

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему:

“Автоматизація системи контролю клімату
в теплиці промислового типу”

Студент групи АВ-31сн Попадин Павло Володимирович
(шифр) (прізвище, ім'я та по батькові)

Керівник роботи:	_____ /	<i>Олег МАСНЯК</i> /
	(підпис)	(ім'я та прізвище)
Консультанти:	_____ /	<i>доц. Ігор КОСТИК</i> /
	(підпис)	(ім'я та прізвище)
	_____ /	<i>доц. Ганна КРИХ</i> /
	(підпис)	(ім'я та прізвище)
	_____ /	<i>доц. Юрій КІТ</i> /
	(підпис)	(ім'я та прізвище)
Завідувач кафедри:	_____ /	<i>доц. Наталія МИХАЙЛИК</i> /
	(підпис)	(ім'я та прізвище)
	_____ /	<i>проф., д.т.н. Федір МАТІКО</i> /
	(підпис)	(ім'я та прізвище)

Львів 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Інститут енергетики і систем керування Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Спеціальність 151 “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АВКТ:

д.т.н., проф. Федір МАТІКО
“ ” 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Попадину Павлу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація системи контролю клімату в теплиці промислового типу
затверджена наказом по університету від “26” травня 2025 р., № 1767-4-08

2. Термін подання студентом закінченої роботи “21” червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технологічна схема

2. Опис технологічного процесу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які належить розробити):

Вступ

1. Аналіз технологічного процесу, як об'єкта керування

2. Техніко-економічне обґрунтування функціональної схеми автоматизації

3. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

4. Розроблення та опис розгорнутої функціональної схеми автоматизації

5. Програмне забезпечення системи автоматизації

6. Принципові електричні схеми з'єднань засобів автоматизації

7. Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання вологості ґрунту в теплиці промислового типу

8. Охорона праці при впровадженні та експлуатації системи автоматизації

9. Обґрунтування економічної доцільності впровадження системи автоматизації

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Функціональна схема автоматизації

2. Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

3. Принципова електрична схема з'єднань засобів автоматизації

4. Моделювання системи автоматичного регулювання вологості ґрунту в теплиці промислового типу

6. Консультування роботи, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Мікропроцесорних програмованих засобів автоматизації</i>	<i>доц. Ігор КОСТИК</i>		
<i>Охорони праці</i>	<i>доц. Юрій КІТ</i>		
<i>Економіки</i>	<i>доц. Наталія МИХАЙЛИК</i>		
<i>Моделювання</i>	<i>доц. Ганна КРИХ</i>		

7. Дата видачі завдання: 28 квітня 2025 р.

Керівник роботи _____ / Олег МАСНЯК /
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ / Павло ПОПАДИН /
(підпис) (ім'я, прізвище)

Календарний план

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	<i>21.05.2025р.</i>	
2.	<i>Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування</i>	<i>21.05.2025р.</i>	
3.	<i>Техніко-економічне обґрунтування функціональної схеми автоматизації</i>	<i>22.05.2025р.</i>	
4.	<i>Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації</i>	<i>23.05.2025р.</i>	
5.	<i>Розроблення та опис розгорнутої функціональної схеми автоматизації</i>	<i>26.05.2025р.</i>	
6.	<i>Програмне забезпечення системи автоматизації</i>	<i>28.05.2025р.</i>	
7.	<i>Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання вологості ґрунту в теплиці промислового типу</i>	<i>30.05.2025р.</i>	
8.	<i>Принципові електричні схеми з'єднань засобів автоматизації</i>	<i>02.06.2025р.</i>	
9.	<i>Охорона праці при впровадженні та експлуатації системи автоматизації</i>	<i>05.06.2025р.</i>	
10.	<i>Обґрунтування економічної доцільності впровадження системи автоматизації</i>	<i>10.06.2025р.</i>	
11.	<i>Висновки</i>	<i>12.06.2025р.</i>	

Студент _____ / Павло ПОПАДИН /
(підпис) (ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ / Олег МАСНЯК /
(підпис) (ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему «Автоматизація системи контролю клімату в теплиці промислового типу» складається з: 132 сторінок, 75 рисунків, 12 таблиць, 41 джерела посилань та 4 графічних листів.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення стабільних мікрокліматичних умов для вирощування перцю солодкого (*Capsicum annuum* L.) в теплиці промислового типу.

Предметом дослідження є побудова автоматизованої системи контролю клімату на основі сучасних мікропроцесорних засобів автоматизації.

Метою роботи є проектування, програмна реалізація та моделювання ефективної системи автоматизованого керування мікрокліматом.

У роботі розглянуто технологічний процес як об'єкт керування, проаналізовано вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на формування мікроклімату в теплиці, обґрунтовано вибір координат регулювання, вимірювання та сигналізації. Розроблено функціональну схему автоматизації системи контролю клімату, здійснено вибір та обґрунтування застосування технічних засобів автоматизації, підібрано найоптимальніший мікропроцесорний засіб автоматизації, як основу для системи автоматизації. Мовою програмування Ladder diagram створено програму функціонування програмованого логічного контролера, а також виконано розробку принципової електричної схеми з'єднань засобів автоматизації. Проведено моделювання контуру регулювання вологості ґрунту з оцінкою перехідних процесів за стандартними критеріями якості, а також приділено увагу питанням безпеки під час монтажу та експлуатації системи.

Результати дослідження можуть бути використані для впровадження автоматизованих систем контролю клімату на промислових тепличних господарствах з метою підвищення врожайності, якості продукції та оптимізації витрат енергоресурсів.

ANNOTATION

The bachelor's thesis consists of: 132 pages, 75 figures, 12 tables, 41 sources of references and 4 graphic posters.

The object of research is the process of providing stable microclimatic conditions for growing sweet pepper (*Capsicum annuum L.*) in an industrial greenhouse.

The subject of the study is the construction of an automated climate control system based on modern microprocessor-based automation tools.

The aim of the work is to design, programmatically implement and model an effective automated microclimate control system.

The paper considers the technological process as an object of control, analyzes the influence of external and internal factors on the formation of the microclimate in the greenhouse, and justifies the choice of control, measurement, and signaling coordinates. The functional scheme of automation of the climate control system was developed, the choice and justification of the use of technical means of automation was carried out, the most optimal microprocessor-based automation tool was selected as the basis for the automation system. A program for the functioning of the programmable logic controller was created in the Ladder diagram programming language, and a schematic electrical diagram of the automation equipment connections was developed. The modeling of soil moisture control systems with an assessment of transient processes according to standard quality criteria was carried out, and attention was paid to safety issues during installation and operation of the system.

The results of the study can be used to implement automated climate control systems in industrial greenhouses in order to increase yields, product quality, and optimize energy consumption.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	12
1.1 Опис технологічного процесу	12
1.2 Аналіз факторів, що впливають на перебіг технологічного процесу	13
1.3 Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта	15
1.4 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та їхніх допустимих відхилень	16
1.5 Технологічна карта	19
1.6 Складання структурної схеми взаємозв'язків параметрів об'єкта керування	19
2 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	22
2.1 Аналіз характеристик взаємозв'язку між параметрами об'єкта керування	22
2.2 Обґрунтування та вибір координат регулювання, вимірювання, контролю, сигналізації, захисту та блокування	23
2.3 Визначення функціональних ознак системи автоматизації	25
2.4 Порівняльний аналіз існуючих схем керування та розроблення оптимальної функціональної схеми автоматизації спрощеним способом	26
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	30
3.1 Вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми	30
3.1.1 Обґрунтування вибору вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів	30
3.1.2 Технічні характеристики вибраних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів	32

3.2 Мікропроцесорний програмований засіб автоматизації	45
3.2.1 Обґрунтування вибору мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації та опис його технічних характеристик	45
3.2.2 Конфігурування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації	51
3.3 Специфікація технічних засобів автоматизації	53
4. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗГОРНУТИМ СПОСОБОМ ТА ЇЇ ОПИС	60
5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	63
5.1 Алгоритми функціонування контурів системи автоматизації	65
5.2 Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації	73
6 ПРИНЦИПОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ З'ЄДНАНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	80
7 РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ В ТЕПЛИЦІ ПРОМИСЛОВОГО ТИПУ	87
7.1 Побудова моделі об'єкта керування	89
7.2 Вибір структурної схеми системи регулювання	94
7.3 Параметрична оптимізація системи регулювання.....	99
7.4 Моделювання та дослідження системи регулювання	103
8. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	109
9. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	119
ВИСНОВКИ	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	128

ВСТУП

Сучасні технології є ключовим чинником у розробці нових, та підвищенні ефективності вже існуючих автоматизованих систем управління та контролю технологічних процесів. В таких умовах широкого застосування набувають мікропроцесорні програмовані засоби автоматизації. Їх використовують насамперед через можливість вільного програмування і здатність до обробки великих обсягів інформації в режимі реального часу, що гарантує високі показники якості регулювання як простих, так і складних комплексних технологічних процесів.

Всеосяжне впровадження програмованих логічних контролерів (далі - ПЛК) не оминуло і галузь сільського господарства. Підвищення врожайності і рентабельності сільськогосподарських підприємств неможливе без якісного та комплексного моніторингу і керування технологічними процесами. ПЛК знайшли своє застосування у контролі за системами зрошення, переробки сировини, моніторингу зовнішніх природніх чинників, використання біоресурсів і забезпеченні сприятливого мікроклімату в тепличних господарствах, що дозволило досягати високих і якісних показників врожайності навіть у місцях з несприятливими природніми умовами.

Тепличні комплекси і системи закритого ґрунту набули широкого розповсюдження у регіонах, де вирощування певних сільськогосподарських культур є неможливим, через несприятливі або специфічні кліматичні умови, а також у випадку, коли стоїть на меті отримання стабільно високої врожайності протягом цілого року, без прив'язки до сезону. В таких умовах важливим аспектом є забезпечення сприятливого для росту рослин мікроклімату всередині теплиці, адже від якості підтримки таких параметрів, як температура, вологість та ін. напряму залежить врожайність і, як наслідок, рентабельність таких господарств.

На сьогоднішній день пошук ефективних і раціональних схем керування мікрокліматом в умовах захищеного ґрунту становить значний науковий і практичний інтерес, оскільки спрямований на створення оптимальних параметрів середовища для підвищення якості вирощуваних культур [1]. Отже, враховуючи

актуальність проблеми, основною метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка ефективної системи контролю клімату для теплиці промислового типу із застосуванням мікропроцесорних програмованих засобів автоматизації.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1. Опис технологічного процесу

Вирощування сільськогосподарських культур у промислових тепличних комплексах передбачає створення та підтримку в реальному часі оптимальних умов для росту і розвитку рослин незалежно від впливу зовнішнього середовища. Сукупність параметрів, які визначають умови всередині закритого від зовнішніх впливів середовища, прийнято називати *мікрокліматом* [2].

До основних параметрів, що формують мікроклімат у теплицях, належать температура та вологість повітря, ґрунту, рівень вуглекислого газу, а також освітленість. Підтримання зазначених параметрів на рівнях, визначених вимогами до технологічного процесу, забезпечує високі показники врожайності, покращення якості продукції та водночас сприяє досягненню значного економічного ефекту, за рахунок економії енергоносіїв [3,10,11].

Основною метою технологічного процесу у системі контролю мікроклімату промислового тепличного комплексу є автоматизована підтримка технологічних параметрів на стабільних рівнях, оптимальних для вирощування конкретної сільськогосподарської культури. З огляду на багатофакторність цього процесу, система формування і підтримки мікроклімату повинна складатись з низки підсистем, що функціонують у режимі реального часу та забезпечують моніторинг кожного з ключових параметрів.

Технологічний процес підтримки мікроклімату за заданими параметрами є циклічним, і реалізується в режимі реального часу. Він включає такі основні етапи:

1. Збір інформації про стан внутрішнього та зовнішнього середовища за допомогою відповідних датчиків.
2. Передача даних на ПЛК для подальшої обробки.
3. Обробка інформації відповідно до алгоритмів, закладених у ПЛК, і як результат формування керуючих сигналів.
4. Вплив на технологічні параметри через виконавчі механізми.
5. Повторний контроль технологічних параметрів, з метою оцінки ефективності регулюючої дії та прийняття наступних керуючих рішень.

Як зазначалося вище, система контролю клімату тепличного комплексу складається з кількох функціональних підсистем, кожна з яких відповідає за певний окремий технологічний параметр. До складу таких підсистем входять:

1. Система опалення – забезпечує підтримку температури повітря в теплиці, а також підігрів ґрунту, що особливо актуально у зимовий період.
2. Система крапельного зрошення – виконує автоматизоване зволоження ґрунту, а також підживлення рослин рідкими добривами, з урахуванням поточних показників вологості.
3. Система туманоутворення – підвищує вологість повітря шляхом створення водяного туману за допомогою насоса високого тиску та розпилювальних форсунок.
4. Система освітлення – задіюється у разі недостатнього природного освітлення (наприклад у зимовий час, або при значній хмарності) та підтримує необхідний рівень освітленості для фотосинтетичної активності рослин.
5. Система вентиляції – складається з фрамуг та вентиляторів і забезпечує циркуляцію повітря всередині теплиці.

Всі перелічені підсистеми інтегруються в одну єдину автоматизовану систему контролю клімату, алгоритм керування якою реалізований програмно, на основі ПЛК. Це дозволяє досягти ефективної взаємодії між підсистемами та стабільного підтримування мікроклімату відповідно до змін внутрішніх і зовнішніх умов.

1.2. Аналіз факторів, що впливають на перебіг технологічного процесу

Для забезпечення стабільного та ефективного перебігу технологічного процесу контролю клімату необхідно врахувати дію комплексу факторів, що впливають на формування параметрів мікроклімату.

Згідно з [4], усі фактори доцільно класифікувати на *внутрішні, зовнішні, експлуатаційні та конструктивні*.

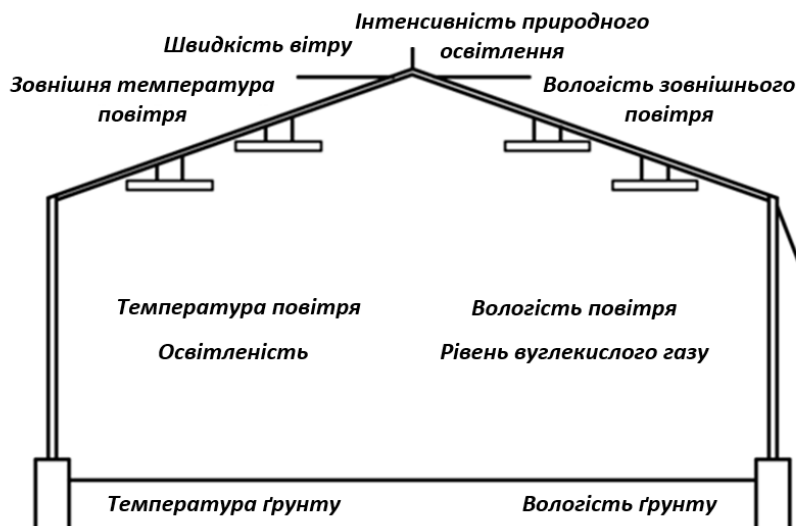


Рис. 1.1 Основні внутрішні та зовнішні чинники, що впливають на формування мікроклімату

До внутрішніх факторів належать безпосередньо керовані параметри мікроклімату, серед яких: температура та вологість повітря, температура та вологість ґрунту, рівень освітленості, концентрація вуглекислого газу. Саме ці величини підлягають автоматизованому моніторингу та регулюванню в рамках реалізації технологічного процесу.

Зовнішні фактори включають параметри навколишнього середовища, зокрема температуру та вологість зовнішнього повітря, інтенсивність природного освітлення, швидкість вітру та атмосферний тиск. Їхній вплив значною мірою визначає теплові й енергетичні втрати теплиці та потреби в активному регулюванні внутрішніх умов.

Експлуатаційні фактори пов'язані з фізичними характеристиками середовища всередині теплиці, такими як маса повітря та ґрунту. Вони впливають на інерційність процесів тепло- і вологообміну, і відповідно на динаміку зміни кліматичних параметрів у відповідь на керуючі дії.

Конструктивні фактори обумовлені особливостями будови теплиці: її геометричними розмірами, формою, площею поверхонь, а також теплопровідністю матеріалів каркаса та покрівлі. Ці параметри визначають теплоємність об'єкта та ефективність утримання енергії всередині теплиці [4].

1.3. Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта

Рівняння матеріального та теплового балансу дозволяють кількісно оцінити вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на стан контрольованого середовища.

Матеріальний баланс

Матеріальний баланс описує зміну кількості речовини в теплиці, зокрема водяної пари (H_2O) і вуглекислого газу (CO_2). Він базується на законі збереження маси: якщо від кількості вхідних в систему речовин відняти кількість вихідних, отримуємо зміну кількості речовини в часі.

Баланс вологи повітря в теплиці визначається надходженням через крапельний полив і систему туманоутворення, а також втратами через випаровування та вентиляцію.

$$\frac{dM_{H_2O \text{ повітря}}}{dt} = G_{\text{зовн}} + G_{\text{туман}} + G_{\text{випар}} - G_{\text{вент}} - G_{\text{конденс}} \quad (1.1)$$

де:

$M_{H_2O \text{ повітря}}$ - маса водяної пари в повітрі теплиці;

$G_{\text{зовн}}$ - надходження зовнішньої вологості;

$G_{\text{туман}}$ - волога через систему туманоутворення;

$G_{\text{випар}}$ - випаровування з поверхні ґрунту та рослин;

$G_{\text{вент}}$ - втрати вологи через вентиляцію;

$G_{\text{конденс}}$ - втрати через конденсацію на поверхнях;

Баланс вологи ґрунту в теплиці тісно зв'язаний з вмістом вологи в повітрі, оскільки між цими двома середовищами постійно відбувається взаємний масообмін у вигляді випаровування та конденсації.

$$\frac{dM_{H_2O \text{ ґрунту}}}{dt} = G_{\text{полив}} + G_{\text{конденс}} - G_{\text{випар}} - G_{\text{росл}} - G_{\text{інфільтрація}} \quad (1.2)$$

де:

$M_{H_2O \text{ ґрунту}}$ - маса води в ґрунті;

$G_{\text{полив}}$ - надходження вологи через систему крапельного поливу;

$G_{\text{конденс}}$ - надходження вологи внаслідок конденсації;

$G_{\text{випар}}$ - випаровування з поверхні ґрунту;

$G_{\text{росл}}$ - споживання вологи рослинами;

$G_{\text{інфільтрація}}$ - втрати вологи через інфільтрацію;

Тепловий баланс

Тепловий баланс ґрунтується на законі збереження енергії, та складається з усіх джерел надходження тепла (система опалення, сонце), а також відведення (конструктивні тепловтрати, вентиляція, теплообмін з ґрунтом).

У динамічному режимі кількість теплоти, що накопичується, залежить від різниці між тепловими надходженнями й втратами, що дозволяє передбачити зміну температури всередині теплиці.

$$\frac{dQ}{dt} = Q_{\text{сонця}} + Q_{\text{опал}} + Q_{\text{вент}} - Q_{\text{втрати}} \pm Q_{\text{збер}} \quad (1.3)$$

де:

Q - кількість теплоти, накопиченої в повітрі й конструкції теплиці;

$Q_{\text{сонця}}$ - тепло, що надходить від сонця;

$Q_{\text{опал}}$ - тепло, що надходить від системи опалення;

$Q_{\text{вент}}$ - температурні втрати від провітрювання;

$Q_{\text{втрати}}$ - температурні втрати через конструктивні елементи;

$Q_{\text{збер}}$ - теплообмін з ґрунтом (може бути як джерелом так і втратами);

1.4. Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та їхніх допустимих відхилень

Визначення номінальних значень технологічних параметрів мікроклімату та допустимих меж їх відхилень є одним із ключових етапів у процесі проектування автоматизованої системи контролю тепличного середовища. Саме набір певних значень таких параметрів, як температура, вологість, освітленість та концентрація вуглекислого газу, у своїй сукупності становить основу поняття, як мікроклімат.

Конкретні значення параметрів мікроклімату повинні ґрунтуватися на конструктивних характеристиках теплиці (табл. 1.1) та агробіологічних вимогах вирощуваної культури. У цій роботі як базову модель для визначення номінальних значень параметрів технологічного процесу обрано перець солодкий (*Capsicum annuum* L.).

Таблиця 1.1

Основні конструктивні параметри теплиці та культура вирощування

№ п/п	Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення
1.	Довжина	м.	40
2.	Ширина	м.	12
3.	Висота сторони	м.	3
4.	Висота максимальна	м.	5
5.	Загальна площа	м ²	480
6.	Об'єм теплиці	м ³	1920
7.	Тип культури	-	<i>Capsicum annuum</i> L.

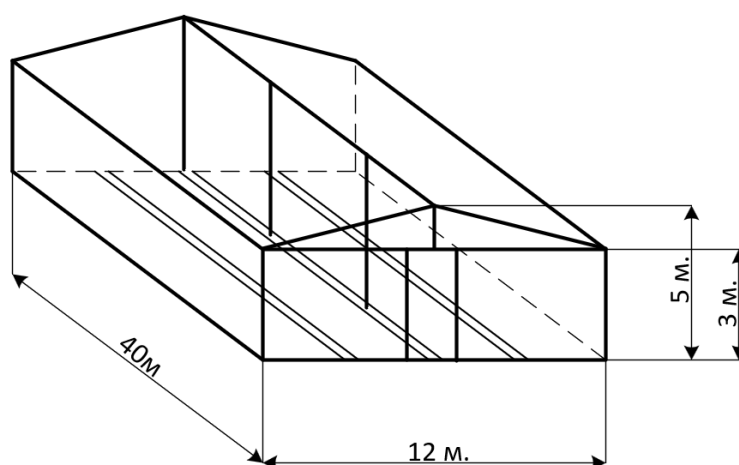


Рис. 1.2 Конструктивні параметри промислової теплиці

Солодкий перець (*Capsicum annuum* L.) – овочева культура родини пасльонових (*Solanaceae*), напівчагарникова рослина роду стручковий перець (*Capsicum*), природний ареал поширення якої – тропічні райони Америки [5].

Перець належить до теплолюбних культур і потребує стабільного теплового режиму протягом всього періоду вегетації. Ідеальною для швидкого проростання насіння температурою вважається діапазон 20-28 °С, тоді як оптимальними для подальшого росту і розвитку вважаються показники в межах 18-25 °С. Рослини чутливо реагують на зниження температури, особливо у весняний період, коли дефіцит тепла часто призводить до скидання зав'язей. Негативний вплив на стан культури справляє й надмірне підвищення температури: при досягненні 35 °С спостерігається значне пригнічення фізіологічних процесів. [6, 10]

Освітленість є ключовим фактором, що обмежує вирощування солодкого перцю в теплицях. Визначальними є тривалість світлового дня, інтенсивність та спектральний склад освітлення. Оптимальна середня тривалість освітлення для солодкого перцю – близько 10 годин на добу, у період цвітіння і плодоношення 14-15 годин, але не менше ніж 8 годин. Рекомендована освітленість поверхні ґрунту складає 20 тис. лк, мінімальна для ефективного росту – 8 тис. лк. При освітленості менше 4 тис. лк рослини не ростуть [7].

Для забезпечення оптимального росту та розвитку солодкого перцю в умовах закритого ґрунту рекомендується підтримувати вологість ґрунту в межах 70-80%. У фазу плодоношення вологість ґрунту слід підвищувати до 80-90%. Вологість повітря необхідно підтримувати на рівні 65-75%. При недостатньому зволоженні з'являється ризик ураження хворобами [8].

У даній роботі концентрація вуглекислого газу (CO₂) розглядається як ключовий показник якісного стану повітряного середовища в теплиці, та використовується для обґрунтування необхідності запуску системи вентиляції. За відсутності систем активного збагачення повітря CO₂, важливо підтримувати його концентрацію на рівнях, близьких до атмосферних значень (близько 400 ppm). Зниження вмісту CO₂ в закритому середовищі теплиці свідчить про потребу у негайному провітрюванні. Крім того, накопичення відпрацьованого повітря з низькою концентрацією CO₂ створює сприятливі умови для розвитку патогенних мікроорганізмів, зокрема грибкових захворювань та шкідників. Своєчасне

відкриття вентиляційних фрамуг забезпечує надходження зовнішнього свіжого повітря та компенсує дефіцит CO₂, що сприяє здоровому росту рослин.

1.5. Технологічна карта

У технологічній карті (табл.1.2), оформленій у відповідності до [9], наведено обґрунтовані вище номінальні значення параметрів технологічного процесу та межі їх відхилення.

Таблиця 1.2

Технологічна карта процесу

№ п/п	Назва параметра	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
1.	Температура повітря в теплиці	°C	22	±2
2.	Температура ґрунту в теплиці	°C	22	±2
3.	Вологість повітря в теплиці	%	70	±5
4.	Вологість ґрунту в теплиці	%	75	±5
5.	Концентрація CO ₂ в теплиці	ppm	300	±100
6.	Освітленість в теплиці	лк	10000	±2000

1.6. Складання структурної схеми взаємозв'язків параметрів об'єкта керування

У результаті аналізу технологічного процесу формування і контролю клімату промислової теплиці, було виділено наступні параметри, що впливають на процес, а також сформовано структурну схему взаємозв'язків

Вхідні величини

$t_{тепл}$ – температура теплоносія системи опалення;

$F_{туман}$ – витрата води в системі туманоутворення;

$F_{крап}$ – витрата води в системі крапельного поливу;

$S_{фрам}$ – ступінь відкриття фрамуг для природної вентиляції;

$P_{осв}$ – потужність системи освітлення;

$A_{вент}$ – робота припливного вентилятора;

Вихідні величини

$t_{нов}$ – температура повітря в теплиці;

$t_{грнт}$ – температура ґрунту в теплиці;

$d_{нов}$ – вологість повітря в теплиці;

$d_{грнт}$ – вологість ґрунту в теплиці;

$Q_{нов}$ – концентрація CO₂ у повітрі теплиці;

$B_{вн}$ – освітленість у теплиці;

Збурення

$t_{зовн}$ – температура зовнішнього повітря;

$d_{зовн}$ – вологість зовнішнього повітря;

$B_{прир}$ – природна освітленість;

$s_{вітру}$ – швидкість вітру;

$Q_{зовн}$ – концентрація CO₂ у зовнішньому повітрі

T – час доби;

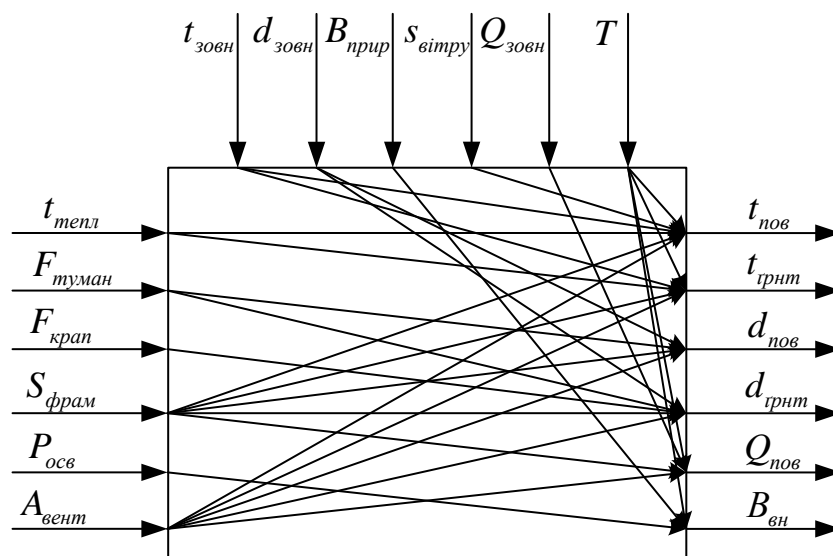


Рис. 1.3 Структурна схема взаємозв'язків між параметрами об'єкта керування

Висновки до розділу 1

У розділі 1 проведено комплексний аналіз об'єкта автоматизації – системи мікроклімату промислової теплиці, призначеної для вирощування солодкого перцю. Визначено основні параметри мікроклімату, що впливають на продуктивність і здоровий ріст культури - температуру, вологість, концентрацію CO₂ та освітленість. Складена технологічна карта, проведено розрахунок теплового та матеріального балансу процесу, а також виконано класифікацію параметрів об'єкта керування на вхідні, вихідні та збурення.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Аналіз характеристик взаємозв'язку між параметрами об'єкта керування

Детально проаналізуємо структурну схему взаємозв'язків між параметрами об'єкта керування, зображену на рис. 1.3:

Температура повітря $t_{нов}$ та ґрунту $t_{грнт}$ всередині теплиці значною мірою визначається зовнішніми збурюючими чинниками, зокрема температурою повітря навколишнього середовища $t_{зовн}$, часом доби T та швидкістю вітру $s_{вітру}$. Слід зауважити, що температура повітря в теплиці, зазвичай, не опускається нижче температури зовнішнього середовища $t_{нов} \geq t_{зовн}$.

У випадку, коли температура повітря або ґрунту є нижчою за оптимальну для вирощування рослин, корекція цих параметрів здійснюється шляхом регулювання подачі теплоносія в системі опалення, який володіє певною температурою $t_{менл}$. За надлишкових температур, особливо влітку, охолодження повітря в теплиці незначною мірою досягається за рахунок організованої вентиляції, яка реалізується за допомогою роботи припливного вентилятора $A_{вент}$ та зміною ступеня відкриття вентиляційних фрамуг $S_{фрам}$.

Вологість повітря $d_{нов}$ в теплиці формується під впливом комплексу зовнішніх чинників, зокрема температури й вологості навколишнього середовища, а також часу доби. Вплив на вологість здійснюється за допомогою системи туманоутворення $F_{туман}$, яка запускається при зниженні рівня вологості до критичних значень. При надмірній вологості для її зниження використовується система вентиляції (здійснюється провітрювання).

Вологість ґрунту $d_{\text{ґрунт}}$ в теплиці залежить від аналогічних зовнішніх чинників, проте основним засобом її регулювання виступає система крапельного поливу $F_{\text{крап}}$, що подає воду рослинам безпосередньо під корінь.

На концентрацію вуглекислого газу (CO_2) в теплиці значний вплив має час доби T . У світлу частину доби, внаслідок інтенсивного фотосинтезу, рослини активно поглинають CO_2 із повітря, що призводить до зниження його концентрації в замкненому об'ємі теплиці. У темну пору доби фотосинтетична активність припиняється, натомість переважає процес дихання рослин, під час якого CO_2 виділяється в повітря, спричиняючи поступове зростання його концентрації.

Для підтримки оптимального рівня CO_2 та забезпечення повітрообміну використовується система вентиляції. Робота припливного вентилятора $A_{\text{вент}}$ в поєднанні з відкриттям фрамуг $S_{\text{фрам}}$ дозволяє стабілізувати концентрацію CO_2 до рівнів концентрації CO_2 у зовнішньому повітрі $Q_{\text{зовн}}$.

У холодні пори року, через недостатню кількість природного освітлення $B_{\text{прир}}$, відбувається пригнічення фотосинтезу і, як наслідок, зменшення ефективності вирощування сільськогосподарських культур. Для компенсації недостатнього природного освітлення $B_{\text{прир}}$ використовується система освітлення, потужність $P_{\text{осв}}$ якої є вирішальним фактором у забезпеченні необхідного освітлення $B_{\text{вн}}$ всередині теплиці.

2.2. Обґрунтування та вибір координат регулювання, вимірювання, контролю, сигналізації та блокування

Забезпечення стабільного мікроклімату в тепличному середовищі вимагає безперервного моніторингу технологічних параметрів, які відображають основні характеристики даного середовища [11]. Як було розглянуто у підрозділі 1.1, до основних параметрів, що формують мікроклімат і підлягають вимірюванню та

контролю в тепличних комплексах належать температура і вологість повітря, ґрунту, освітленість і рівень вуглекислого газу.

На основі аналізу джерел [1-4, 7, 8, 10, 11] було визначено доцільність виділення наступних координат регулювання, кожна з яких реалізується у вигляді окремого контуру:

- Контур регулювання температури повітря. Забезпечення температурного режиму в межах, допустимих для культури значень є критичним для фізіологічної активності рослин, зокрема фотосинтезу та дихання [1, 3, 10].
- Контур регулювання температури ґрунту. Температура ґрунту впливає на поглинання води і мінеральних речовин, особливо в зимовий період [1, 10].
- Контур регулювання вологості повітря. Вологість повітря визначає інтенсивність транспірації, що напряму пов'язано з водним балансом рослин і ефективністю газообміну [4, 10, 11].
- Контур регулювання вологості ґрунту. Автоматизоване регулювання цього параметру забезпечує оптимальну вологість кореневої системи і дозволяє уникнути пересушування або надмірного зволоження. Обидва цих випадки є критичними для здоров'я рослин [2, 7, 11].
- Контур регулювання освітлення. В умовах недостатнього природного освітлення, або сильної хмарності, пригнічується фотосинтез, що впливає на якісний показник росту [3, 4, 8].
- Контур регулювання рівня вуглекислого газу. Концентрація CO_2 впливає на швидкість фотосинтезу. Контроль за цим параметром часто реалізується через системи вентиляції, або підживлення (для створення штучного надлишку CO_2) [4, 10, 11]. Окрім цього швидкість вітру визначає доцільність та ступінь відкриття фрамуг, адже відкриття фрамуг при сильному вітрі може призвести до їх пошкодження, або виведення з ладу [1, 10].
- Контур сигналізації перепаду тиску на фільтрі притічного вентилятора.

Цей контур виконує контроль ступеня забрудненості фільтра шляхом вимірювання перепаду тиску. Сигналізація вмикається при перевищенні допустимого перепаду тиску, що вказує на потребу в обслуговуванні фільтра.

2.3. Визначення функціональних ознак системи автоматизації

Таблиця 2.1

Функціональні ознаки автоматизації

№ п/п	Обсяг автомати- зації Назва параметра	Показ	Реєстрація	Підсумовування	Усереднення	Визначення відхилення	Розрахунок ТЕП	Оптимізація	Сигналізація	Дискретне керування	Захист	Блокування	Автоматичне регулювання
1.	Температура повітря в теплиці	+	+						+				+
2.	Температура ґрунту в теплиці	+	+						+				+
3.	Вологість повітря в теплиці	+	+						+	+			
4.	Вологість ґрунту в теплиці	+	+						+				+

5.	Концентрація CO ₂ в теплиці	+	+						+	+			
6.	Освітленість в теплиці	+								+			
7.	Швидкість вітру										+		

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8.	Перепад тиску на фільтрі притічного вентилятора							+					

2.4. Порівняльний аналіз існуючих схем керування та розроблення оптимальної функціональної схеми автоматизації спрощеним способом

На основі детального аналізу літературних джерел встановлено, що існує декілька підходів до реалізації системи автоматизованого керування мікрокліматом тепличних господарств, що відрізняються структурою, функціональністю та масштабами впровадження.

У роботі [2] запропоновано систему автоматизованого керування мікрокліматом, спроектовану з акцентом на мінімізацію вартості реалізації та простоту експлуатації. В її основі лежить платформа Arduino Nano, до якої підключено набір датчиків для вимірювання різноманітних параметрів навколишнього середовища, а також виконавчі пристрої. Схему підключення компонентів взято з [2] та наведено на рис. 2.1.

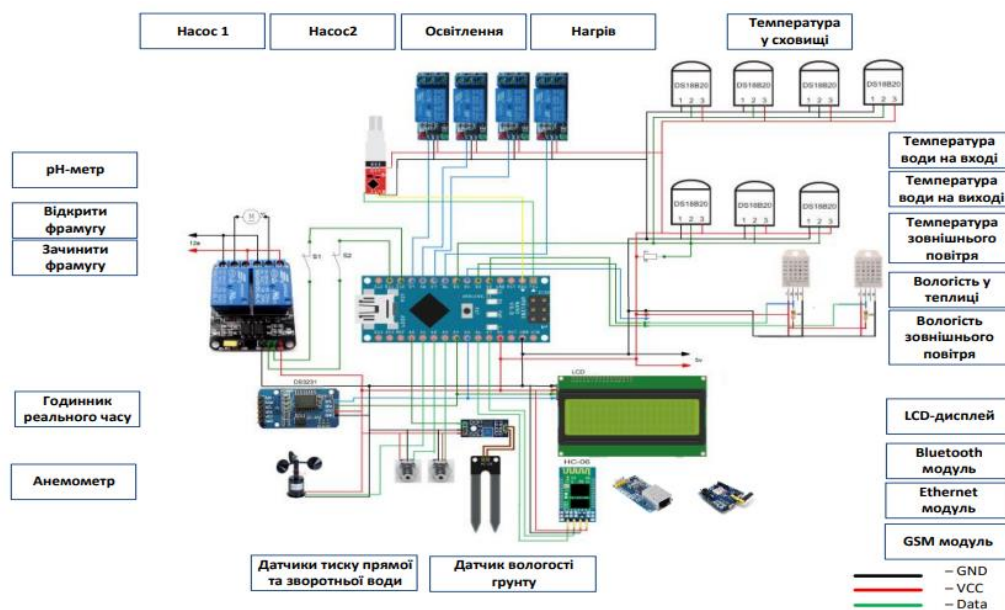


Рис. 2.1 Структурна схема системи управління мікрокліматом, реалізованої на платформі Arduino Nano [2]

До основних переваг такого підходу належать: низька вартість впровадження, доступність апаратної частини та можливість інтерактивного управління через бездротові інтерфейси (Bluetooth або Wi-Fi) за допомогою сторонніх пристроїв.

Водночас, до недоліків запропонованої системи слід віднести обмежений ступінь автоматизації – більшість параметрів лише вимірюються, тоді як регулювання здійснюється дискретно. Крім того, функціональні можливості Arduino Nano є обмеженими, у порівнянні зі спеціалізованими промисловими логічними контролерами, як щодо обчислювальної потужності, так і за кількістю доступних входів/виходів, що робить її непридатною для використання у теплицях середніх і великих масштабів. Таким чином, представлена система може вважатися доцільною для використання у малогабаритних домашніх теплицях, але є недостатньо ефективною і обмеженою для промислових умов.

Також, цікавий варіант автоматизації розглянуто у роботі [3], де запропоновано функціональну реалізацію автоматизованої системи керування мікрокліматом у промисловій теплиці площею до 1500 м³, яка об'єднує в єдиний керований процес декілька інженерних підсистем – опалення, вентиляцію, зволоження повітря та аварійну сигналізацію.

Перевагою запропонованої системи є її простота та надійність у експлуатації (за рахунок використання електроконтактних термометрів та двопозиційних водорегуляторів), локальний фокус регулювання та потенційна енергоефективність. Серед недоліків системи слід відзначити обмежену точність регулювання, зумовлену відсутністю ПЛК або аналогових регуляторів з ПІД законом, обмежену кількість керованих і вимірюваних параметрів, а також сумнівну енерго- та, відповідно, економічну ефективність, що пов'язана з використанням двопозиційного регулювання в інерційних процесах, таких як керування температурою та вологістю повітря.

Враховуючи результати аналізу існуючих схем автоматизації мікроклімату тепличних господарств, було сформовано власне технічне рішення у вигляді спрощеної функціональної схеми системи автоматизованого контролю для теплиці промислового типу, зображеної на рисунку 2.2.

Запропонована схема складається з 7 контурів, які забезпечують комплексне регулювання ключових параметрів, що у своїй сукупності формують задані умови мікроклімату і підтримують їх на визначених рівнях.

Контур 1. Регулювання температури повітря в теплиці.

Контур 2. Регулювання температури ґрунту в теплиці.

Контур 3. Регулювання вологості повітря в теплиці.

Контур 4. Регулювання вологості ґрунту в теплиці.

Контур 5. Регулювання концентрації CO₂ шляхом провітрювання.

Контур 6. Регулювання освітленості в теплиці.

Контур 7. Сигналізація стану забрудненості фільтра притічної вентиляції.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано порівняльний аналіз існуючих схем керування мікрокліматом тепличних господарств та обґрунтовано вибір основних координат регулювання. В таблиці 2.1 систематизовані функціональні ознаки автоматизації та визначено обсяг автоматизації кожного технологічного параметру. Підсумком розділу стала розробка оптимальної спрощеної функціональної схеми

автоматизації, зображеної на рисунку 2.2, яка враховує недоліки попередньо проаналізованих варіантів і забезпечує найбільш ефективне керування системою контролю клімату.

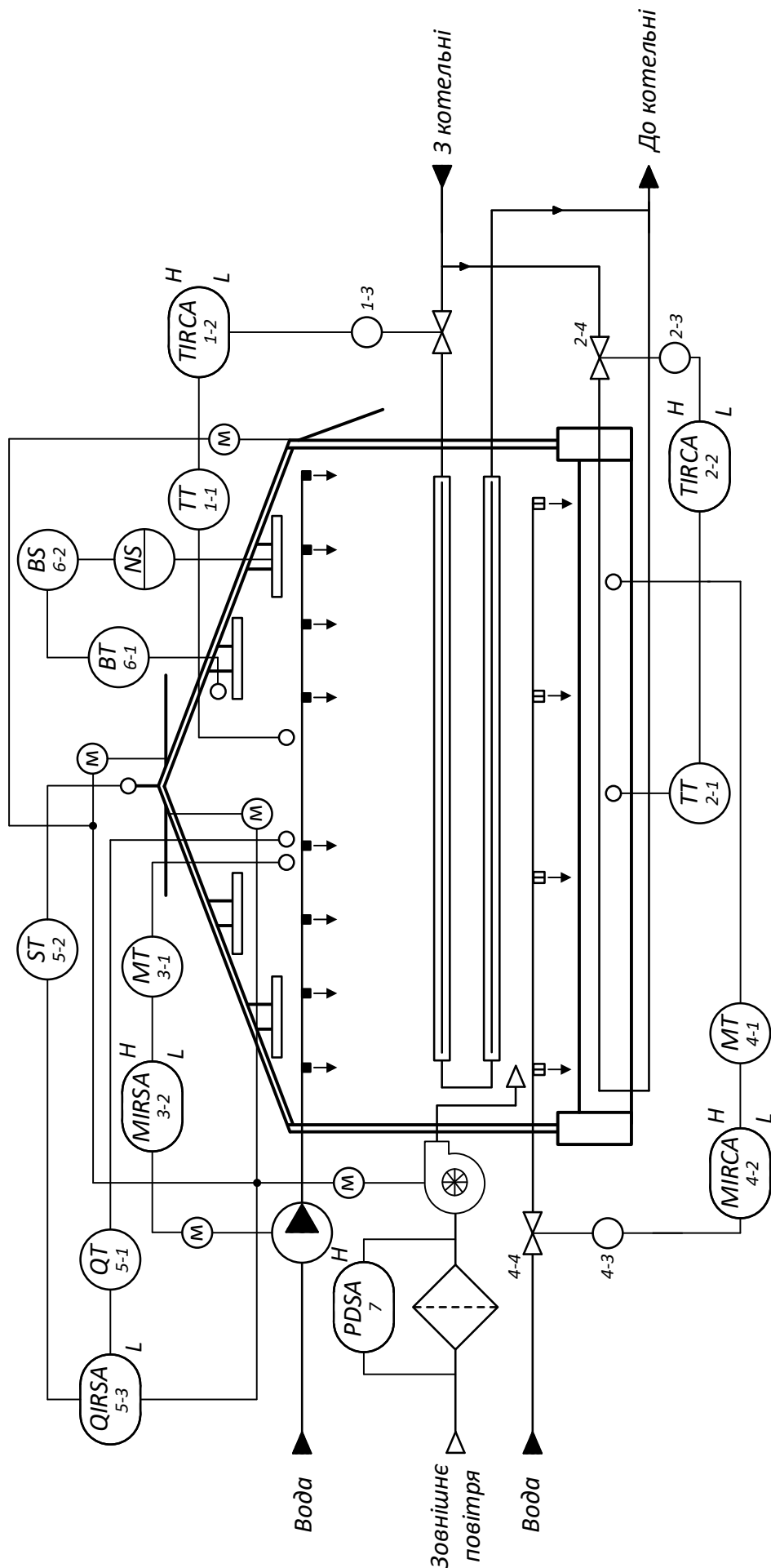


Рис. 2.2 Функціональна схема автоматизації системи контролю клімату в теплиці промислового типу, яка виконана спрощеним способом

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1. Вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми

3.1.1. Обґрунтування вибору вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

Контур 1. Регулювання температури повітря;

Вимірювання температури повітря в теплиці виконується за допомогою комбінованого вимірювального перетворювача температури та відносної вологості навколишнього середовища Schneider Electric, модель TM1SHTCC4, з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 mA.

Сигнал з вимірювального перетворювача надходить на аналоговий вхід ПЛК, який, відповідно до програми та завдання, формує регулюючу дію у вигляді вихідного аналогового сигналу на соленоїд VM024D (018Z0290) пропорційного електромагнітного клапана DANFOSS EV260B, з вхідним сигналом 4-20 mA, який керує надходженням гарячого теплоносія в систему опалення.

Контур 2. Регулювання температури ґрунту;

Температура ґрунту вимірюється за допомогою термоперетворювача Danfoss MBT 3560 з уніфікованим аналоговим вихідним сигналом 4-20mA, що надходить на аналоговий вхід ПЛК, де він обробляється згідно алгоритмів.

ПЛК в свою чергу формує регулюючу дію, яка надходить на соленоїд VM024D (018Z0290) пропорційного електромагнітного клапана DANFOSS EV260B у вигляді вхідного уніфікованого аналогового сигналу 4-20 mA. Останній керує надходженням гарячого теплоносія в систему опалення ґрунту.

Контур 3. Регулювання вологості повітря;

Вимірювання відносної вологості повітря в теплиці відбувається за допомогою комбінованого вимірювального перетворювача температури та відносної вологості навколишнього середовища, від компанії Schneider Electric, модель TM1SHTCC4, з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 mA.

Сигнал з вимірювального перетворювача надходить на аналоговий вхід ПЛК, який його обробляє, перетворює, і за заданим алгоритмом формує регулюючу дію

у вигляді дискретного вихідного сигналу, що подається на котушку контактора TeSys Deca LC1D LC1D123BL, який в свою чергу запускає трифазний електродвигун Sati M20901504B14 1.5 кВт, що приводить в дію насос високого тиску HAWK FOG 0810CR системи туманоутворення.

Контур 4. Регулювання вологості ґрунту;

Вологість ґрунту вимірюється за допомогою вимірювального перетворювача вологості фірми RIXEN MTR-731 з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 mA. Вихідний сигнал надходить на аналогові входи ПЛК, який, згідно програми функціонування, формує регулюючу дію у вигляді вихідного аналогового сигналу 4-20 mA, яка надходить на соленоїд VM024D (018Z0290) пропорційного електромагнітного клапана DANFOSS EV260B, який керує подачею води в системі крапельного поливу.

Контур 5. Регулювання концентрації CO₂ в повітрі;

Вимірювання концентрації CO₂ в теплиці відбувається за допомогою вимірювального перетворювача Comet T5140 з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 mA. ПЛК отримує даний сигнал на аналоговому вході, згідно алгоритмів обробляє його, і формує регулюючу дію на контактор Schneider TeSys Deca LC1D LC1D123BL, який запускає трифазний електродвигун відцентрового вентилятора фірми Вентс ВЦУ 4Е 250х140, продуктивністю 2000 м³/год і номінальною потужністю 570 Вт, що забезпечує подачу свіжого повітря в теплицю.

Для випуску відпрацьованого повітря, використовуються фрамуги вгорі і збоку теплиці. Фрамуги відкриваються водночас з запуском відцентрового вентилятора, створюючи рівномірну міграцію повітря. Ступінь відкриття фрамуг залежить від швидкості вітру. Вимірювальний перетворювач швидкості вітру PSE-FST-200-201-I з вихідним уніфікованим сигналом 4-20 mA передає вимірювані дані на аналоговий вхід ПЛК, який, в свою чергу, формує регулюючу дію у вигляді дискретного сигналу на реверсивні контактори Schneider TeSys K LP2K LP2K0610BD на кожному з трьох асинхронних трифазних електродвигунів AIP 71 A4 Л 0,55 кВт 1500об/хв, що приводять в рух черв'ячний редуктор з механізмом відкриття/закриття фрамуг. Для контролю ступеня відкриття фрамуг

використовуються індуктивні давачі положення OMRON TL-Q5MB1-R 2M PNP NO (нормально відкриті), що розташовані так, щоб надавати PLC інформацію про актуальне положення фрамуги (0%, 15%, 25%, 50%, 100%, де 0% - повністю закриті фрамуги), що визначається методом підрахунку обертів валу редуктора.

Контур 6. Регулювання освітленості;

Вимірювальний перетворювач освітленості RIXEN LXT-401A з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 mA розміщується всередині теплиці, над засобами освітлення (щоб виключити їхній вплив на вимірювання). Сигнал надходить на аналоговий вхід ПЛК, який обробляє отриманий сигнал і при недостатній природній освітленості формує керуючу дію у вигляді дискретного сигналу на контактор Schneider TeSys Green LC1D50ABBE, що комутує систему освітлення.

Контур 7. Сигналізація стану забрудненості фільтра притічної вентиляції;

Між входом і виходом фільтра, що розташований перед припливним відцентровим спіральним вентилятором, встановлено реле перепаду тиску Thermokon PS500. При перевищенні значення, що свідчить про забруднення або несправність фільтра, реле замикає лінію +24 В на дискретний вхід ПЛК, формуючи дискретний вхідний сигнал. Стан фільтра відображено на людино-машинному інтерфейсі.

3.1.2. Технічні характеристики вибраних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

Вимірювальний перетворювач вологості і температури Schneider Electric (TM1SHTCC4) [13].

Комбінований вимірювальний перетворювач Schneider Electric TM1SHTCC4 призначений для застосування в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВіК). Живиться напругою 9...28 В AC або 9...40 В DC, максимальне споживання – 50 mA. Вихідний сигнал уніфікований 4...20 mA.

Діапазони вимірювання:

- Температура -40...+60°C +/- 1°C; Вологість 0-100% +/- 3 % RH;

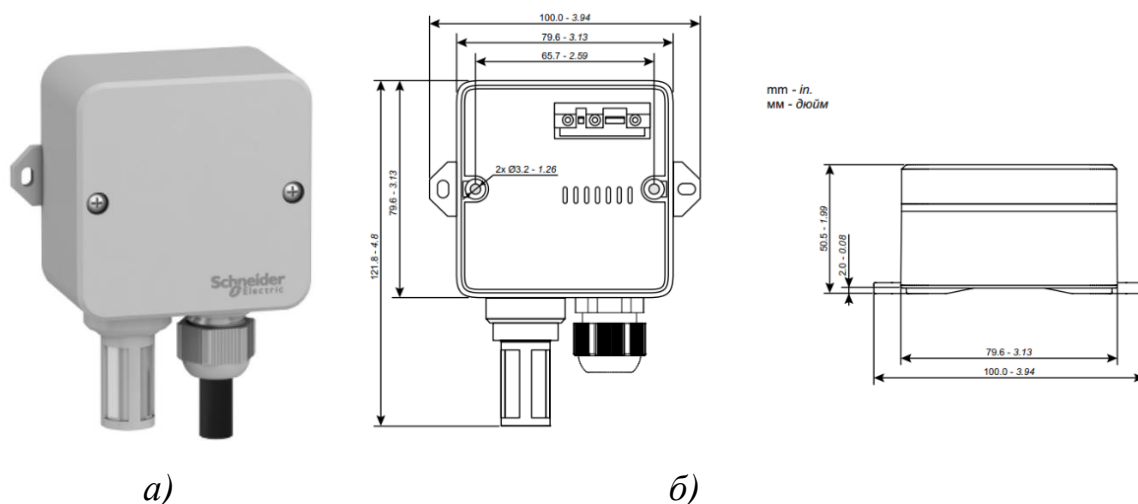


Рис. 3.1 Вимірювальний перетворювач вологості і температури Schneider Electric (TM1SHTCC4). Загальний вигляд (а) та габаритні розміри (б)

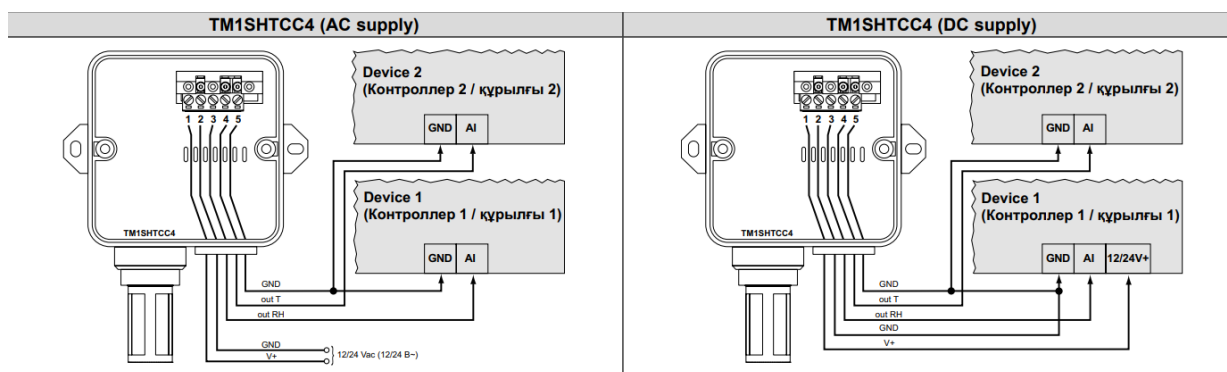


Рис. 3.2 Вимірювальний перетворювач вологості і температури Schneider Electric (TM1SHTCC4). Варіанти електричного під'єднання та позначення виводів

Вимірювальний перетворювач температури Danfoss MBT3560 [14].

МБТ 3560 компактний промисловий термоперетворювач опору типу Pt1000 з вбудованим нормуючим перетворювачем, розроблений для роботи в суворих умовах.

Корпус виготовлено з нержавіючої сталі марки AISI 316. Володіє виходом 4-20 мА, працює в діапазоні температур $-50...+200^{\circ}\text{C}$, з точністю $\leq \pm 0,5\%$ (максимально $\leq \pm 1\%$). Споживання – до 30 мА в мережі 10-30 В DC.



Рис. 3.3 Термоперетворювач Danfoss MBT 3560. Загальний вигляд

EN 175301-803	AMP Econoseal J series (male)	IEC 947-5-2 M12 x 1	Flying leads	2 m screened cable
Enclosure				
IP65	IP67	IP67	IP67	IP67
Materials				
Glass filled polyamid, PA 6.6	Glass filled polyamid, PA 6.6	Glass filled polyamid, PA 6.6	Glass filled polyamid, PA 6.6	PUR
Electrical connection, 4 – 20 mA output (2 wire)				
Pin 1: +supply Pin 2: +supply Pin 3: Not used Earth: Not connected to MBT housing	Pin 1: +supply Pin 2: +supply Pin 3: Not used	Pin 1: +supply Pin 2: Not used Pin 3: Not used Pin 4: +supply	Red wire: +supply Black wire: +supply	Red wire: +supply White wire: +supply Red/black wire: Not used Screen: Not connected to MBT housing
Electrical connection, Ratio metric (3-wire) 10 – 90%				
Pin 1: +supply Pin 2: +supply Pin 3: Output Earth: Not connected to MBT housing	Pin 1: +supply Pin 2: +supply Pin 3: Output	Pin 1: +supply Pin 2: not used Pin 3: Output Pin 4: +supply	Red wire: +supply Black wire: +supply Blue wire: Output	Red wire: +supply White wire: +supply Red/ Black wire: Output Screen: Not connected to MBT housing

Рис. 3.4 Термоперетворювач Danfoss MBT 3560. Варіанти електричного під'єднання

Вимірювальний перетворювач вологості ґрунту RIXEN MTR-731 [15].

RIXEN MTR-731 призначений для вимірювання вологості ґрунту, піску, тирси, целюлози, компосту, порошку, будівельних матеріалів та подальшого постійного контролю. Він виконаний в водонепроникному корпусі з нержавіючої сталі, що відповідає стандарту IP65. Його перевагами є легкий монтаж, калібрування і висока надійність.

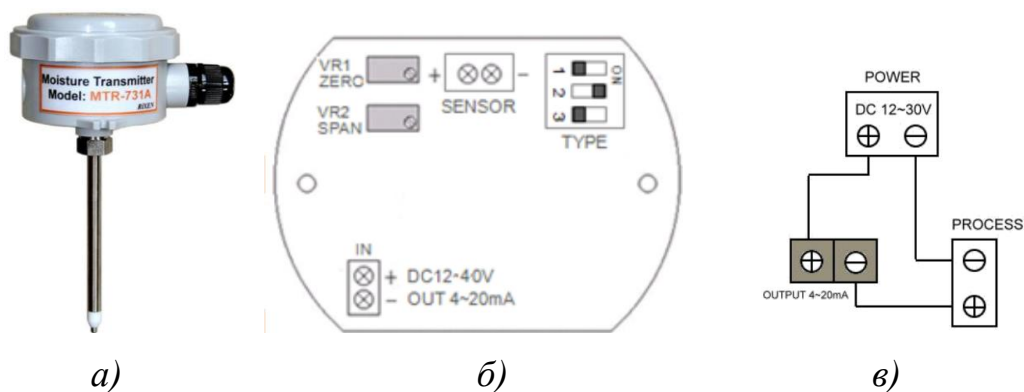


Рис. 3.5 Вимірювальний перетворювач вологості ґрунту RIXEN MTR-731. Загальний вигляд (а), вигляд комутаційної коробки (б), та схема електричного під'єднання (в)

RIXEN MTR-731 забезпечує вимірювання в діапазоні 0-100% з похибкою $\pm 2\%$ при 25°C , має аналоговий вихідний сигнал 4-20 mA та живиться від джерела постійного струму з напругою 12...40 В DC.

Вимірювальний перетворювач концентрації CO_2 Comet T5150 [16].

Універсальний вимірювальний перетворювач концентрації CO_2 Comet T5140 призначений для застосування в системах кліматичного контролю та автоматизації з метою безперервного моніторингу вмісту CO_2 в повітрі. Пристрій має вбудований LED-дисплей (за потреби вимикається) та світлодіодний трьохколірний індикатор, для візуального відображення рівня концентрації.

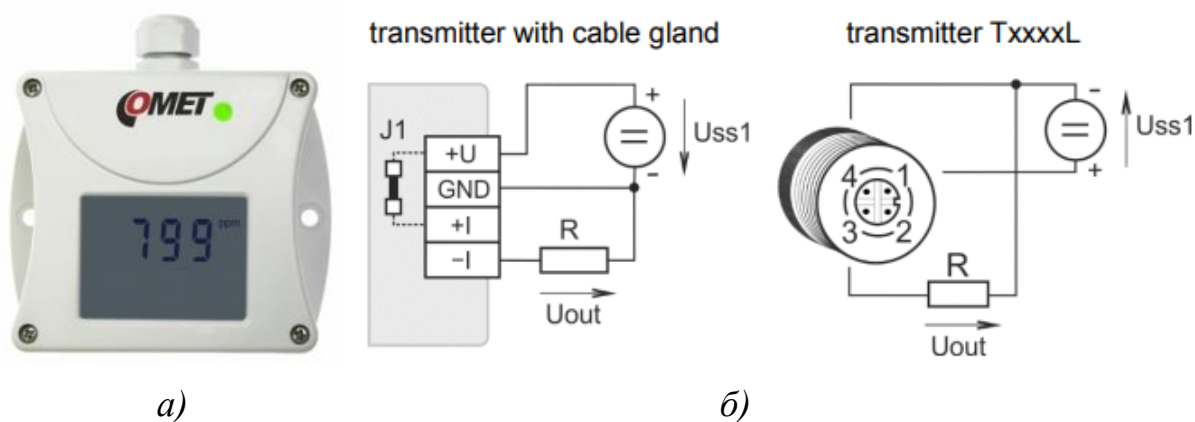


Рис. 3.6 Вимірювальний перетворювач концентрації CO_2 Comet T5150. Загальний вигляд (а), та схема електричного під'єднання (б)

Діапазон вимірювання від 0 до 2000 rpm, максимальна похибка ± 50 rpm, роздільна здатність 1 rpm, Пристрій володіє аналоговим вихідним сигналом 4-20 mA та живиться постійною напругою, в межах 9...30V DC, що забезпечує гнучкість і інтегрованість в системи, побудовані на ПЛК.

Вимірювальний перетворювач швидкості вітру PCE-FST-200-201-I [17].

Вимірювальний перетворювач швидкості вітру PCE-FST-200-201-I виконаний у вигляді чашкового анемометра. Завдяки високій чутливості він здатен реєструвати навіть незначні рухи повітря зі швидкістю менш ніж 0,5 м/с, з загальним діапазоном до 50 м/с, забезпечуючи вихідний сигнал у форматі 4-20 mA, що дозволяє використовувати його у поєднанні з ПЛК. Похибка вимірювання складає ± 0.5 м/с (< 5 м/с).

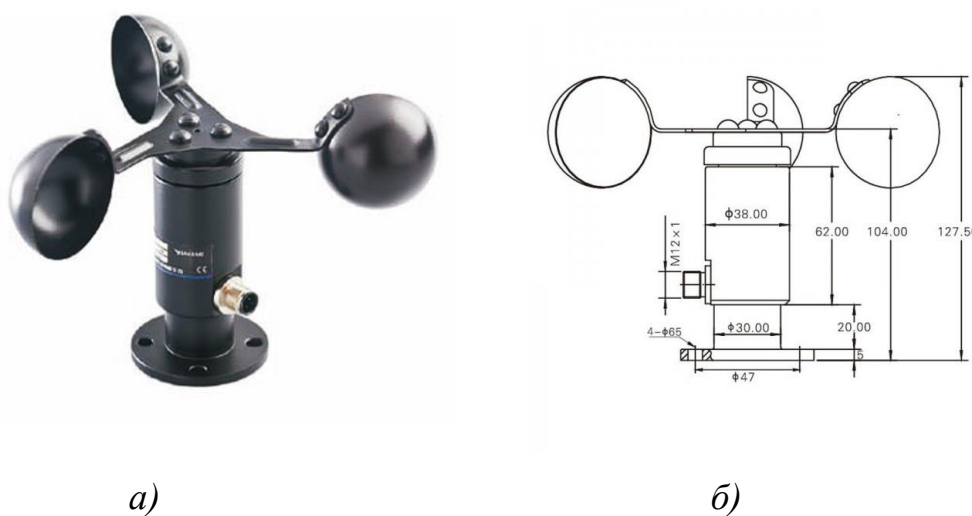


Рис. 3.7 Вимірювальний перетворювач швидкості вітру PCE-FST-200-201-I. Загальний вигляд (а), та габаритні розміри (б)

Корпус виконаний із корозійностійкого сплаву, що гарантує стійкість до корозії та тривалу експлуатацію в агресивних умовах довкілля. Конструкція передбачає герметизацію чутливого елемента, яка запобігає проникненню води та пилу, забезпечуючи надійність роботи у складних промислових чи атмосферних умовах. Клас захисту – IP65. Живиться від напруги 12...36 V DC.

Індуктивний давач положення OMRON TL-Q5MC1 [19].

OMRON TL-Q5MB1-R2M – це безконтактний індуктивний давач наближення від японської компанії OMRON, призначений для виявлення металевих об'єктів у системах автоматизації та на верстатах з числовим програмним керуванням.

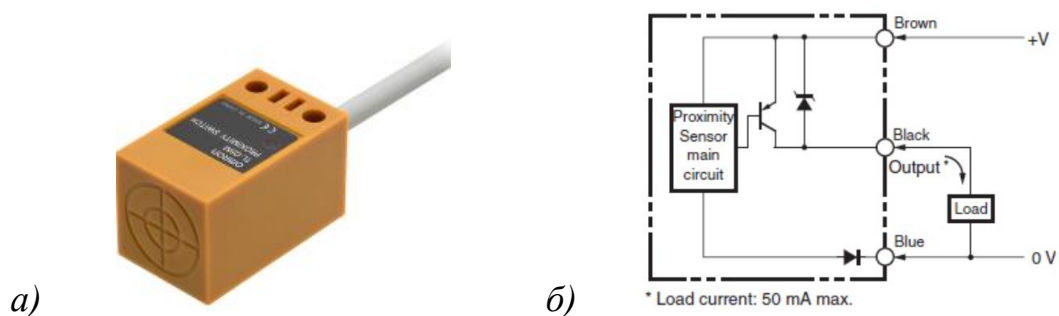


Рис. 3.11 Індуктивний давач положення OMRON TL-Q5MB1-R 2M PNP NO. Загальний вигляд (а) та схема електричного під'єднання (б)

Давач має PNP-вихід з нормально відкритим (NO) контактом, що забезпечує подачу позитивного сигналу, наприклад +24 В DC, на дискретний вхід ПЛК у момент виявлення об'єкта. Також, на ньому присутня світлодіодна індикація червоного кольору для візуального контролю стану спрацювання.

Живлення пристрою – 12...24 В DC, дистанція спрацювання до об'єкта - 5 mm \pm 10%, частота відгуку – 500 Гц, час відгуку близько 5 мс.

Насос високого тиску HAWK FOG 0810CR [20].

HAWK FOG 0810CR належить до серії FOG і призначений для роботи в системах дрібнодисперсного зрошення та мийних установках з невеликою витратою води. Пристрій функціонує при максимальному тиску 100 бар (1450 PSI) і температурі води до 65°C, що забезпечує його ефективність у промислових та побутових умовах.

Продуктивність в діапазоні 8 - 9,6 л, залежить від вибраного електродвигуна. Рекомендованим є двигун з потужністю 1.5 кВт та фланцем В14.



Рис. 3.12 Насос високого тиску HAWK FOG 0810CR. Загальний вигляд

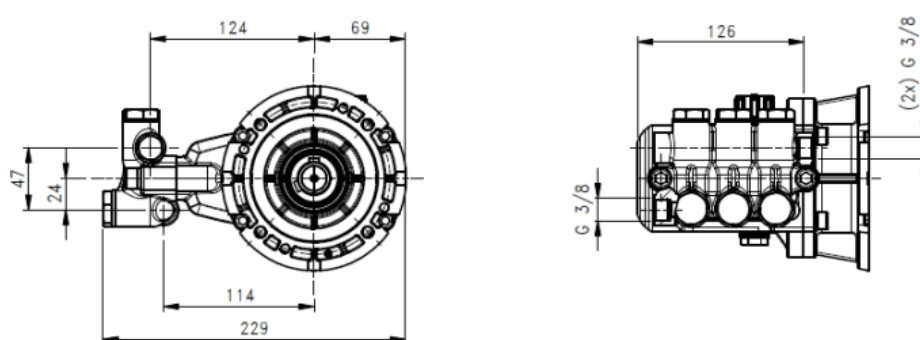
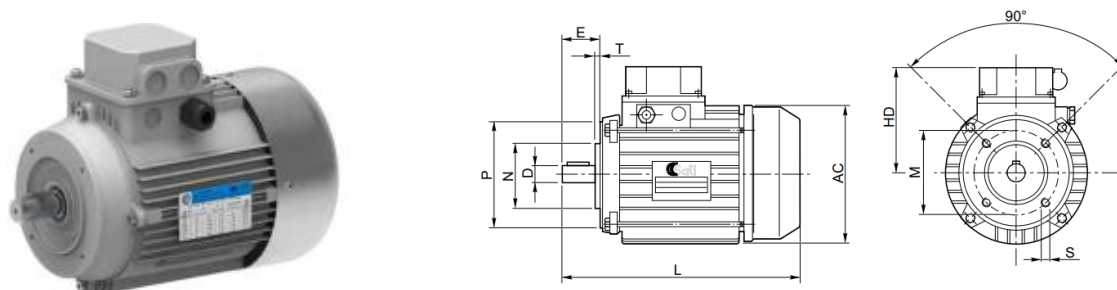


Рис. 3.13 Насос високого тиску HAWK FOG 0810CR. Габаритні розміри

Електродвигун Sati 90L M20901504B14 [21].

Трифазний електродвигун Sati M20901504B14 потужністю 1,5 кВт з фланцем типу B14 є асинхронним двигуном змінного струму, що працює від трифазної мережі 230/400В 50 Гц. Його номінальний струм становить 3,31 А, а частота обертання – 1500 об/хв, що робить його оптимальним варіантом для використання з вибраним вище насосом системи туманоутворення.



Тип/ Type	B3							B5					B14					B3 / B5 / B14		
	H	A	AA	AD	B	C	K	M	N	P	T	S	N	M	P	T	S	HD	AC	L
90L	90	140	175	229	125	56	10X13	Ø165	Ø130	Ø200	3,5	Ø12	Ø95	Ø115	Ø140	3	M8	139	Ø183	337/367

Рис. 3.14 Електродвигун Sati M20901504B14. Загальний вигляд та габаритні розміри

Електродвигун АІР 71 А4 Л [22].

Трифазний асинхронний електродвигун серії АІР, модель АІР 71 А4 Л, виробництва ТОВ «Промелектро-Харків», призначений для роботи в трифазній мережі змінного струму напругою 230/400 В і частотою 50 Гц. Номінальна потужність становить 0,55 кВт, а номінальна частота обертів – 1500 об/хв.

Він широко застосовується для приводу різноманітного побутового та промислового обладнання – деревообробних верстатів, насосів, бетономішалок, вентиляторів, а у поєднанні з редуктором – для відкриття воріт, чи переміщення інших конструкцій.

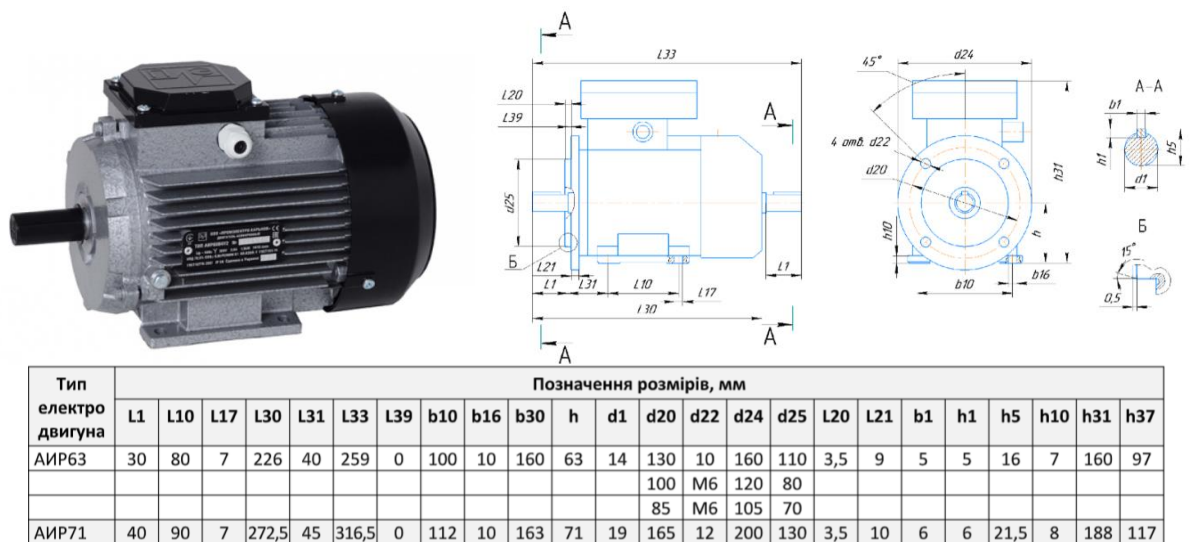


Рис. 3.15 Електродвигун типу АІР 71. Загальний вигляд, та габаритні розміри

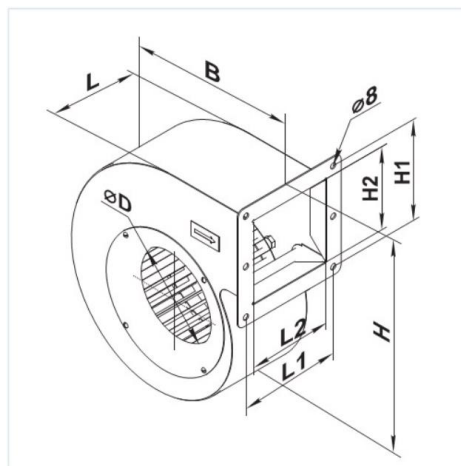
Відцентровий вентилятор Вентс ВЦУ 4Е 250x140 [23].

Вентилятор Вентс ВЦУ 4Е є однофазним відцентровим вентилятором із вбудованим електродвигуном, розміщеним у спіральному корпусі. Він призначений для роботи у припливних і витяжних системах вентиляції різних типів приміщень.

Максимальна продуктивність вентилятора становить 2000 м³/год, живлення від мережі 230 В при частоті 50 Гц. Максимальний споживаний струм – 2,48 А, потужність – 570 Вт.



а)



б)

Розміри	D	B	H	H1	H2	L	L1	L2	M	P
мм	250	410	485	230	191	205	230	197	270	238

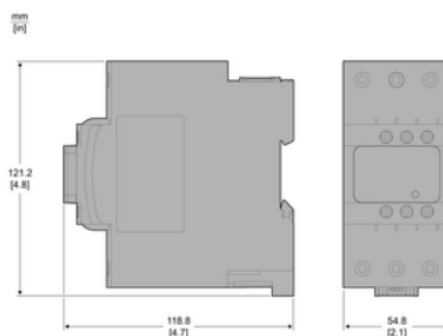
Рис. 3.16 Вентилятор Вентс ВЦУ 4Е. Загальний вигляд (а) та габаритні розміри (б)

Контактор Schneider TeSys Green LC1D50ABBE [24].

Контактори серії TeSys Deca від Schneider Electric є надійними та компактними рішеннями для комутації різних типів навантаження.



а)



б)

Рис. 3.17 Контактор Schneider TeSys Green LC1D50ABBE. Загальний вигляд (а) та габаритні розміри (б)

Контактор LC1D50ABBE серії TeSys Green D50 призначений для комутації потужного резистивного навантаження та керування електродвигунами. Він має 3 полюси, та керується напругою 24 В DC, що дозволяє інтегрувати його в системи

автоматизації. Робоча напруга складає до 690 В, а номінальний робочий струм – 80 А при АС-1, та 50 А при АС-3 та АС-3е.

Реверс-контактор Schneider TeSys К LP2K LP2K0610BD [25].

Schneider Electric LP2K0610BD належить до серії TeSys К — компактних мініатюрних контакторів, призначених для керування двигунами та іншими навантаженнями в промислових і побутових системах.

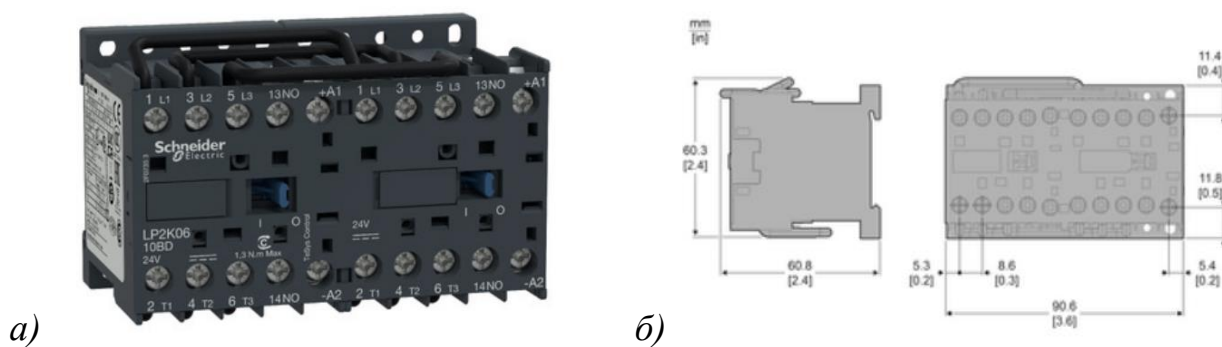


Рис. 3.18 Контактор Schneider TeSys К LP2K LP2K0610BD. Загальний вигляд (а) та габаритні розміри (б)

Даний контактор відноситься до типу реверсивних контакторів з попередньо зібраною шинною перемичкою для зміни напрямку обертання двигуна. Володіє 3 полюсами, здатен комутувати струми до 6А, при потужності двигуна до 2,2 кВт при 400В. Котушка керування 24 В DC.

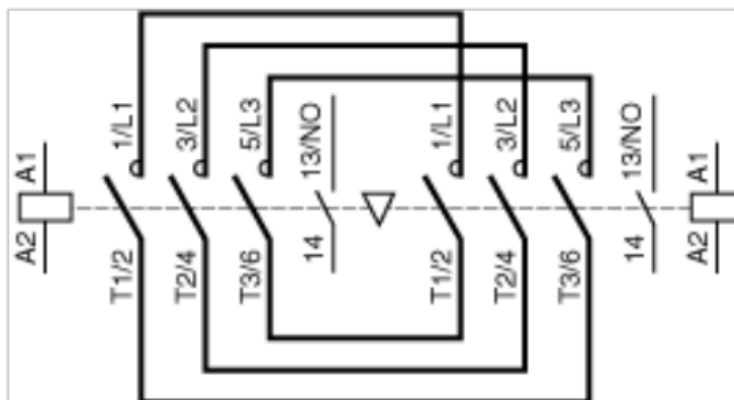


Рис. 3.19 Контактор Schneider TeSys К LP2K LP2K0610BD. Схема полюсів

Контактор Schneider TeSys Deca LC1D LC1D123BL [26].

TeSys Deca LC1D LC1D123BL – це трьохполюсний контактор, розроблений компанією Schneider Electric для комутації різноманітними електричними навантаженнями з номінальним струмом до 14А при 400В, та потужністю до 5,5 кВт. Напруга керування 24 В DC. У даній роботі використовується для комутації привода насоса високого тиску.

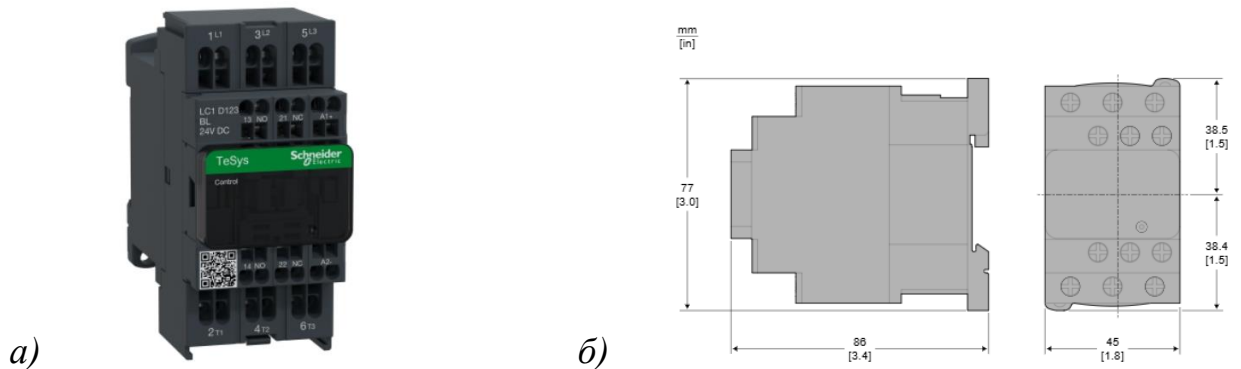


Рис. 3.20 Контактор Schneider TeSys Deca LC1D LC1D123BL. Загальний вигляд (а) та габаритні розміри (б)

Пропорційний електромагнітний клапан EV260B [27].

Пропорційні нормально закриті електромагнітні клапани типу EV260B виробництва компанії Danfoss з електромагнітною котушкою призначені для плавного регулювання витрати речовин в промисловості.

Діаметр клапана – 20 мм, при цьому пропускна здатність 5 м³/год, максимальний робочий тиск – 10 bar. Діапазон робочих температур -10...80°C.

Для роботи з клапаном використовується котушка BL024D (018Z0291) з перетворювачем. Напруга живлення 21-30В, потужність 23 Вт, керуючий сигнал 4-20 mA.

Метод підключення наступний: котушка клапана має три виводи. Середній вивід використовується для заземлення. Два інших – для підключення фази і нейтралі джерела живлення. Контакти +I та -I слугують для підключення керуючого сигналу у форматі 4-20 mA.



Рис. 3.21 Пропорційний електромагнітний клапан EV260B з котушкою BL024D 018Z0291. Загальний вигляд клапана (а), та котушки (б)

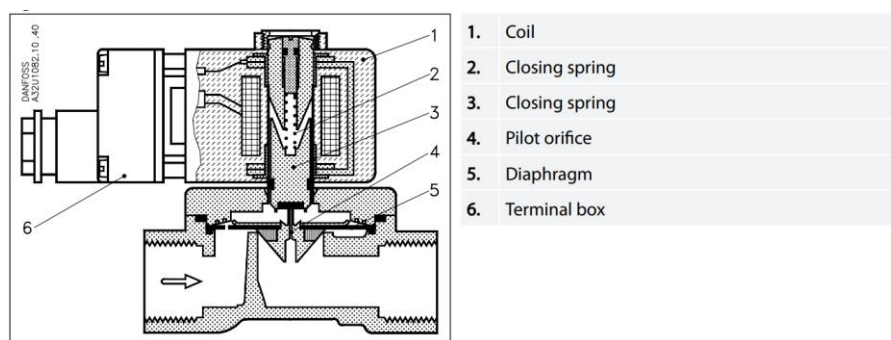


Рис. 3.22 Пропорційний електромагнітний клапан EV260B з котушкою BL024D 018Z0291. Функціональна схема: 1 – Котушка, 2 – Закриваюча пружина, 3 – Якір, 4 – Регулюючий отвір, 5 – Діафрагма, 6 – Клемна коробка

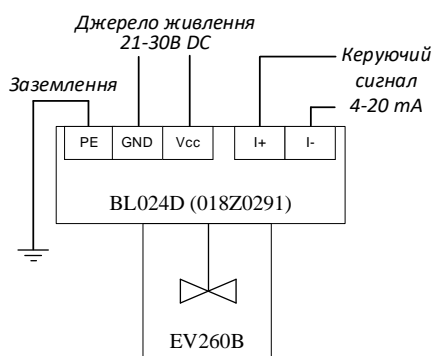


Рис. 3.23 Схема електричного під'єднання котушки BL024D 018Z0291

Реле перепаду тиску Therموкон PS500 [28]

Реле перепаду тиску Therموкон PS500 призначене для моніторингу різниці тисків у системах вентиляції та фільтрації повітря. Володіє регульованим діапазоном спрацювання – 30-500 Па, та срібними контактами перемикача.

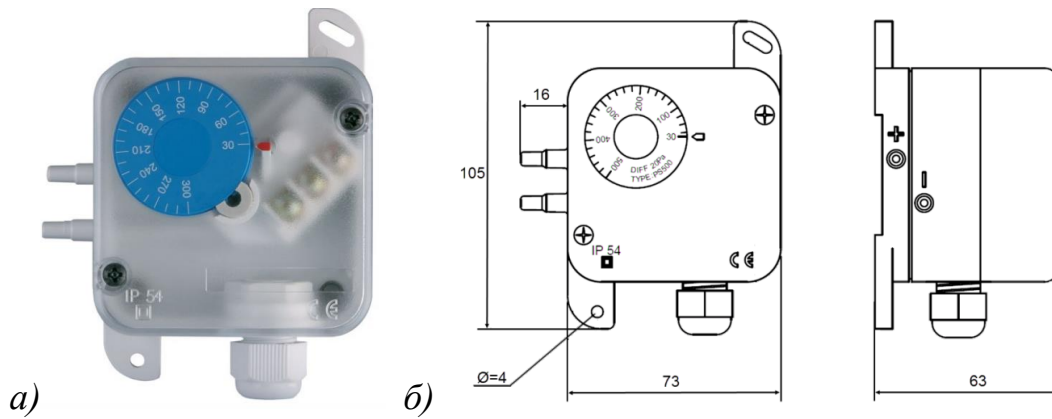


Рис. 3.24 Реле перепаду тиску Thermokon PS500. Загальний вигляд (а) та габаритні розміри (б)

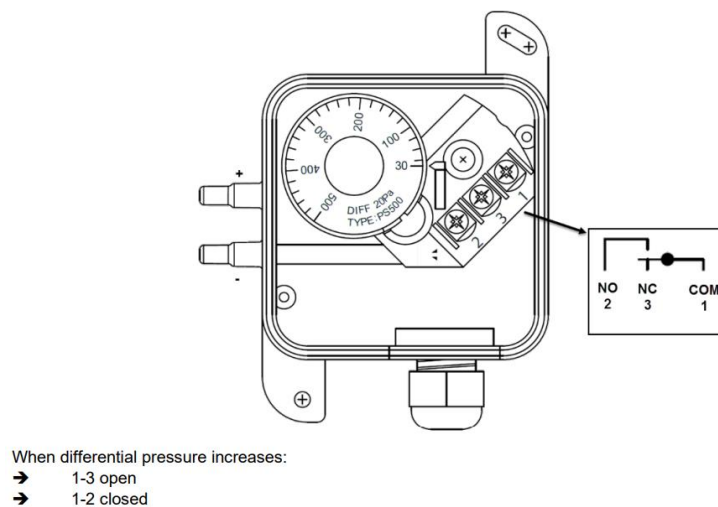


Рис. 3.25 Схема електричного під'єднання контактів реле перепаду тиску Thermokon PS500

3.2. Мікропроцесорний програмований засіб автоматизації

3.2.1. Обґрунтування вибору мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації та опис його технічних характеристик

Для реалізації надійної та ефективної системи контролю мікроклімату промислової теплиці необхідно застосувати сучасний мікропроцесорний програмований засіб автоматизації. Обраний ПЛК має відповідати вимогам надійності, функціональності, зручності у експлуатації, можливості масштабування та економічної доцільності. З огляду на зазначені вимоги, у даній роботі було обрано програмований логічний контролер Vision V570 розробки компанії Unitronics.



Рис. 3.26 PLC Unitronics Vision V570. Загальний вигляд

Unitronics Vision V570 [29, 30] – це промисловий програмований логічний контролер, який поєднує в одному корпусі логічний контролер та вбудовану панель людино-машинного інтерфейсу (HMI). Основним його призначенням є побудова систем автоматизації середнього рівня складності (до 24 контурів ПД регулювання з автоналаштуванням), з можливістю масштабування, що забезпечує його високу адаптивність до вимог конкретного технологічного процесу.

Завдяки підтримці мов Ladder Diagram (LD) та Instruction List (IL), а також використанню зручного графічного середовища розробки VisiLogic, Vision V570 надає широкі можливості для реалізації складних алгоритмів керування.

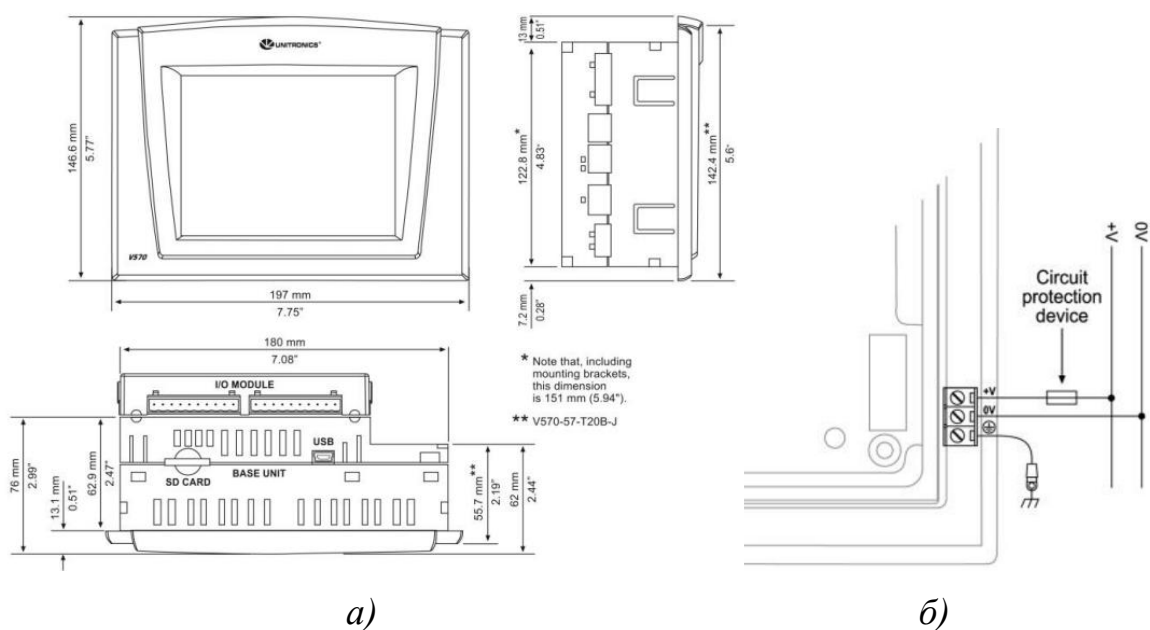


Рис. 3.27 Габаритні (а) та схема електричного підключення (б) розміри ПЛК Unitronics Vision V570

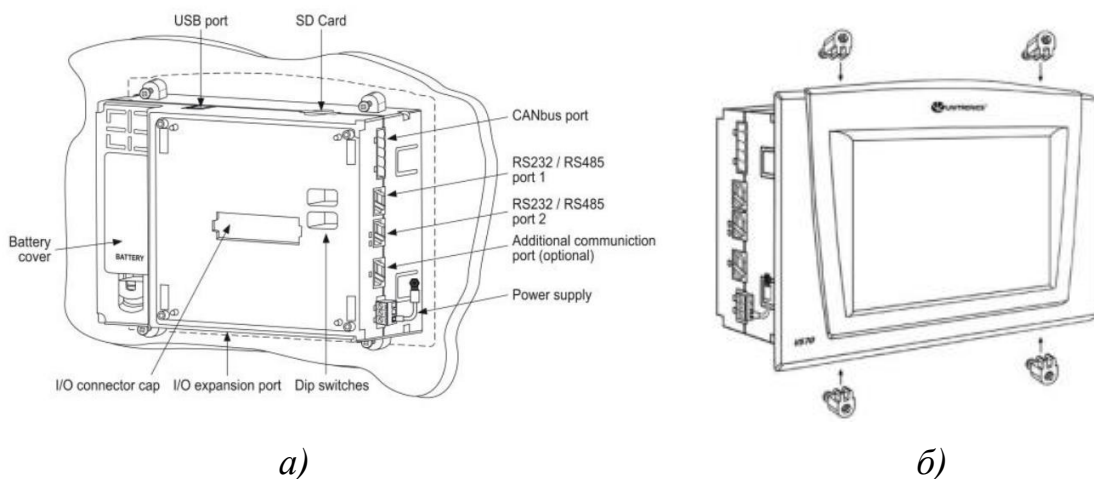


Рис. 3.28 Видгляд портів, входів, виходів (а) та методу кріплення (б)

ПЛК Unitronics Vision V570

Завдяки наявності сенсорного дисплея, підтримці широкого спектра промислових протоколів обміну даними та зручному програмному середовищу розробки, контролер дозволяє реалізовувати інтуїтивно зрозумілий і ергономічний графічний інтерфейс оператора, а також складні алгоритми керування об'єктами автоматизації, що робить його особливо доцільним для використання в агропромислових системах.

Основні технічні характеристики Vision V570 наведено в таблиці 3.1 [29].

Таблиця 3.1

Технічні характеристики Unitronics Vision V570

№ п/п	Назва параметра	Значення
1	2	3
1.	Тип дисплея	TFT LCD, 5.7", сенсорний, з підсвіткою (білий LED)
2.	Роздільна здатність	320x240 пікселів (QVGA)
3.	Кількість кольорів	65 536 (16-біт)
4.	Тип сенсора	Резистивний, аналоговий

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
5.	Пам'ять програми	Логіка – 2 МБ, зображення – 12 МБ, шрифти – 1 МБ
6.	Оперативне керування	8192 бітів, 4096 цілих, 512 довгих, 256 подвійних, 64 з плаваючою крапкою
7.	Кількість таймерів/лічильників	384 таймери, 32 лічильники
8.	Комунікаційні порти	2×RS232/RS485, USB (Mini-B), CANbus, Ethernet TCP/IP(опціонально)
9.	Підтримувані протоколи	MODBUS RTU/TCP, CANopen, SMS, GPRS, власні протоколи
10.	Підключення вводу/виводу	Snap-in модулі, розширення через локальну шину або CANbus
11.	Підтримка типів I/O	Цифрові, аналогові, високошвидкісні, температурні, вагові
12.	Напруга живлення	12/24 В постійного струму (допустимий діапазон: 10,2–28,8 В)
13.	Споживаний струм	540 mA @ 12 В; 270 mA @ 24 В

Здатність до масштабування забезпечується завдяки підтримці широкого спектра модулів введення/виведення (I/O). Зокрема, Unitronics Vision V570 сумісний із 8 модулями типу Snap-in, які встановлюються безпосередньо на корпус, а також з 21 модулем розширення, що підключається через відповідні інтерфейси.

Схеми підключення зовнішніх пристроїв до портів введення/виведення наведено на рисунках 3.29 – 3.33.

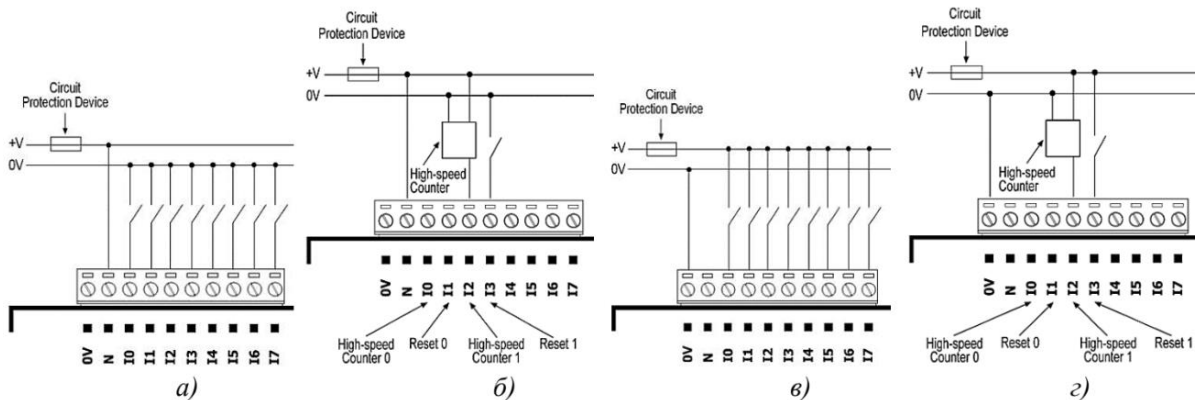


Рис. 3.29 Схема підключення дискретних вхідних сигналів з периферійних пристроїв: а) n-p-n схема, б) n-p-n схема високочастотного сигналу, в) p-n-p схема, г) p-n-p схема високочастотного сигналу

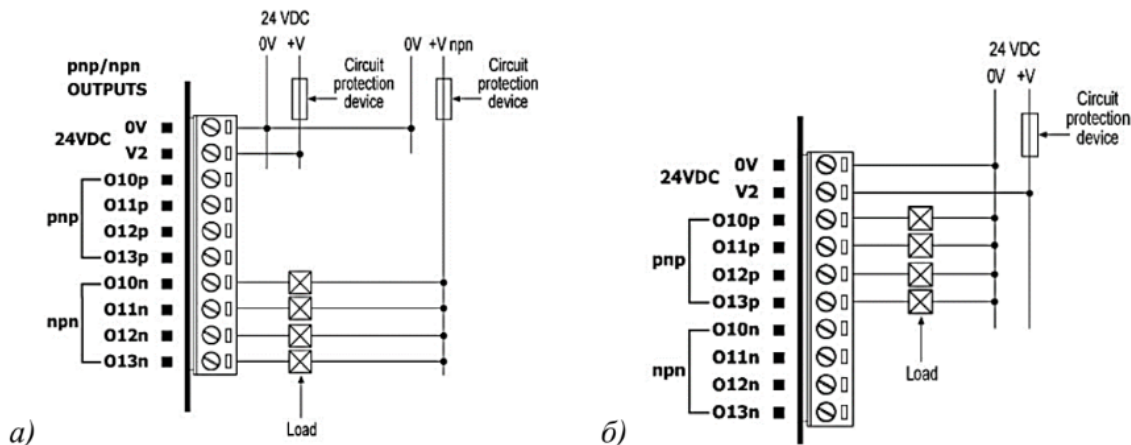


Рис. 3.30 Схема підключення дискретних сигналів керування периферійними пристроями до транзисторних виходів: а) n-p-n , б) p-n-p

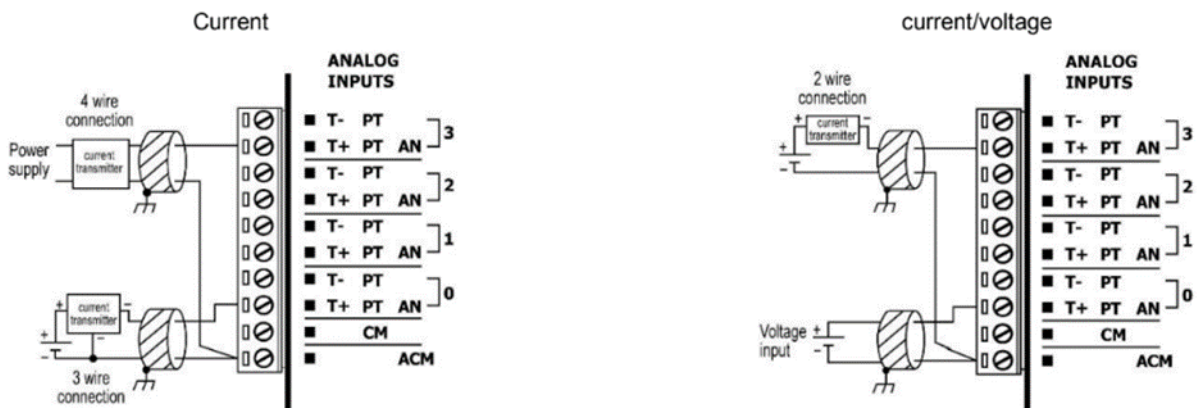


Рис. 3.31 Схема варіантів підключення аналогових вхідних сигналів

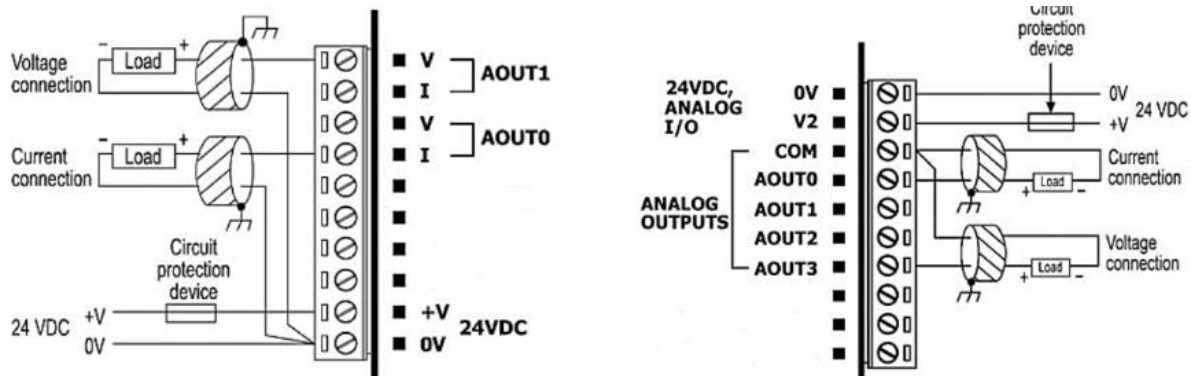


Рис. 3.32 Схема підключення аналогових вихідних сигналів керування

Схему підключення зовнішніх пристроїв до аналогових входів/виходів модулів розширення ІО-АІ4-АО2 [31] зображено на рисунку 3.33.

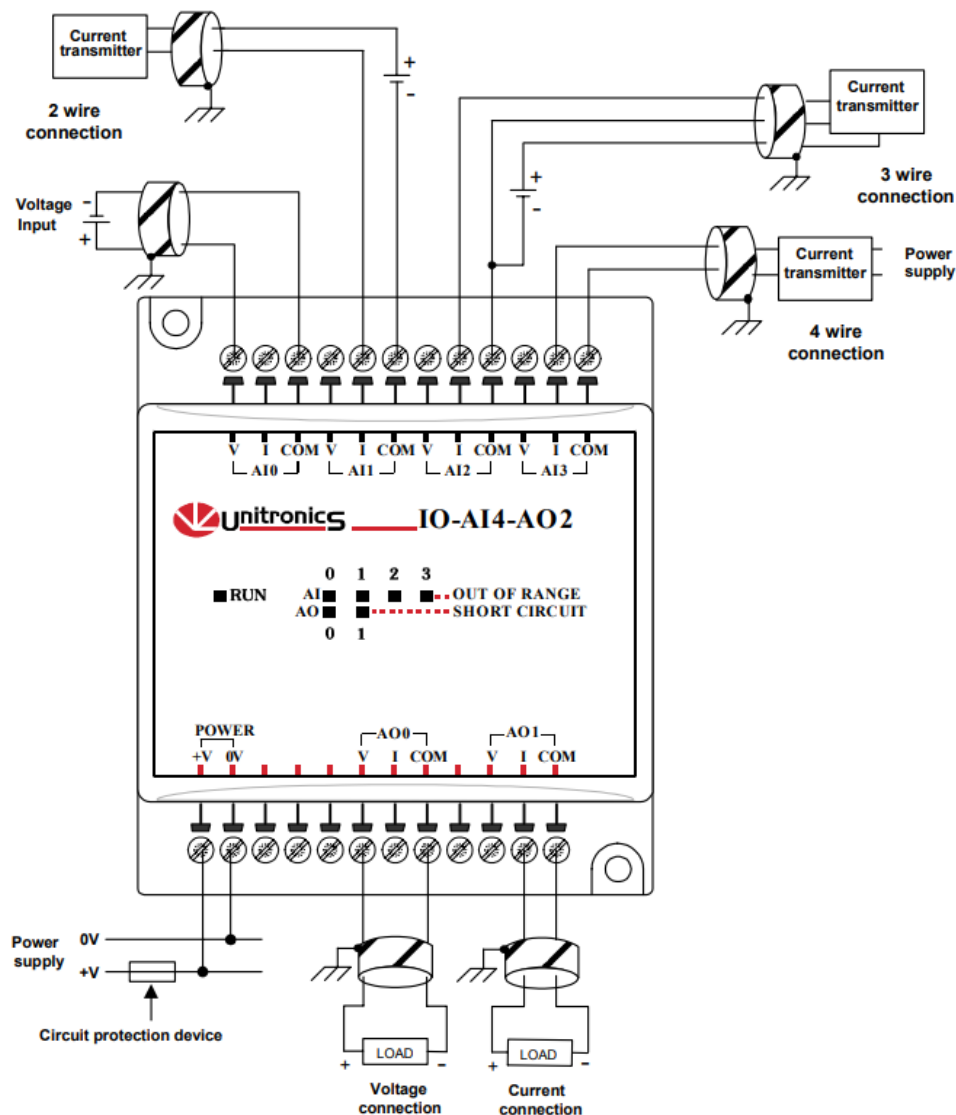


Рис. 3.33 Схема підключення зовнішніх пристроїв до аналогових входів та аналогових виходів модуля розширення ІО-АІ4-АО2

3.2.2. Конфігурація мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

Згідно з функціональною схемою автоматизації, для побудови системи автоматичного регулювання технологічного процесу слід передбачити відповідну кількість входів та виходів, необхідних для забезпечення коректної роботи всіх елементів системи. Проведемо аналіз необхідних входів/виходів:

- Загальна кількість дискретних входних сигналів: $DI_{\text{ЗАД}} = 4$;
- Загальна кількість дискретних вихідних сигналів: $DO_{\text{ЗАД}} = 9$;
- Загальна кількість аналогових входних сигналів: $AIN_{\text{ЗАД}} = 7$;
- Загальна кількість аналогових вихідних сигналів: $AOUT_{\text{ЗАД}} = 3$;

У відповідності до [29] здійснюється підбір відповідних функціональних модулів мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації, з метою забезпечення необхідної кількості входів/виходів:

- Мікропроцесорний програмний модуль керування з вбудованою HMI-панеллю оператора типу Vision V570 розробки компанії Unitronics – 1 шт;
- Пристрій вводу/виводу Snap-in типу V200-18-E3XB – 1 шт;
- Інтерфейсний модуль типу EX-A2X для підключення модулів розширення – 1 шт;
- Модуль розширення типу IO-AI4-AO2 – 1 шт;

Така конфігурація здатна забезпечити достатню кількість входів/виходів для забезпечення потреб актуальної функціональної схеми автоматизації, а саме:

- Дискретні входні сигнали: $DI = 18 > DI_{\text{ЗАД}} = 4$;
- Дискретні вихідні сигнали: $DO = 17 > DO_{\text{ЗАД}} = 9$;
- Аналогові входні сигнали: $AIN = 8 > AIN_{\text{ЗАД}} = 7$;
- Аналогові вихідні сигнали: $AOUT = 6 > AOUT_{\text{ЗАД}} = 3$;

На підставі обраної конфігурації можна стверджувати, що сформований склад мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації повністю задовольняє технічні вимоги, необхідні для реалізації системи автоматизованого керування мікрокліматом у промисловій теплиці.

Наступним кроком є програмне конфігурування в середовищі VisiLogic.

У процесі налаштування створюється новий проєкт, у якому здійснюється вибір ПЛК Vision V560, підключення Snap-in V200-18-E3XB та модуля розширення IO-AI4-AO2, з подальшим конфігуруванням входів/виходів. Послідовність конфігурації відображено на рисунку 3.28.

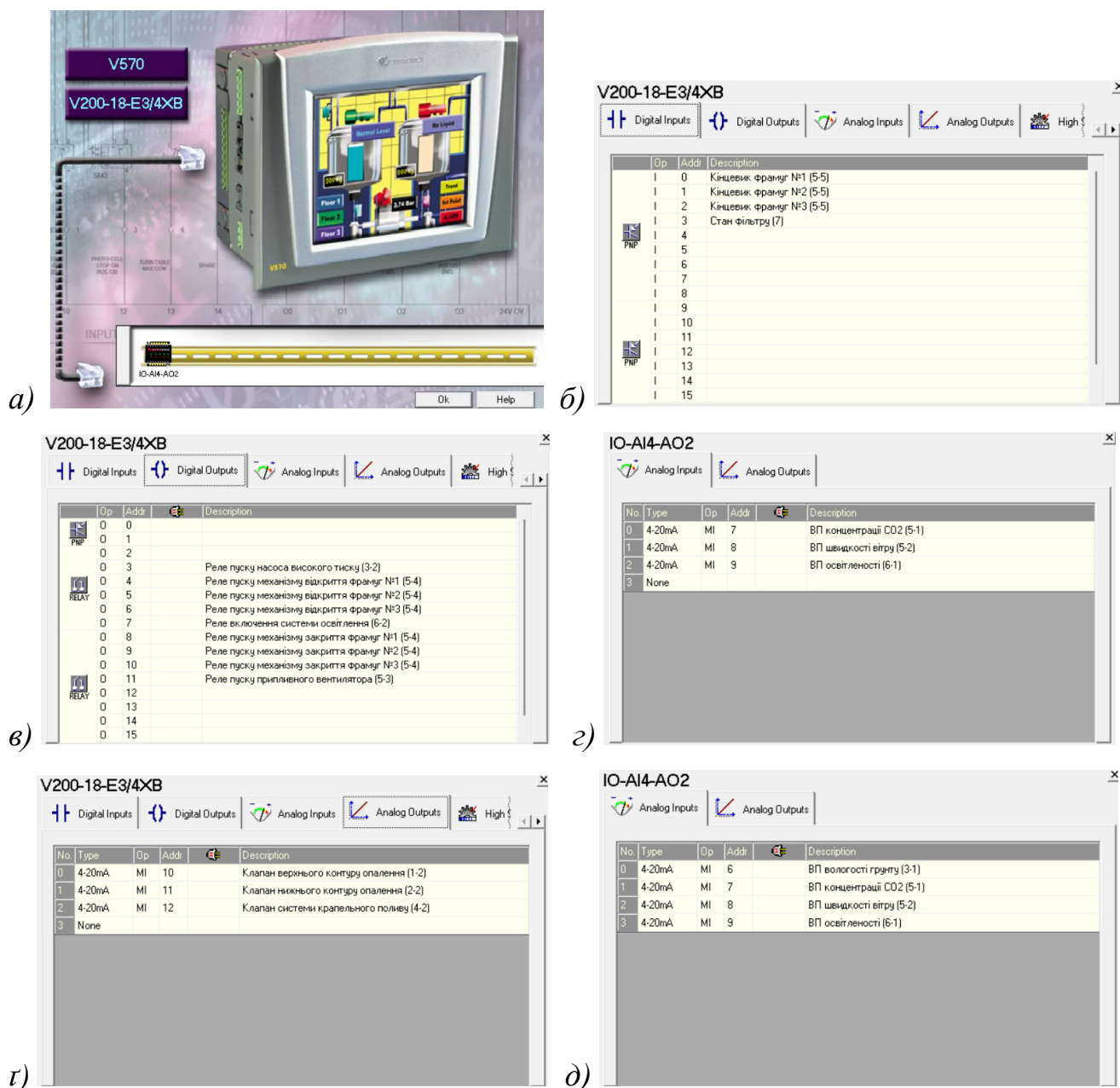


Рис. 3.34 Вікна налаштування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації Unitronics Vision V570 та модулів розширення в середовищі VisiLogic: а) налаштування конфігурації основних компонентів; б) налаштування адресації дискретних виходів модуля Snap-in V200-18-E3XB; в) налаштування адресації дискретних входів модуля Snap-in V200-18-E3XB; г) налаштування адресації та вибір типів вхідних аналогових сигналів модуля Snap-in V200-18-

ЕЗХВ; г) налаштування адресації та вибір типів вихідних аналогових сигналів модуля Snap-in V200-18-ЕЗХВ; д) налаштування адресації та вибір типів вхідних та вихідних аналогових сигналів модуля розширення ІО-АІ4-АО2;

3.3. Специфікація технічних засобів автоматизації

Таблиця 3.2

Специфікація технічних засобів автоматизації

№ п/п	№ позиції	Назва параметру	Місце встановлення	Назва засобу та коротка технічна характеристика	Тип	К-сть
1	2	3	4	5	6	7
1	1-1, 3-1	Температура повітря в теплиці, Вологість повітря в теплиці	По місцю	Комбінований давач, Діапазон: температура -40...+60°C +/- 1 °C, вологість 0-100% +/- 3 % , Вихід 4-20 mA, живлення 9...40V DC, 50 mA	Schneider Electric TM1SHTCC 4	1
2	2-1	Температура ґрунту	По місцю	Термоперетворювач опору з вбудованим нормуючим перетворювачем. Діапазон вимірювання 50...+200°C, похибка $\leq \pm 1\% \text{ max}$ Вихід 4-20 mA, живлення 10...30V DC, 30 mA	Danfoss MBT 3560	1

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
3	4-1	Вологість ґрунту	По місцю	Вимірювальний перетворювач вологості ґрунту. Діапазон 0-100% $\pm 2\%$, Вихід 4-20 мА, живлення 12-40В DC	RIXEN MTR-731	1
4	5-1	Концентрація CO ₂ в теплиці	По місцю	Універсальний вимірювальний перетворювач концентрації CO ₂ . Діапазон 0-2000ppm ± 50 ppm, Роздільна здатність 1ppm, Вихід 4-20 мА, живлення 9-30В DC	Comet T5140	1
5	5-2	Швидкість вітру	По місцю	Чашковий анемометр. Діапазон 0.5...50 м/с ± 0.5 м/с (при <5 м/с). Вихід 4-20 мА, живлення 12...36В DC	PCE-FST-200-201-I	1
6	5-11, 5-12, 5-13	Оберти валу редуктора підйомного механізму фрамуг	По місцю	Індуктивний PNP давач. Робоча відстань 5 мм $\pm 10\%$, живлення 10...30В DC, 10 mA max	OMRON TL-Q5MB1-R 2M	3

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
7	6-1	Природня освітленість	По місцю	Вимірювальний перетворювач освітленості. Діапазон 0-20000 LUX, похибка $\pm 3\%$, Вихід 4-20 mA, живлення 9...32В DC	RIXEN LXT-401A	1
8	7-1	Перепад тиску на фільтрі припливного вентилятора	По місцю	Реле перепаду тиску. Діапазон налаштувань 30-500 Па Срібні контакти, дискретний вихідний сигнал	Thermokon PS500	1
9	1-2, 2-2, 4-2	Витрата теплоносія Системи опалення, Витрата теплоносія системи опалення ґрунту, Витрата води в системі крапельного поливу	По місцю	Електромагнітна котушка, призначена для роботи з пропорційними клапанами. Вхідний керуючий сигнал 4-20 mA, живлення 21...30В DC, потужність 23 Вт	Danfoss BL024D (018Z0291)	3

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
10	1-3, 2-3, 4-3	Витрата теплоносія Системи опалення, Витрата теплоносія системи опалення ґрунту, Витрата води в системі крапельного поливу	По місцю	Пропорційний клапан. $T_{\text{макс}}$ -10...80°C, $P_{\text{макс}}$ 10 bar, діаметр 20 мм, пропускна здатність 5 м ³ /год	EV260B	3
11	3-2, 5-3	Дискретне керування витратою води в системі туманоутворення, Дискретне керування приводом системи притічної вентиляції	На щиті	Електромагнітний контактор. $I_{\text{макс}} = 14$ А, Максимальна потужність 5,5 кВт, напруга керування котушки 24В DC	Schneider TeSys Deca LC1D LC1D123B L	2

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
12	5-5, 5-6, 5-7	Дискретне керування ступенем відкриття фрамуг	На щиті	Електромагнітний реверсивний контактор. $I_{\max} = 6 \text{ А}$, Максимальна потужність 2,2 кВт, напруга керування котушки 24В DC	Schneider TeSys K LP2K LP2K0610B D	3
14	6-2	Дискретне керування освітленістю в теплиці	На щиті	Силовий контактор. $I_{\max} = 80(50) \text{ А}$, напруга керування котушки 24В DC	Schneider TeSys Green LC1D50AB BE	1
15	3-3	Дискретне керування витратою води в системі туманоутворення	На місці	Асинхронний трифазний двигун. Потужність 1,5 кВт, фланць В14,230/400В 50 Гц, струм 3,31 А, 1500 об/хв	Sati M20901504 B14	1
16	3-4	Дискретне керування витратою води в системі туманоутворення	На місці	Насос високого тиску. Тиск 100 бар 1450 PSI, 8-9,6 л/год. Фланець В14	HAWK FOG 0810CR	1
17	5-4	Дискретне керування приводом системи притічної вентиляції	На місці	Відцентровий вентилятор у спіральному корпусі. 2000 м ³ /год, 230 В 50 Гц. 2,48 А, потужність – 570 Вт.	Вентс ВЦУ 4Е	1

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
18	5-8, 5-9, 5-10	Дискретне керування ступенем відкриття фрамуг	На місці	Асинхронний трифазний двигун. 230/400 В 50 Гц. Потужність 0,55 кВт, 1500 об/хв.	AIP 71 A4 Л	3
19			На щиті	Блок живлення, форм-фактор DIN. Напруга входу 100...240В AC, виходу 24В DC 5А 120 Вт.	Schneider Electric ABLS1A24 050	1
20			На щиті	Програмований логічний контролер з вбудованим НМІ. Комунікації 2×RS232/RS485, USB Mini-B, CANbus, Ethernet TCP/IP, протоколи MODBUS RTU/TCP, CANopen, SMS, GPRS, пам'ять 2 мб логіка, 12 мб зображення , 384 таймери, 32 лічильники. Напруга живлення 12/24В DC, 270 mA max	Unitronics Vision V570	1

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7
21			На щиті	Пристрій вводу/виводу Snap-in. Дискретні входи/виходи – 18/17, аналогові – 8/6 відповідно.	V200-18-E3XB	1
22			На щиті	Модуль розширення. Аналогові входи 12 bit – 4, аналогові виходи 12 bit – 2. Живлення 24В DC 75 mA max.	ІО-АІ4-АО2	1

Висновки до розділу 3

Вибір та опис технологічних засобів автоматизації є ключовим етапом при розробці систем автоматичного керування. На основі спрощеної функціональної схеми автоматизації, наведеної на рисунку 2.2, здійснено вибір технічних засобів, які забезпечують реалізацію системи автоматизованого контролю клімату. Описано функціонал кожного приладу та наведено технічні характеристики, надано всю необхідну інформацію щодо підключення та монтажу у вигляді схем. Відповідно до необхідної кількості аналогових та дискретних входів/виходів було обрано конфігурацію у вигляді програмованого логічного контролера Vision V570 з модулем розширення ІО-АІ4-АО2. Завершальним етапом стало складання таблиці 3.2 зі специфікацією вибраних технічних засобів автоматизації.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗГОРНУТИМ СПОСОБОМ ТА ЇЇ ОПИС

На основі попередньо проведеного аналізу технологічного процесу та побудованої спрощеної функціональної схеми, у відповідності до вимог [33], була розроблена детальна функціональна схема автоматизації системи контролю клімату в теплиці промислового типу, зображена на графічному листі №1. Вона складається з 6-ти контурів регулювання, вимірювання, показів та сигналізації технологічних параметрів, що в повній мірі забезпечує автоматизований контроль найважливіших для росту і розвитку рослин параметрів середовища в теплиці.

Контур 1. Регулювання температури повітря;

Вимірювання температури повітря в теплиці виконується за допомогою комбінованого вимірювального перетворювача температури та відносної вологості навколишнього середовища 1-1, вихідний сигнал з якого надходить на аналоговий вхід ПЛК. Контролер формує регулюючу дію, яка надходить на електромагнітну котушку 1-2 пропорційного клапана 1-3, змінюючи тим самим витрату теплоносія в системі опалення. Сигналізація по верхній та нижній межі параметра відображається на вбудованій в ПЛК Vision V570 НМІ-панелі.

Контур 2. Регулювання температури ґрунту;

Температура ґрунту вимірюється за допомогою термоперетворювача 2-1. Уніфікований струмовий вихідним сигнал надходить на аналоговий вхід ПЛК, який, на основі його обробки, формує регулюючу дію на соленоїд 2-2 пропорційного електромагнітного клапана 2-3. Останній керує витратою гарячого теплоносія в контурі опалення ґрунту. При перевищенні чи критичному зниженні температури ґрунту, на НМІ-панелі з'являється відповідна сигналізація.

Контур 3. Регулювання вологості повітря;

Вимірювання відносної вологості повітря в теплиці відбувається за допомогою комбінованого вимірювального перетворювача температури та відносної вологості 3-1. Дані в форматі уніфікованого аналогового сигналу надходять на відповідний вхід ПЛК, що регулюючу дію у вигляді дискретного вихідного сигналу, подається на котушку контактора 3-2, який знаходиться на щиті

і комутує асинхронний трифазний електродвигун 3-3, який приводить в дію насос високого тиску 3-4, що використовується для туманоутворення. Система сигналізації по верхній та нижній межі реалізована на сенсорному інтерфейсі користувача (НМІ-панелі).

Контур 4. Регулювання вологості ґрунту;

Вологість ґрунту вимірюється за допомогою вимірювального перетворювача вологості 4-1. Вихідний уніфікований струмовий сигнал надходить на аналогові входи ПЛК, який, згідно програми функціонування, формує регулюючу дію у вигляді вихідного аналогового сигналу, що надходить на соленоїд 4-2 пропорційного електромагнітного клапана 4-3, який керує подачею води в системі крапельного поливу. Сигналізація по верхній та нижній межі вологості ґрунту відбувається засобами НМІ-панелі.

Контур 5. Регулювання концентрації CO₂ в повітрі;

Вимірювання концентрації CO₂ в теплиці відбувається за допомогою вимірювального перетворювача 5-1 з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом. ПЛК приймає даний сигнал на свій аналоговий вхід, згідно алгоритмів обробляє його, і формує дискретний керуючий сигнал на контактор 5-3, який запускає однофазний асинхронний електродвигун 5-4 відцентрового вентилятора, що забезпечує подачу свіжого повітря в теплицю. Нижній поріг концентрації CO₂ сигналізується попереджувальним повідомленням на НМІ-панелі.

Для випуску відпрацьованого повітря, використовуються фрамуги вгорі і збоку теплиці. Фрамуги відкриваються водночас з запуском відцентрового вентилятора. Ступінь відкриття фрамуг залежить від швидкості вітру, та контролюється індуктивними давачами наближення 5-11, 5-12, 5-13, що встановлені на валах редуктора підйомного механізму. Вимірювальний перетворювач швидкості вітру 5-2 передає вимірювані дані на аналоговий вхід ПЛК, який в свою чергу формує регулюючу дію у вигляді дискретного сигналу на реверсивні контактори 5-5, 5-6, 5-7 на кожному з трьох асинхронних трифазних електродвигунів 5-8, 5-9, 5-10, що приводять в рух черв'ячний редуктор з механізмом відкриття/закриття фрамуг.

Контур 6. Регулювання освітленості;

Вимірювальний перетворювач освітленості 6-1 розміщується всередині теплиці, над засобами освітлення (щоб виключити їхній вплив на вимірювання). Сигнал надходить на аналоговий вхід ПЛК, який обробляє отриманий сигнал і при недостатній природній освітленості формує керуючу дію у вигляді дискретного сигналу, який подається на контактор 6-2, що комутує трифазну систему освітлення.

Контур 7. Сигналізація стану забрудненості фільтра притічної вентиляції;

Для визначення стану повітряного фільтра на вході припливного вентилятора, використовується реле перепаду тиску 7-1, яке замикає лінію +24 В при досягненні вставленого перепаду тиску між входом і виходом повітряного фільтра, на дискретний вхід ПЛК, тим самим формуючи дискретний вхідний сигнал. Інформаційне попереджувальне повідомлення з вимогою обслуговування фільтра відображається на НМІ-панелі.

Висновки до розділу 4

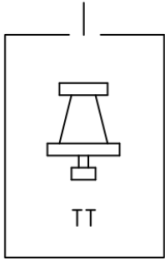
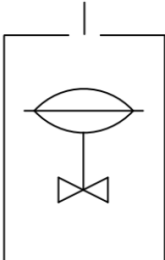

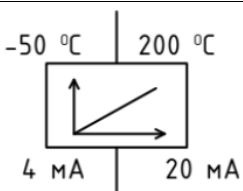

Відповідно до основного завдання розділу було виконано розробку повної функціональної схеми автоматизації, зображеної на графічному листі №1, а також виконано детальний опис функціонування кожного з 7 контурів системи контролю клімату в теплиці промислового типу.

РОЗДІЛ 5. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

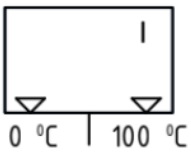
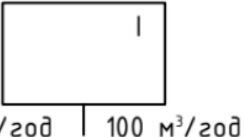
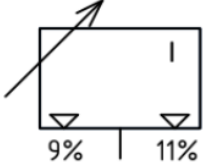
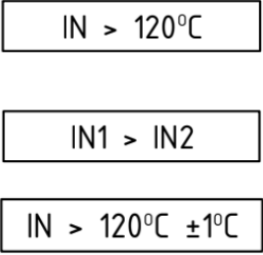

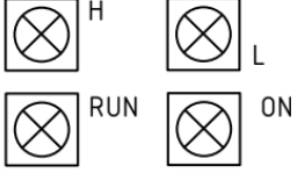
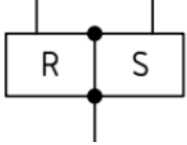
При розробці автоматизованих систем керування технологічними процесами, окрім безпосереднього програмування логіки роботи, важливо також сформувати візуально зрозумілі алгоритмічні схеми, які дозволяють чітко уявити принцип функціонування кожного з контурів системи автоматизації. Графічні зображення функціональних елементів та їх позначення описано в таблиці 5.1 [32].

Таблиця 5.1

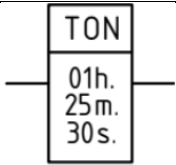
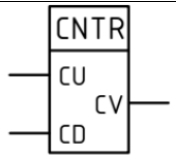
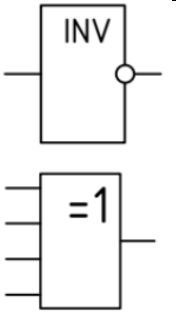
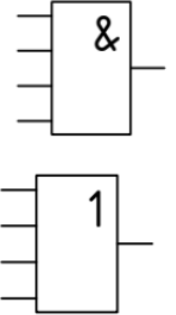
Основні елементи алгоритмічних схем функціонування

Зображення	Функціональне позначення
1	2
	<ul style="list-style-type: none"> - Давач, чутливий елемент, первинний вимірювальний перетворювач
	<ul style="list-style-type: none"> - Виконавчий механізм з аналоговим керування
	<ul style="list-style-type: none"> - Електромагнітний контактор, реле, пускач
	<ul style="list-style-type: none"> - Лінійне масштабування аналогового сигналу
	<ul style="list-style-type: none"> - Аналоговий ПІД регулятор;

Продовження таблиці 5.1

1	2
<p>TT-01</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Індикатор технологічного параметру аналогового типу, з обмеженням по діапазону
<p>FT-01</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Індикатор технологічного параметру аналогового типу
	<ul style="list-style-type: none"> - Аналоговий задавач, з обмеженнями по значеннях
	<ul style="list-style-type: none"> - Компаратори з різними умовами (порівняння з константою, порівняння з іншим сигналом, порівняння з гістерезисом);
	<ul style="list-style-type: none"> - Кнопка «START»;
	<ul style="list-style-type: none"> - Кнопка «STOP»;
	<ul style="list-style-type: none"> - Лампа-індикатор по верхній, нижній межі технологічного параметру, або стану процесу, чи обладнання;
	<ul style="list-style-type: none"> - Реле стану (RS тригер)
	<ul style="list-style-type: none"> - Перемикач різних типів сигналів

Продовження таблиці 5.1

1	2	
 <p>TON 01h. 25m. 30s.</p>	<p>- Таймер на ввімкнення (TON);</p>	
 <p>CNTR CU CV CD</p>	<p>- Лічильник імпульсів (Counter);</p>	
 <p>INV =1</p>	 <p>& 1</p>	<p>- Логічні побітові операції (інверсія, логічне додавання, логічне множення, логічне додавання по модулю 2) числових бо дискретних значень;</p>

5.1. Алгоритми функціонування контурів системи автоматизації

На основі розгорнутої функціональної схеми технологічного процесу автоматизації системи контролю клімату в промисловій теплиці (графічний лист №1) та керуючись принципами, описаними в [32], розроблено алгоритмічні схеми функціонування кожного окремого контуру (рисунок 5.1-5.7).

Контур 1. Регулювання температури повітря в теплиці;

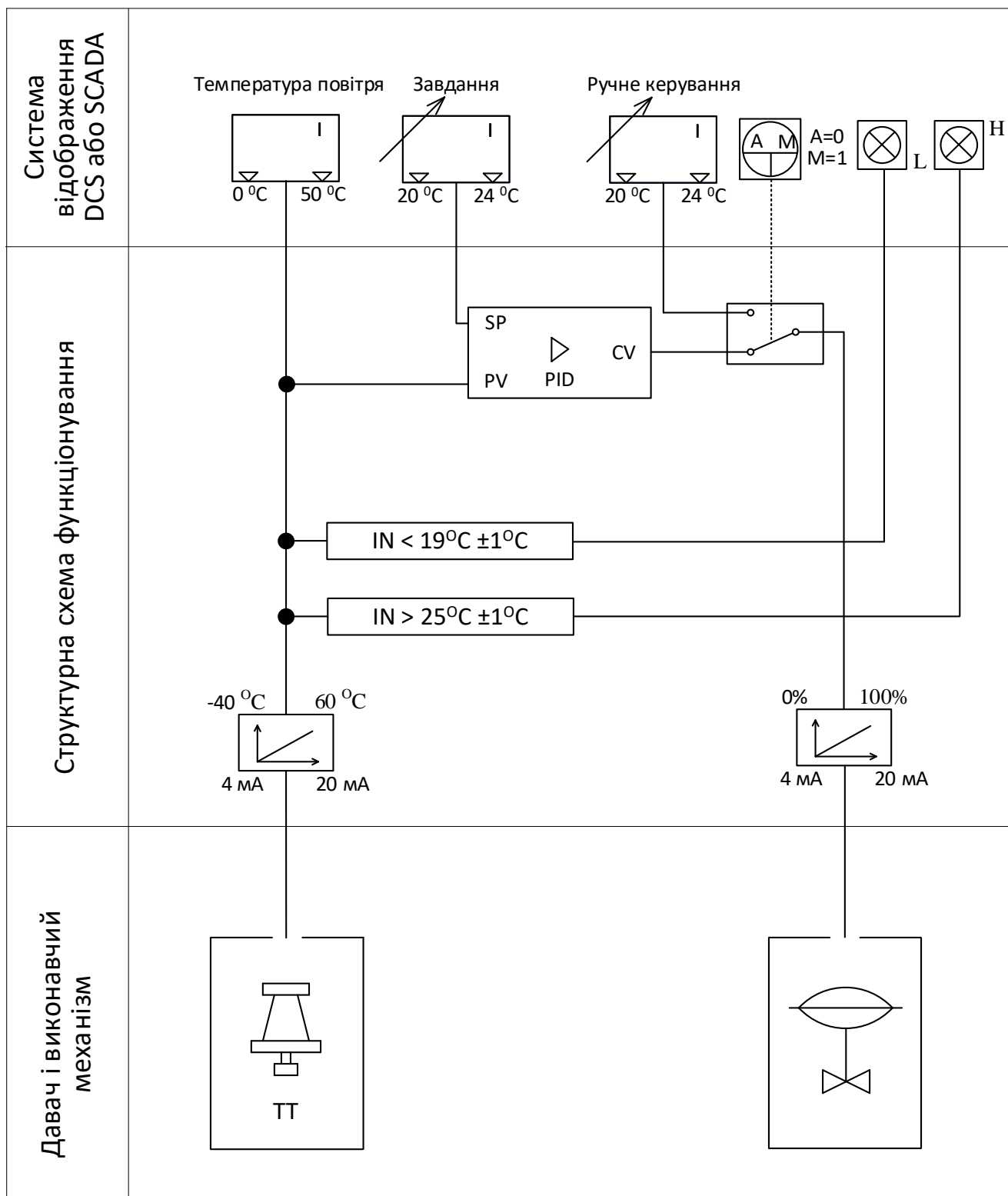


Рис. 5.1 Алгоритм функціонування контуру регулювання температури повітря в теплиці

Контур 2. Регулювання температури ґрунту в теплиці;

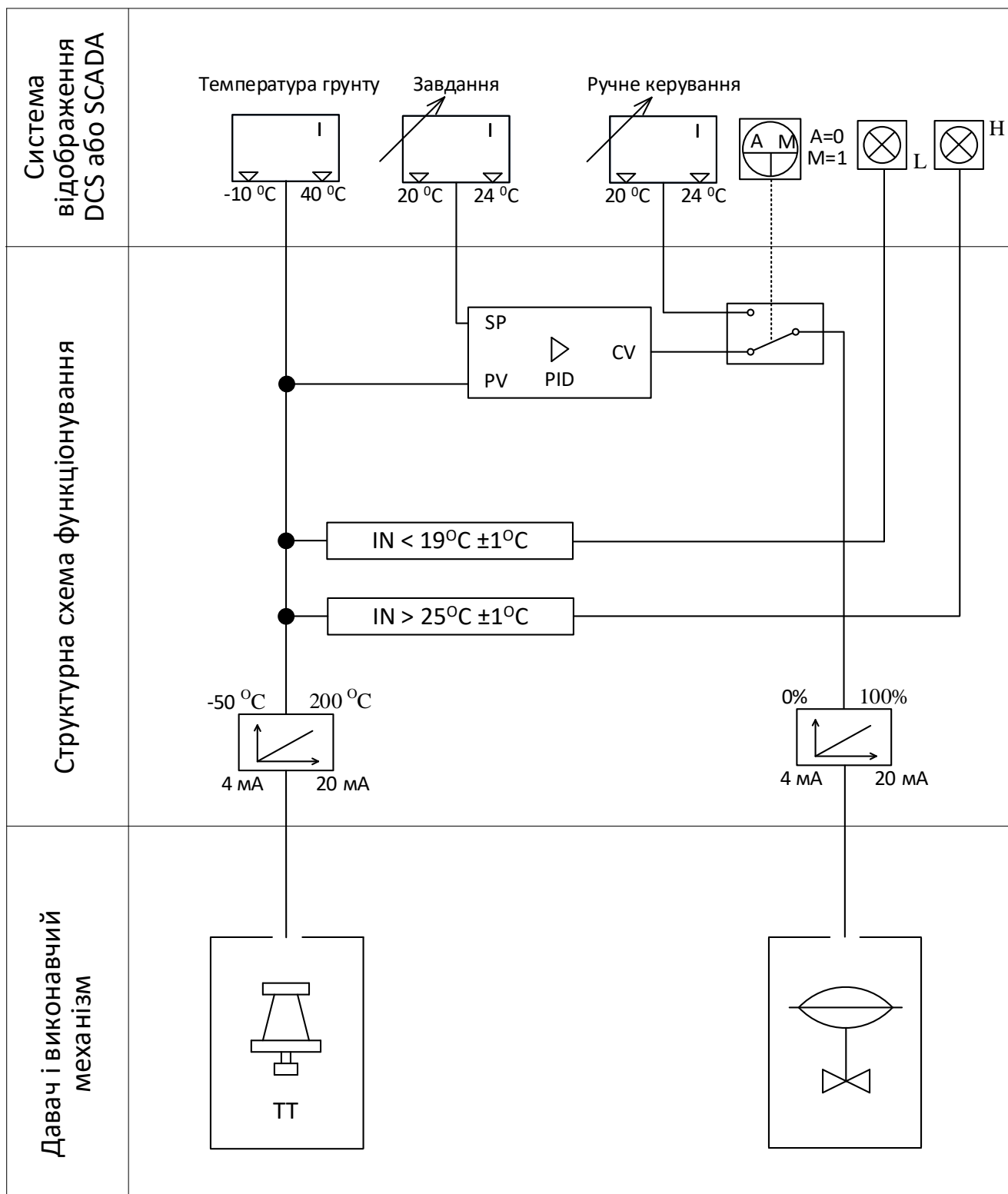


Рис. 5.2 Алгоритм функціонування контуру регулювання температури ґрунту в теплиці

Контур 3. Регулювання вологості повітря в теплиці;

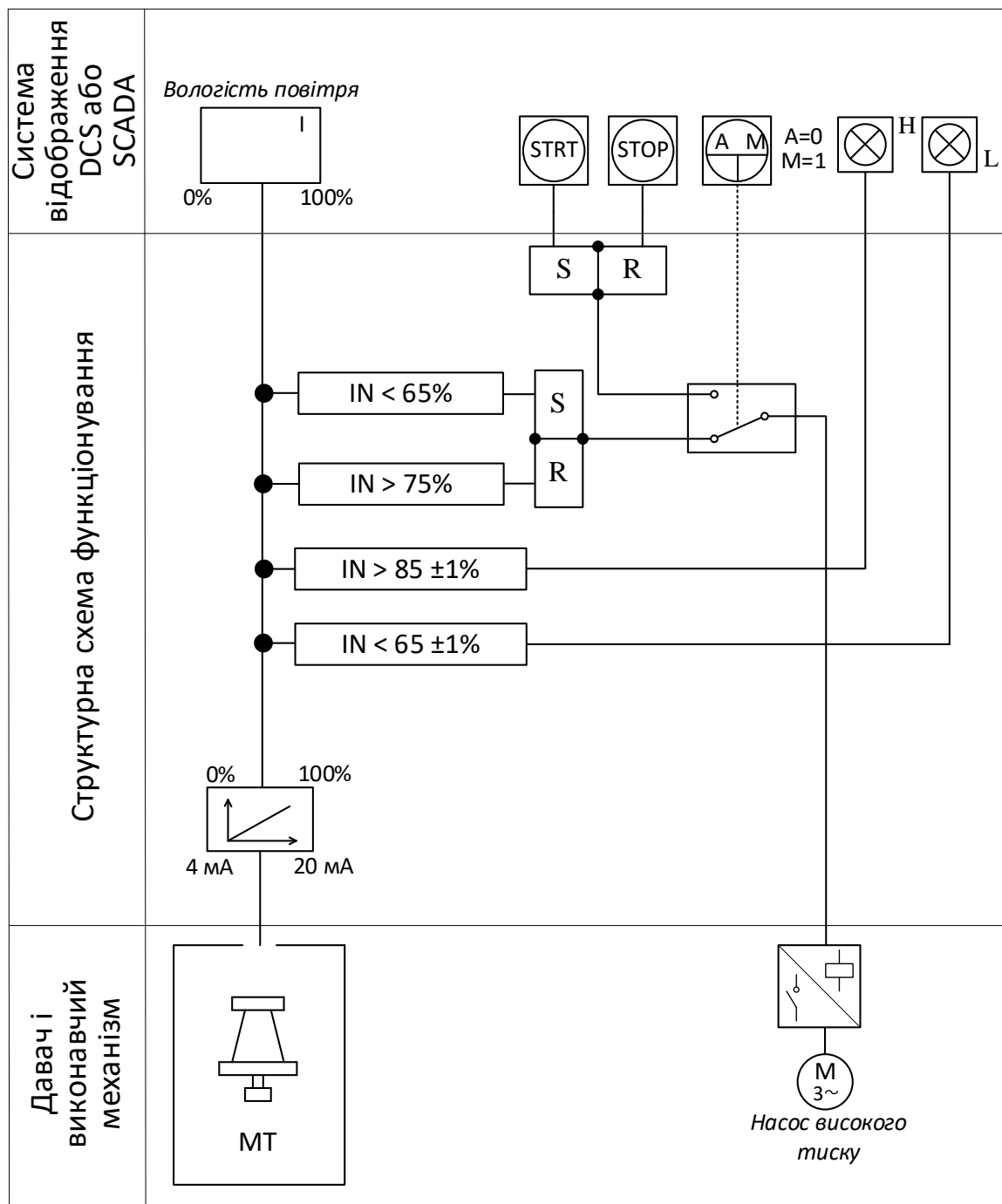


Рис. 5.3 Алгоритм функціонування контуру регулювання вологості повітря в теплиці

Контур 4. Регулювання вологості ґрунту в теплиці;

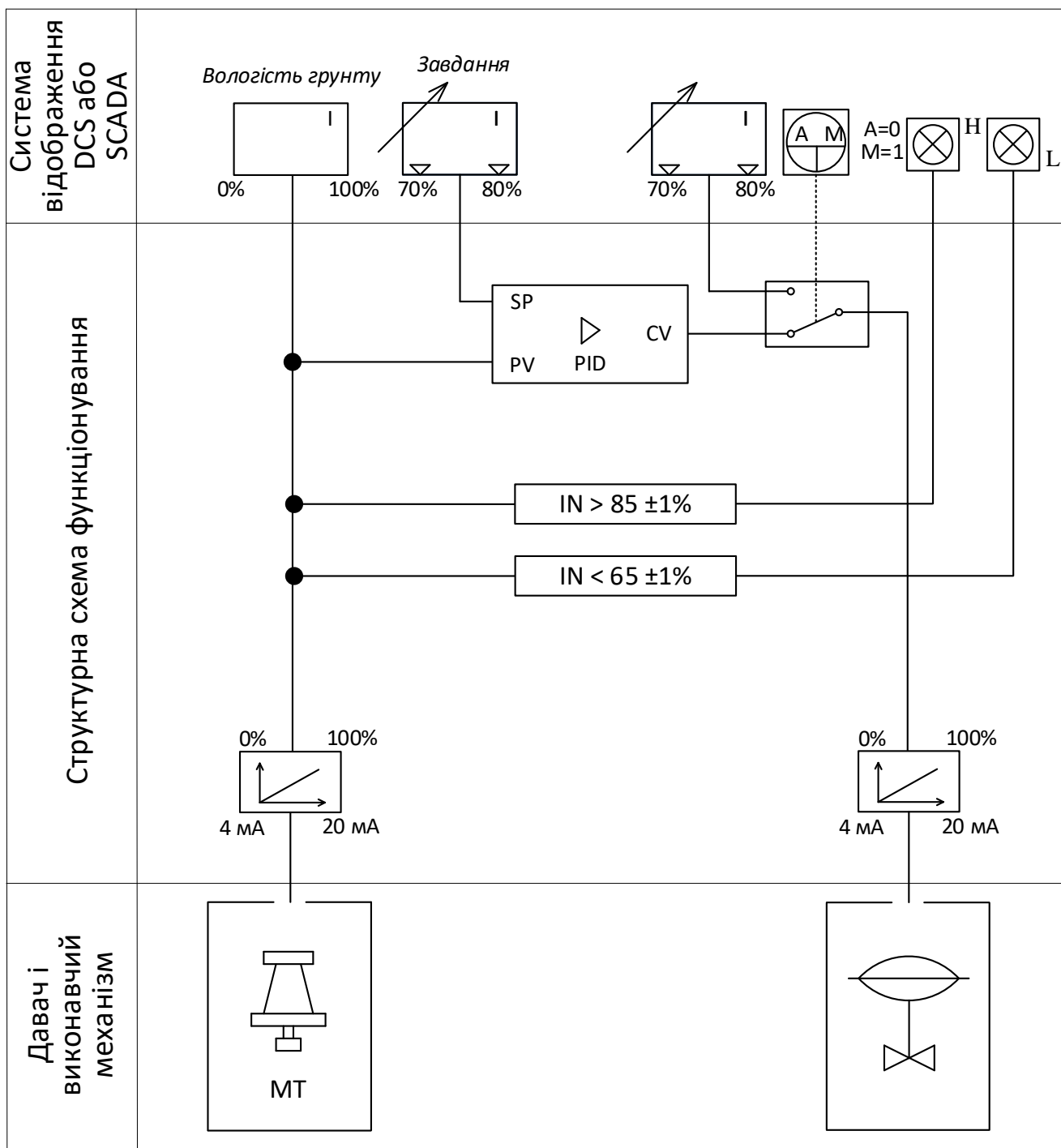


Рис. 5.4 Алгоритм функціонування контуру регулювання вологості ґрунту в теплиці

Контур 6. Регулювання освітленості в теплиці.

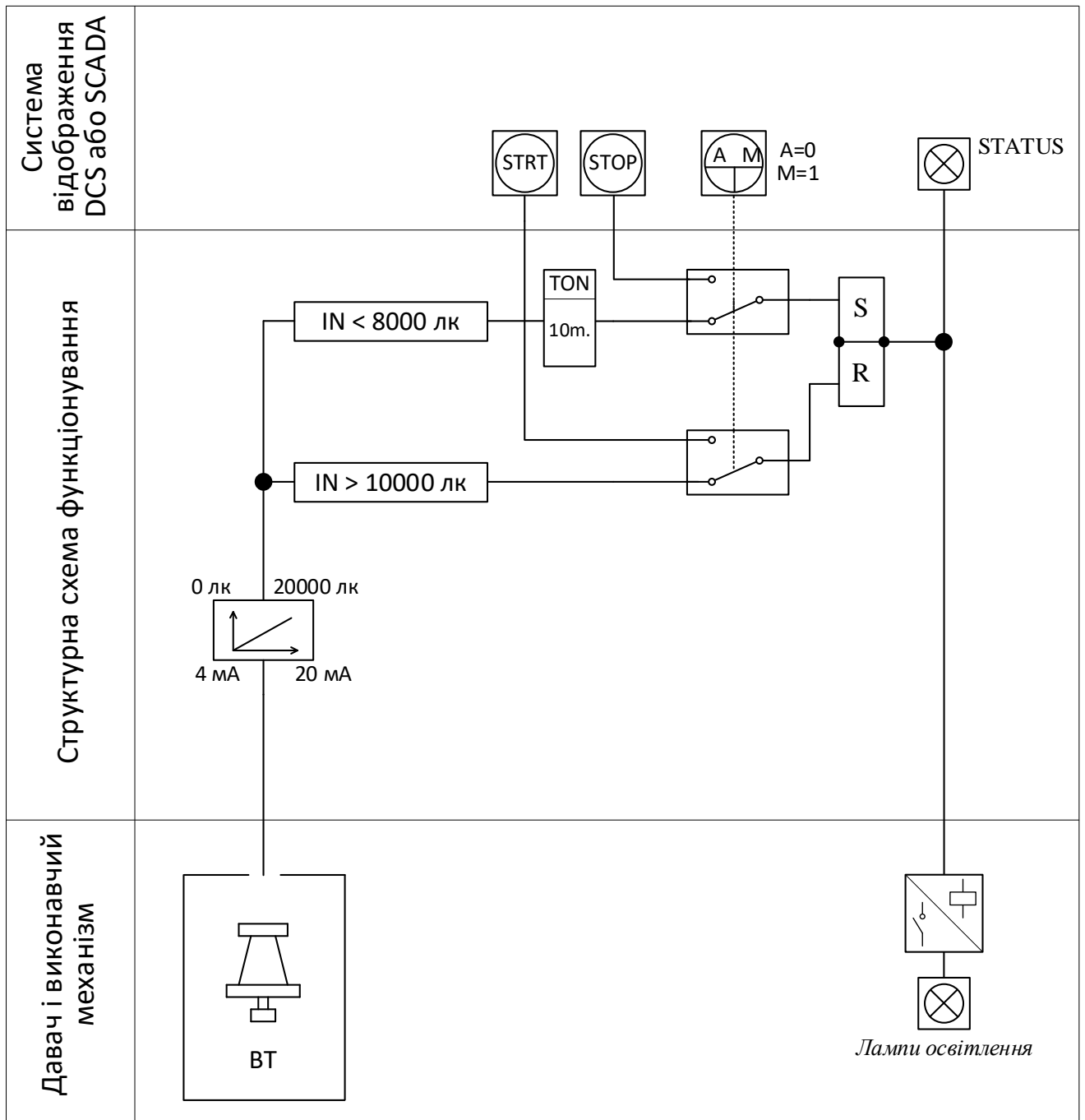


Рис. 5.6 Алгоритм функціонування контуру регулювання освітленості в теплиці

Контур 6. Сигналізація стану забрудненості фільтра притічної вентиляції

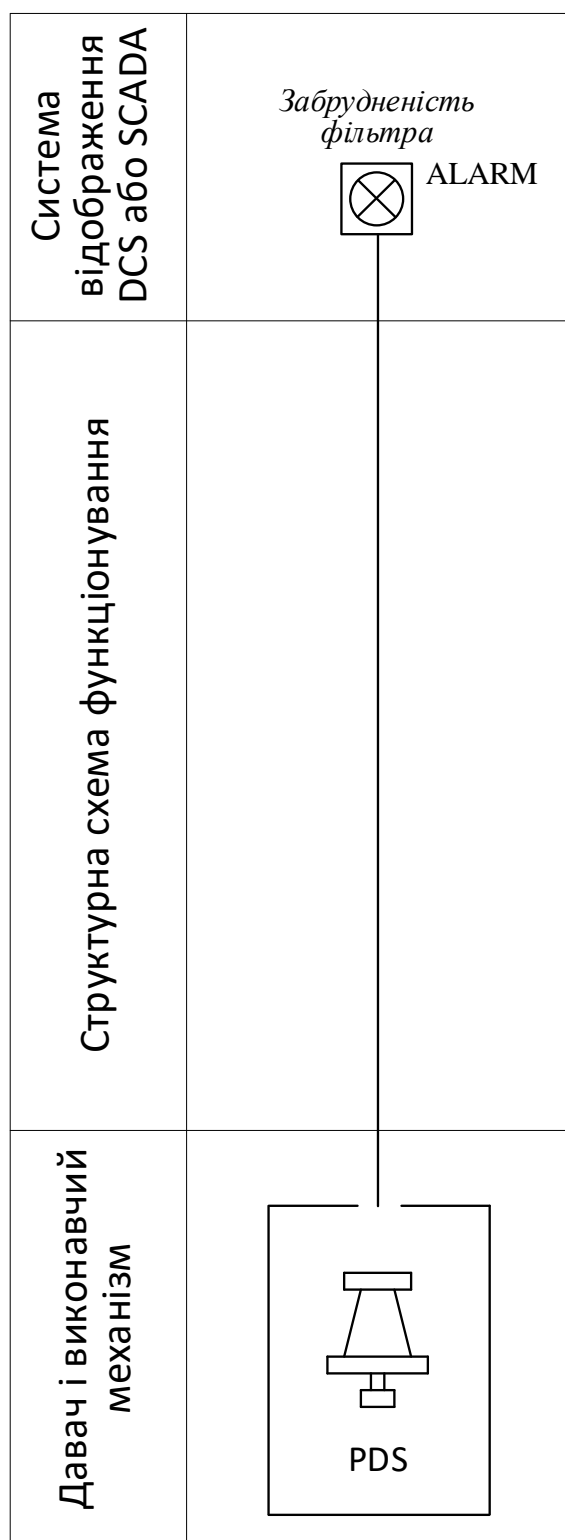


Рис. 5.7 Алгоритм функціонування контуру сигналізації стану забрудненості фільтра притічної вентиляції

5.2. Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

У підрозділі продемонстровано основні підходи та рішення, які були використані під час розробки програми функціонування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації. Реалізація програми здійснена мовою Ladder Diagram (LAD) у середовищі розробки Unitronics VisiLogic згідно з алгоритмами, розробленими і зображеними у попередньому підрозділі.

Побудова програми функціонування кожного з контурів автоматизації виконувалась за принципом логічної послідовності, що передбачає:

- Первинну лінеаризацію та обробку вхідних сигналів;
- Реалізацію основної логіки функціонування;
- Формування та обробку вихідних сигналів;

Розглянемо особливості і основні моменти реалізації програми функціонування:

Лінеаризація та обробка вхідного аналогового сигналу.

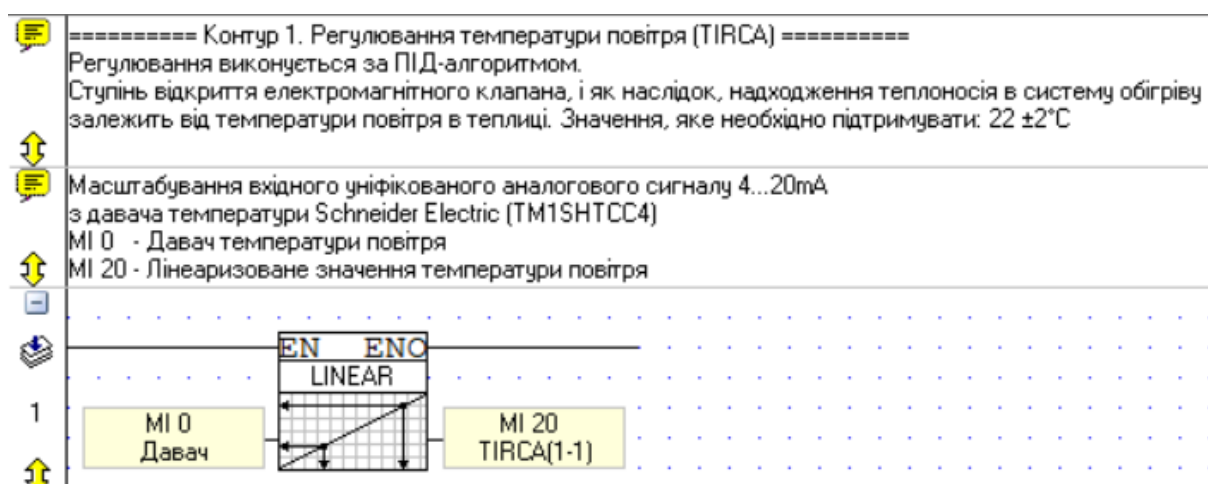


Рис. 5.8 Уривок програми функціонування, який відображає процедуру лінеаризації вхідного аналогового сигналу до робочих значень у контурі №1

Пристрій вводу/виводу Snap-in типу V200-18-E3XB володіє аналоговими входами з АЦП 14bit розрядності (модуль розширення ІО-АІ4-АО2 – 12bit),

відповідно, при роботі з сигналом 4-20 mA робочий діапазон (X1 і X2) буде складати від 3277 до 16383 для V200-18-E3XB, і від 819 до 4095 для IO-AI4-AO2.

У свою чергу вихідні значення Y1 і Y2 задаються згідно діапазону вимірювального перетворювача. За вхідний сигнал (джерело) прийнято аналоговий вхідний сигнал з вимірювального перетворювача температури в форматі 4-20 mA.

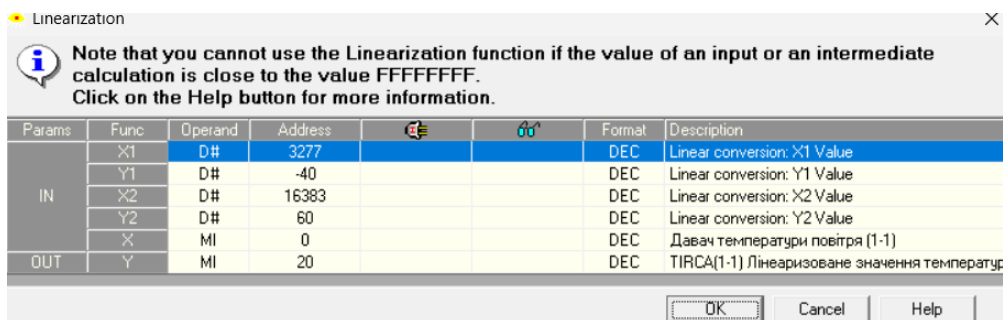


Рис. 5.9 Вікно конфігурації параметрів масштабування вхідного аналогового сигналу

Налаштування ПІД алгоритму.

Першим етапом реалізації ПІД алгоритму є його конфігурація. Вона відбувається з прив'язкою до Power-up bit (SB 2) – системного біта, який активується один раз при подачі живлення на контролер, або при його перезавантаженні. Тобто дії, які до нього прив'язані будуть виконуватись лише раз, після запуску системи.

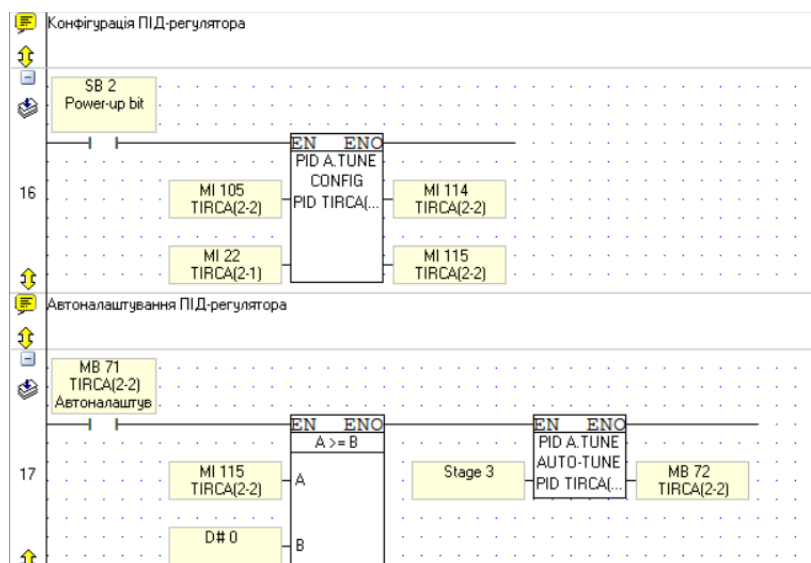


Рис. 5.10 Уривок програми функціонування, який відображає конфігурацію і автоналаштування ПІД регулятора у контурі №2

Вікно налаштувань має вигляд таблиці, розділеної на IN (вхідні змінні, які потрапляють в алгоритм, чи змінюють його функціонування), та OUT (вихідні змінні – результат виконання функціонального блоку, або змінні, що описують хід його роботи, чи актуальний статус).

Основними з них є:

- Завдання (SP) – завдання, яке необхідно підтримувати ПІД регулятора;
- Вхідний сигнал (PV) – вхідний сигнал, основна інформація про процес;
- Пропорційна, Інтегральна, Диференціальна – складові ПІД регулятора;
- Час вибірки – час відгуку вихідного сигналу на зміну вхідного;
- Вид дії – визначає, як регулятор реагує на зміну вхідного сигналу
- Діапазони вхідних і вихідних величин (вихідні приймаються за 0-100)
- Значення регулюючої дії (CV) – безпосередньо регулююча дія, яку

формує регулятор, і яка згодом передається на виконавчий механізм.

Params	Type	Add	Format	Description
IN	MI	105	DEC	TIRCA(2-2) Завдання
	MI	22	DEC	TIRCA(2-1) Лінеаризоване значення температури гр
	MI	106	DEC	TIRCA(2-2) Пропорційна складова
	MI	107	DEC	TIRCA(2-2) Інтегральна складова
	MI	108	DEC	TIRCA(2-2) Диференціальна складова
	MI	109	DEC	TIRCA(2-2) Час вибірки
	MB	70		TIRCA(2-2) Дія (0 - Зворотня, 1 - Прям)
	MI	110	DEC	TIRCA(2-2) Вхідна величина. Нижній діапазон значен
	MI	111	DEC	TIRCA(2-2) Вхідна величина. Верхній діапазон значен
	MI	112	DEC	TIRCA(2-2) Вихідна величина. Нижній діапазон значе
OUT	MI	113	DEC	TIRCA(2-2) Вихідна величина. Верхній діапазон значе
	MI	114	DEC	TIRCA(2-2) Значення регулюючої дії
	MI	115	DEC	TIRCA(2-2) Статус
	MI	116	DEC	Auto-tune parameters, 32 MIs - 1 of 32

Рис. 5.11 Вікно конфігурації ПІД алгоритму у контурі №2

Кожному параметру присвоюється змінна з відповідним типом (зазвичай Integer, за винятком біта перемикачя типу дії, де 0 – зворотня і 1 - пряма).

Алгоритм безударного переходу між ручним і автоматичним режимом керування.

Для його реалізації застосовуються блоки STORE, які можна порівняти з дією «Звідки взяти – куди зберегти», де з входу «А» функціонального блоку, в якому знаходиться змінна «MI 114 TIRCA(2-2) Значення регулюючої дії» значення записується в розташовану вихідну комірку «В», тобто присвоюється змінній «MI 148 TIRCA(2-2) Ручний режим». Зроблено це для того, щоб у випадку перемикачання оператором з автоматичного режиму керування у безпосередньо ручний, не було так званого «удару», коли йде неприродна різка зміна регулюючої дії, і як наслідок, різка зміна у технологічному процесі.

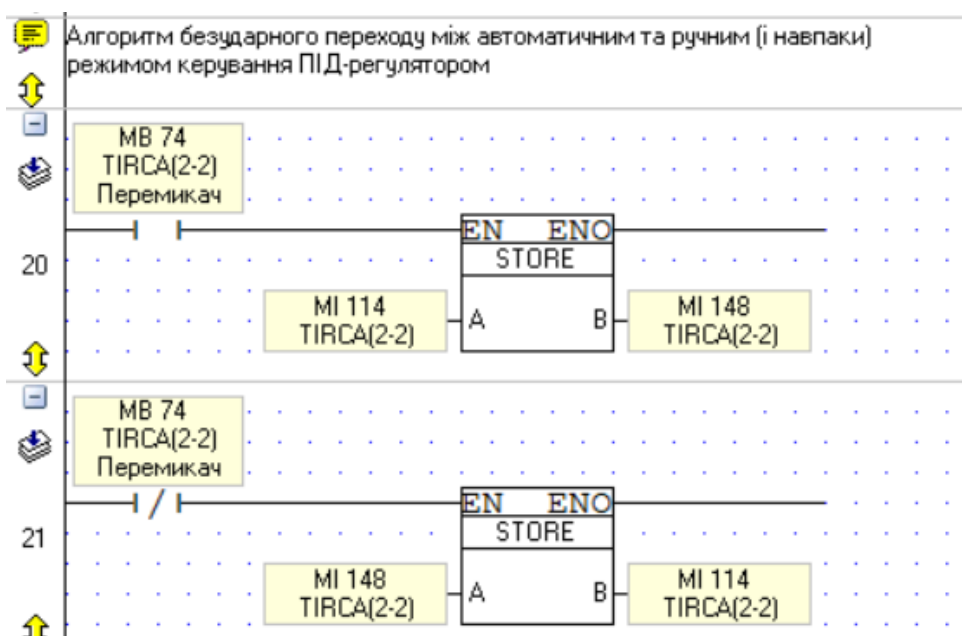


Рис. 5.12 Уривок програми функціонування, який відображає реалізацію безударного переходу у контурі №2

Зворотнє перетворення сигналу керуючої дії для передачі його на канал вихідного сигналу.

На відміну від аналогових входів Snap-in модуля, аналогові виходи використовують ЦАП з 12bit розрядністю, відповідно, відбувається процес зворотній, до лінеаризації вхідного сигналу: сигнал регулюючої дії з ПІД алгоритму потрапляє на блок LINEAR.

Параметрам X1 і X2 присвоюється значення діапазону сигналу регулюючої дії, тобто 0-100, а вихідному сигналу – розрядність ЦАП, тобто 819-4095, де 819 \approx 4 mA вихідного струму, а 4095, відповідно, 20 mA.

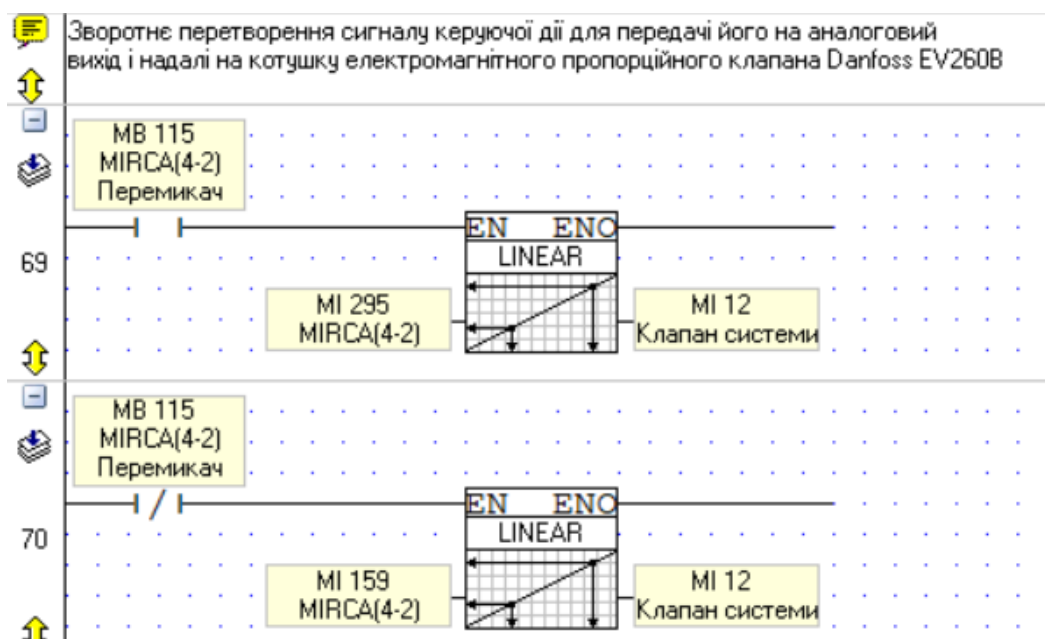


Рис. 5.13 Уривок програми функціонування, який відображає процедуру лінеаризації сигналу регулюючої дії для подальшої передачі його на аналоговий вихід у контурі №4

Linearization

Note that you cannot use the Linearization function if the value of an input or an intermediate calculation is close to the value FFFFFFFF. Click on the Help button for more information.

Params	Func	Operand	Address			Format	Description
IN	X1	D#	0			DEC	Linear conversion: X1 Value
	Y1	D#	819			DEC	Linear conversion: Y1 Value
	X2	D#	100			DEC	Linear conversion: X2 Value
	Y2	D#	4095			DEC	Linear conversion: Y2 Value
OUT	X	MI	295			DEC	MIRCA(4-2) Ручний режим N°1
	Y	MI	12			DEC	Клапан системи крапельного поливу N°1 (4-3)

OK Cancel Help

Рис. 5.14 Вікно конфігурації параметрів масштабування вихідного аналогового сигналу

Сигналізація по верхній та нижній межі технологічного параметра

Сигналізація організована за допомогою компараторів з гістерезисом, які підключені в режимі самопідхвату. Якщо значення технологічного параметру опускається нижче заданих значень – подається дискретний вихідний сигнал на контрольну лампу сигналізації по верхній/нижній межі.

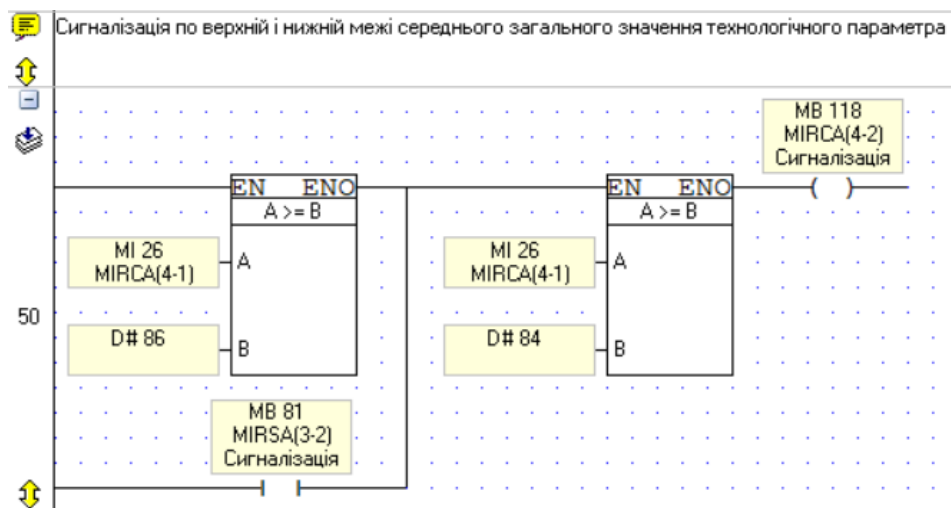


Рис. 5.15 Уривок програми функціонування, який відображає алгоритм сигналізації технологічного параметра по верхній межі

Дискретне керування системою освітлення

Активація або вимкнення системи освітлення залежить від показів датчика освітленості. Аналоговий вхідний сигнал після лінеаризації порівнюється компаратором на умову «включення» і на умову «вимкнення». При досягненні однієї з цих умов відбувається SET (встановлення в значення 1) або RESET (скидання в 0) тригера, який формує дискретний вихідний сигнал на контактор системи освітлення. Алгоритму притаманні 2 варіанти роботи алгоритму – автоматичний (по виставлених значеннях реагування) та ручний – за допомогою кнопок.

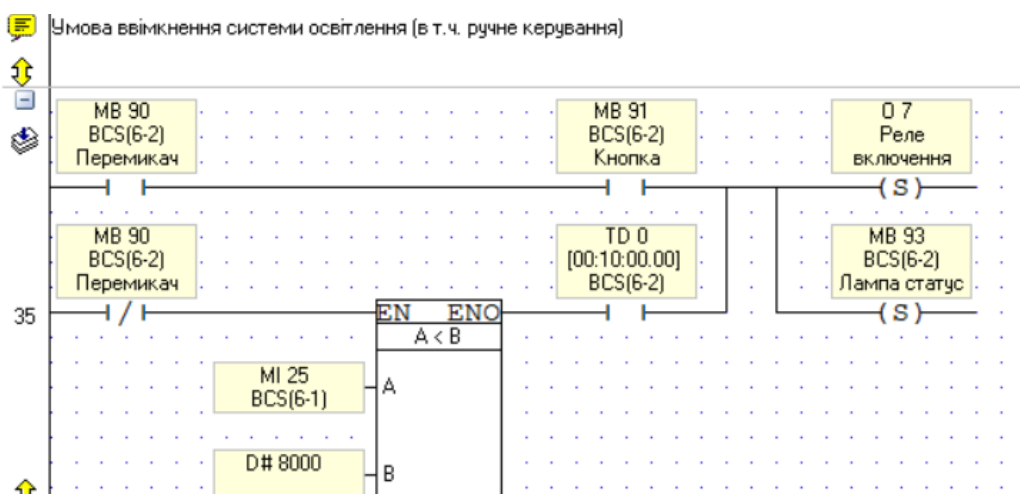


Рис. 5.16 Уривок програми функціонування, який відображає алгоритм керування системою освітлення

Висновки до розділу 5

Розділ 5 присвячений розробці алгоритмів функціонування кожного з 7 контурів системи автоматизації, та розробці програми функціонування. На основі функціональної схеми створено алгоритми, за якими у програмному середовищі Unitronics VisiLogic мовою Ladder Diagram було реалізовано програму функціонування. Особливу увагу приділено налаштуванню ПД регулятора, безударному переходу між режимами керування та сигналізації по заданій межі технологічного параметру. Всі ці моменти були в деталях описані у підрозділі 5.2., а повна програма функціонування представлена на графічному листі №2.

РОЗДІЛ 6. ПРИНЦИПОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ З'ЄДНАНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Принципова електрична схема автоматизованої системи контролю клімату в промисловій теплиці має забезпечити належне відображення всіх зовнішніх з'єднань між мікропроцесорним програмним засобом автоматизації і периферійними технічними засобами автоматизації. До складу таких засобів належать первинні вимірювальні перетворювачі (давачі температури, вологості, освітленості тощо), а також виконавчі механізми (вентилятори, клапани, електромагнітні реле тощо).

Загальний вигляд розробленої принципової електричної схеми зовнішніх з'єднань подано на графічному листі №3.

Схема підключення контролера Unitronics Vision V570 та модуля розширення IO-AI4-AO2.

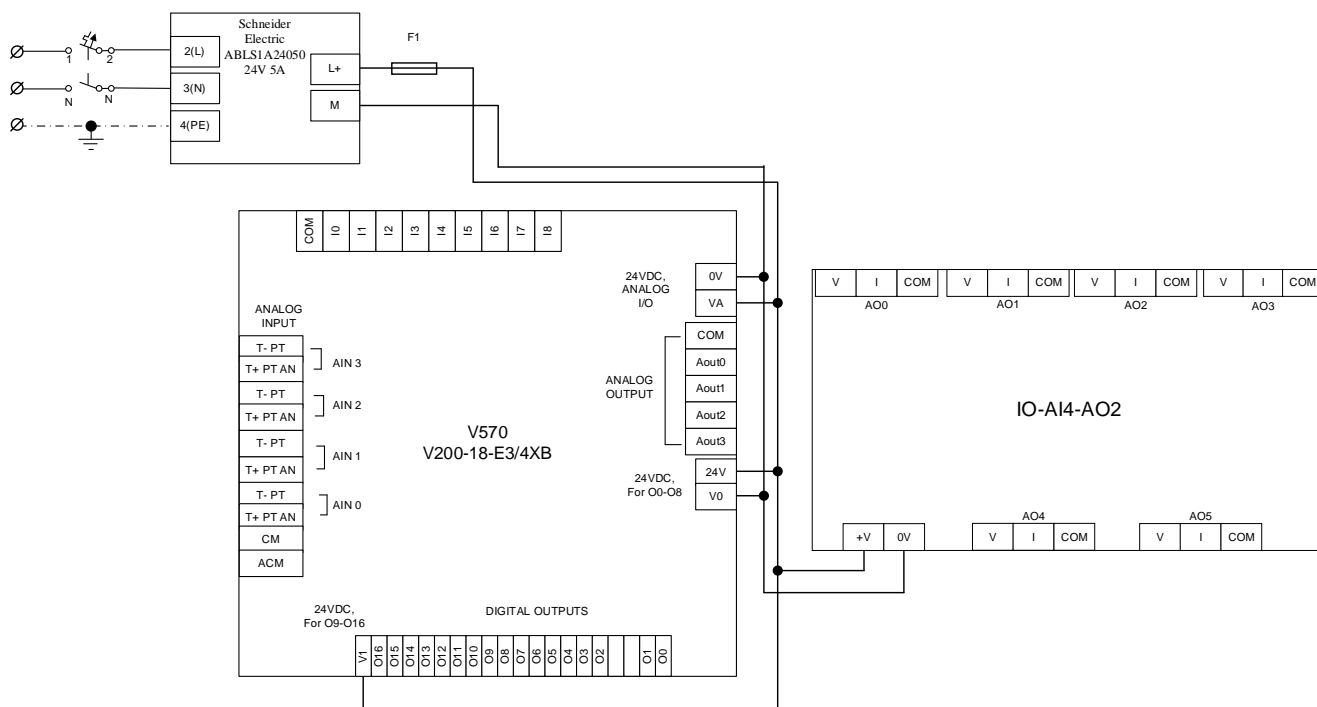


Рис. 6.1 Схема підключення живлення модуля Snap-In V200-18-E3XB і модуля розширення IO-AI4-AO2

Приклад схеми підключення комбінованого аналогового вимірювального перетворювача температури та вологості повітря Schneider Electric TM1SHTCC4:

Даний комбінований вимірювальний перетворювач температури та вологості повітря використовує трьохпровідну схему підключення, де окремо подається живлення +24В, контакти GND під'єднуються до +0В лінії, а сигнальні виходи «out T» і «outRH» - до аналогових входів ПЛК.

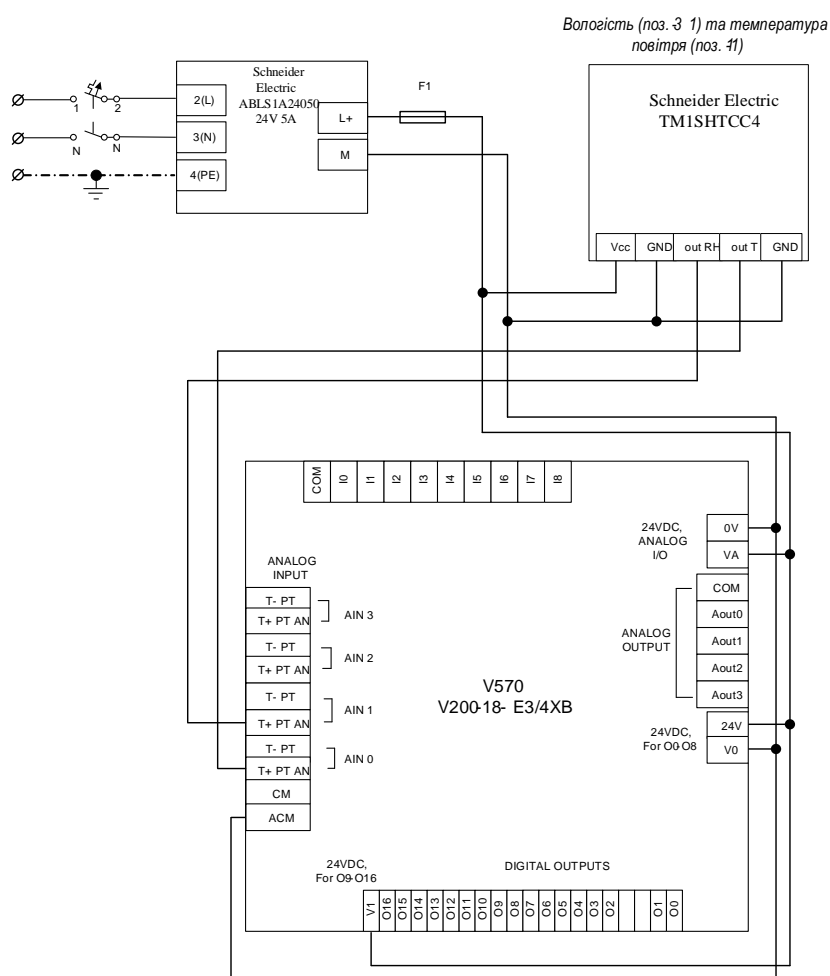


Рис.6.2 Схема підключення вимірювального перетворювача температури і вологості повітря до модуля Snap-in V200-18-E3XB

Приклад схеми підключення аналогового вимірювального перетворювача освітленості RIXEN LXT-401A:

Згідно технічної документації, вимірювальний перетворювач під'єднується по двопровідній схемі підключення – тобто I+ до лінії 24В живлення, а I- (вихідний

уніфікований сигнал 4-20 mA) – до аналогового входу «I» модуля розширення, який призначений для роботи зі струмовим вхідним сигналом.

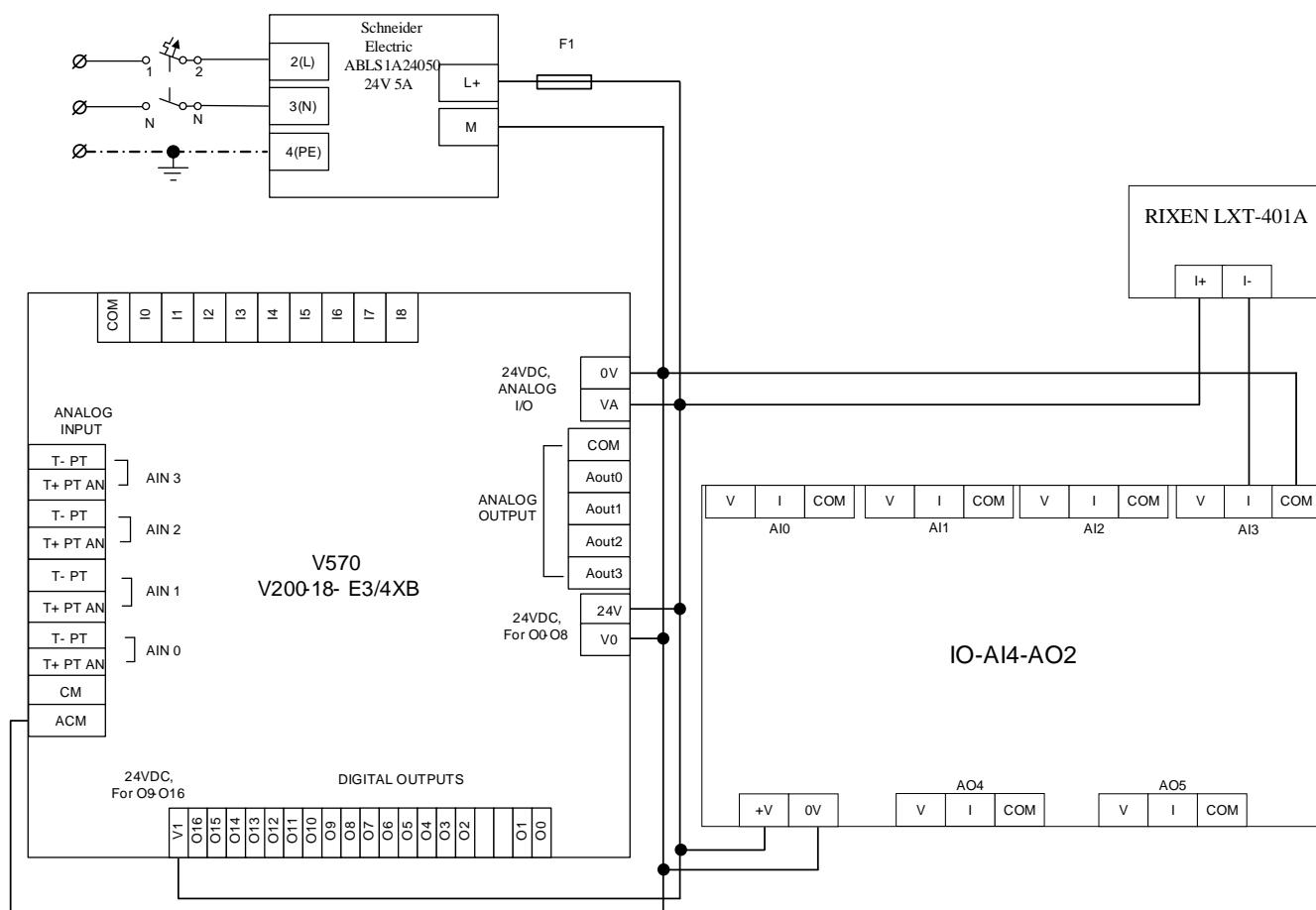


Рис.6.3 Схема підключення вимірювального перетворювача освітленості RIXEN LXT-401A

Приклад схеми підключення реле перепаду тиску Therмокон PS500:

Електричне підключення відбувається наступним чином: реле володіє трьома контактами – нормально відкритим (NO), нормально закритим (NC) та головним контактом (COM). На контакт COM підключається лінія +24 В DC з блоку живлення. Контакт NO в свою чергу – до дискретного входу ПЛК.

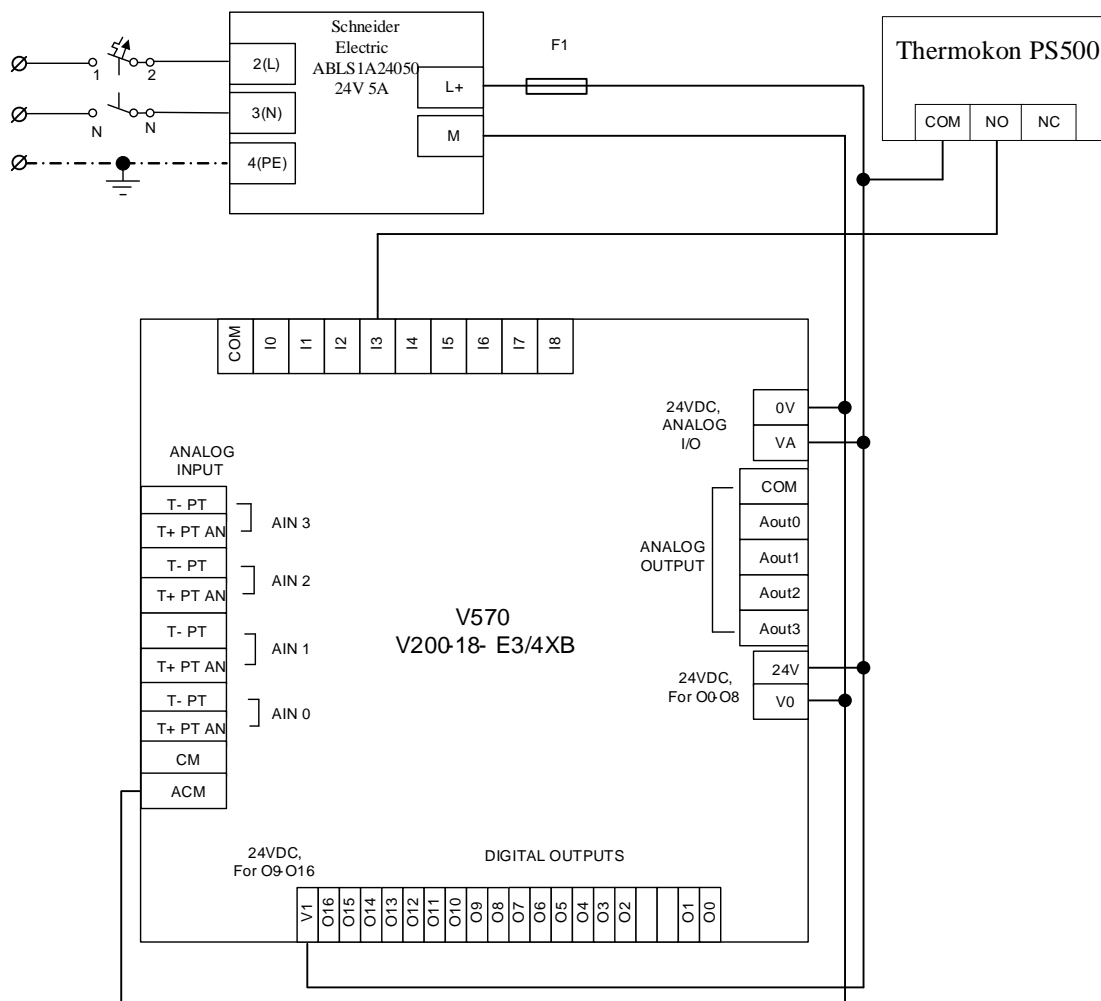


Рис.6.4 Схема підключення реле перепаду тиску Thermokon PS500

Приклад схеми підключення індуктивного датчика положення OMRON TL-Q5MB1-R:

Omron TL-Q5MB1-R є індуктивним датчиком типу PNP з нормально відкритим виходом. Метод його електричного під'єднання передбачає підключення коричневого проводу до лінії +24 В, синього – до COM дискретних входів контролера, а чорного – до дискретного входу. При виявленні металевих об'єкта в зоні спрацювання, на вихідному чорному дроті з'являється напруга логічної "1" (+24 В).

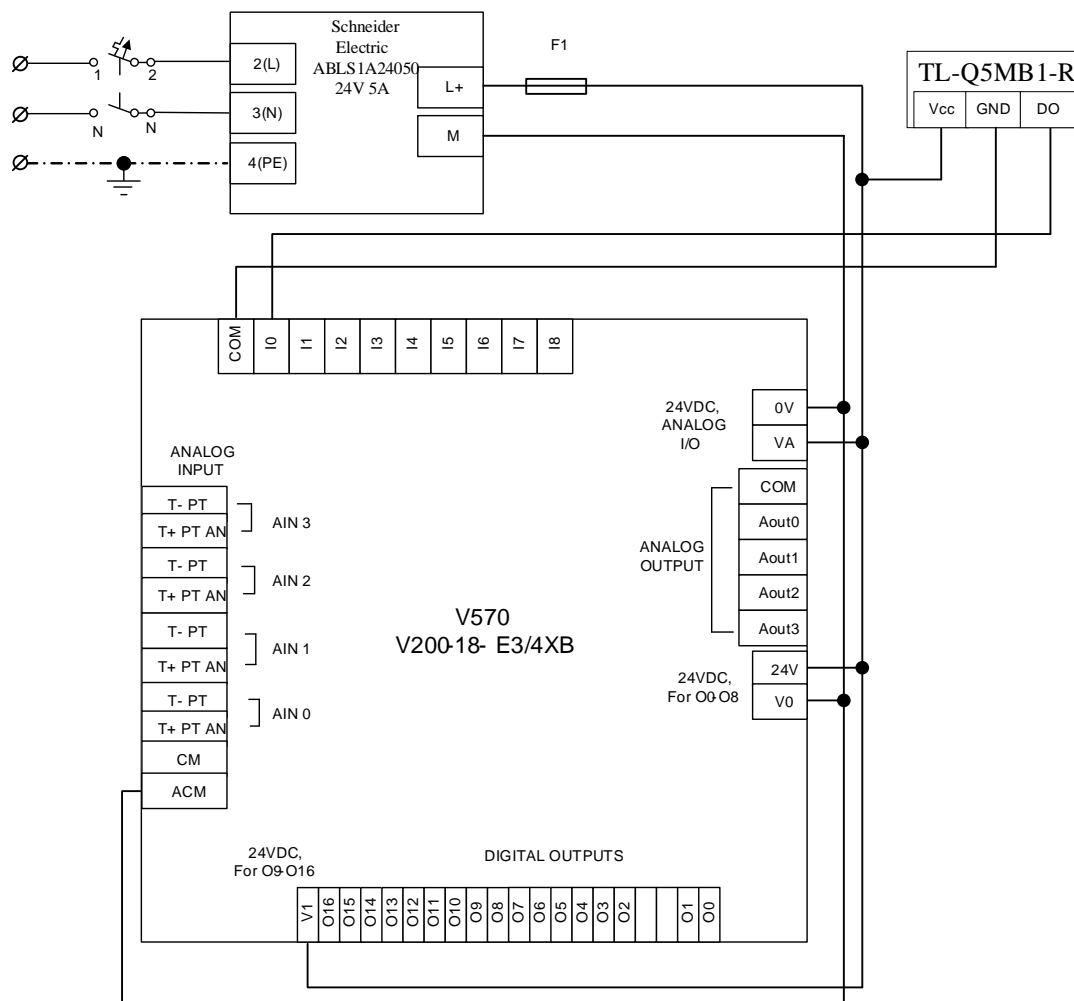


Рис.6.5 Схема підключення індуктивного датчика положення OMRON TL-Q5MB1-R

Приклад схеми підключення електромагнітного клапана Danfoss EV260B з катушкою BL024D 018Z0291

Соленоїд пропорційного електромагнітного клапана використовує вихідний струмовий аналоговий сигнал, що формується на аналоговому виході ПЛК. Під'єднання виконується наступним методом: на входи Vcc і GND подається живлення соленоїда, «I+» з'єднується з аналоговим виходом ПЛК, а «I-» підключається до «COM» того ж аналогового виходу. Контакт «PE» призначений для заземлення.

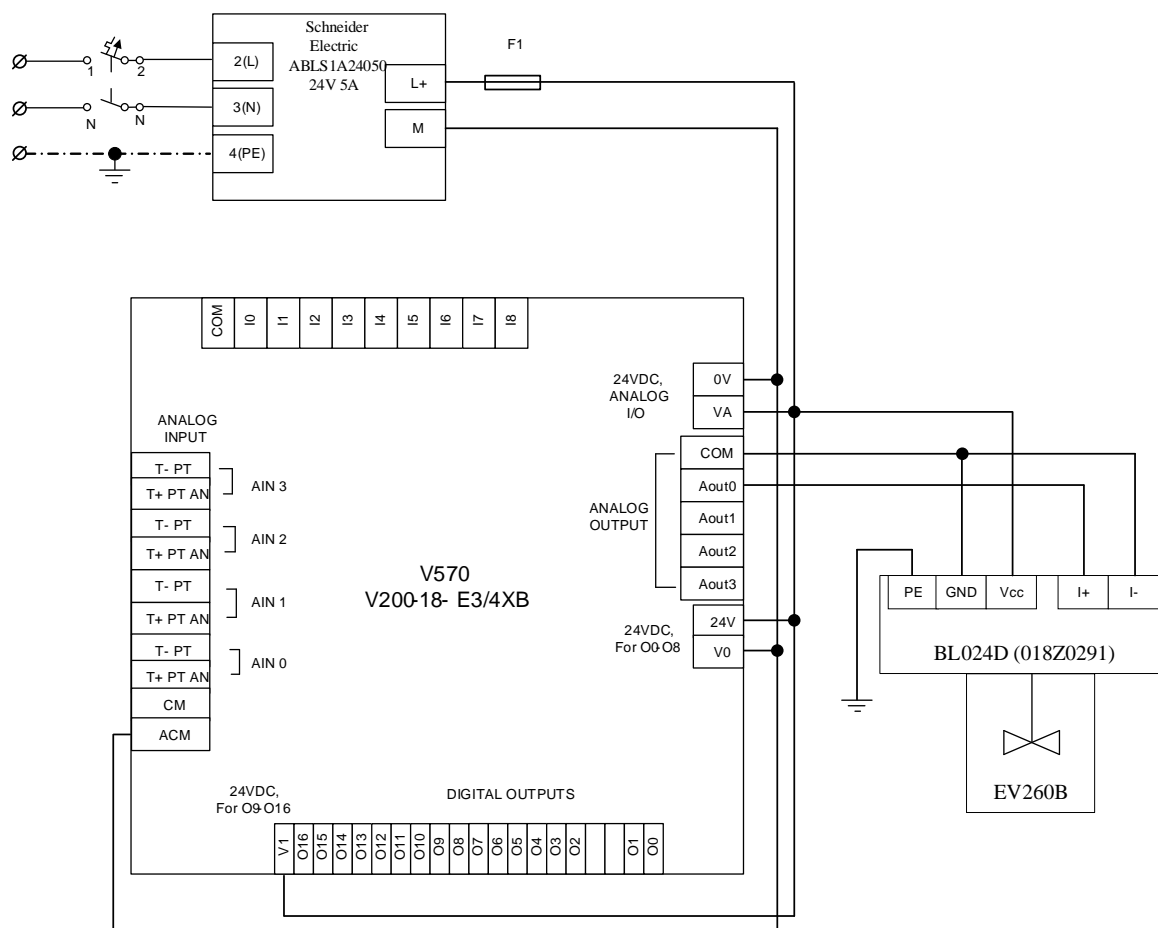


Рис.6.6 Схема підключення котушки BL024D 018Z0291

Приклад схеми підключення електромагнітних контакторів та двигунів

Всі вибрані в даній роботі електромагнітні контактори володіють котушкою керування напругою +24 В, що дозволяє керувати ними за допомогою дискретних виходів ПЛК. До клемі +A1 підключається дискретний вихід з контролера, а -A2 – до лінії +0 В блоку живлення. Підключення електродвигуна до контакторів відбувається стандартним чином: три фази електромережі загального користування підключаються до клем L1 L2 L3, в той час, як виводи обмоток електродвигуна – до клем L4, L5 та L6. Реверсивні контактори підключаються за аналогічним принципом, але зі зміною місцями 1 і 3 обмотки електродвигуна (щоб змінити напрямок обертання ротора). При цьому друга пара контактів керується окремим реле, з блокуванням одночасного ввімкнення.

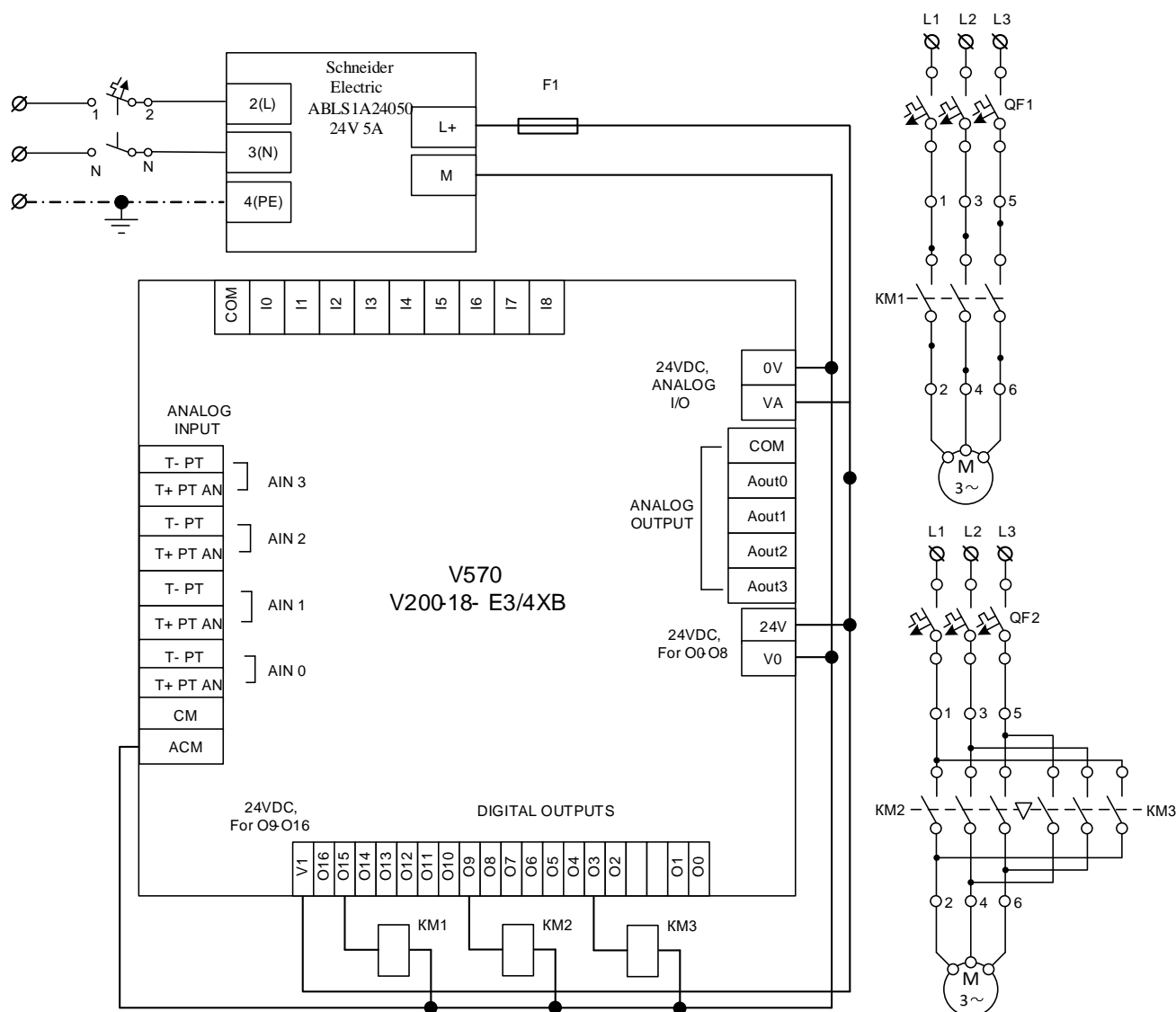


Рис.6.7 Схема підключення електромагнітних контакторів та електродвигунів

Висновки до розділу 6

Для повноцінної реалізації системи автоматизації контролю клімату було розроблено схему електричних з'єднань обраних технічних засобів, описаних у розділі 3. Повна електрична схема наведена на графічному листі №3. Особлива увага приділена підключенню вимірювальних перетворювачів вологості та температури повітря, освітленості, а також під'єднанню електроприводів до контакторів.

РОЗДІЛ 7. РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ В ТЕПЛИЦІ ПРОМИСЛОВОГО ТИПУ

У цьому розділі розглядається система автоматичного регулювання (далі – САР) вологості ґрунту в теплиці промислового типу. Досліджуваний контур регулювання є частиною загальної функціональної схеми автоматизації, розробленої у розділі 4 та позначений на графічному листі №1 під порядковим номером 4.

Об'єктом регулювання є ділянка ґрунту, зволоження якого відбувається методом крапельного поливу. Вихідною величиною у даному контурі є поточна вологість ґрунту, яка вимірюється давачем на визначеній глибині. Номінальне значення вологості ґрунту – 75%.

Регулююча дія здійснюється зміною ступеня відкриття клапану, розміщеного на трубопроводі з мережевою водою.

Найпоширеніше збурення – зміна температури повітря в теплиці.

Для побудови моделі об'єкта регулювання використовується крива розгону, що отримана за допомогою переміщення регулюючого органу на 12%.

Таблиця 7.1

Крива розгону, отримана при стрибкоподібному
переміщенні регулюючого органу на 12%

Час, с	Вологість ґрунту, %
1	2
0	75.00
35	75.08
70	75.25
105	75.79
140	76.53
175	77.54
210	78.41

Продовження таблиці 7.1

1	2
245	78.98
280	79.54
315	79.97
350	80.44
385	80.67
420	80.74
455	80.80
490	80.85
525	80.91
560	80.95
595	81.00

Вимоги до якості процесу регулювання, які слід задовільнити у процесі розрахунку регулятора:

1) Максимальне динамічне відхилення A_I не має бути більшим за 5%. Процес зміни вологості ґрунту є достатньо інерційним, відповідно надто велике динамічне відхилення може призвести до надмірного зволоження чи пересихання протягом тривалого часу, що призведе до погіршення умов росту рослин.

2) Допустима похибка регулювання Δ не більше ніж 1% гарантує достатню точність процесу регулювання, запобігаючи систематичним відхиленням від заданого рівня вологості ґрунту.

3) Обмеження часу регулювання t_p до 7 хвилин (420 секунд) дозволяє оперативно усунути відхилення і уникнути негативного впливу деяких видів збурень, наприклад різких стрибків температури повітря чи ґрунту.

4) Ступінь коливальності $m = 0.32$. Значення, менше 0.32 призведе до збільшення амплітуди коливань та погіршення стабільності.

7.1 Побудова моделі об'єкта керування

Для синтезу системи автоматичного регулювання необхідно перш за все мати математичну модель об'єкта керування. На підставі такої моделі можна вибрати структурну схему системи автоматичного регулювання, алгоритм керування регулятора. Розглянемо криву розгону, отриману при стрибкоподібній зміні ступеня відкриття регулюючого органу на 12%:

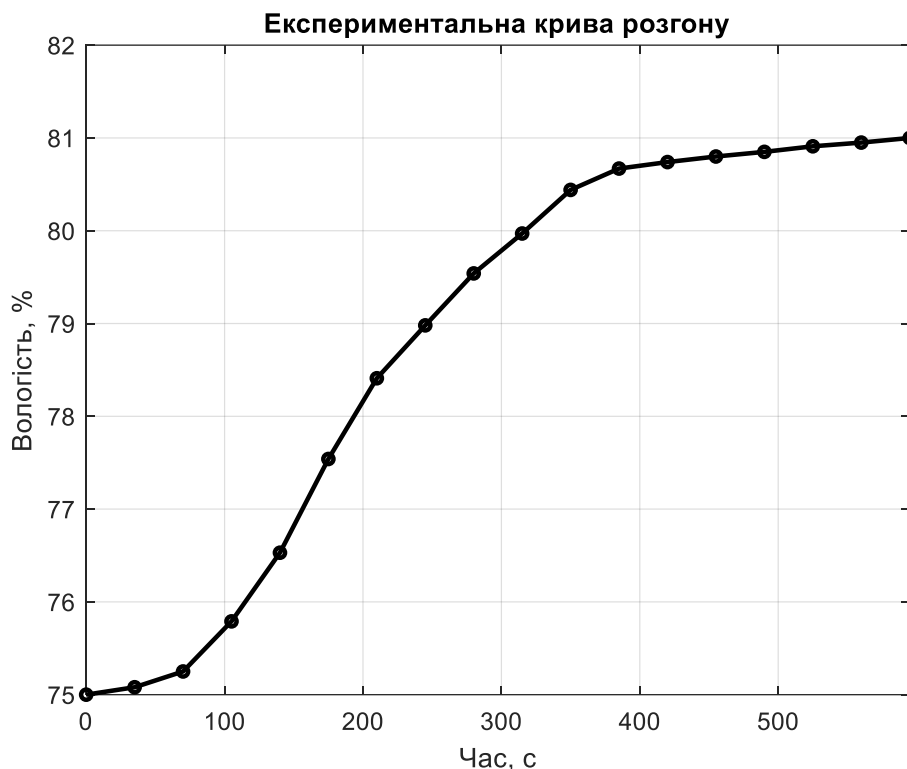


Рис. 7.1 Експериментальна крива розгону при стрибкоподібній зміні ступеня відкриття РО на 12%

Провівши візуальний аналіз рисунку 7.1, за методикою, описаною в [34], було прийняте рішення знаходити математичну модель у вигляді послідовно з'єднаних аперіодичних ланок з однаковими сталими часу і ланки запізнення.

Тоді передавальна функція має наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{1}{(Tp + 1)^n} e^{-\tau p}, \quad (7.1)$$

де T – стала часу аперіодичної ланки;

τ – час запізнення;

n – кількість аперіодичних ланок;

Для спрощення розрахунків в процесі знаходження параметрів моделі, виконуємо нормування експериментальної кривої розгону, використовуючи формулу:

$$h^e(t) = \frac{y^e(t) - y_H}{\Delta y}, \quad (7.2)$$

де $y^e(\infty) = 81\%$ – значення вихідного параметра після завершення перехідного процесу;

$y_H = 75\%$ – початкове значення регульованої величини;

За результатами розрахунків по формулі (7.2) отримуємо нормовану експериментальну криву розгону (рис. 7.2).

Для визначення кількості n аперіодичних ланок з таблиці 7.2 потрібно знайти готові розраховані значення t_{05}/T та t_{09}/T . З нормованої експериментальної кривої розгону (рисунок 7.2) визначено, що $t_{05} = 193.51$ с, $t_{09} = 347.02$ с, а відношення $t_{05}/t_{09} = 0.558$.

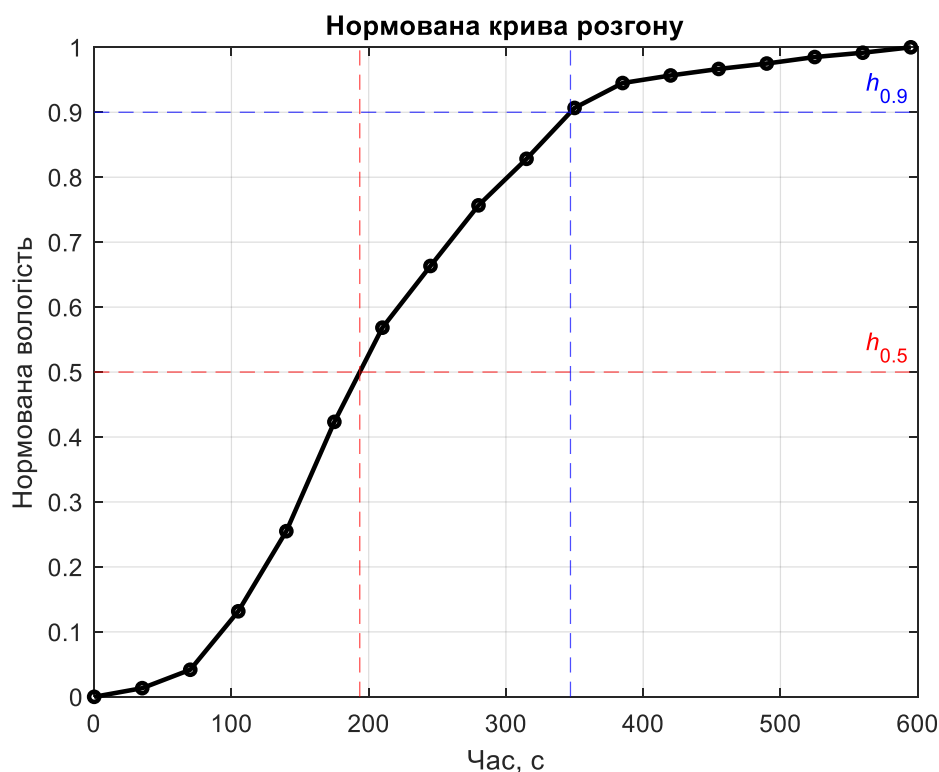


Рис. 7.2 Нормована експериментальна крива розгону та визначення t_{05} і t_{09}

Необхідно перевірити умову, щоб впевнитися в правильності вибору передавальної функції:

$$0.43 \leq t_{05} / t_{09} \leq 0.68 \Rightarrow 0.43 \leq 0.558 \leq 0.68 .$$

Умова виконується, отже можна користуватись таблицею 7.2. Найближчим значенням до $t_{05} / t_{09} = 0.558 \in 0.55$, що відповідає чотирьом аперіодичним ланкам ($n = 4$). Відношення параметрів t_{05} і t_{09} до сталої часу T дорівнює 3.67 та 6.68 відповідно.

Таблиця 7.2

Визначення кількості n аперіодичних ланок

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{05} / T	1.68	2.67	3.67	4.67	5.67	6.67	7.67	8.69	9.69
t_{09} / T	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.17	12.99	14.21
t_{05} / t_{09}	0.43	0.5	0.55	0.58	0.61	0.63	0.65	0.67	0.68

Час запізнення визначається з рівняння:

$$\frac{t_{05} - \tau}{t_{09} - \tau} = 0.55 \Rightarrow \frac{193.51 - \tau}{347.02 - \tau} = 0.55 \Rightarrow \tau = 5.886. \quad (7.3)$$

Розрахунок сталої часу T відбувається за наступною формулою:

$$\begin{aligned} (t_{05} - \tau) / T &\Rightarrow (193.51 - 5.886) / T = 3.67 \Rightarrow T_{05} = 51.12371 \\ (t_{09} - \tau) / T &\Rightarrow (347.02 - 5.886) / T = 6.68 \Rightarrow T_{09} = 51.06796 \\ (T_{05} + T_{09}) / 2 &= (51.12371 + 51.06796) / 2 = 51.096 \approx 51c. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Передавальний коефіцієнт, або як ще його називають коефіцієнт передачі k визначається з експериментальної кривої розгону (рисунок 7.1) за формулою:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \Rightarrow \frac{6}{12} = 0,5 \left[\frac{\%}{\% \text{ ходу } PO} \right] \quad (7.5)$$

З врахуванням визначених параметрів, передавальна функція об'єкта регулювання (7.1) набуває вигляду:

$$W(p) = \frac{0.5}{(51p+1)^4} e^{-5.886p} \quad (7.6)$$

Перевірка адекватності знайденої динамічної моделі

Для оцінки адекватності розрахованої математичної моделі виконується порівняння значень кривої розгону, отриманої теоретичним шляхом, із відповідними значеннями експериментальної кривої розгону, знятої з об'єкта регулювання.

Порівняння здійснюється за допомогою програми, реалізованої в програмному середовищі MATLAB. Для побудови теоретичної кривої розгону застосовується формула:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq t < \tau \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau}{T} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{t-\tau}{T}\right)^i}, & \text{при } t \geq \tau \end{cases} \quad (7.7)$$

```
% Вхідні дані експериментальної кривої розгону
t=[0 35 70 105 140 175 210 245 280 315 350 ...
   385 420 455 490 525 560 595];
h_exp=[75 75.08 75.25 75.79 76.53 77.54 ...
        78.41 78.98 79.54 79.97 80.44 80.67 ...
        80.74 80.80 80.85 80.91 80.95 81];
% Параметри функції передачі
tau=5.886; T=51; n=4;
% Обчислення розрахованої кривої
h_roz=zeros(size(t));
for j=1:length(t)
    if t(j)<tau
        h_roz(j)=0;
    else
        sum_p=0;
        for i=0:(n-1)
            sum_p=sum_p+(1/factorial(i)) ...
                * ((t(j)-tau)/T)^i;
        end
        h_roz(j)=1-exp(-(t(j)-tau)/T)*sum_p;
    end
end
% Масштабування розрахованої кривої розгону до значень
експериментальної
h_roz_s=h_roz*(81 - 75)+75;
```

```

% Побудова графіка
figure; hold on;
plot(t,h_exp, '-ok', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',4);
plot(t,h_roz_s, '--r', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',4);
xlabel('t, c'); ylabel('h, %');
legend('Експериментальна', 'Розрахована');
title('Порівняння експериментальної та розрахованої кривої розгону');
grid on;

```

Результатом виконання програми є графік порівняння експериментальної та розрахованої, на основі функції передачі (7.6), кривої розгону, що зображений на рисунку 7.3.

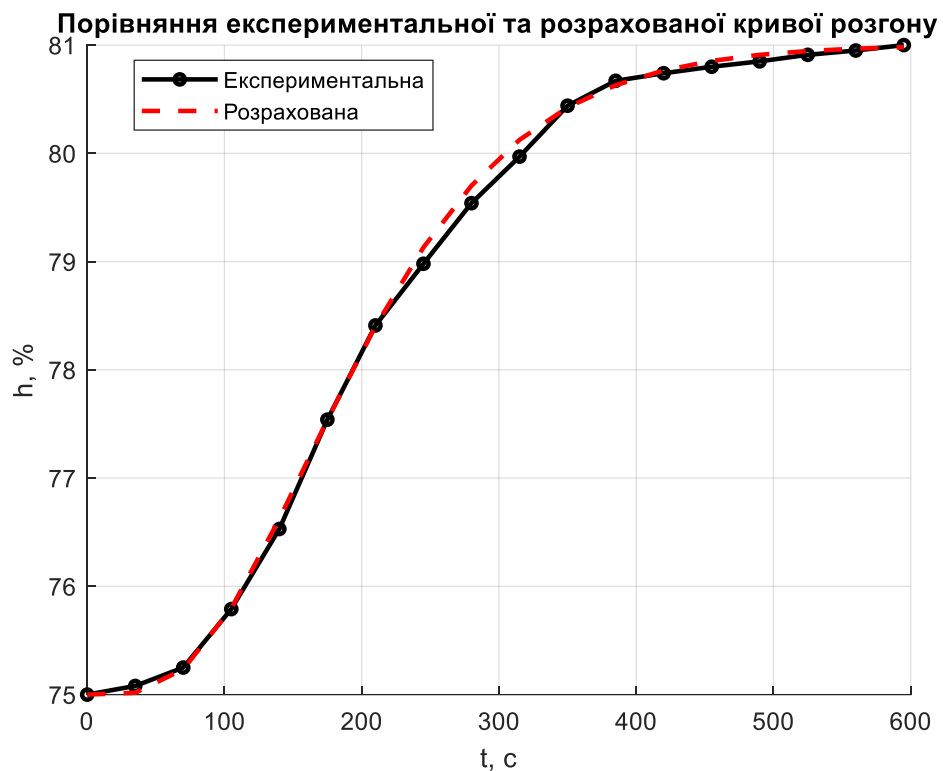


Рис. 7.3 Порівняння експериментальної (чорний) та розрахованої (червоний) кривих розгону при стрибкоподібній зміні ступеня відкриття РО на 12%

Критерієм оцінки якості математичної моделі є відносна зведена похибка $\delta = \Delta \cdot 100\%$. Якщо вона не перевищує 3% то можна робити висновки, що точність апроксимації задовільна. Також, одним з методів визначення відносної зведеної

похибки, є безпосереднє порівняння значень експериментальної кривої розгону з теоретично розрахованими у задані моменти часу.

$$\delta = \frac{y(t) - y^e(t)}{\Delta y^e} \cdot 100\% \quad (7.8)$$

де $y^e(t)$ - значення експериментальної кривої розгону;

$y(t)$ - значення теоретично розрахованої кривої розгону;

За результатами розрахунків, максимальна зведена похибка $\delta = 2.7\%$, що відповідає критерію адекватності знайденої моделі, відносно експериментальної кривої розгону.

За таких умов можна стверджувати, що передавальна функція у вигляді (7.6) адекватно описує об'єкту регулювання.

7.2 Вибір структурної схеми системи регулювання

Структурна схема системи регулювання будується на основі аналізу технологічного процесу та відображає взаємозв'язок між об'єктом, регулятором, виконавчим механізмом та засобами вимірювання технологічних параметрів.

Розрахована на основі експериментальної кривої розгону передавальна функція об'єкта регулювання (7.6) використовуватиметься у прямому зв'язку структурної схеми, водночас автоматичний регулятор – у колі зворотного зв'язку. Параметри налаштування регулятора визначаються таким чином, щоб забезпечити дотримання вимог до якості процесу регулювання.

З урахуванням інерційних властивостей об'єкта та вимог до швидкодії, точності і перерегулювання, доцільно застосувати ПІД регулятор. Завдяки поєднанню пропорційної, інтегральної та диференціальної дій, ПІД регулятор забезпечує усунення статичної похибки, швидке реагування на збурення та покращення стійкості, що робить його ефективним для інерційних об'єктів з самовирівнюванням.

Розрахунок оптимальних параметрів регулятора

У даній роботі для розрахунку параметрів ПД регулятора застосовано метод розширених частотних характеристик [35,36], який забезпечує достатню точність розрахунку параметрів налаштування.

Метод розширених частотних характеристик ґрунтується на використанні амплітудно-фазового критерію стійкості, або як ще його називають критерій стійкості Найквіста, який оцінює запас стійкості системи [34]. Розширені частотні характеристики отримуються шляхом підстановки комплексної змінної у передавальну функцію об'єкта:

$$p = -m\omega \pm i\omega, \quad (7.9)$$

де ω - кругова частота;

m - ступінь коливальності;

Ступінь коливальності m характеризує запас стійкості системи, і розраховується за формулою:

$$m = \alpha / \omega, \quad (7.10)$$

де α - абсолютне значення дійсної частини комплексного кореня характеристичного рівняння;

Забезпечення необхідного запасу стійкості системи базується на амплітудно-фазовому критерії Найквіста, що застосовується до розширених частотних характеристик розімкненої системи регулювання:

$$W_{pc}(m, i\omega) = W_{op}(m, i\omega)W_p(m, i\omega) = -1. \quad (7.11)$$

Формула (7.11) описує розширену амплітудно-фазову характеристику розімкненої системи регулювання, яка складається з розширеної амплітудно-фазової характеристики об'єкта регулювання (РАФХ), та розширеної АФХ регулятора.

Передавальна функція ПД регулятора з паралельною структурою має вигляд:

$$W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_{iz}p} + T_{\delta}p, \quad (7.12)$$

де k_p - пропорційна складова;

$\frac{k_p}{T_{i3}p}$ - інтегральна складова;

$T_{\theta}p$ - диференціальна складова;

Розрахунок параметрів ПІД регулятора варто розпочати з розрахунку розширеної фазочастотної характеристики, а також пошуку робочого діапазону частот регулятора ω^* та ω^{**} . При цих частотах характеристика досягає значень $(-\pi/2) + \arctg m$ та $-\pi$ відповідно. Для розрахунку створено програму:

```
% Параметри ОР
T=51; tau=5.886;
m=0.32; k=0.5; Td=1;
k=0.195; m=0.35;
w=0:0.0001:0.018;
p=-w.*m+i.*w;
% Передавальна функція ОР
Wor=k*exp(-tau*p)./(T*p+1).^4;
% Розрахунок РФЧХ та  $w^*$  та  $w^{**}$ 
fi=phase(Wor);
fi_w1=-pi/2+atan(m);
fi_w2=-pi;
x1=[w(1) w(end)]; y1=[fi_w1 fi_w1];
[w1,yi1]=polyxpoly(x1,y1,w,fi)
x2=[w(1) w(end)]; y2=[fi_w2 fi_w2];
[w2,yi2]=polyxpoly(x2,y2,w,fi)
yLim=yLim();
% Побудова графіків
figure(1)
plot(w,fi,'k-',[w(1) w1],[yi1 yi1],'r.-',[w1 w1],[yi1
yLim(1)],'r.-'...
,[w(1) w2],[yi2 yi2],'b.-',[w2 w2],[yi2 yLim(1)],...
'b.-'); grid;
xlabel('w,рад/с'); ylabel('fi_{OP}, рад');
```

Результатом виконання програми є графік розширеної фазочастотної характеристики, зображений на рисунку 7.4, з якого визначаються частоти робочого діапазону регулятора $\omega^*=0.005481$ та $\omega^{**}=0.01408$.

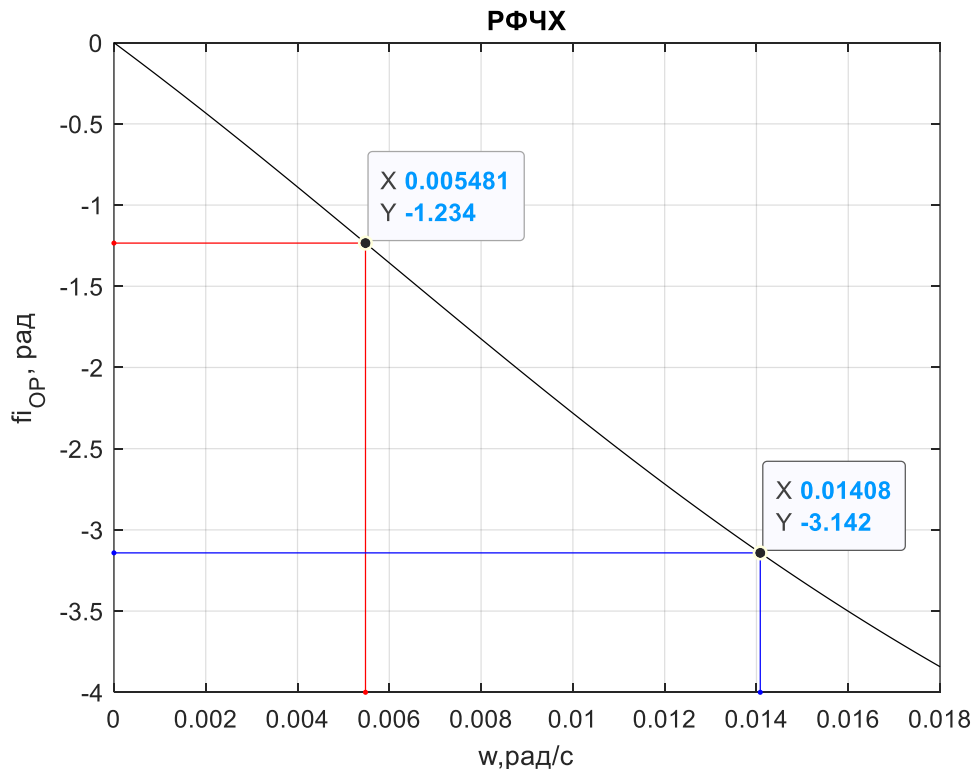


Рис. 7.4 Розширена фазо-частотна характеристика об'єкта регулювання та параметри ω^* і ω^{**}

Параметри налаштування ПІД регулятора k_p та $\frac{k_p}{T_{i3}}$ розраховуються за такою

формулою:

$$\begin{cases} \frac{k_p}{T_{i3}} = \frac{\omega \sqrt{m^2 + 1} \cdot [m \cdot \cos \gamma(m, \omega) - \sin \gamma(m, \omega)]}{A_{OP}(m, \omega)} + \omega^2 (1 + m^2) T_D \\ k_p = \frac{\sqrt{m^2 + 1} \cdot \cos \gamma(m, \omega)}{A_{OP}(m, \omega)} + 2T_D m \omega \end{cases}, \quad (7.13)$$

де $\gamma(m, \omega) = \text{abs}[\varphi_{op}(m, \omega)] + \text{arctgm} - \pi$;

$A_{OP}(m, \omega) = |W_{OP}(m, i\omega)|$ - розширена амплітудно-частотна характеристика об'єкта регулювання;

$\varphi_{op}(m, \omega)$ - розширена фазо-частотна характеристика об'єкта регулювання;

При цьому, згідно методики розрахунку ПІД регулятора [34-36], час диференціювання T_D фіксують на певному значенні, а розрахунок параметрів пропорційної та інтегральної складової здійснюють за формулою (7.13).

Наступним кроком, в площині параметрів $k_p, \frac{k_p}{T_{iz}}$, для заданих значень m та T_0

будується границя області запасу стійкості. Параметри налаштування

$(k_p)_{onm}, \left(\frac{k_p}{T_{iz}}\right)_{onm}$ регулятора визначають наближено, за екстремумом цієї границі.

Для розрахунку границі області запасу стійкості використовується розроблена програма:

```

clc; clear all;
% Параметри ОР
T=51;k=0.5;m=0.32;tau=5.886;
w1=0.005481; w2=0.01408;
Td=50; w=w1:0.0001:w2;
% Передавальна функція ОР
p=-w.*m+i.*w;
Wor=k*exp(-tau*p)./(T*p+1).^4;
A=abs(Wor); fi=phase(Wor);
% Розрахунок ПІД
y=abs(fi)+atan(m)-pi;
kp_Tiz=(w.*sqrt(m^2 + 1).*(m.*cos(y)-sin(y))./A)...
+w.^2.*(1+m^2).*Td;
kp=(sqrt(m^2+1)*cos(y)./A)+2*Td*m*w;
t=0:2000;
[maxVal, maxIdx]=max(kp_Tiz);
kp_max=kp(maxIdx)
kp_Tiz_max=maxVal
Tiz=kp_max/kp_Tiz_max
xLim=xlim(); yLim=ylim();
% Побудова графіків
figure(1) plot(kp,kp_Tiz,'-k'); hold on;
plot(kp_max,kp_Tiz_max,'.r','MarkerSize',8,...
'LineWidth',1.8); grid;
title('Границя області запасу стійкості');
xlabel('k_{p}'); ylabel('k_{p}/T_{iz}');

```

Як результат виконання програми отримано графік границі області запасу стійкості (рисунок 7.5), з якого наближеним методом визначено параметри

$$(k_p)_{onm} = 2.1277, \left(\frac{k_p}{T_{iz}}\right)_{onm} = 0.0213 \text{ та } T_{iz} = 99.9574.$$

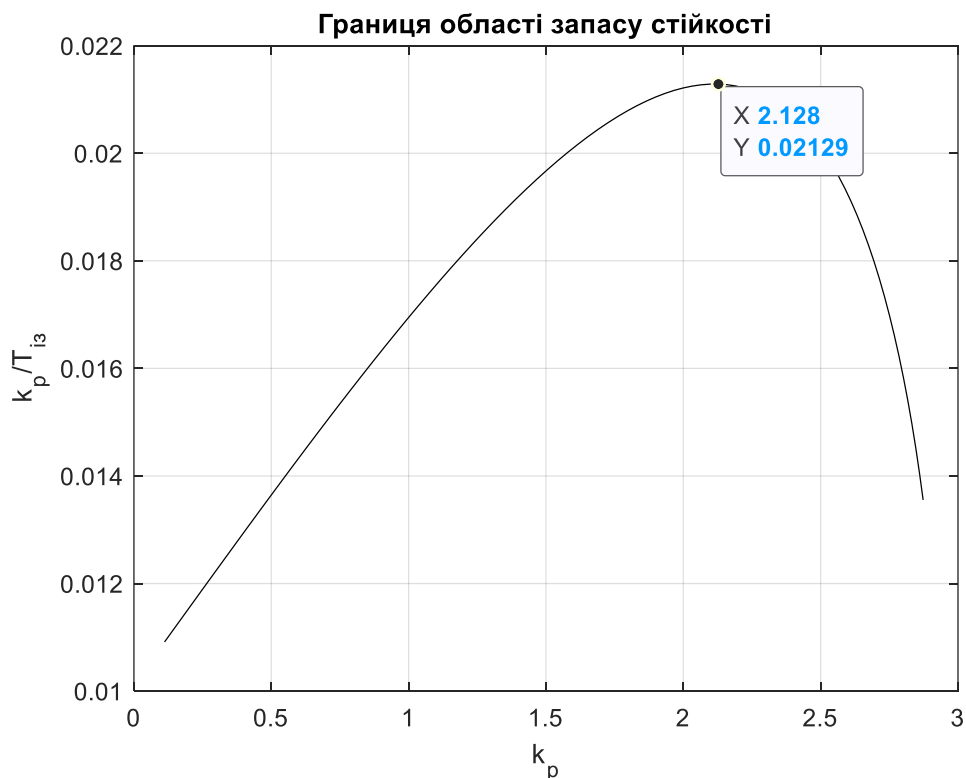


Рис. 7.5 Границя області запасу стійкості для системи регулювання вологості ґрунту з ПД регулятором

Оптимальні значення параметрів налаштування ПД регуляторів повинні задовольняти умову:

$$0 \leq \frac{T_d}{T_{is}} \leq 0.5 \Rightarrow 0 \leq \frac{50}{99.9574} \approx 0.5 \leq 0.5 \quad (7.14)$$

Оскільки умова (7.14) задовольняється, відповідно передавальна функція ПД регулятора набуває вигляду:

$$W(p) = 2.1277 + \frac{0.0213}{p} + 50p \quad (7.15)$$

7.3 Параметрична оптимізація системи регулювання

У теорії автоматичного регулювання одним із поширених підходів до кількісної оцінки якості функціонування САР є використання інтегральних критеріїв. Їх перевага полягає у можливості узагальненої числової характеристики якості процесу керування. Оптимальні параметри налаштування регулятора

можуть бути визначені на основі мінімізації цих критеріїв із урахуванням запасу стійкості системи [35].

Найпоширенішим критерієм для розрахунку оптимальних параметрів налаштування регулятора є друга інтегральна оцінка якості [36], яку розраховують за формулою:

$$J_2 = \int_0^{t_{\text{доп}}} \Delta x^2(t) dt, \quad (7.16)$$

де: $\Delta x(t)$ - похибка регулювання;

Для розрахунку оптимальних параметрів налаштування ПІД регулятора, які мінімізують другу інтегральну оцінку якості процесу регулювання при стрибкоподібній зміні ступеня відкриття РО на 20% ходу, застосовую програму, реалізовану в середовищі MATLAB:

```
% Параметри ОР
T=51;k=0.5;
m=0.32;tau=5.886;
w1=0.005481;w2=0.01508;
Td=72; w=w1:0.0001:w2;
% Передавальна функція ОР
p=-w.*m+i.*w; Wor=k*exp(-tau*p)./(T*p+1).^4;
% Розрахунок ПІД
A=abs(Wor); fi=phase(Wor); y=abs(fi)+atan(m)-pi;
kp_Tiz=(w.*sqrt(m^2 + 1).*(m.*cos(y)-sin(y))./A)...
+w.^2.*(1+m^2).*Td;
kp=(sqrt(m^2+1)*cos(y)./A)+2*Td*m*w;
% Розрахунок другої інтегральної оцінки
t=0:1000; s=tf('s');
for i=1:length(w)
Wor2=tf(k,[T 1])*tf(1,[T 1])...
*tf(1,[T 1])*tf(1,[T 1])*exp(-s*tau);
War=tf(kp_Tiz(i),[1 0])+tf(kp(i))+tf([Td 0],1);
Wall=feedback(Wor2,War); y=step(Wall,t)*20;
integ=trapz(t,y.^2); I(i)=integ;
end
% Пошук мінімального значення, кропт та kp/Tizoпт
Jmin=min(I); num=find(Jmin==I);
kpo=kp(num)
kp_Tizo=kp_Tiz(num)
Tiz=kpo/kp_Tizo
```

```

% Побудова графіку границі запасу стійкості
figure(1)
plot(kp, kp_Tiz, '-k'); hold on;
plot(kpo, kp_Tizo, '.r', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 1.8);
hold off; grid;
title('Границя області запасу стійкості');
xlabel('k_{p}'); ylabel('k_{p}/T_{із}');
% Побудова графіку J2
figure(2)
plot(kp, I, kpo, Jmin, '.r'); grid;
ylabel('J_{2}'); xlabel('k_{p}');
title('Друга інтегральна оцінка');

```

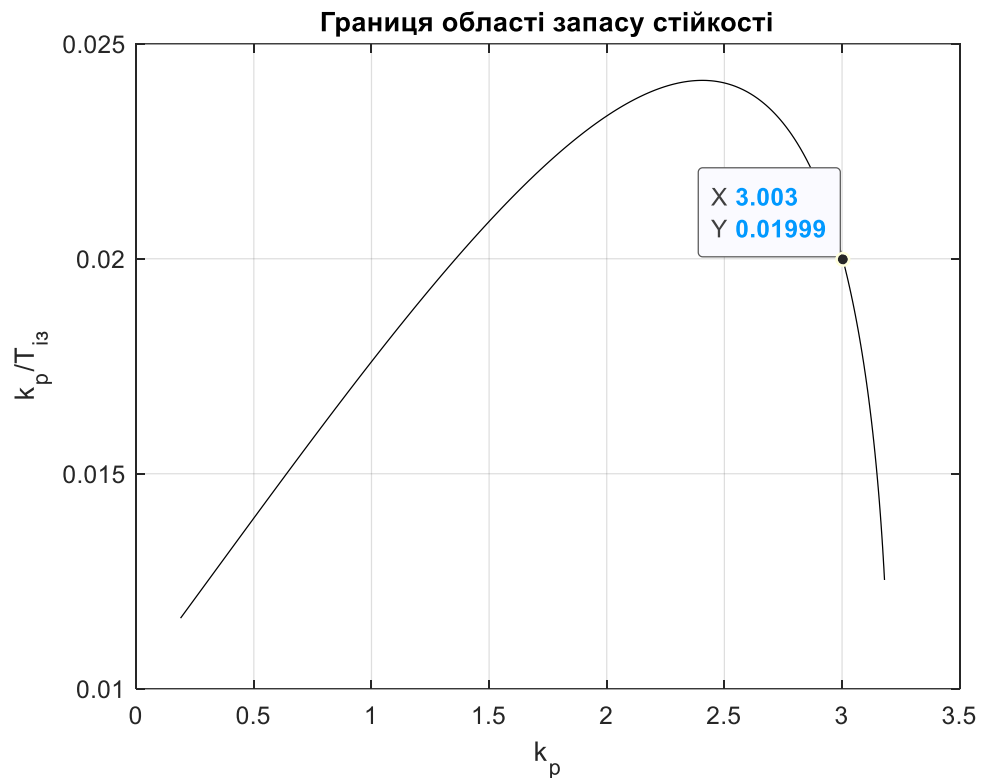


Рис. 7.6 Границя області запасу стійкості САР з оптимальними параметрами налаштування ПІД регулятора, знайденими за другою інтегральною оцінкою

З розрахунків програми отримуємо оптимальні значення налаштування ПІД регулятора за другою інтегральною оцінкою якості J_2 :

$$J_2 = 3634 \quad k_p = 3.0034 \quad \frac{k_p}{T_{із}} = 0.0199$$

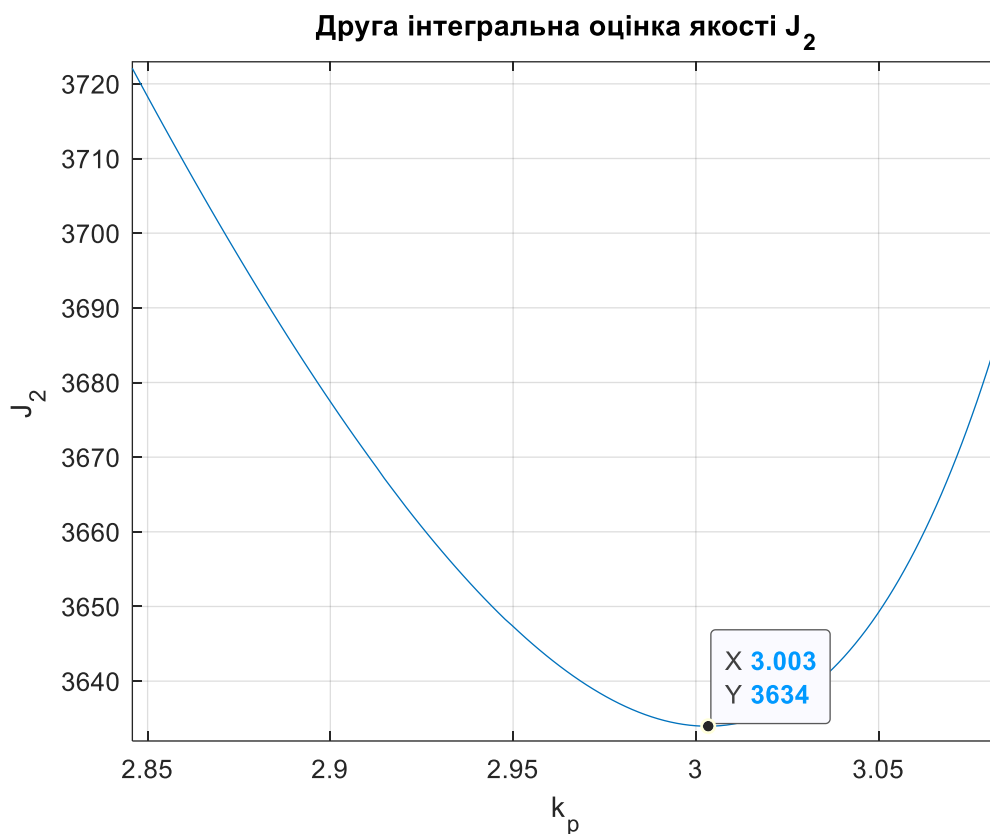


Рис. 7.7 Графік залежності між другою інтегральною оцінкою якості J_2 та коефіцієнтом передачі ПІД регулятора k_p

Таблиця 7.2

Параметри налаштувань ПІД регулятора, знайдених за різними методами

Назва методу	Пропорційна складова k_p	Інтегральна складова $\frac{k_p}{T_{is}}$	Диференціальна складова T_d
1	2	3	4
Наближенням (за максимумом $\frac{k_p}{T_{is}}$)	2.1277	0.0213	50
За другою інтегральною оцінкою якості	3.0034	0.0200	72

У таблиці 7.2 подано знайдені за наближенням методом та за другою інтегральною оцінкою якості регулювання, оптимальні параметри ПІД регулятора.

Порівняльний аналіз ефективності цих методів налаштування ПІД регулятора, а також результати моделювання відповідних САР, наведено у підрозділі 7.4.

7.4 Моделювання та дослідження системи регулювання

Дослідження систем автоматичного регулювання за допомогою моделювання в середовищі Simulink є ефективним засобом аналізу перехідних процесів, прогнозування поведінки об'єкта регулювання за різних збурень, а також перевірки ефективності застосованих регуляторів.

Для виконання моделювання необхідно побудувати в середовищі Simulink об'єкт регулювання, присвоївши йому параметри математичної моделі, розраховані у попередніх підрозділах, ПІД регулятор та збурюючу дію:

Передавальна функція об'єкта регулювання за регулювальною дією:

$$W(p) = \frac{0.5}{(51p + 1)^4} e^{-5.886p}$$

Передавальна функція ПІД регулятора: $W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_i s} + T_d p$

Передавальна функція найімовірнішого збурення, у вигляді зміни температури повітря в теплиці: $W(p) = \frac{1}{(74p + 1)^3} e^{-10p}$ (7.17)

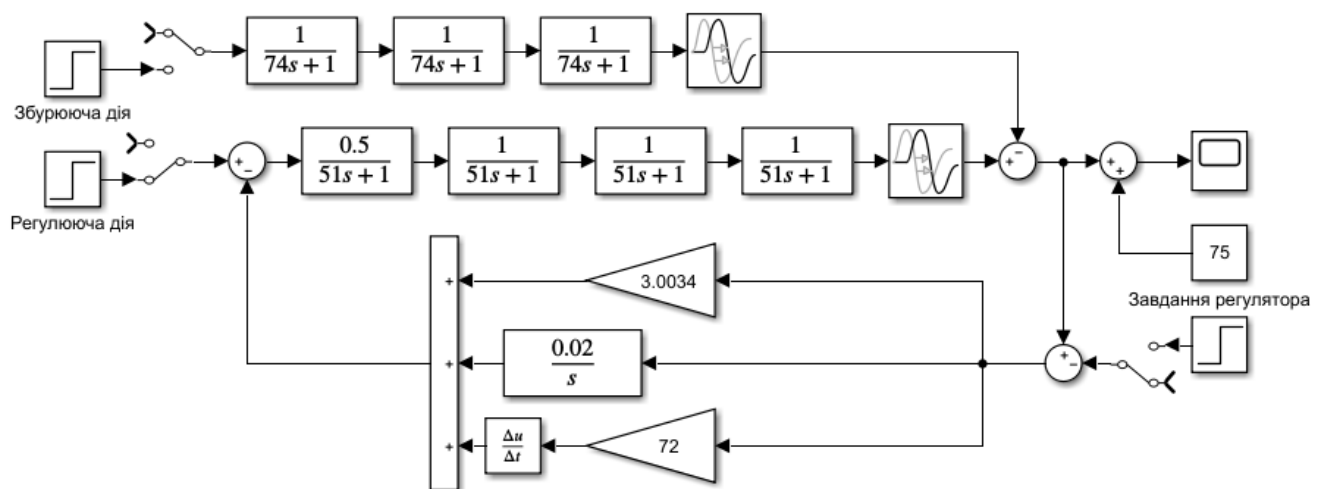


Рис. 7.8 Структурна схема САР вологості ґрунту

На першому етапі моделювання проводиться порівняльний аналіз оптимальних параметрів налаштувань ПІД регулятора (таблиця 7.2), визначених за наближеним методом та за другою інтегральною оцінкою якості регулювання. Метою цього етапу є вибір, за результатами моделювання, оптимального варіанту налаштувань, для забезпечення максимальної ефективності процесу регулювання.

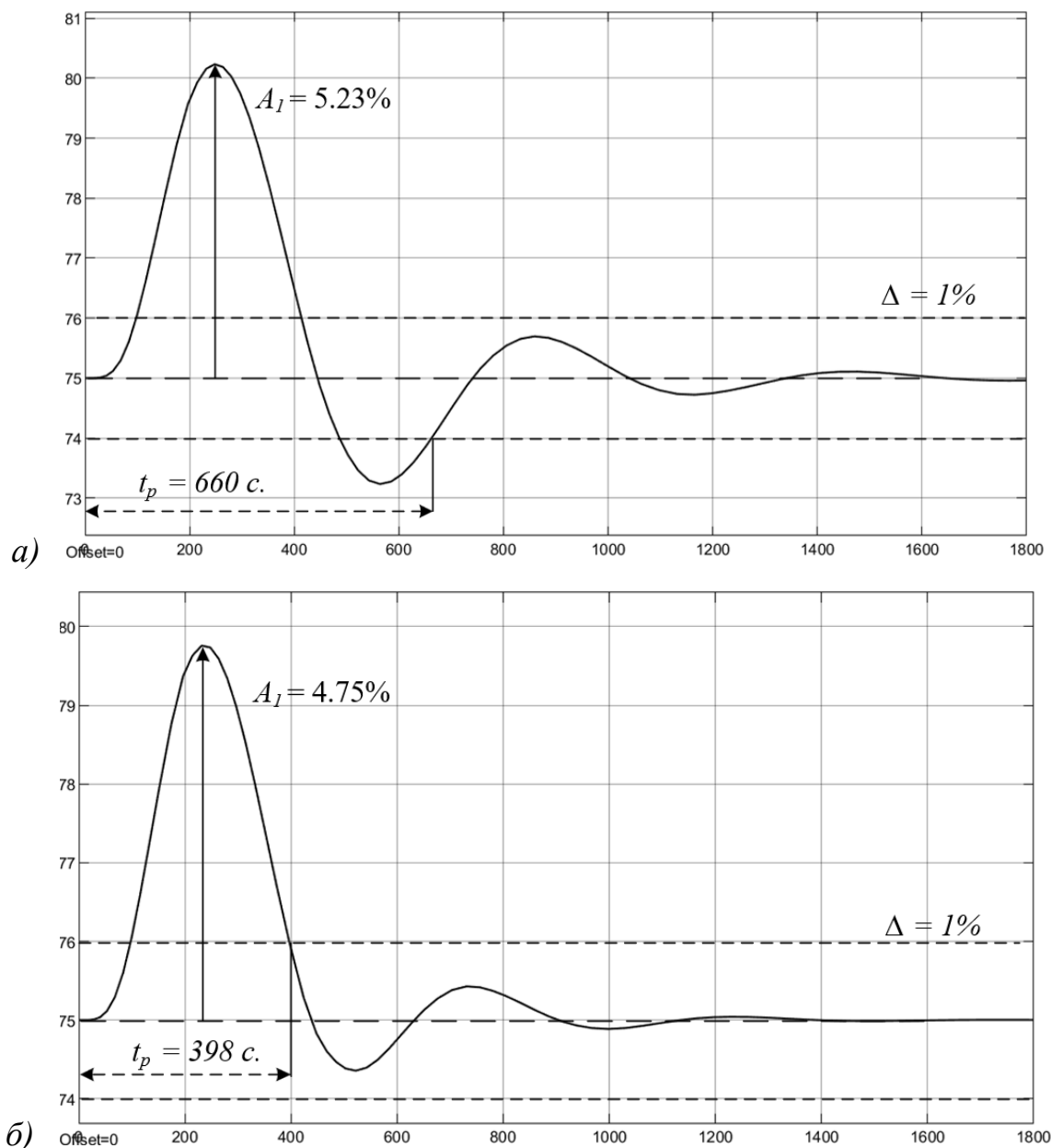


Рис. 7.9 Перехідний процес САР вологості ґрунту в теплиці при стрибкоподібній зміні ступеня відкриття РО на 20% ходу. Параметри налаштування, визначені за наближеним методом (а), та за другою інтегральною оцінкою якості регулювання (б)

Результатом аналізу перехідних процесів, що зображені на рисунку 7.9, є наступна таблиця, в якій виконане порівняння параметрів налаштування, знайдених різним способом, з вимогами, встановленими до якості процесу регулювання.

Таблиця 7.3

Порівняння показників якості САР з ПД регулятором,
налаштованим різними методами

Показники якості процесу регулювання	Вимоги до якості процесу регулювання	Наближений (за максимумом $\frac{k_p}{T_{із}}$)	За другою інтегральною оцінкою якості
Максимальне динамічне відхилення A_I , %	≤ 5	5.23	4.75
Час регулювання t_p , с.	≤ 420	660	398

З таблиці 7.3 можна зробити висновок, що параметри регулятора, визначені на основі другої інтегральної оцінки якості, є оптимальними для даного об'єкта керування, оскільки забезпечують дотримання встановлених в завданні вимог до якості, відповідно, можуть бути застосовані для подальшого моделювання САР. В такому випадку, передавальна функція регулятора з оптимальними параметрами налаштувань набуде вигляду:

$$W(p) = 3.0034 + \frac{0.02}{p} + 72p. \quad (7.18)$$

Другим етапом є моделювання системи (рисунок 7.8) при дії збурення та при зміні заданого значення вологості ґрунту на 3%.

До об'єкта регулювання застосовується збурююча дія у вигляді стрибкоподібної зміни температури повітря в теплиці на 3°C, що описується передавальною функцією (7.17).

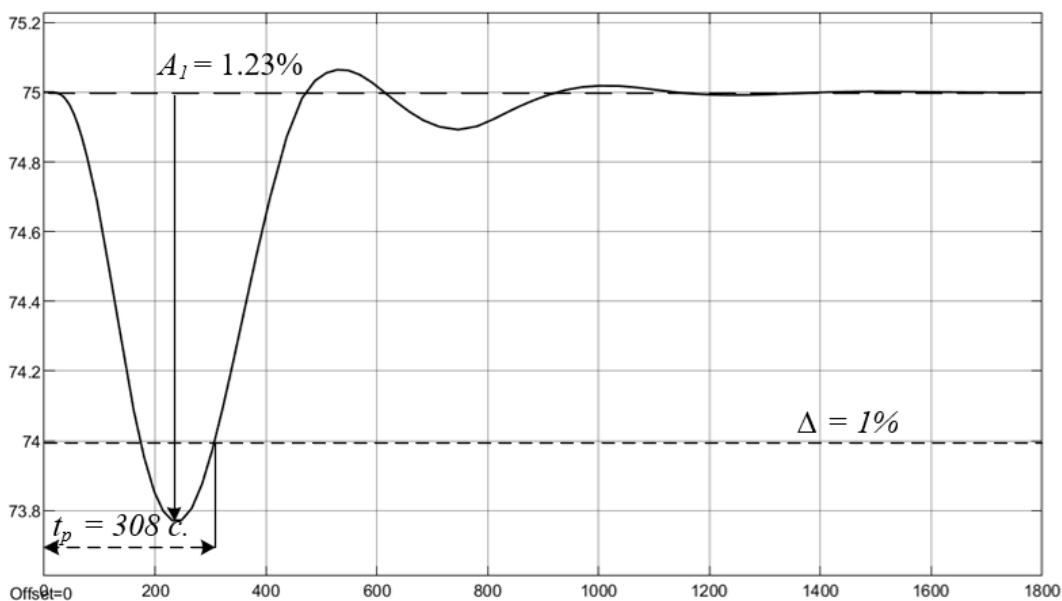


Рис. 7.10 Перехідний процес САР вологості ґрунту в теплиці при стрибкоподібній зміні температури повітря в теплиці на $+3^{\circ}\text{C}$

З аналізу графіку перехідного процесу, зображеного на рисунку 7.10, можна зробити висновок, що стрибкоподібна зміна температури повітря в теплиці на $+3^{\circ}\text{C}$ спричиняє реакцію системи з перерегулюванням $A_I = 1.23\%$ та часом регулювання $t_p = 308$ с., що свідчить про відповідність вимогам якості.

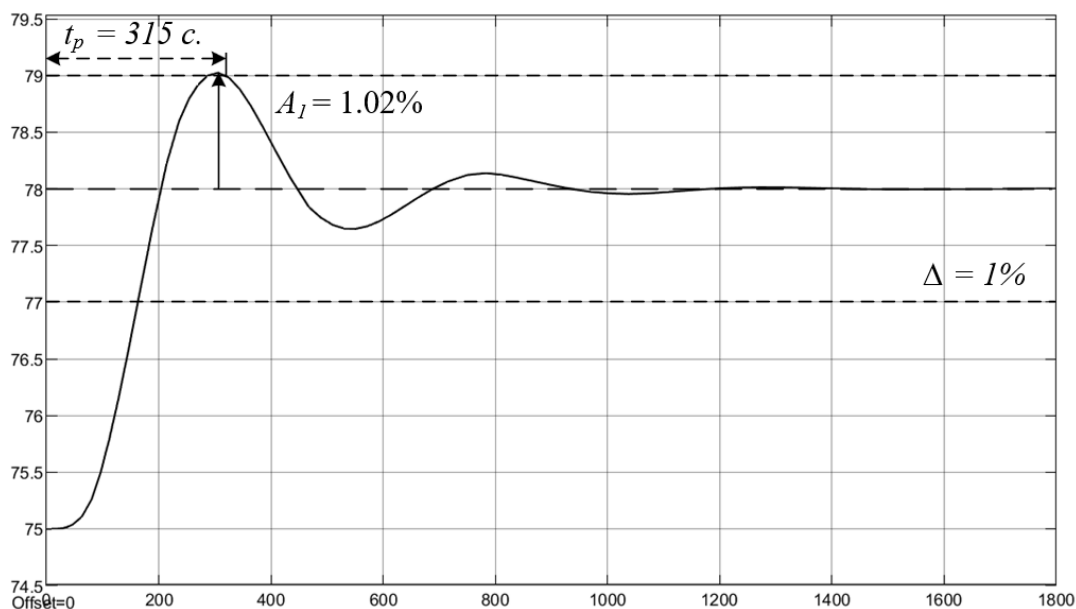


Рис. 7.11 Перехідний процес САР вологості ґрунту в теплиці при зміні заданого значення вологості ґрунту на 3%

Перехідний процес, зображений на рисунку 7.11, при зміні заданого значення вологості ґрунту на 3% досягає нового стану рівноваги за 315 секунд, із максимальним динамічним відхиленням $A_1 = 1.02\%$, що відповідає встановленим вимогам до якості процесу регулювання.

Результати моделювання САР вологості ґрунту в теплиці зібрані в таблиці 7.4. та представлені на графічному листі №4

Таблиця 7.4

Порівняння показників якості

Показники якості процесу регулювання	Вимоги до якості процесу регулювання	Переміщення РО на 20%	Зміна заданого значення вологості ґрунту на 3%	Збурення у вигляді зміни температури повітря в теплиці на +3°C
1	2	3	4	5
Максимальне динамічне відхилення A_1 , %	≤ 5	4.75	1.02	1.23
Час регулювання t_p , с.	≤ 420	398	315	308

Висновки до розділу 7

У розділі 7 проведена комплексна робота по ідентифікації та моделюванню системи автоматичного регулювання вологості ґрунту, що відповідає контуру 3 на функціональній схемі автоматизації (графічний лист №1).

На основі експериментальної кривої розгону (рисунок 7.1) була побудована адекватна математична модель, яку було використано при подальших розрахунках регулятора і моделюванні. Передавальна функція об'єкту регулювання:

$$W(p) = \frac{0.5}{(51p + 1)^4} e^{-5.886p}.$$

Параметри ПД регулятора було визначено за допомогою методу розширених частотних характеристик. Оптимальні значення отримано кількома способами, з-поміж яких параметри, розраховані на основі другого інтегрального критерію якості, найкраще задовольняли вимоги до якості регулювання. Передавальна функція ПД регулятора має такий вигляд:

$$W(p) = 3.0034 + \frac{0.02}{p} + 72p$$

Моделювання виконувалось при застосуванні до об'єкта регулювання збурення у вигляді зміни температури повітря в теплиці на $+3^{\circ}\text{C}$, при стрибкоподібній зміні ступеня відкриття РО на 20%, а також при зміні заданого значення вологості ґрунту на 3%. У всіх трьох випадках перехідні процеси відповідають вимогам, встановленим до якості процесу регулювання. Детальні результати моделювання наведено на графічному листі №4 та в таблиці 7.4.

РОЗДІЛ 8. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Під охороною праці розуміють систему законодавчих актів і відповідних їм соціально-економічних, технічних, гігієнічних і організаційних заходів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Охорона життя та здоров'я працюючих у процесі їх трудової діяльності, створення безпечних та нешкідливих умов праці є одним з найважливіших завдань при проєктуванні виробництва.

Законодавчими актами, що визначають основні положення про охорону праці, є загальні закони України (Конституція України, Закони України про охорону праці, "Про охорону здоров'я", Кодекс цивільного захисту України", "Про використання ядерної енергії та радіаційний захист", "Про систему громадського здоров'я", "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування", Кодекс законів про працю України), а також спеціальні законодавчі акти (Державні нормативні акти про охорону праці, Державні стандарти України (ДСТУ), Будівельні норми та правила, Санітарні норми, Правила технічної та безпечної експлуатації електроустановок споживачів та інші).[39]

В розділі охорони праці детально розглянуто питання безпеки при виконанні електромонтажних робіт при впровадженні систем автоматизації контролю клімату в теплиці промислового типу.

Вимоги безпеки при роботі на електроустановках

Перед початком роботи необхідно підготувати робоче місце. В електроустановках при роботі з повним чи частковим зняттям напруги повинні бути виконані у вказаній нижче послідовності наступні технічні заходи:

— виконання необхідних відключень і вжиття заходів, які перешкоджають подачі до місця роботи внаслідок помилкового чи самовільного включення комутаційної апаратури;

— вивішування плакатів **"НЕ ВКЛЮЧАТИ - РОБОТА НА ЛІНІЇ"**, **"СТІЙ - ВИСОКА НАПРУГА"**, **"ПРАЦЮВАТИ ТУТ"** тощо, а також, при необхідності, встановлення огорожень;

- приєднання до клеми "Земля" переносних огорожень;
 - перевірка відсутності напруги на струмоведучих частинах, на які повинно бути накладене заземлення;
- накладення заземлень (безпосередньо після перевірки відсутності напруги).

В установках напругою до 1000 В, до яких відносяться всі схеми автоматики:

- для попередження подачі напруги до місця роботи внаслідок трансформації необхідно відключити всі пов'язані з підготовкою робочого місця силові і вимірювальні трансформатори як з боку вищої, так і нижчої напруги;
- на місці роботи повинні бути відключені струмоведучі частини, а також ті, які можуть бути доступними при виконанні роботи. Доступні при торканні струмоведучі частини можна не відключати, якщо вони будуть огороженні ізолюючими накладками із ізоляційних матеріалів.

Відключення повинно виконуватись таким чином, щоб визначені для виконання роботи частини електроустановки чи обладнання, були з усіх боків відокремлені від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, комутаційними апаратами чи зняттям запобіжників.

Відключення може бути виконано:

- комутаційними апаратами з ручним керуванням, положення яких видно з лицьового боку чи встановлюється оглядом струмоведучі частини, на яких проводяться роботи, а також ті, які можуть бути доступними при виконанні роботи. Доступні при торканні струмоведучі частини можна не відключати, якщо вони будуть огороженні ізолюючими накладками із ізоляційних матеріалів;
- відключення повинно виконуватись таким чином, щоб визначені для виконання роботи частини електроустановки чи обладнання панелей із заднього боку, відкриттям щитків, дверей кожухів чи зняттям самих кожухів, якщо конструктивне виконання останніх дозволяє виконати цю операцію без небезпеки

замикання ними струмоведучих частин, що знаходяться під напругою чи доторкання до таких частин осіб, які виконують операцію;

- контакторами чи іншими комутаційними апаратами з автоматичним приводом і дистанційним керуванням з доступними для огляду контактами, після вжиття заходів, які усувають можливість помилкового включення (зняття запобіжників оперативного струму, від'єднання проводів котушки для вимкнення);

- в схемах автоматики в основному виконуються роботи без застосування заземлень, тому повинні вживатись додаткові заходи, які перешкоджають помилковій подачі напруги до місця роботи, зокрема механічне замикання приводів відключених апаратів, запобіжників, включених послідовно з комутаційними апаратами; застосування ізолюючих накладок в рубильниках, автоматах, тощо; від'єднання кінців живлення на щиті.

На ключах керування, вимикачах навантаження, а також на підставках запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця роботи, вивішуються плакати «**НЕ ВМИКАТИ - ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ**». На тимчасових огороженнях вивішують плакати «**СТІЙ - НЕБЕПЕЧНО ДЛЯ ЖИТТЯ**». Знімати і переставляти плакати під час роботи забороняється. Плакати знімаються тільки після закінчення робіт.

Перед початком роботи необхідно перевірити наявність напруги. Перевірка відсутності напруги в ланцюгах автоматики і керування (до 1000 В) проводиться пристроєм показу та контролю напруги чи переносним вольтметром, застосування контрольних ламп допускається при лінійній напрузі до 220 В включно.

Безпосередньо перед перевіркою напруги повинна бути встановлена справність пристрою контролю напруги чи іншого приладу, яким будуть проводитися виміри, шляхом доторкання до струмоведучих частин, які розташовані поблизу і явно знаходиться під напругою. При неможливості перевірити пристрій контролю напруги чи інший прилад на місці, допускається перевірка його на іншій, не відключеній ділянці. При цьому, якщо він падав чи

піддавався поштовхам чи ударам, то застосовувати його без повторної перевірки не допускається.

Обов'язковість і правильність виконання організаційних заходів, які забезпечують безпеку робіт в електроустановках є запорукою безаварійності робіт і відвертання нещасних випадків.

До організаційних заходів, які забезпечують безпеку робіт в електроустановках відносяться [40]:

- оформлення роботи нарядом чи розпорядженням;
- допуск до роботи;
- нагляд під час роботи;
- оформлення перерв в роботі, переводу на інше місце, закінчення робіт.

Заходи безпеки при ремонті і технічному обслуговуванню систем автоматики і приладів.

Ремонт і обслуговування систем автоматики необхідно проводити у відповідності до заводської чи виробничої інструкції по експлуатації даної системи.

Виконувати налагодження приладів і регуляторів при включеному технологічному обладнанні забороняється.

Робота в пристроях контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (далі - КВП і А) повинна виконуватись тільки по виконавчих схемах. Робота без схем, по пам'яті, забороняється.

Слюсар КВП і А калібрувальної лабораторії має право одноосібно проводити будь - які вимірювання в схемах та здійснювати роботи і демонтаж вузлів, заміну несправних елементів, тощо), якщо робоча напруга схеми не перевищує 36 В.

Зняття запобіжників в електричних схемах повинно проводитись при вимкнутій напрузі. При неможливості зняття напруги слюсар КВП і А зобов'язаний користуватись захисними засобами (діелектричні рукавички, кліщі).

Перед перевіркою опору ізоляції вимкнutoї лінії необхідно зробити перевірку на відсутність напруги між проводами та на кожному проводі відносно «Землі».

При виконанні робіт в пожеже- та вибухонебезпечних приміщеннях, а також на технологічній обв'язці газових об'єктів, використовується виключно обміднений або покритий консистентним мастилом інструмент, з метою запобігання іскроутворенню.

Трубні проводки, арматура повинні постійно контролюватись на відсутність витoku газу та масла. Витоки виявляти за допомогою мильної емульсії. Використання відкритого вогню з цією метою заборонено. Виявлені витoki повинні бути усунені негайно.

Монтаж і демонтаж термopар та інших вузлів та деталей допускається проводити тільки після охолодження агрегатів до температури не вище + 40 °С.

Після демонтажу кінці проводів повинні бути обов'язково ізольовані.

В приміщенні калібрувальної лабораторії перевірка електричних (електронних), пневматичних та гідравлічних приладів і регуляторів повинна проводитись на спеціальних стендах або робочих столах. Над місцем роботи повинні бути вивішені перевірочні та випробувальні схеми.

Перевіряти наявність напруги допускається тільки при допомозі контрольної лінії, вольтметра, тестера чи індикатора.

Забороняється залишати без нагляду випробувальну установку, яка знаходиться під напругою.

Перед відшукуванням або усуненням несправностей в приладах, регуляторах, схемах та випробувальних установках слюсар КВП і А калібрувальної лабораторії повинен відключити джерело живлення.

При роботі на об'єктах забороняється спиратися або ставати на бар'єри майданчиків, запобіжні кожухи муфт, підшипників та інші деталі, а також трубопроводи, конструкції та перекриття, які не призначені для проходу по них і не мають спеціальних огорожень та поручнів.

Регулювання та підстроювання приладів слюсар КВП і А калібрувальної лабораторії повинен робити інструментом з ізольованими ручками.

Розрахунок занулення на розмикаючу здатність

До частин, що підлягають зануленню або заземленню відносяться:

- 1) корпуси електричних машин, трансформаторів, світильників тощо;
- 2) приводи електричних апаратів;
- 3) вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів;
- 4) каркаси розподільних щитів, щитів керування, щитків і шаф, а також частини, які знімаються або відчиняються, якщо на останніх встановлено електрообладнання напругою вище 42 В змінного струму або більше 110 В постійного струму;

- 5) металеві конструкції розподільних пристроїв, металеві кабельні конструкції, металеві кабельні з'єднувальні муфти, металеві оболонки і броня контрольних і силових кабелів, металеві оболонки проводів, металеві рукави і труби електропроводки, кожухи і опорні конструкції магістралей, лотки, коробки, струни, троси і сталеві полоси, на яких закріплені кабелі і проводи (окрім струн, тросів і полос, на яких прокладені кабелі із заземленою або зануленою металевою оболонкою чи бронею), а також інші металеві конструкції, на яких встановлене електрообладнання;

- 6) металеві оболонки і броня контрольних і силових кабелів і проводів напругою до 42 В змінного струму і до 110 В постійного струму, прокладених на загальних металевих конструкціях, у тому числі у загальних трубах, коробах, лотках тощо разом з кабелями і проводами, металева оболонка і броня яких підлягає заземленню або зануленню;

- 7) металеві корпуси пересувних і переносних електроприймачів;

- 8) електрообладнання, що встановлене на рухомих частинах верстатів, машин і механізмів [37].

Занулення здійснюється в чотири-фазних мережах з наглухо заземленою нейтраллю з напругою до 1000 В. Мета розрахунку занулення полягає у визначенні умов, при яких воно надійно і швидко відключає пошкоджену електроустановку від мережі і одночасно забезпечує безпеку дотику людини до занулених частин установки в аварійний період [38].

При замиканні фази на занулений корпус електроустановка автоматично відключається, якщо значення струму однофазного короткого замикання (тобто між фазним і нульовими захисними провідниками) I_k А, задовольняє умові:

$$I_k \geq k \cdot I_{ном} ,$$

де k – коефіцієнт кратності номінального струму $I_{ном}$, А плавної вставки запобіжника або вставки струму спрацювання автоматичного вимикача А.

Модуль струму короткого замикання, А, вираховується за приблизною формулою:

$$I_{кз} = U_{\phi} / (Z_m / 3 + Z_n) ,$$

де Z_m і Z_n – модулі повного опору обмоток джерела живлення і повного опору петлі фаза-нуль.

Повний опір петлі фаза-нуль визначається фаза-нуль:

$$Z_n = \sqrt{(R_{\phi} + R_{H3})^2 + (X_{\phi} + X_{H3} + X_n)^2} ,$$

де $R_{\phi} + R_{H3}$ – активний опір петлі фаза-нуль.

Значення $R_{\phi} + R_{H3}$ для провідників із кольорових металів (мідь, алюміній) визначають за відомими даним: перетин S , мм², довжини l і матеріалу провідників.

Активний опір визначається:

$$R = \rho \cdot l / S ,$$

де ρ – питомий опір провідника (для міді 0,018, а для алюмінію 0,028 Ом·мм²/м) [38].

Перетин нульового захисного провідника S_{H3} , мм², приймається за умови, що $R_{H3} \leq 2 \cdot R_{\phi}$, тобто якщо фазні і нульові захисні провідники виконані з одного

металу, то $S_{H3} \geq 0.5 \cdot S_{\phi}$ (де S_{ϕ} – січення фазного провідника, мм²), якщо з різних металів, наприклад, фазний з міді, а нульовий захисний з алюмінію, то $S_{H3} \geq 0.8 \cdot S_{\phi}$.

Значення Z_m залежить від потужності трансформатора і схеми з'єднання його обмоток, а також від конструктивного виконання трансформатора.

Значення X_{ϕ} , X_{H3} і для мідних і для алюмінієвих провідників порівняно малі (біля 0,0156 Ом/км), тому ними можна знехтувати.

Значення X_n можна визначити за формулою (для ліній прокладених в повітрі) $X_n = 0.1256 \cdot \ln(2D/d)$ (Ом/км), де D – відстань між провідниками, d – діаметр.

В наближених розрахунках зовнішній індуктивний питомий опір для внутрішньої проводки складає 0,3 Ом/км і 0,6 Ом/км для повітряних ліній (при віддалі між проводами, що відповідають нормам):

$$X_n = X'_n \cdot l,$$

де l – довжина [38].

Проводимо розрахунок занулення для чотирьох-провідної лінії 380/220, яка складається з 2-ох діляниць: $l_1 = 800$ м; $l_2 = 300$ м, виконаних з мідних проводів, площа січення яких відповідно $S_1 = 50$ мм² і $S_2 = 6$ мм² живиться від трансформатора потужністю 63 кВА зі схемою з'єднання обмоток «зірка зигзаг з нулем».

Необхідно знайти значення струму однозначного короткого замикання I_k і визначити $I_{ном}$, вибрати тип запобіжника.

$$I_k \geq k \cdot I_{ном},$$

$$I_k = \frac{U_{\phi}}{Z_m/3 + \sqrt{(R_{\phi} + R_{H3})^2 + (X_{\phi} + X_{H3} + X_n)^2}}.$$

З таблиць [38] знаходимо повний опір трансформатора, $Z_m = 0,36$ Ом.

Визначаємо опір фазного і нульового захисних провідників R_{ϕ} , R_{H3} , X_{ϕ} , X_{H3} , X_n на ділянці $l_1 = 800$ м; $l_2 = 300$ м.

$$R_{\phi 1} = \rho \cdot l_1 / S_1 = 0,018 \frac{800}{50} = 0,288 \text{ Ом};$$

$$R_{\phi 2} = \rho \cdot l_2 / S_2 = 0,018 \frac{300}{6} = 0,9 \text{ Ом.}$$

Оскільки фазний провід мідний, приймаємо $X_{\phi} = 0$; $S_{H3} \geq 0,5 \cdot R_{\phi}$, тому приймаємо $S_{H31} = 25 \text{ мм}^2$, $S_{H32} = 3 \text{ мм}^2$.

$$R_{H31} = \rho \cdot l_1 / S_{H31} = 0,018 \frac{800}{25} = 0,576 \text{ Ом}$$

$$R_{H32} = \rho \cdot l_2 / S_{H32} = 0,018 \frac{300}{3} = 1,8 \text{ Ом}$$

Оскільки фазний провід мідний, приймаємо $X_{H3} = 0$. Зовнішній індуктивний опір 1 км петлі фаза-нуль приймаємо $X'_n = 0,6 \text{ Ом/км}$, тоді

$$X_{n1} = X'_{n1} \cdot l_1 = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48 \text{ Ом}$$

$$X_{n2} = X'_{n2} \cdot l_2 = 0,6 \cdot 0,3 = 0,18 \text{ Ом}$$

Опір петлі проводів «фазний-нульовий» на першій ділянці:

$$Z_{1n} = \sqrt{(R_{\phi 1} + R_{H31})^2 + (X_{\phi 1} + X_{H31} + X_{n1})^2} = \sqrt{(0,288 + 0,576)^2 + 0,48^2} = 0,9884 \text{ Ом}$$

$$Z_{2n} = \sqrt{(R_{\phi 2} + R_{H32})^2 + (X_{\phi 2} + X_{H32} + X_{n2})^2} = \sqrt{(0,9 + 1,8)^2 + 0,18^2} = 2,706 \text{ Ом}$$

Струм короткого замикання $I_k = \frac{U_{\phi}}{(Z_{2n} + Z_{1n} + Z_m)/3}$;

$$I_k = \frac{220}{(2,706 + 0,9884 + 0,36)/3} = \frac{220}{1,3515} = 162,78 \text{ А}$$

Для плавкого запобіжника $k \geq 3$, тому

$$I_{ном} = \frac{I_k}{k} = \frac{163}{3} = 54,3 \text{ А}$$

Вибираємо запобіжник ПН2-100 на $I_{ном} = 50 \text{ А}$, згідно таблиць [38].

Напруга на корпусі буде максимальною при струмі короткого замикання I_k .

$$U_{n \max} = I_k Z_n.$$

Ця напруга на корпусі не повинна перевищувати допустиму напругу дотику (42 В, а в особливо несприятливих умовах 12 В)

$$U_{n \max} = U_{дон}.$$

Для зниження напруги корпусу необхідно зменшити опір нульового провідника (збільшити його січення або прокласти паралельно кілька провідників) або застосувати повторне заземлення нульового провідника. При наявності повторного заземлення нульового захисного провідника напруга відносно землі на корпусі обладнання:

$$U_k = I_k Z_n \frac{R_n}{R_0 + R_n},$$

де R_n – опір повторного заземлення, Ом; R_0 – опір нейтралі трансформатора, Ом [38].

Висновки до розділу 8

У цьому розділі було розглянуто основні вимоги законодавства та практичні заходи з охорони праці, які необхідно враховувати при впровадженні систем автоматизації в тепличних умовах. Основний акцент зроблено на безпечному виконанні електромонтажних робіт, правильній експлуатації електроустановок напругою до 1000 В, а також захисті персоналу під час обслуговування контрольно-вимірювальних приладів і автоматичних систем.

Також був виконаний розрахунок занулення для чотирьох-провідної лінії 380/220 В. Як результат - вибрано запобіжник ПН2-100 на $I_{ном} = 50$ А.

РОЗДІЛ 9. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Останніми роками спостерігається стійка тенденція до впровадження систем автоматизації у сільському господарстві, насамперед у тепличному виробництві. Постійно зростаючі вимоги до якості сільськогосподарської продукції, потреба в економії ресурсів та мінімізації залучення людської праці обумовлюють

необхідність переходу від ручного або напівавтоматичного контролю до повноцінних автоматизованих систем.

З економічної точки зору, застосування автоматизованих систем управління у тепличному господарстві має кілька важливих переваг. По-перше, вони дають змогу точніше регулювати параметри середовища — температуру, вологість, рівень CO₂, освітлення — що безпосередньо впливає на врожайність та якість продукції. Це, своєю чергою, дозволяє зменшити втрати, пов'язані з нестабільними умовами вирощування, і стабілізувати прибутки господарства.

По-друге, автоматизовані системи здатні оптимізувати використання ресурсів — води, енергетичних носіїв, добрив — завдяки чіткому дозуванню та точному часу подачі. За відсутності автоматизації ці процеси мають високу залежність від людського фактора та зовнішніх чинників, що призводить до перевитрат або недостатньої ефективності. Оптимізація витрат ресурсів безпосередньо відображається на собівартості продукції, знижуючи її без шкоди для якості.

Проте автоматизація потребує початкових інвестицій: вартість контрольно-вимірювального обладнання, виконавчих механізмів, систем зв'язку, контролерів, давачів, програмного забезпечення, а також витрати на проектування, монтаж, пуско-налагоджувальні роботи та навчання персоналу. Додатково враховуються супутні витрати: модернізація або адаптація інженерної інфраструктури, сервісне обслуговування, енергетичне резервування тощо.

Розрахунок техніко-економічних параметрів впровадження

Впровадження автоматизованої системи контролю клімату в тепличному господарстві потребує комплексної оцінки техніко-економічних параметрів, що є основою для прийняття рішення про доцільність інвестицій. Одним із ключових аспектів такої оцінки є розробка кошторису [41] — детального плану витрат на реалізацію проєкту.

Вартість закупівлі технічних засобів автоматизації, вибраних і описаних у розділі 3, наведена у кошторисі (таблиця 9.1)

Таблиця 9.1

Кошторис витрат на закупівлю технічних засобів автоматизації

№ п/п	Тип приладу	Найменування приладу	К-сть	Вартість 1 шт., грн.	Загальна вартість, грн
1	2	3	4	5	6
1.	Комбінований перетворювач температури та вологості повітря	Schneider Electric TM1SHTCC 4	1	16 643,94	16 643,94
2.	Термоперетворювач опору з вбудованим нормуючим перетворювачем.	Danfoss MBT 3560	1	7 135,00	7 135,00
3.	Вимірювальний перетворювач вологості ґрунту	RIXEN MTR-731	1	6 100,00	6 100,00
4.	Універсальний перетворювач концентрації CO2	Comet T5140	1	22 464,00	22 464,00
5.	Чашковий анемометр	PCE-FST-200-201-I	1	9 600,00	9 600,00

Продовження таблиці 9.1

1	2	3	4	5	6
6.	Індуктивний PNP давач	OMRON TL-Q5MB1-R 2M	3	116,00	348,00
7.	Вимірювальний	RIXEN	1	21 840,00	21 840,00

	перетворювач освітленості	LXT-401A			
8.	Реле перепаду тиску	Thermokon PS500	1	1 400,00	1 400,00
9.	Пропорційний клапан з електромагнітною катушкою	Danfoss EV260B, BL024D (018Z0291)	3	27 600,00	82 800,00
10.	Електромагнітний контактор	Schneider TeSys Deca LC1D LC1D123B L	2	3 142,10	6 284,20
11.	Електромагнітний реверсивний контактор	Schneider TeSys K LP2K LP2K0610B D	3	3 411,65	10 234,95
12.	Силовий контактор	Schneider TeSys Green LC1D50ABBE	1	4 603,00	4 603,00
13.	Асинхронний трифазний двигун	Sati M20901504	1	6 416,93	6 416,93

Продовження таблиці 9.1

1	2	3	4	5	6
14.	Насос високого тиску	HAWK FOG 0810CR	1	17 760,00	17 760,00
15.	Відцентровий венти-	Вентс ВЦУ	1	13 635,00	13 635,00

	лятор	4E			
16.	Асинхронний трифазний двигун	AIP 71 A4 Л	3	2 670,00	8 010,00
17.	Блок живлення	Schneider Electric ABLS1A24 050	1	3 594,82	3 594,82
18.	Програмований логічний контролер	Unitronics Vision V570	1	41 368,50	41 368,50
19.	Пристрій вводу/виводу Snap-in	V200-18-E3XB	1	22 428,00	22 428,00
20.	Модуль розширення	IO-AI4-AO2	1	8 692,00	8 692,00
	Всього				311 358,34

Вартість монтажу, впровадження та наладки обладнання, згідно з галузевими тенденціями, складає 45% від вартості обладнання, тоді як логістичні витрати (транспортування, вантажно-розвантажувальні роботи, оформлення супутньої документації) зазвичай знаходяться в межах 20% вартості технічних засобів автоматизації.

Вартість монтажних та пуско-налагоджувальних робіт:

$$311\,358,34 \cdot 0,45 = 140\,111,25 \text{ грн.}$$

Логістичні витрати:

$$311\,358,34 \cdot 0,2 = 62\,271,67 \text{ грн.}$$

Тоді загальні витрати на впровадження системи автоматизації:

$$K = 311\,358,34 + 140\,111,25 + 62\,271,67 = 513\,741,26 \text{ грн.}$$

Розрахунок амортизації обладнання

Суть амортизації полягає у поступовому перенесенні вартості закупленого обладнання на собівартість продукції протягом усього строку його експлуатації.

Беручи до уваги середній термін експлуатації технічних засобів автоматизації, за норму річного відрахування приймаємо 40% вартості всього обладнання.

Таким чином, річна сума амортизації становитиме:

$$A = 311\,358,34 \cdot 0.4 = 124\,543,336 \text{ грн.}$$

Розрахунок техніко-економічної ефективності

Середнє річне споживання енергії в теплиці промислового типу (враховуючи роботу всіх основних споживачів по середньодобовому споживанню, помноженому на 365 днів) після впровадження системи автоматизації складає:

Двигуни та електроприводи – $6,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$;

Живлення автоматики – $1,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$;

Живлення системи освітлення – $58,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ + коефіцієнт хмарності 1,25;

Загальне середньодобове споживання складає:

$$6,5 + 1,2 + (58,9 \cdot 1,25) = 81,325 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{день},$$

або $81,325 \cdot 365 = 29\,683,625 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$

Витрати на електроенергію розраховуються за встановленим тарифом для бізнесу від ПрАТ «Львівобленерго»:

Загальний тариф, з ПДВ – $5809,55 \text{ грн} / \text{МВт} \cdot \text{год}$;

Річні витрати на електроенергію:

$$5809,55 \cdot 29.6836 = 172\,448.50 \text{ грн.}$$

Витрати електроенергії до впровадження системи автоматизації склали $33\,210,4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$, здебільшого, через ненормоване використання системи освітлення та притічної вентиляції.

Витрати до автоматизації:

$$5809,55 \cdot 33.2104 = 192\,937.47 \text{ грн.}$$

Різниця (економія) склала:

$$192\,937.47 - 172\,448.50 = 20\,488,98 \text{ грн.}$$

Середньорічне споживання тепла на підтримання температури повітря і ґрунту до автоматизації об'єкта складало близько 320 Гкал. Витрати на сировину для забезпечення 1 Гкал тепла на локальній котельні складають 2247 грн/Гкал.

При цьому річні витрати на забезпечення тепла:

$$2247 \cdot 320 = 719\,040 \text{ грн.}$$

Після впровадження заходів з автоматизації, посилюється контроль за доцільним використанням теплоносія, відповідно реальне споживання впало до 260 Гкал/рік. Тоді економія витрати на споживання тепла складають:

$$719\,040 - (260 \cdot 2247) = 134\,820 \text{ грн.}$$

Окрім цього, завдяки забезпеченню оптимальних умов вирощування, врожайність солодкого перцю, врожайність зросла на 17%, відносно показників до вводу в експлуатацію системи автоматизованого контролю клімату.

Врожайність до автоматизації складала 175 грн/ м²/міс, тобто:

$$175 \cdot 480 \text{ м}^2 \cdot 12 = 1\,008\,000 \text{ грн.}$$

Врожайність після автоматизації:

$$1\,008\,000 + (1\,008\,000 \cdot 0.17) = 1\,179\,360 \text{ грн.}$$

Приріст склав:

$$1\,179\,360 - 1\,008\,000 = 171\,360 \text{ грн.}$$

Розрахунок терміну окупності

Загальна річна вигода від впровадження системи автоматизації:

$$20\,488,98 + 134\,820 + 171\,360 = 326\,668,98 \text{ грн.}$$

При вартості проекту в 513 741,26 грн. термін окупності складе:

$$T_{ок} = \frac{513\,741,26}{326\,668,98} \approx 1.572 \text{ року}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$k = \frac{326\,668,98}{513\,741,26} \approx 0.6359$$

Висновки до розділу 9

Проведений економічний розрахунок чітко демонструє, що впровадження системи автоматизації в теплиці — це вигідна інвестиція. Загальні витрати на реалізацію проекту, що включають вартість обладнання, монтажні, пусконаладжувальні та логістичні роботи, є виправданими з огляду на очікувані

економічні вигоди. Автоматизація дозволяє ефективніше використовувати електроенергію та тепло, знижуючи витрати. Окрім цього, завдяки стабільному мікроклімату врожайність солодкого перцю зростає на 17%, що збільшує прибуток господарства. Термін окупності складає близько 1.5 року, що підтверджує високу рентабельність та доцільність впровадження автоматизованої системи контролю клімату.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі здійснено розробку системи автоматизованого контролю клімату в теплиці промислового типу.

Виконано комплексний аналіз технологічного процесу забезпечення мікроклімату як об'єкта керування, та проведено розрахунок матеріального та

теплового балансу. Сільськогосподарською культурою, на основі якої вибрані номінальні значення параметрів мікроклімату, є перець солодкий (*Capsicum annuum L.*). Після аналізу були вибрані координати регулювання, контролю, вимірювання та сигналізації. Для створення оптимальної спрощеної функціональної схеми автоматизації виконувався порівняльний аналіз існуючих систем керування кліматом тепличних комплексів. Результатом стала функціональна схема автоматизації системи контролю клімату, що виконана спрощеним методом і зображена на рисунку 2.2. Схема складається з 7 контурів регулювання, вимірювання, контролю та сигналізації.

Розробка і впровадження системи автоматизації є неможливим без обладнання, що безпосередньо забезпечує автоматизацію об'єкта керування. Для цього здійснювався аргументований вибір технічних засобів автоматизації та мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації. Логічною основою системи обрано промисловий логічний контролер Unitronics Vision V570. Обрані технічні засоби автоматизації зібрано в специфікацію, що представлена у вигляді таблиці 3.2.

Як один з основних етапів можна виділити розробку, згідно дійсних стандартів [33], функціональної схеми автоматизації розгорнутим способом (графічний лист №1).

Програмне забезпечення систем автоматизації також є важливою складовою, без якої система не може функціонувати. Розроблені алгоритми функціонування і, реалізована мовою програмування Ladder diagram програма, забезпечує реалізацію всіх функцій, передбачених для системи автоматизованого контролю клімату, а саме забезпечення і підтримка оптимальних для росту і розвитку рослин умов. На графічному листі №2 зображена програмна реалізація кожного контуру регулювання, вимірювання та сигналізації.

Розділ 6 присвячений розробці принципової схеми електричних з'єднань засобів автоматизації. Було описано принцип та продемонстровано варіанти електричних підключень технічних засобів автоматизації, що використовуються у

даному проєкті. Повна принципова схема електричних з'єднань засобів автоматизації представлена на графічному листі №3.

У розділі 7 виконано розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання на прикладі контуру регулювання вологості ґрунту в теплиці. Для цього на ділянці ґрунту була знята експериментальна крива розгону, з якої потім було знайдено передавальну функцію у вигляді:

$$W(p) = \frac{0.5}{(51p + 1)^4} e^{-5.886p}.$$

В якості автоматичного регулятора був вибраний ПІД регулятор. За порівняльним аналізом графіків перехідного процесу (рисунок 7.9) було зроблено висновок, що налаштування ПІД регулятора, отримані на основі другого інтегрального критерію якості, найкраще задовольняли вимоги до якості регулювання, а саме при моделюванні зміни регулюючої дії на 20% ходу РО , максимальне динамічне відхилення A_I склало 4.75%, а час регулювання – 398 секунд. Результати моделювання САР вологості ґрунту в теплиці при дії збурення та при зміні завдання автоматичного регулятора представлені на графічному листі №4.

У розділі 8, що присвячений охороні праці, розглядалось питання безпеки при монтажі і експлуатації системи автоматизації. Був виконаний розрахунок занулення на розмикаючу здатність.

Завершальним етапом став розрахунок техніко-економічних показників, який підтвердив доцільність впровадження системи автоматизації: зниження витрат на електроенергію й тепло, підвищення врожайності солодкого перцю на 17% та скорочення терміну окупності до 1,572 року при коефіцієнті економічної ефективності 0,6359.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савченко, В. М., Крот, В. В. Вплив культиваційних споруд та технологічних систем на параметри мікроклімату при вирощуванні продукції закритого ґрунту / В. М. Савченко, В. В. Крот // *Крамаровські читання: зб. тез доп. II міжнар. наук.-техн. конф.* – 2015. – С. 72–74.

2. Євсеєнко, О. М. Розробка апаратно-програмної системи керування мікрокліматом теплиці / О. М. Євсеєнко // *Технічна інженерія*. – 2020. – № 1 (85). – С. 104–109.

3. Оробчук, Б. Я., Шишко, В. О. Розробка системи забезпечення мікроклімату в теплиці / Б. Я. Оробчук, В. О. Шишко // *Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів*. – 2019. – Вип. 3. – С. 73–74.

4. Цмоць, І. Г., Теслюк, Т. В. Структура та моделі роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці / І. Г. Цмоць, Т. В. Теслюк // *Вісник НУ "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та ІТ*. – 2016. – № 843. – С. 228–237.

5. Дудник, С. П., Єлагін, В. Д., Однолько, І. В. Перець і баклажани : навч. посіб. / С. П. Дудник, В. Д. Єлагін, І. В. Однолько. – Київ : Урожай, 1989. – 95 с. : рис., табл. – ISBN 5-337-00254-0.

6. Белогубова, Е. Н., Васильєв, А. М., Гиль, Л. С. та ін. Сучасне овочівництво закритого і відкритого ґрунту / Е. Н. Белогубова, А. М. Васильєв, Л. С. Гиль та ін. – Київ : Київська правда, 2006. – 527 с.

7. Кур'ята В. Г. Морфологічні особливості формування листкового апарату перцю солодкого за дії гібереліну та фолікуру / В. Г. Кур'ята, В. В. Рогач, О. В. Кушнір // *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. - 2017. - Вип. 2 (94). - С. 86-92.

8. Культура перець солодкий для закритого ґрунту [Електронний ресурс] // АгроРесурси разом. – Режим доступу: <https://agrarii-razom.com.ua/culture/perec-solodkiy-dlya-zakritogo-gruntu> – Дата звернення: 20.05.2025.

9. Юсик, Я. П., Фединець, В. О., Васильківський, І. С. (укл.) Методичні вказівки до курсового проєкту з дисципліни "Автоматизація технологічних процесів" для бакалаврів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / Я. П. Юсик, В. О. Фединець, І. С. Васильківський. – Львів : Львівська політехніка, 2021. – 25 с.

10. Гиль, Л. С., Пашковський, А. І., Суліма, Л. Т. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Частина 1: Закритий ґрунт : навч.

посіб. / Л. С. Гіль, А. І. Пашковський, Л. Т. Суліма. – Вінниця : Нова Книга, 2008. – 368 с. – ISBN 978-966-382-203-7.

11. Канарський, Є. О., Орехов, О. О., Желтухін, О. В. Розробка автоматизованої системи керування тепличним господарством / Є. О. Канарський, О. О. Орехов, О. В. Желтухін // *Young Scientist*. – 2022. – № 3 (103). – С. 5. – DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-3-103-22>.

12. Макогон, І. С., Фетюхіна, Л. В. Система моніторингу параметрів мікроклімату фермерських теплиць / І. С. Макогон, Л. В. Фетюхіна // *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених–2020*. – 2020. – С. 75–76.

13. Schneider Electric Паспорт продукту: Датчик вологості і температури, 4–20 мА, TM1SHTCC4 [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/product/download-pdf/TM1SHTCC4>, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

14. Danfoss Датчик температури Type MBT 3560 : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: <https://assets.danfoss.com/documents/259294/AI202686427745uk-UA1001.pdf>, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

15. RIXEN Soil Moisture Transmitter MTR-730 Series : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: <https://en.rixen.com.tw/download/downloadfile/354/1.htm>, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

16. Comet System CO₂ concentration transmitter T5140 : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: <https://www.cometsystem.com/pdf/t5140>, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

17. PCE Instruments Air Flow Meter PCE-FST-200-201-I : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: https://www.pce-instruments.com/english/api/getartfile?_fnr=965406&_dsp=inline, вільний. – Дата звернення: 28.05.2025.

18. RIXEN Illuminance Transmitter LXT-401 Series : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу:

<https://en.rixen.com.tw/download/downloadfile/360/1.htm>, вільний. – Дата звернення: 28.05.2025.

19. Omron Rectangular Standard Proximity Sensor TL-Q5MB1-R 2M [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: <https://www.ia.omron.com/product/item/64246/>, вільний. – Дата звернення: 28.05.2025.

20. Hawk Technical sheets – FOG Pump [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], 2014. 6с. Режим доступу: <https://www.hawkpumps.com/en/downloadpdfdocument/1797/technical+sheets+fog+pump>, вільний.– Дата звернення: 28.05.2025.

21. Sati Асинхронні електродвигуни: каталог та технічна документація [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 9 с. – Режим доступу: https://kpd-drive.com.ua/images/upload/files_entity/676/289/motori-elettrici-pdf-pdf.pdf, вільний– Дата звернення: 30.05.2025.

22. Промелектро Електродвигун АИ1Е71А4 [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – Режим доступу: https://promelectro.com/air-70_a4/, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

23. VENTS Посібник користувача ВЦУ(ц)/ВЦУН. Вентилятор відцентровий у спіральному корпусі [Посібник користувача] [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 24 с. – Режим доступу: <https://vents.ua/download/vcu-manual-13119.pdf>, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

24. Schneider Electric Контактор TeSys Deca LC1D50ABBE : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 6 с. – Режим доступу: <https://surl1.cc/yhdhub>, вільний– Дата звернення: 28.05.2025.

25. Schneider Electric Контактор TeSys К LP2K0610BD : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 10 с. – Режим доступу: <https://surl.li/ghnhvq>, вільний– Дата звернення: 28.05.2025.

26. Schneider Electric Контактор TeSys Deca LC1D123BL : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 9 с. – Режим доступу: <https://surl.lu/svkffu>, вільний – Дата звернення: 28.05.2025.

27. Danfoss Solenoid valve EV260B : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], 2021. – 10 с. – Режим доступу: <https://assets.danfoss.com/documents/197271/AI178086429374en-000802.pdf>, вільний – Дата звернення: 29.05.2025.

28. Thermokon PS Differential Pressure Switch : datasheet [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], 2024. – 3 с. – Режим доступу: <https://www.thermokon.de/direct/alterra-base/mimes/get/e97c6050789078811>, вільний – Дата звернення: 07.06.2025.

29. Unitronics Vision OPLC V570-57-T20B & V570-57-T20B-J : технічний опис [Електронний ресурс]. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 3 с. – Режим доступу: https://unitronicsplc.com/wp-content/uploads/2015/12/V570-57-T20B-J_TECH-SPEC_06-12.pdf, вільний – Дата звернення: 02.06.2025.

30. Костик, І. В. (укл.) Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни "Мікропроцесорні програмні засоби автоматизації" для студентів-рівня бакалавра технічних спеціальностей / І. В. Костик. – Львів : Львівська політехніка, 2022. – 32 с.

31. Unitronics IO-AI4-AO2: інструкція користувача / Unitronics. – [Б. м. : б. в.], [б. р.]. – 8 с. – Режим доступу: <https://www.unitronicsplc.com/wp-content/uploads/2015/12/IO-AI4-AO2-5408-0061-2.pdf>, вільний. – Дата звернення: 02.06.2025.

32. Костик, І. В., Матіко, Ф. Д. Основні правила та методи графічного представлення алгоритмів функціонування контурів регулювання / І. В. Костик, Ф. Д. Матіко : лекція №2 з дисципліни "Мікропроцесорні програмні засоби автоматизації" для студентів 151 спец. – Львів : Львівська політехніка, 2022. – 24 с.

33. ДСТУ Б А.2.4-16:2008 Система проектної документації для будівництва. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах : нац. станд. України. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2008. – 10 с. – (Введено в дію з 01.01.2010).

34. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Теорія автоматичного керування" для студентів бакалаврського (першого) рівня вищої

освіти спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / Укл. Г.Б. Крих, Ф.Д. Матіко – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2021. 29 с.

35. Крих, Г. Б., Матіко, Г. Ф. Теорія автоматичного керування : навч.-метод. комплекс [Електронний ресурс] / Г. Б. Крих, Г. Ф. Матіко. – Львів : ВНС Львівська політехніка, 2018. – 415 с. – Режим доступу: <https://vns.lpnu.ua/> (доступ реєстрованим користувачам). – Реєстр. № Е41-158-94/2018; Сертиф. № 02561.

36. Крих, Г. Б., Матіко, Ф. Д. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. / Г. Б. Крих, Ф. Д. Матіко. – Львів : Сполом, 2017. – 165 с. – ISBN 978-966-919-258-5.

37. Катренко Л.А., Кіт Ю.В., Пістун І.П. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум: Навч. посіб. – Суми: Університетська книга, 2024. – 540 с.

38. Практикум із охорони праці. За редакцією В.І. Жидецького. Львів «Афіша», 2000.

39. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI-К. – Київ : [б. в.], 2012. – 97 с.

40. НПАОП 40.1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

41. Методичні вказівки для виконання розділу з економіки у кваліфікаційних роботах для студентів бакалаврського рівня вищої освіти спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології". – Львів: Кафедра маркетингу та логістики Національний університету "Львівська політехніка", 2017. 29 с.