}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s}.$$

Величини насичення та вид використовуваної нелінійної характеристики обумовлені особливостями конструкції нагнітаючого насоса (регульованого, нерегульованого), що застосовується для систем поливу. Керування здійснюється зміною сигналу керування тиском насоса.

При нульових початкових умовах діапазон зміни сигналу задаючого впливу на систему визначається обмеженням вихідної змінної нелінійного елемента одиничним негативним чи позитивним значеннями. Тому задане значення вихідний регульованої змінної (в даному випадку - швидкості обертання насоса) також обмежено значеннями коефіцієнта передачі об'єкта управління $W_o(0)$ [25]. Це не суперечить практиці, тому

$$|g(t)| \leq W_o(0). \quad (2)$$

При початкових ненульових умовах діапазон зміни сигналу вихідної змінної системи також обмежений схожим на формулу (2) виразом

$$|\Delta y(t)| \leq W_o(0). \quad (3)$$

Це накладає обмеження початкових ненульових умов $y(0)$ на можливе завдання і призводить до зміни нерівності (2). Так, при позитивних значеннях $g(t) > 0$ і $y(0) > 0$ вираз (2) відповідно до (3) матиме наступний вигляд

$$g(t) \leq W_o(0) + y(0). \quad (4)$$

Даний вираз збережеться і за від'ємних значеннях $y(0) < 0$. Звідки випливає, що при від'ємних значеннях нульової умови та $g(t) > 0$ справедливо $|y(0)| < W_o(0)$.

Подібні вирази можуть бути отримані при від'ємних значеннях $g(t) < 0$. Так, якщо при цьому $y(0) < 0$, то вираз (2) з урахуванням (3) буде мати наступний вигляд

$$g(t) \geq -W_o(0) + y(0). \quad (5)$$

Даний вираз збережеться і при позитивних значеннях $y(0) > 0$. Звідки випливає, що при позитивних значеннях нульової умови та $g(t) < 0$ також справедливо $|y(0)| < W_o(0)$.

При синтезі цифрового регулятора вирішується завдання переобладнання, що полягає у заміні безперервного регулятора цифровим, із збереженням найважливіших властивостей безперервної системи (рисунок 3.4).

Наявність нелінійностей електромеханічних виконавчих приводів, значна інерційність систем ЕМП, що застосовуються в системі поливу і іригації теплиць дає основу запропонувати алгоритм синтезу цифрових регуляторів для таких систем керування, заснований на способі переобладнання безперервного регулятора. Алгоритм синтезу цифрових регуляторів включає наступні етапи [26]:

- етап 1 - регулятор синтезується як безперервний за відомими методиками, зокрема методами описаними в класичній теорії автоматичного управління;
- етап 2 - здійснюється перехід до цифрового регулятора за відомим виразами (описаними вище) дискретної передавальної функції

$$M(z) = W_p(z)E(z) = \left[K_p + \frac{K_i Tz}{z-1} + \frac{K_d(z-1)}{Tz} \right] E(z). \quad (6)$$

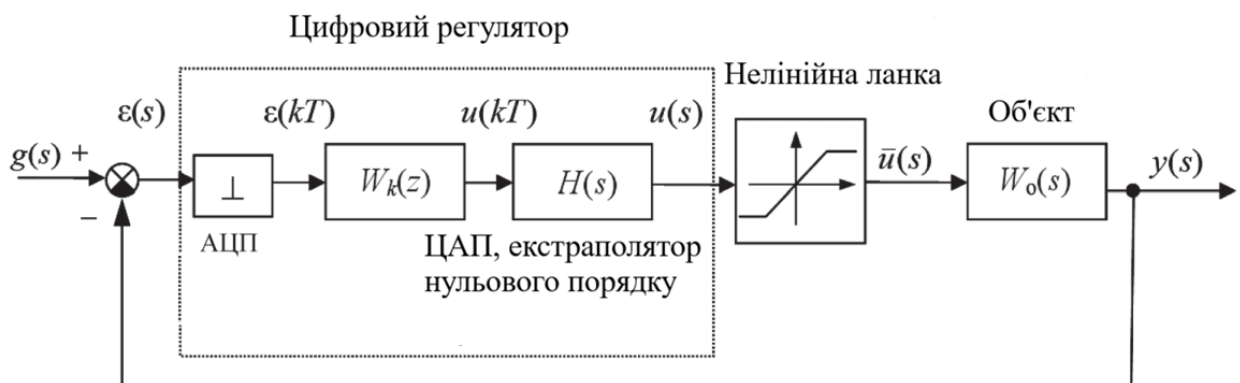


Рисунок 3.4 - Структурна схема цифрової нелінійної системи керування

Для отриманої дискретної передавальної функції (6) цифрового ПД-регулятора відповідає різницеве рівняння

$$U(kT) = U((k-1)T) + a\varepsilon(kT) + b\varepsilon((k-1)T) + c\varepsilon((k-2)T),$$

де U - вихідна змінна цифрового ПД-регулятора, ε - вхідна змінна цифрового ПД-регулятора (помилка регулювання); величини $a=(K_p+K_iT+K_dT^{-1})$, $b=-(K_p+2K_dT^{-1})$, $c=K_dT^{-1}$.

Частота дискретизації береться більша, ніж смуга пропускання неперервної системи керування ЕМП, наскільки більше - це визначається з

подальшого моделювання та оцінки результатів. Як зазначено вище, вибір частоти - це, швидше, методика, підкріплена інженерною інтуїцією та практичним досвідом.

3.3 Моделювання роботи електромеханічного приводу насосної установки САУ поливу теплиць

Моделювання проводиться для варіантів цифрового регулювання з вибраними частотами дискретизації та перерахованими значеннями параметрів за формулою (1). Схема моделі визначається використанням бібліотек середовища Simulink та досвіду моделювання. Приклад реалізації цієї методики - синтез цифрового регулятора. Об'єкт управління описується передавальною функцією

$$W_o(s) = \frac{115,05}{2,473s^2 + 10,5s + 26,98}.$$

Задані показники якості управління - час перехідного процесу вихідного сигналу (5%-на зона) - не більше 1 с. Перерегулювання у всьому діапазоні не повиненна перевищувати $\sigma < 8\%$ [26, 27].

В результаті застосування сучасного програмного забезпечення та чисельних методів дослідження визначаються параметри безперервного ПД-регулятора в частотній області за методикою аналітичного синтезу:

$$K_p = 2,634; K_i = 1,445; K_d = 0,615.$$

При переході до цифрового варіанта ПД-регулятора, що визначається дискретною передавальною функцією $W_p(z)$, пропорційна частина аналогового регулятора зберігає своє значення K_p , інтегральна частина, яка в аналоговому варіанті має наступний вигляд K_i/s , замінюється дискретною передавальною функцією $K_i T_z/z-1$, а диференціальна частина, в аналоговому варіанті має вигляд $K_d s$, замінюється дискретною передавальною функцією $K_d(z-1)/T_z$. Таким чином, дискретна передавальна функція цифрового варіанта регулятора матиме наступний вигляд:

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_p(z) = K_p + \frac{K_i T z}{z-1} + \frac{K_d(z-1)}{Tz},$$

де T - період дискретизації, с.

Дискретної передавальної функції цифрового ПІД-регулятора відповідає різницеве рівняння

$$U(kT) = U((k-1)T) + a\varepsilon(kT) + b\varepsilon((k-1)T) + c\varepsilon((k-2)T),$$

де U - вихідна змінна цифрового ПІД-регулятора, ε - вхідна змінна цифрового ПІД-регулятора (помилка регулювання), $a=(K_p+K_iT+K_dT^{-1})$, $b=-(K_p+2K_dT^{-1})$, $c=K_dT^{-1}$.

Наступним кроком є визначення параметрів цифрового ПІД-регулятора, пропорційна частина якого не змінюється, а інтегральна та диференціальна частини будуть мати вигляд

$$W_i(z) = \frac{K_i T z}{z-1};$$

$$W_d(z) = \frac{K_d(z-1)}{Tz}.$$

Виконано дослідження цифрової системи управління зі змінним періодом дискретизації в діапазон від $T=0,01$ с до $T=0,005$ с.

Результати моделювання цифрової системи управління при $T=0,01$ с показано на рисунку 3.5.

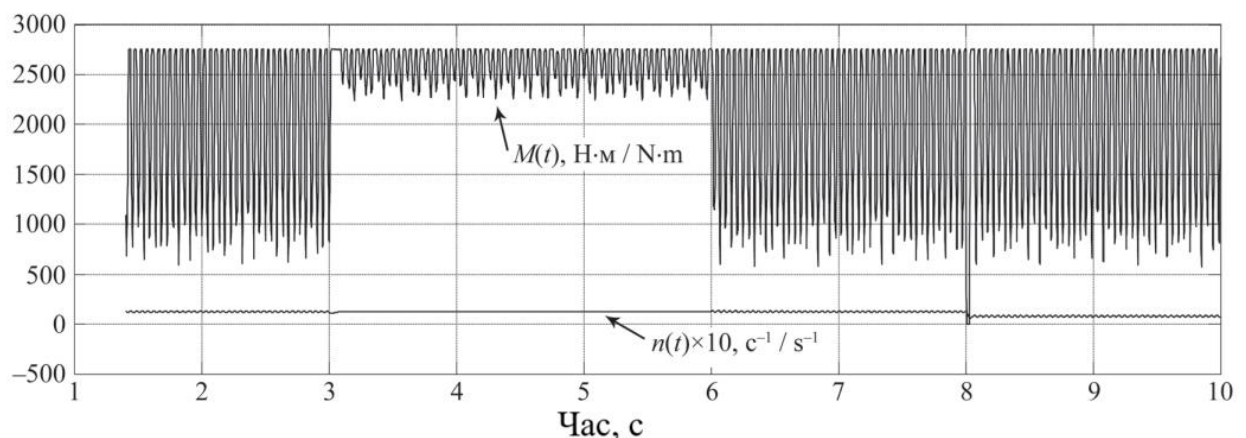


Рисунок 3.5 - Графік зміни моменту та частоти обертання насоса у часі

На графіку на рисунка 3.5 видно, що за даної частоти дискретизації присутні значні пульсації моменту, що у даному випадку неприпустимо.

Моделювання системи керування з цифровим регулятором ($T=0,005\text{с}$) при зміні основних збурювальних впливів показує, що при даній частоті практично відсутні пульсації моменту і швидкості, що відповідає завданням.

Результати моделювання системи керування з аналоговим та цифровим регулятором при $T=0,005\text{с}$ показують гарний збіг керованого процесу (рисунок 3.6) [27].

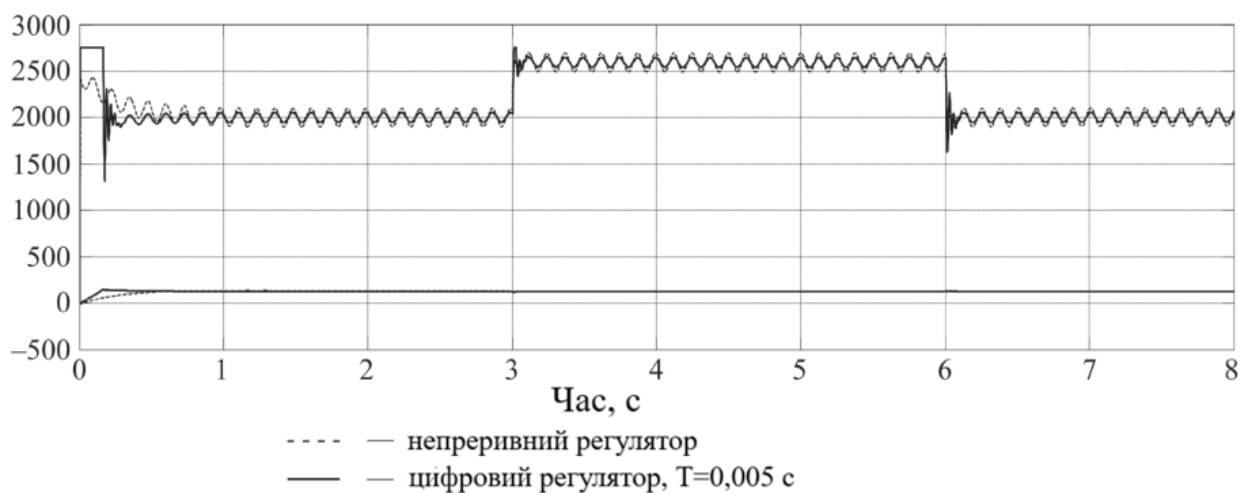


Рисунок 3.6 - Графік зміни моменту та частоти обертання насоса у часі

Відносна помилка в динаміці процесу управління для моменту менше 7%, а для частоти обертання - менше 2% (рисунок 3.7).

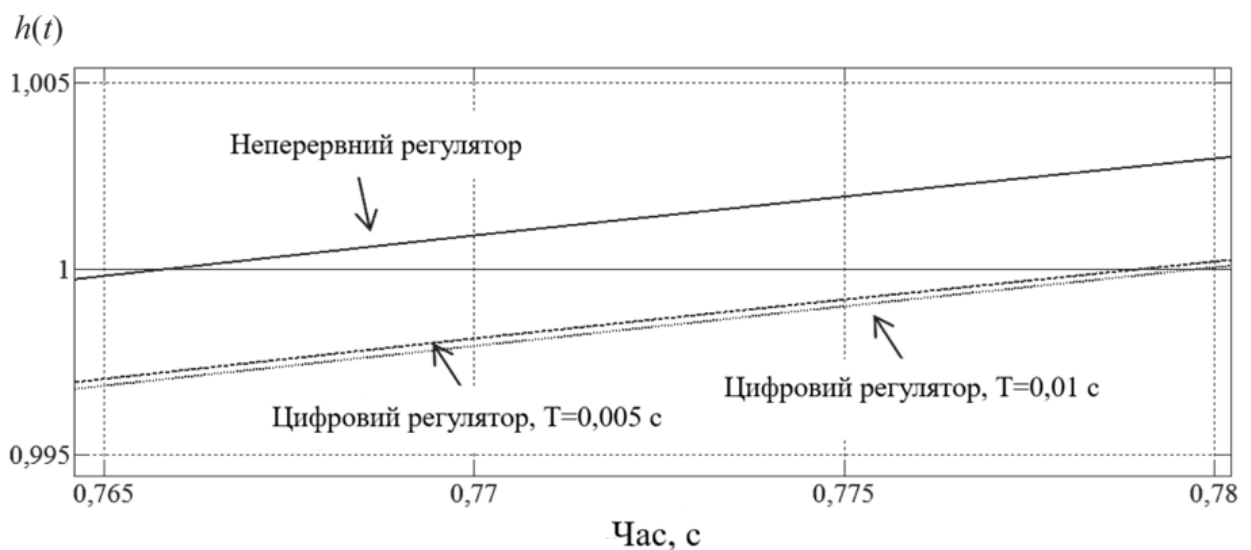


Рисунок 3.7 – Графік перехідного процесу

Розглянутий приклад підтверджує можливість використання запропонованої методики синтезу ПД-регулятора для систем керування з електромеханічними виконавчими механізмами систем поливу і іригації тепличних господарств.

Таким чином, запропонована методика синтезу цифрової системи управління з ЕМП, характерна для систем поливу і іригації тепличних господарств. Необхідна якість процесу управління забезпечується раціональним визначенням частоти дискретизації цифрового регулятора замкнутої системи. В основу методики покладено наступне твердження: частота дискретизації береться більша, ніж смуга пропускання неперервної системи управління ЕМП, наскільки більше визначається з подальшого моделювання та оцінки одержуваних результатів.

Основними перевагами методу є можливість організації діалогових процедур проектування цифрових регуляторів систем автоматизованого управління. Етапи побудови параметрів регулятора можуть бути найбільш ефективно реалізовані в програмного середовища MATLAB&Simulink.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі розроблена автоматизована система керування поливом тепличного господарства. До основних етапів автоматизації відносять процеси виконання поставлених задач, функціонування автоматизованих програмно-технічних алгоритмів і засобів з допомогою програмовано-логічних контролерів промислового взірця. Застосування технічних засобів автоматизації дозволяють контролювати та діагностувати якість поливу і внесення добрив та прогнозувати різні ситуації по основних параметрах (вологість ґрунту, температура, інтенсивність поливу), це дає можливість раціонально використовувати водні ресурси тепличного господарства. У результаті було розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає у розробці автоматизованої системи керування поливом та іригацією тепличного господарства з урахуванням сучасних вимог до ефективності, точності та енергоощадності технологічних процесів.

У першому розділі роботи було проведено детальний аналіз технологічного процесу вирощування рослин у тепличних умовах як об'єкта керування. Встановлено, що тепличне господарство є складною динамічною системою з багатьма взаємопов'язаними параметрами, серед яких одним із найважливіших є вологість ґрунту. Проведений аналіз показав, що існуючі системи керування часто не забезпечують необхідного рівня адаптивності та точності, що обумовлює необхідність впровадження сучасних автоматизованих рішень.

Також у першому розділі було здійснено огляд структури автоматизованих систем підтримки технологічних процесів у промислових теплицях. Визначено, що ефективна система повинна включати вимірювальну підсистему, керуючий модуль та виконавчі механізми, об'єднані в єдину інформаційно-керуючу мережу. Особливу увагу приділено застосуванню інтелектуальних сенсорів та технологій Інтернету речей, які

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяють здійснювати безперервний моніторинг параметрів середовища в режимі реального часу та забезпечують високу точність збору даних.

У другому розділі було обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації для реалізації системи поливу. Розроблено структуру автоматизованої системи, яка базується на використанні програмовано-логічного контролера як центрального елемента керування. Проведено аналіз вимог до контролера, що дозволило визначити його оптимальні технічні характеристики, зокрема швидкодію, наявність аналогових і цифрових входів/виходів, а також можливість інтеграції з іншими компонентами системи.

Окрему увагу приділено вибору первинних перетворювачів та сенсорів. Встановлено, що для забезпечення надійної роботи системи необхідно використовувати сенсори вологості ґрунту з високою точністю та стабільністю показів. Крім того, обґрунтовано доцільність використання додаткових сенсорів, які дозволяють враховувати вплив зовнішніх факторів на процес зрошення. Також було виконано вибір виконавчих механізмів, зокрема насосного обладнання та електромагнітних клапанів, які забезпечують реалізацію керуючих впливів у системі.

У третьому розділі було здійснено розрахунок системи автоматичного регулювання поливу. Розроблено загальну структурну схему системи керування з урахуванням принципів теорії автоматичного управління. Визначено основні функціональні елементи системи та встановлено їх передавальні функції, що дозволило сформулювати математичну модель об'єкта керування.

На основі отриманої моделі було виконано синтез цифрової нелінійної системи керування, яка враховує особливості динаміки ґрунту як об'єкта з великою інерційністю та наявністю збурень. Обґрунтовано використання регулятора, що забезпечує необхідну точність і стійкість системи, а також дозволяє компенсувати вплив зовнішніх факторів.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливу увагу приділено моделюванню роботи електромеханічного приводу насосної установки. У процесі моделювання було отримано перехідні характеристики системи, що дозволило оцінити її динамічні властивості, зокрема швидкодію, перерегулювання та час встановлення. Результати моделювання підтвердили працездатність розробленої системи та відповідність її параметрів заданим вимогам.

У цілому, розроблена автоматизована система керування поливом забезпечує стабільне підтримання заданого рівня вологості ґрунту, зменшує вплив збурень та підвищує ефективність використання водних ресурсів. Використання сучасних засобів автоматизації дозволяє знизити участь оператора у процесі керування, що підвищує надійність і повторюваність технологічного процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості впровадження розробленої системи в умовах реального тепличного господарства. Це дозволить підвищити врожайність, зменшити витрати ресурсів та покращити якість продукції. Крім того, запропоновані підходи можуть бути використані при проектуванні аналогічних систем автоматизації в аграрній сфері.

Таким чином, поставлені в кваліфікаційній роботі задачі виконані у повному обсязі, а отримані результати підтверджують доцільність застосування автоматизованих систем керування для оптимізації процесів поливу та іригації тепличних господарств.

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сотник С. В., Кирпота Ф. В. Огляд базових елементів автоматизованої системи контролю навколишнього середовища портативної ділянки зеленого побуту // Автоматизація, електроніка та робототехніка (AERT-2023). – 2023. – С. 28-31.
2. Kyropota F. Development of Automated Environmental Control System for Portable Greenway Section // Automation and development of electronic devices» ADED-2023, Part 2. – 2023. – С. 1-4.
3. Lyashenko V. et al. Modeling of Machine Design with Numerical Control in UG NX 7.5 System // The International Journal of Engineering and Science (IJES). – 2018. – Volume 7(7). – С. 28-31.
4. Tahseen A. J. A. et al. Access control to robotic systems based on biometric: the generalized model and its practical implementation // International Journal of Intelligent Engineering and Systems. – 2023. – Vol. 16, No. 5. – С. 313-328.
5. Sharo Y. M. A. et al. Neural Networks As A Tool For Pattern Recognition of Fasteners // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2021. – Vol. 69, No. 10. – С. 151-160.
6. Deineko Z. et al. Features of Database Types // International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2021. – Vol. 5(10). – С. 73-80.
7. Сацик В. О. Апаратне забезпечення автоматизованого регулювання мікроклімату теплиці / В. О. Сацик, Д. П. Карпук // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". – 2019. – Вип. №40. – С. 245-250.
8. Економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличні господарства / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, І. І. Чернов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2019. – Вип. 174(2). – С. 53-59. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2012_174\(2\)10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2012_174(2)10).
9. Коломієць Т. І. Автоматизована система управління параметрами мікроклімату в теплицях / Т. І. Коломієць // Автоматизація та комп'ютерно-

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науковопрактичної Internet-конференції. – Черкаси, 2019. – С. 32-33.

10. Лисенко В. П. Програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, Т. І. Лендел, І. І. Чернов // Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2019. – №2. – С. 65

11. Speetjens S. L. Methodic design of a measurement and control system for climate control in horticulture / S. L. Speetjens, H. J. J. Janssen, G. van Straten, Th. H. Gieling, J. D. Stigter // Comput. Electron. Agric. – 2019. – Vol.64. – №2 (December 2008). – P. 162-172.

12. Малько С. Л. Актуальность проблемы контроля и диагностики систем автоматизации технологических процессов защищенного грунта / С. Л. Малько, Л. П. Андрианова // Электрификация сельского хозяйства. — Уфа: БГАУ, 2019, Вып. 3. — С. 62-65.

13. Токмаков Н. М. Математическая модель системы управления микроклиматом ангарных теплиц / Н. М. Токмаков, В. С. Грудинин // Гавриш №3.

14. Лукінюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.- інтегр. технології» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2019. – 236 с. : іл. – Бібліогр.: с. 230–231. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-287-2.

15. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – Ч. 1. Вимірювальні пристрої. – 470 с.

16. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: навч. посіб.: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін. ; За заг. ред. А.

					ДП.АКІТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

- К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХП», 2013 р. – Ч. 2. Регулювальні і виконавчі пристрої. – 658 с. : іл. – Бібліогр.: с. 644–645. – 500 пр. – ISBN 966-593-292-6.
17. Бойчик І. М., Харів П. С., Хопчан М. І. Економіка підприємств, - Львів, Сполом, 2000. – 254 с. Гіроль М.М. Техногенна безпека / М.М. Гіроль, Л.Р. Ниник, В.Й. Чабан. – Рівне, 2019. – 358 с.
18. N. V. P. R. Durga Prasad, T. Lakshminarayana, et al., “Automatic Control and Management of electrostatic Precipitator”, IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 561-567, Vol. 35, No. 3, May/June, 1999.
19. Ralf Joost and Ralf Salomon. “Advantages of fpga-based multiprocessor systems in industrial applications”. In 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2005). IEEE-I EON, November 2019.
20. Hyman, Anthony. Charles Babbage, pioneer of the computer. — Oxford University Press, 2019. 15.Randell, Brian. The Origins of Digital Computers: Selected Papers.. — 2003.
21. Проектування систем автоматизації: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.
22. Об’єктно-орієнтоване програмування : конспект лекцій для студентів напряму підготовки "Комп’ютерні науки" всіх форм навчання / Ю. Е. Парфьонов, В. М. Федорченко, М. Ю. Лосєв, О. В. Щербаков. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2010. – 312 с.
23. 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 «КП», 2008. - 236 с.
24. Технічні засоби автоматизації:/ В.В. Ткачов, В.П. Чернишев, М.М. Одновол; Нац. гірн. ун-т. - Д. : НГУ, 2007. - 174 с.
25. Автоматизовані системи управління та зв’язок: курс лекцій / Уклад. Л.В. Борисова, О.В. Закора, А.Б. Фещенко . — Х : НУЦЗУ, 2018 . — 282 с.

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. Автоматизовані системи управління та зв'язок: методичні вказівки з організації та завдання до самостійної роботи під час вивчення дисципліни / Уклад. В.О. Собина, В.О. Закора, А.Б. Фещенко . — Х : НУЦЗУ, 2018 . — 27с.
27. 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.

					ДП.АКТ.10994354.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		