

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 636.5252/58:62 503.51

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
(назва ННІ)

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

В.о. завідувача кафедри автоматики  
та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ В.В. Каплун  
(підпис) (ПІБ)

\_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**02.06.-КМР.1664"С".2024.09.26.029.ПЗ**

на тему **«КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА  
АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІДТРИМАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В  
ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ З ПРОГНОЗУВАННЯМ ЕНЕРГОВИТРАТ»**

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(назва)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_ І.М. Болбот, д.т.н., професор  
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

\_\_\_\_\_ О.Є. Чернишенко  
(підпис) (П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи

\_\_\_\_\_ В.П. Лисенко, д.т.н., професор  
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ-2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри  
автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка  
О.О. Опришко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
(бакалаврської, дипломної)

**Чернишенку Олександрю Євгенійовичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність:

174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема магістерської роботи:

**«КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ  
ПІДТРИМАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ З  
ПРОГНОЗУВАННЯМ ЕНЕРГОВИТРАТ»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 року №1664«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 05.12.2024 року

**Вихідні дані до магістерської роботи:** завдання кафедри на виконання магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження та аналізу; наукова література з тематики магістерської роботи.

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Аналіз енергетичних характеристик процесів виробництва тепличної продукції та обґрунтування шляхів підвищення їх енергоефективності.
2. Передумови створення інтелектуальної системи керування температурним режимом у промисловій теплиці.
3. Розробка та дослідження математичної моделі керування температурою та вологістю в промисловій теплиці.
4. Застосування інтелектуальних методів оптимізації.
5. Схеми системи автоматизації.
6. Визначення економічної ефективності впровадження розробленої системи керування мікрокліматом в промисловій теплиці.

**Дата видачі завдання «26» вересня 2024 року**

**Керівник магістерської роботи**

(Підпис)

Лисенко В.П.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

(Підпис)

Чернишенко О.Є.

(Прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Вступ .....	5
РОЗДІЛ 1. Аналіз енергетичних характеристик процесів виробництва тепличної продукції та обґрунтування шляхів підвищення їх енергоефективності .....	8
1.1. Промислові теплиці та особливості вирощування в них овочевої продукції .....	8
1.2. Існуючі рішення енергозбереження у промислових теплицях. Аналіз методів підвищення енергоефективності .....	12
РОЗДІЛ 2. Передумови створення інтелектуальної системи керування температурним режимом у промисловій теплиці .....	23
2.1. Опис електротехнічного комплексу промислової теплиці .....	23
2.2. Технологічні передумови створення енергоефективної системи керування енергетичними потоками в теплиці .....	32
2.3. Розробка концептуальної моделі багатозадачної системи регулювання мікроклімату в теплиці .....	35
2.4. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування параметрами мікроклімату в промисловій теплиці .....	42
РОЗДІЛ 3. Розробка та дослідження математичної моделі керування температурою та вологістю в промисловій теплиці .....	44
3.1. Розробка математичної моделі керування температурою та вологістю повітря в теплиці .....	44
3.2. Дослідження впливу параметрів мікроклімату на інерційність об'єкта .....	50
3.3. Аналіз роботи математичної моделі з ПІ регулятором в Simulink MatLab .....	56
РОЗДІЛ 4. Застосування інтелектуальних методів оптимізації режимів у тепличних комплексах .....	60
4.1. Теоретичні передумови використання нейронних мереж для моделювання процесів у виробництві .....	60
4.2. Використання нейронечіткої експертної системи щодо формування енергоощадних алгоритмів керування об'єктом .....	62
4.3. Використання генетичних алгоритмів для розрахунку оптимальних налаштувань системи автоматичного регулювання .....	71
4.4. Оптимізація налаштувань локальної системи із використанням нечіткої логіки .....	80
4.5. Розроблення моделі прогнозування енергетичних витрат шляхом використання методів нейромережевого прогнозування .....	86
РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації .....	92
5.1. Вибір програмованого логічного контролера .....	92
5.2. Розробка схем погодження між первинними перетворювачами – промисловим регулятором і промисловим регулятором – виконавчими механізмами .....	97

РОЗДІЛ 6. Визначення економічної ефективності впровадження розробленої інтелектуальної системи керування температурним режимом в промисловій теплиці .....	101
6.1. Методика визначення енергоефективності роботи обладнання тепличного комплексу із енергоефективною системою автоматичного керування .....	101
6.2. Оцінювання економічної ефективності системи автоматичного керування режимами вирощування овочевої продукції у тепличних комплексах .....	103
Висновки .....	109
Література .....	111
Додатки .....	114

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Споруди закритого ґрунту (СЗГ) характеризуються наявністю значних енергетичних потоків, що використовуються для забезпечення відповідної технології вирощування овочевої продукції. Високі ціни на енергоносії (природний газ, електрична енергія) створюють умови для розроблення спеціальних систем, здатних мінімізувати енергетичні витрати, оскільки наявні системи, як складові технології, реалізують найпростіші стабілізаційні алгоритми, котрі не забезпечують високу енерго- та ресурсоефективність.

На обсяги споживання енергії в СЗГ впливають багато факторів, таких наприклад як хмарність, сила та напрям вітру, інші погано-прогнозовані традиційними методами природні фактори, що непросто передбачити у відповідних традиційних математичних моделях. Вирішення зазначених проблем можливе шляхом використання сучасних інтелектуальних алгоритмів обробки інформації, що поступає від об'єкта керування, та застосування результатів для формування відповідних стратегій керування з метою максимізації прибутку за результатами виробництва.

Аналіз витрат тепличного комплексу показав, що в середньому за добу на обігрів теплиці витрачається 4095 м<sup>3</sup> газу та 978 кВт електроенергії, тобто у собівартість вирощених овочів закладено 65% вартості витрат на опалення та електроенергію (рис. В1).

Основою ефективності роботи тепличного господарства є стабільна якість продукції, мінімальний час виробничого циклу, а також зниження матеріальних, енергетичних і трудових витрат. Одним із шляхів підвищення продуктивності виробництва є використання енергоефективних систем керування, що дають можливість швидко та ефективно реалізовувати складні обчислювальні процедури керування електротехнологічним комплексом із збереженням стабільної якості продукції.

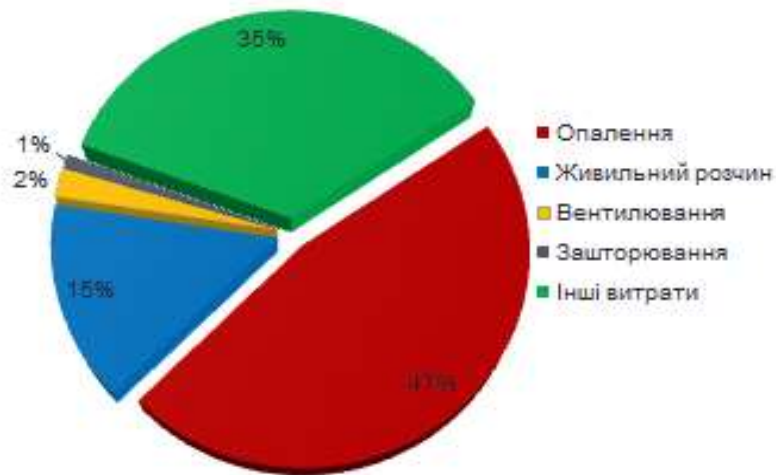


Рис. В1. Графік впливу енергетичних витрат на собівартість тепличної продукції

**Мета і задачі досліджень.** Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка інтелектуальної системи енергоефективного керування мікрокліматом у спорудах закритого ґрунту на основі прогнозування енерговитрат, у тому числі з урахуванням зонності тарифів в оплаті за використання електричної енергії.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

1. З метою знаходження найбільш енергозатратних процесів виробництва в СЗГ оцінити енергетичні потоки за їх обсягами. Для обґрунтування використання моделей прогнозування енергетичних витрат провести аналіз зв'язків між зовнішніми збуреннями та енергетичними витратами, що забезпечують дотримання заданої технології вирощування рослинної продукції.

2. За допомогою розробленої імітаційної моделі процесу керування температурно-вологісним режимом в теплиці дослідити вплив збурень на якість перехідного процесу системи автоматизації з ПІ-регулятором (як такого, що найбільш поширений в промислових теплицях). На основі отриманих результатів обґрунтувати використання інтелектуальних методів пошуку оптимальних параметрів регулятора, що адаптуються до змін умов функціонування системи автоматизації.

3. Розробити модель нейронечіткої системи автоматизованого керування ввімкненням груп двигунів опалення й вентилявання з урахуванням трьох-зонності тарифу на електроенергію для мінімізації енергетичних витрат.

4. Розробити моделі пошуку оптимальних налаштувань ПІ-регулятора шляхом використання методів нечіткої логіки.

5. Розробити загальний алгоритм функціонування інтелектуальної системи енергоефективного керування мікрокліматом у СЗГ на основі врахування прогнозованих енергетичних витрат та вартості енергоносіїв.

6. Виконати оцінювання економічної ефективності впровадження розробленої інтелектуальної САК у тепличне виробництво.

**Об'єктом дослідження** є процеси керування енергетичними потоками формування мікроклімату промислової теплиці.

**Предметом дослідження** є взаємозв'язки і закономірності процесів і режимів керування енергетичними потоками на енергоефективність виробництва овочевої продукції в промислових теплицях.

**Методи дослідження.** Дослідження ґрунтуються на основних положеннях тепломасообміну, математичного моделювання, теорії автоматичного керування, теорії нейронних мереж з використанням комп'ютерних технологій.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

### 1.1. Промислові теплиці та особливості вирощування в них овочевої продукції

Теплиці й парники класифікують за численними ознаками: за функціональним призначенням, технологією вирощування рослин, за часом експлуатації, конструктивним рішенням та типом покрівлі. Промислові теплиці розрізняють за конструкційними ознаками на односекційні (ангарні) і багатосекційні (блочні); за матеріалом покриття – скляні, плівкові та склопластикові. Вони можуть бути одно – або багатоповерховими (баштового типу), як з прозорим огороженням, так і непрозорі. За конструкцією даху теплиці поділяють на односкатні, двоскатні, нерівноскатні, аркові.

Будівельні конструкції теплиць визначають з урахуванням впливу зовнішніх кліматичних факторів: найнижчої середньодобової температури, вітрового і снігового навантаження (добова маса снігового покриву), а також сейсмічної активності у районі будівництва. На даний час розроблені типові проекти тепличних комбінатів, призначених для різних кліматичних зон.

Державні будівельні норми для проектування споруд закритого ґрунту (ДБН В.2.2-2-95 "Будинки і споруди. Теплиці та парники") вимагають наявності систем автоматичного регулювання практично усіх технологічних параметрів: температури і вологості повітря; температури води в системі підґрунтового обігрівання; температури поливної води і розчинів мінеральних добрив; концентрації добрив у поливній воді та вуглекислоти в повітрі; автоматизацію процесів поливу, підживлення і доосвічування рослин;

закриття вентиляційних фрамуг. Для кожного виду рослин характерні свої оптимальні режимні параметри та допустимі відхилення від оптимальних.

Забезпечення необхідного мікроклімату в культиваційних спорудах закритого ґрунту при вирощуванні овочів і розсади в зимовий та ранньовесняний періоди потребує значних витрат теплової енергії. Це найбільш концентровані й енергоємні споживачі теплоти.

### ***Технологічні вимоги до параметрів мікроклімату при вирощуванні томатів в умовах закритого ґрунту***

Виробництво овочів вимагає добре обладнаних теплиць, забезпечених опаленням і з правильно організованим освітленням. Крім технічного пристрою обігріву теплиць, потрібно правильно підібрати асортимент томатів для закритих ґрунтів і скласти якісну ґрунтову суміш.

*Вимоги до температури* навколишнього середовища. Помідор – теплолюбна культура. Насіння його за температури 25-30°C проростає протягом 3-5 діб. При зниженні температури ґрунту до 13°C на глибині загортання насіння сходи з'являються лише через 17-22 дні. Після з'явлення повних сходів на ріст і розвиток рослин позитивно впливає зниження температури на 3-4 доби (вдень-до 12-15°C, а вночі – до 8-10°C). Це сприяє більш швидкому росту і розвитку кореневої системи і формуванню компактних (не витягнутих) добре облиснених рослин [15].

*Вимоги до світла.* Мінімальна інтенсивність світла, при якій можливий вегетативний Ріст рослин, становить 2-3 тис. лк. Для формування бутонів і переходу до цвітіння вона повинна бути не нижче 4-5 тис. люкс, а для безперервного розвитку та плодоношення – не нижче 10 тис. люкс. Оптимальною інтенсивністю освітлення для рослин помідора є 20-35 тис. люкс залежно від фази росту й розвитку, тривалості освітлення і сортових особливостей. Висока освітленість також негативно впливає на рослини. Так, при збільшенні інтенсивності освітлення (більше 40 тис. люкс) листки помідора жовтіють і опадають [15].

*Вимоги до вологи.* В житті рослин помідора важливу роль відіграє волога ґрунту. Це пов'язано з тим, що фізіологічні процеси проходять нормально лише при оптимальному (80-90%) вмісті води в клітинах і тканинах. Проте протягом вегетації потреба рослин у воді неоднакова. Найбільша вимога в них до вологості ґрунту проявляється під час проростання насіння та після висаджування розсади на постійне місце вирощування і в період від початку плодоутворення до дозрівання плодів. Дослідженнями також встановлено, що навіть короткочасне (на 1-2 доби) зменшення вологості ґрунту порівняно з оптимальною в цей час призводить до зниження польової схожості насіння в 1,5-2 рази [15].

Поряд із великою вимогливістю до ґрунтової вологи помідор добре росте при помірній вологості повітря – 50-60%. Якщо вона перевищує 70%, тоді погано запилюються квітки. Крім того, рослини пошкоджуються грибковими хворобами. Надмірно низька відносна вологість повітря і різкі коливання її також негативно впливають на ріст і розвиток рослин. Наприклад, коли відносна вологість повітря менша 30-35%, пиляки в'януть і не розвиваються, а квітки опадають. При різких коливаннях вологості повітря плоди помідора пошкоджуються верхівковою гниллю.

*Вимоги до мінерального живлення.* Для нормального росту, розвитку та одержання максимальної врожайності плодів помідора велике значення має оптимальне мінеральне живлення рослин. Разом з тим рослини помідора реагують на умови ґрунтового живлення протягом вегетаційного періоду по-різному. Так, молоді рослини на одиницю сухої речовини потребують у 3-5 разів більше мінеральних речовин, ніж дорослі. Тому для вирощування розсади готують збагачену поживну суміш [15].

Зведені значення нормативних параметрів мікроклімату для вирощування помідорів наведені у таблицях 1.1 – 1.3 [15,17].

Таблиця 1.1.

Значення радіаційних параметрів для розвитку огірків і томатів

Культура	Освітленість, кЛк	Інтенсивність ФАР, $\frac{МДж}{м^2 \cdot год.}$	Приток ФАР за сонячний день
Томат	8	0,16	7,8

Таблиця 1.2.

Технологічні параметри мікроклімату в теплиці

Параметр середовища	Од. вимір.	Вирощування розсади	Вирощування рослин	Плодоношення
<b>Культура – помідор</b>				
Температура повітря:	°C			
- нічна		16...18	18...20	16...18
- денна (похмуро)		20...26	20...22	18...20
- денна (сонячно)		20...26	24...26	20...22
Відносна вологість повітря	%			
- нічна		50...70	60...70	75...80
- денна (похмуро)		50...70	50...60	70...75
- денна (сонячно)		50...70	50...60	65...70
Концентрація CO <sub>2</sub> в повітрі	%	0,1...0,2	0,1...0,2	0,1...0,2
Природна освітленість ярусу листя:	кЛк			
- верхнього		10...40	20...40	20...40
- нижнього		-	10...20	10...20
Рухомість повітря	м/с	0,1...0,5	0,1...0,5	0,1...0,5

Таблиця 1.3.

Допустимі граничні параметри середовища в теплиці

при різній освітленості

Параметр	Од. вим.	Значення параметрів середовища				
Освітленість	кЛк	0...10	10...20	20...30	30...40	40...50
Температура:	°C					
- повітря		18...20	20...22	22...24	24...26	26...28
- ґрунту		20...21	21...22	22...23	23...24	24...25
Відносна волог. повітря	%	85...80	80...75	75...70	70...65	65...60
Рухомість повітря	м/с	0,05...0,1	0,15...0,2	0,25	0,25	0,3

## **1.2. Існуючі рішення енергозбереження у промислових теплицях. Аналіз методів підвищення енергоефективності**

До енергозбереження відноситься комплекс заходів, спрямованих на підвищення родючості ґрунтів та урожайності сільськогосподарських культур, на забезпечення раціонального використання енергетичних ресурсів за рахунок скорочення їх втрат, удосконалення організаційно-економічних механізмів енергоспоживання, застосування енергозберігаючих технологій та техніки, поновлюваних та вторинних енергоресурсів.

Сучасні економічні умови вимагають створення такої теплиці для вирощування овочевих культур, яка дала б можливість налаштувати енергоощадну технологію їх виробництва за рахунок традиційних джерел теплопостачання та максимального використання сонячної енергії, а також значного зменшення тепловтрат через огорожуючі конструкції з раціональним використанням теплоти під час комп'ютерного регулювання її витрати, що зумовлює створення надійного, оптимального мікроклімату і, як наслідок, дає можливість збільшити врожайність тепличних овочів та підвищити їх якість при значному зменшенні витрат теплової енергії.

Перспективними напрямками зниження витрат енергоресурсів в овочівництві закритого ґрунту є: встановлення окремої міні-котельні в кожній теплиці; окреме керування контурами обігрівання з метою наближення тепла до рослини; встановлення котлів з термоакумуляторами, з подачею CO<sub>2</sub> та акумулююючих резервуарів з гарячою водою, яка подається в теплиці при відключеному котлі; використання тепла ТЕЦ, АЕС, геотермальних вод, альтернативних видів біологічного обігрівання з використанням місцевих матеріалів – відходів рослинництва, що дає змогу обігрівати кореневмісну зону рослин у теплицях; використання сучасних енергозберігаючих покривних матеріалів (полікарбонат); використання систем екранування: зашторювання для зниження перегрівання у весняно-літні періоди та

використання енергозберігаючих екранів для збільшення термічного опору покрівля теплиці; впровадження систем доосвічування рослин із застосування фіто-ламп; автоматизація та комп'ютеризація технологічних процесів. Запропоновані заходи дають змогу в 3-4 рази зменшити енерговитрати на вирощуванні овочевих культур у закритому ґрунті.

Одним з вагомих джерел економії ресурсів є вибір палива, а саме: рідкого – продукти перегонки нафти; твердого – буре та кам'яне вугілля, дерево, солома, різні відходи виробництва та життєдіяльності людини; газоподібного – біогаз, газ. Паливо, особливо газ, можна економити за рахунок заміни котлів, ККД яких раніше становив 89 – 90%, на котли з термоакумуляторами, з подачею CO<sub>2</sub>, при ККД – 95 – 96% та акумулюючих резервуарів, в яких запасається гаряча вода, яка подається в теплиці при відключеному котлі. При значному підвищенні цін на газ 5% економії – це вагома величина. Застосування акумулюючих резервуарів дозволяє зекономити до 500 тис. м<sup>3</sup> газу на рік для великих підприємств за наявності теплиць голландського типу та міні - котелень [3,29].

Важливим фактором, що впливає на ефективність овочівництва закритого ґрунту, є широке впровадження автоматизованого управління та контролю параметрів мікроклімату, вискоефективних і надійних в експлуатації систем та комп'ютерного моніторингу. Одним з недоліків існуючих систем є перевищення температури повітря в теплиці унаслідок неточного регулювання. Так, збільшення температури всього на 1°C призводить до перевитрат за рік з розрахунку на 1 га площі теплиць, додатково 100 тон умовного палива [2].

Перспективними заходами щодо поліпшення стану справ у галузі тепличного виробництва є розвиток нових технологій конструювання теплиць і оптимізація процесів вирощування за рахунок впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем управління.

Існують різні напрями досліджень, пов'язані з різними аспектами підвищення ресурсоефективності тепличного господарства: використання води для зрошення, проектування оптимальної структури теплиці, збереження ґрунту в кращих умовах вирощування, споживання енергії системи в цілому, кліматичного контролю в межах об'єкта та боротьби з шкідниками. На сьогодні, дослідницький підхід змістився від орієнтації не лише на збільшення виробництва та економії витрат, а й до включення аспектів, пов'язаних із збереженням ресурсів та стійкістю системи [27].

Дослідження енергоефективності в теплиці довели, що керування процесами в тепличних спорудах є унікальним завданням, оскільки воно вимагає використання систем управління, здатних реагувати на постійно мінливі умови навколишнього середовища та мікрокліматичні зміни. У північних широтах та екстремальному кліматі вартість опалення та охолодження теплиць може досягати 70–85% від загальної вартості експлуатації [28].

Виділяють три рівні контролю процесів в промислових теплицях голландського типу – *обладнання, функціонування та система* – визначені національною асоціацією виробників теплиць. На *рівні обладнання* приводи контролюють роботу конкретного обладнання. На *рівні функцій* регулюється все обладнання, яке відноситься до певної функції, наприклад, контроль вологості. *Контроль системного рівня* – це контроль, який відстежує та з'єднує все обладнання та функції управління, а також визначає задані значення та операційні етапи з загальної перспективи системи.

Загально відомі стратегії включають температурні режими, контроль вологості за допомогою вентиляції, подачу CO<sub>2</sub> на основі подій та динамічний контроль додаткових факторів росту на основі вимірюваної щільності фотосинтетичного потоку фотона від сонячного випромінювання. З кожним із цих керованих параметрів навколишнього середовища існує баланс між економічною життєздатністю та високою врожайністю. Була запропонована ідея інтеграція температури (IT) – підтримка оптимальної середньої

температури за певний проміжок часу при мінімізації потреби в енергії – це ефективна методика контролю температури [20]. Діапазон визначається в нижньому кінці за температурами, при яких відбувається пошкодження рослин, а на високому – за температурами, при яких швидкість росту значно знижується, що описано в роботі [26].

Важливим питанням для досліджень є *алгоритми управління*. Регулювання мікроклімату в теплицях є складною задачею, оскільки в роботі є багато взаємозалежних змінних. Система управління середовищем в теплиці - це складна нелінійна система з множинним входом та багато виходом. У регулюванні автоматичними системами в теплицях використовуються кілька типів алгоритмів управління, такі як пропорційно-інтегральний, нелінійний, р-система, методи нечіткої логіки, нейронна мережа та гібридні алгоритми управління. Як правило, ці алгоритми управління можна класифікувати як класичні, вдосконалені, інтелектуальні або гібридні алгоритми управління [22,23].

До класичних алгоритми управління відносять: пропорційно-інтегральний (ПІ-) і пропорційно-інтегрально-диференційний алгоритми (ПІД-) управління, які найчастіше застосовується в керуванні мікрокліматом в теплиці через їх гнучкість, простоту та хороші показники керування. ПІД-контролер – це механізм зворотного зв'язку з керуючим циклом, який в основному зчитує датчик, обчислює потрібний вихід виконавчого механізму шляхом згортання пропорційної, інтегральної та диференційної складової. Налаштування контролера – складний і трудомісткий процес. ПІД-алгоритм також не підходить для розширених програм, особливо для нелінійного, динамічного управління [1].

Розширені ж алгоритми керування використовуються в разі виникнення проблем управління, які характеризуються надзвичайно тривалими затримками процесу, високим ступенем взаємодії з процесом, численними обмеженнями в роботі та вимірюваними порушеннями процесу [24]. Ці алгоритми здатні керувати нелінійними системами зі збуреннями,

краще, ніж звичайні, але потребують певної форми математичних моделей на відміну від інтелектуального управління.

*Адаптивний контроль* в свою чергу дозволяє швидко змінювати параметри у відповідь на зміни динаміки середовища теплиці. Він також враховує похибки у формулюванні моделі та оцінці параметрів. Однак, все ще потребується використання визначення відповідної моделі. Адаптивний контроль отримує миттєві рішення як від реальних вимірюваних, так і прогнозованих параметрів [25].

*Робастна система керування* вимагає попередньої невизначеності процесів заздалегідь через нелінійні або часові зміни процесів. Це дає змогу описати систему керування в усіх можливих умовах експлуатації. Тому робастний контролер призначений для підтримки стабільності та продуктивності в цьому діапазоні умов роботи [10]. Робастний контролер був успішним у підтримці температури та вологості в теплиці в межах 2°C та 10% від заданих показників відповідно. Для контролю за мікрокліматом в теплиці, зв'язаним з різними за часом умовами, робастний контролер виявився досить ефективним. Однак він працює в умовах різких збурень, вимагаючи додаткових параметрів для кожної різної системи керування. Іноді алгоритм робастної системи суперечить потребі в динамічному управлінні.

Сучасні тепличні комплекси потребують використання нових підходів до керування. Такими є, наприклад *інтелектуальні алгоритми*, які використовують методи штучного інтелекту та виявляються корисними за відсутності математичної моделі. Однак для навчання моделей вони потребують великого набору даних. До таких систем належать *нечіткі та нейронні мережі*. Системи нечіткої логіки є кращим варіантом з цифрової логіки, оскільки вона може бути викладена в поняттях, більш зрозумілих оператору, інтерполюючи вхідні значення як логічні змінні зі значеннями від 0 до 1. Дослідники [2] використовували інтелектуальну систему на основі нечіткої логіки для контролю за температурою і вологістю в теплиці, з

вентиляцією і підтриманням норм підживлення рослин як контрольних точок, ними було досягнуто 22% та 33% економії енергії та води відповідно.

Нейронні елементи управління і мережі є одними з найскладніших форм контролю. Ці обчислювальні системи складаються з високо пов'язаних обробних елементів, які динамічно реагують на зовнішні входи. Нейронні мережі, як правило, розташовані в шарах взаємопов'язаних вузлів з функцією активації, з візерунками, представленими в мережу вхідним шаром, який сигналізує про більш глибокі шари. Обробка проводиться системою зважених з'єднань, а потім посилається на вихідний рівень, де ініціюється команда керування. Застосування нейромережевого керування у теплицях дає перевагу в тому, що його можна реалізувати без необхідності складної математичної моделі. Він також є потужним нелінійним оцінювачем і може виявляти взаємозв'язки між вхідними та вихідними змінними, навіть якщо вони складні або невідомі. Однак недоліком цього методу управління є те, що він вимагає аргументування на основі даних, що керуються або вбудованих експертних знань.

Теплиця, зазвичай, розглядається як система, яка може сприяти зростанню рослин, оскільки гарантує відповідність умов мікроклімату для вирощування рослин. Насправді теплиця – це система зберігання тепла, яка перетворює сонячне випромінювання, що падає, у приріст тепла. Цей фізичний процес заснований на провідності, накопиченні тепла та конвекції. Модель автоматизованої теплиці повинна бути спроможна передбачити зміни параметрів навколишнього середовища в приміщенні, які ґрунтуються на кількох граничних умовах. На рис. 1.1 зображена спрощена теплова модель теплиці, що базується на чотирьох шарах, які беруть участь у термодинамічних обмінах: покриві, внутрішньому повітрі, рослинах та ґрунті.

На даний час відомі моделі тепличного комплексу, а також традиційні аналітичні методи аналізу і прогнозування поведінки цього складного об'єкта. В сучасних умовах використання таких моделей не забезпечує достатньої

ефективності через ускладнення задач керування, наприклад, оптимізації та адаптації.

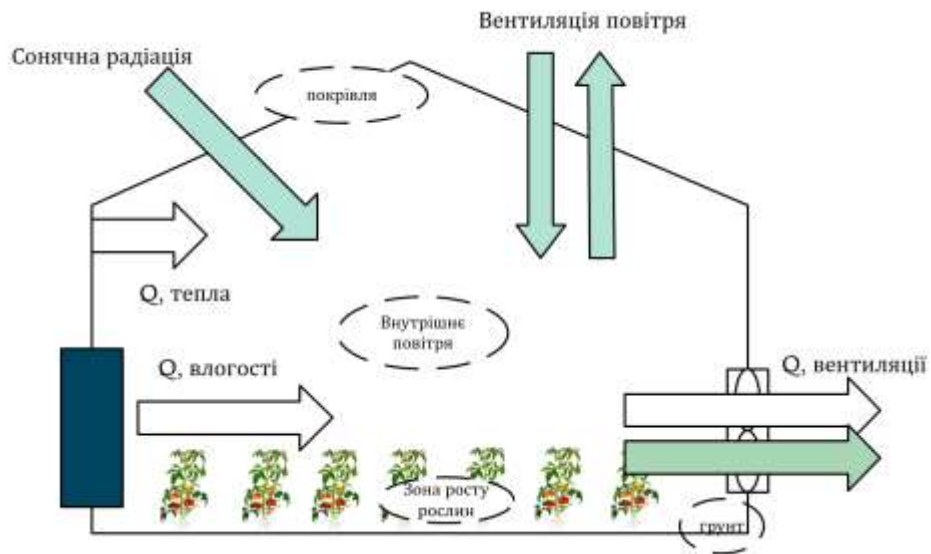


Рис. 1.1. Спрощена схема потоків складових мікроклімату теплиці

Використання *штучних нейронних мереж* (ШНМ) для тепличного комплексу (а саме, їх особливості – навчання на експериментальному зразку та паралельна обробка інформації) забезпечує високу швидкодію. Переваги та недоліки нейронних мереж (НМ) спостерігаються в різних сферах застосування в теплицях, від прогнозування мікроклімату, витрат енергії, до більш конкретних завдань, таких як контроль рівня вуглекислого газу. На рис. 1.2 представлені теми, що виникають при дослідженні сучасних теплиць та класифікація використовуваних моделей.

Серед основних досліджень, які оцінювали життєздатність НМ при моделюванні стану мікроклімату в теплиці, який спеціально зосереджувався на взаємовідносинах введення-виведення та найефективнішому процесі виборів вхідних даних, довело, що ШНМ отримують кращі результати, ніж фізичні моделі масової та енергетичної передачі, а також наголосили на їх потенційному застосуванні для екологічного контролю параметрів в теплицях. Методи побудови моделей за допомогою ШНМ має велику здатність до

відображення нелінійних функцій, що застосовується до багатьох систем виробничого процесу [21].

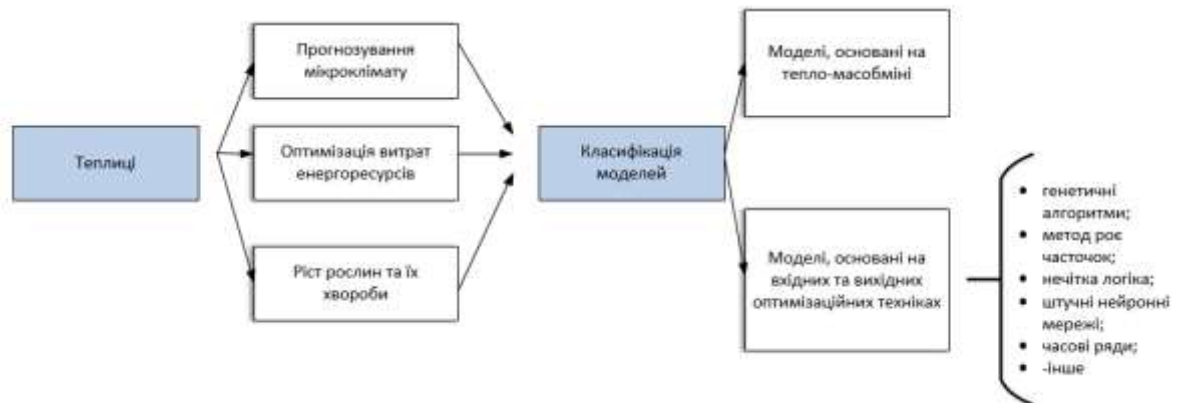


Рис. 1.2. Досліджувана тематика інтересів у класифікації теплиць та моделей

Дослідники [16] проводили моделювали внутрішньої температури гідропонної теплиці на основі відносної вологості в приміщенні, зовнішньої температури повітря та сонячної радіації. Вони обговорювали різні методи навчання нейронної мережі радіальної базової функції (RBF), які структурно простіші за багатошаровий перцептрон (MLP), які є типом FFNN. Завданням використання штучної нейронної мережі радіальної базової функції (RBFANN) є те, що процес проектування та навчання є більш простим завданням.

Можливість ШНМ моделювати складні та нелінійні системи дозволяє застосовувати їх у різних завданнях у теплицях, а не лише в прогнозуванні мікроклімату, на якому зосереджена більшість досліджень. Як зазначалося, внутрішня температура та вологість є одними із змінних, які викликають найбільший інтерес для прогнозування їх поведінки. Моделі добре вміщують дані, а також генерують надійні результати оптимізації [21].

Розумне сільське господарство – це концепція управління сільського господарством, яка використовує сучасні технології для збільшення кількості і якості продукції, доступ до GPS, сканування ґрунту, управління даними та технології Інтернет речей. Одним з головних недоліків сучасних сільськогосподарських теплиць є неефективне інтелектуальне управління

інформацією. Необхідною умовою ефективного впровадження технологій *Інтернет речей* є розробка та впровадження такої структури системи, як це показано на рис. 1.3. Проектування таких систем, де використовується технологія Інтернет або локальної мережі (LAN), дозволяють поєднувати датчики, контролери та комп'ютери для з'єднання людей та "речей", отримуючи таким чином єдину систему.



Рис. 1.3. Застосування моделі сільського господарства 4.0 у тепличному господарстві

Говорячи про технологію Інтернет речей, необхідно звернути увагу на дослідження [28]. В роботі узагальнено характеристики інтелектуальної системи вимірювань та контролю мікроклімату теплиць, а також представлений метод побудови інтелектуальної системи вимірювань та контролю через фактичну проектну ситуацію та зміст. Інтелектуальна система вимірювання та керування мікрокліматом в теплицях на основі Інтернет речей реалізує автоматичну роботу обладнання теплиць без нагляду, зменшує споживання енергії та експлуатаційні витрати, може забезпечити ідеальне середовище зростання рослин та може знизити інтенсивність праці людей та покращити використання обладнання. Поліпшити мікроклімат в теплиці,

знизити кількість шкідників та хвороб, збільшити урожайність сільськогосподарських культур тощо та досягти інтенсивного віддаленого управління системами в теплицях. Для збереження зібраних даних програмне забезпечення аналізується комп'ютером, а графік відображається в інтерфейсі, що дозволяє персоналу зручно порівнювати отримані показники з нормальними параметрами тепличних середовищ, які вже зберігаються в базі даних. Одночасно з цим, автоматично запускається обладнання для контролю параметрів мікроклімату в теплиці, таких як рідкі добрива, ввімкнення/вимкнення нагрівачів, зволожувачі повітря, сонцезахисні штори тощо, регулюється середовище росту тепличних культур та підтримується оптимальне середовище для вирощування рослин.

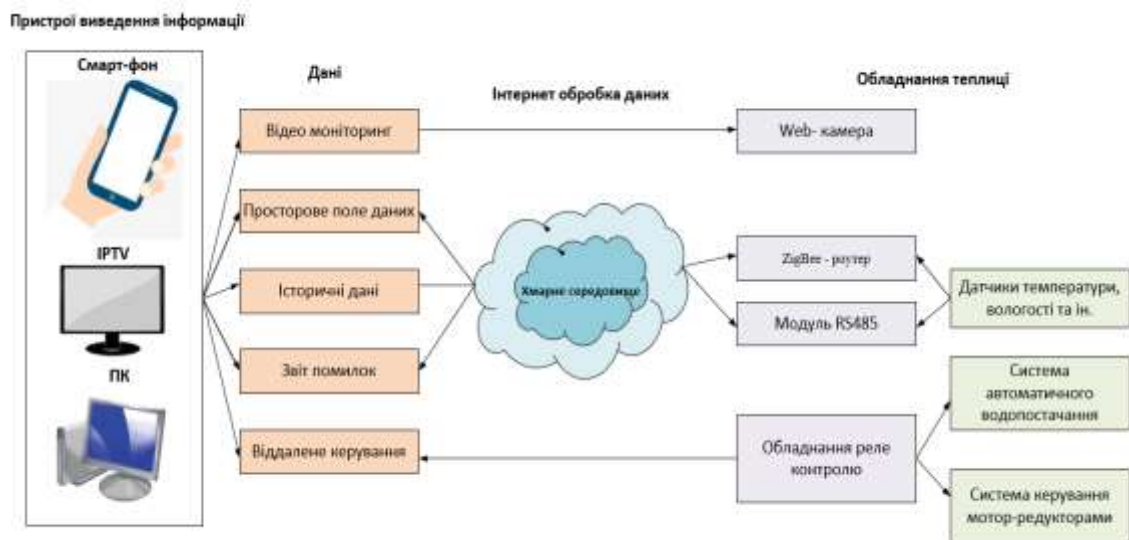


Рис. 1.4. Основні параметри інтелектуального моніторингу теплиць

У результаті аналізу існуючих технічних рішень та методів підвищення енергоефективності визначимо основні заходи економії у тепличному виробництві (таблиця 1.4). Одним із шляхів підвищення продуктивності виробництва є використання енергоефективних систем керування, що дають можливість швидко та ефективно реалізовувати складні обчислювальні процедури керування електротехнологічним комплексом при стабільній якості продукції.

## Заходи економії енергоресурсів в тепличному комплексі

<i>Сутність методу</i>	<i>Економія</i>	<i>Недоліки</i>
Опалення електроенергією	20-30%	- значна вартість обладнання; - відсутність українських виробників обладнання.
Перехід на біогаз	30-40%	- потребує значних інвестицій; - високі терміни окупності.
Перехід на дерев'яні пелети	20-30%	- нестабільне постачання сировини; - тяжкий процес забезпечення якості сировини.
Використання вугілля	20-30%	- можливість забруднення конструкцій теплиці; - додаткові інвестиції в побудову складів для зберігання сировини.
Використання теплових насосів	50-60%	- значні витрати на переобладнання;
Встановлення сонячних батарей	20-30%	- необхідність додаткового виду енергетичного забезпечення; - залежність від пори року та часу доби.
Використання вітрогенераторів	30-40%	- значна вартість обладнання; - залежність від умов навколишнього середовища; - високі терміни окупності.
Нові методи керування	30-40%	- складність реалізація алгоритмів керування.

## РОЗДІЛ 2

# ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ У ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ

### 2.1. Опис електротехнічного комплексу промислової теплиці

У тепличних комплексах відбувається повний цикл вирощування рослин – від посіву до отримання овочевої продукції. Кожний етап має технологічні особливості і для його реалізації використовується значні обсяги енерговитрат.

Для аналізу та розробки системи керування енергоефективністю тепличного господарства експериментальні дані та перелік основного електротехнологічного обладнання отримано на базі тепличного господарства ПРАТ "Комбінат "Тепличний" смт. Калинівка, Броварського р-ну, Київської області [18].

Обладнання теплиць складається з таких систем: для обігріву ґрунту й повітря; зрошення; внесення рідких мінеральних добрив та позакореневих підживлень, подачі вуглекислого газу, вентиляції, зашторювання, систем для функціонування побутових приміщень. Дані про значення технологічні параметри у блоках теплиць передаються датчиками на пульт керування, де зосереджено апаратуру автоматичного керування і контролю.

*Тепловий режим.* Система опалення споруд закритого ґрунту включає в себе: котельню з двома котлами потужністю по 8 тис. кВт, 18 насосів для подачі та розподілу теплоносія в шатрі теплиці загальною потужністю 35 кВт та тепломережу. Вентилювання повітря забезпечується двома шляхами: природнім – за допомогою відкриття фрауг, та примусовим – з використанням вентиляторів. Споживча потужність мотор-редукторів, що

відкривають чи закривають фрамуги, складає 18,5 кВт, потужність вентиляторів – 1,2 кВт.

*Водний режим* забезпечується різними системами зрошення (надґрунтове, підґрунтове, крапельне). *Режим підживлення* забезпечується підтриманням необхідної концентрації мінеральних добрив. Потужність системи підготовки живильного розчину складає 93 кВт.

*Газовий режим* в атмосфері споруди закритого ґрунту передбачає контроль і підтримання концентрації вуглекислоти на рівні 0,1-0,25% (для томату). Потужність двигуна подачі CO<sub>2</sub> становить 11 кВт.

*Світловий режим.* Для додаткового доосвітчування при вирощуванні розсади в спорудах закрито ґрунту використовують штучне освітлення.

Таблиця 2.1.

Технічні характеристики обладнання електротехнічного комплексу

Технологічний процес	Назва обладнання	К-ть, шт.	Потуж., кВт	Призначення
Тепловий режим	Котел	2	1600	Нагрів теплоносія
	Циркуляційний насос	18	35	Подача теплоносія всередину теплиці
Вентилювання	Мотор-редуктор	8	18,5	Відкриття/закрита фрамуг
	Вентилятор	10	1,2	Циркуляція повітря в шатрі теплиці
Водний режим	Циркуляційний насос	9	93	Подача живильного розчину до рослин, дренаж
Газовий режим	Циркуляційний насос	2	11	Підтримання концентрації CO <sub>2</sub>
Зашторювання	Мотор-редуктор	4	9,2	Підняття/опускання штор

Розглянемо склад систем створення мікроклімату більш детально.

*Система опалення* складається з таких елементів як котельня, буфер (ємнісний гідроакумулятор), розширювальна система, транспортна група, змішувальна група, тепломережа.

*Котельня* включає в себе 2 водогрійних котла, паливник, економайзер.

*Економайзер* призначений для підвищення ККД котла, за рахунок додаткового нагрівання теплоносія продуктами згорання газу та його охолодженні при отриманні CO<sub>2</sub>. Теплоносій подається до економайзера через циркуляційний насос, встановлений на вході економайзера.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд водогрійного котла Witomax-200 тепличних комплексів

*Буфер* запасує надлишкову енергію. Коли котел працює на виробіток CO<sub>2</sub>, а в теплицю подача тепла не виконується, то нагрітий теплоносій накопичується у ємнісний буфер, звідки при потребі першочергово збирається для подачі теплоносія до теплиці.

*Розширювальна система* призначена для підтримки робочого тиску в системі. Компресор підіймає тиск, автоматичний клапан скидає надлишковий тиск.

*Транспортна група* призначена для подачі теплоносія. Складається із двох колекторів подачі і повернення теплоносія. До складу транспортної групи входять циркуляційні насоси, трьох ходові клапани, датчики вимірювання, регулятори.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд транспортної групи

*Змішувальна група* розміщена безпосередньо всередині теплиці і призначена для подачі води в кожний контур опалення. До складу змішувальної групи входять циркуляційні насоси, трьохходові клапани, датчики вимірювання, регулятори.



Рис. 2.3. Загальний вигляд змішувальних груп

*Тепломережа.* У теплиці використовуються система з розподілом контурів опалення. Кількість контурів визначається в залежності від культури, що вирощується. Теплиця, що розглядається, має три контури обігріву: два надгрунтового опалення і один загальний підпокрівельного опалення. Завдяки цьому вирівнюється теплове поле по усій площі теплиці.

Основний надгрунтовий контур опалення розташований по всій площі між рядками і також виступає в якості рейок для технологічних візків. Являє собою металеву трубу з діаметром 51 мм. Труби ліфтового надгрунтового

обігріву проходить в зоні росту рослин для забезпечення максимально комфортних умов росту рослин. Під покрівельне опалення розташоване в площині верхніх горизонтальних несучих конструкцій, служить для запобігання утворенню намерзання на склі фрамуг і відкладання снігу, допомагає у тримати в теплиці заданий температурний режим. Обігрівальні труби приєднані до системи опалення через розподільчі трубопроводи.



а)

б)

в)

Рис. 2.4. Трубна система опалення теплиці:

а) надґрунтовий контур опалення; б) труба ліфтового обігріву;  
в) підпокрівельний обігрів

*Система підготовки живильного розчину* являє собою ряд послідовно з'єднаних елементів (труб, насосів, датчиків рівня води, датчиків тиску, баків-змішувачів) за допомогою яких готується і подається живильний розчин, необхідний для життєзабезпечення і розвитку рослин.



Рис. 2.5. Елементи системи підготовки живильного розчину

Кількісний склад насосів груп систем опалення та підготовки живильного розчину та їх потужність наведені у додатках А1, А2.

*Система вентилявання.* Вентилювання повітря в тепличному блоці забезпечується двома шляхами: природнім – за допомогою відкриття фрамуг, та примусових – з використанням вентиляторів.

Природнім шляхом вентиляція здійснюється через фрамуги, розташовані по краях покрівлі в шаховому порядку. Загальна площа вентиляційних фрамуг в покрівлі теплиці становить 25-30% від площі теплиці. Кут відкривання фрамуг становить 46-60°. Застосовується система відкривання фрамуг рейкового типу з горизонтальним ходом приводу. В якості приводу застосовуються мотор-редуктори і рейкові редуктори. Основний приводний вал з оцинкованої труби  $\text{Ø}42 \times 3 \text{ мм}$ . Штовхаючі штанги з оцинкованої труби  $\text{Ø}27 \times 1,5 \text{ мм}$ . Для механічного зв'язку з фрамугою застосовуються 4 алюмінієві штанги  $\text{Ø}19 \text{ мм}$  на кожен фрамугу.



Рис. 2.6. Мотор-редуктор Ridder RW240 для відкриття фрамуг

Штучна вентиляція здійснюється за допомогою циркуляційних вентиляторів (рис. 2.7, додаток А3), основна функція яких полягає в забезпеченні циркуляції повітря в теплиці. При цьому відбувається рівномірний розподіл теплого повітря від працюючих систем опалення. Однак в неопалюваних теплицях вентилятор теж необхідний. З його допомогою підтримується нормальна для зростання і розвитку рослин атмосфера.



Рис. 2.7. Рециркуляційний вентилятор промислової теплиці

*Система зашторювання.* Однією з найважливіших складових сучасної теплиці є система зашторювання (рис. 2.8, додаток А4), яка дозволяє забезпечити стійкий мікроклімат в теплиці за рахунок регулювання температури, вологості, і ступеня освітленості, а також дозволяє досягти значної економії тепла. Система розроблена для уникнення високих температур в приміщенні в спекотні періоди року. Можна так само скоротити втрати тепла в зимовий період. Дана система стане запорукою створення рівномірного і сприятливого кліматичного поля для будь-якого виду рослин. Втрати тепла скорочуються до 40%. Це забезпечується шляхом зменшення просочування теплової енергії через купольну частину теплиці.

Розрізняють кілька видів систем зашторювання: горизонтальний (верхній) та вертикальний (бічний). Горизонтальне зашторювання розташовується у верхній частині теплиці, і ним оснащені практично всі сучасні теплиці. Вертикальне зашторювання застосовується менше.



Рис. 2.8. Зовнішній вигляд системи зашторювання

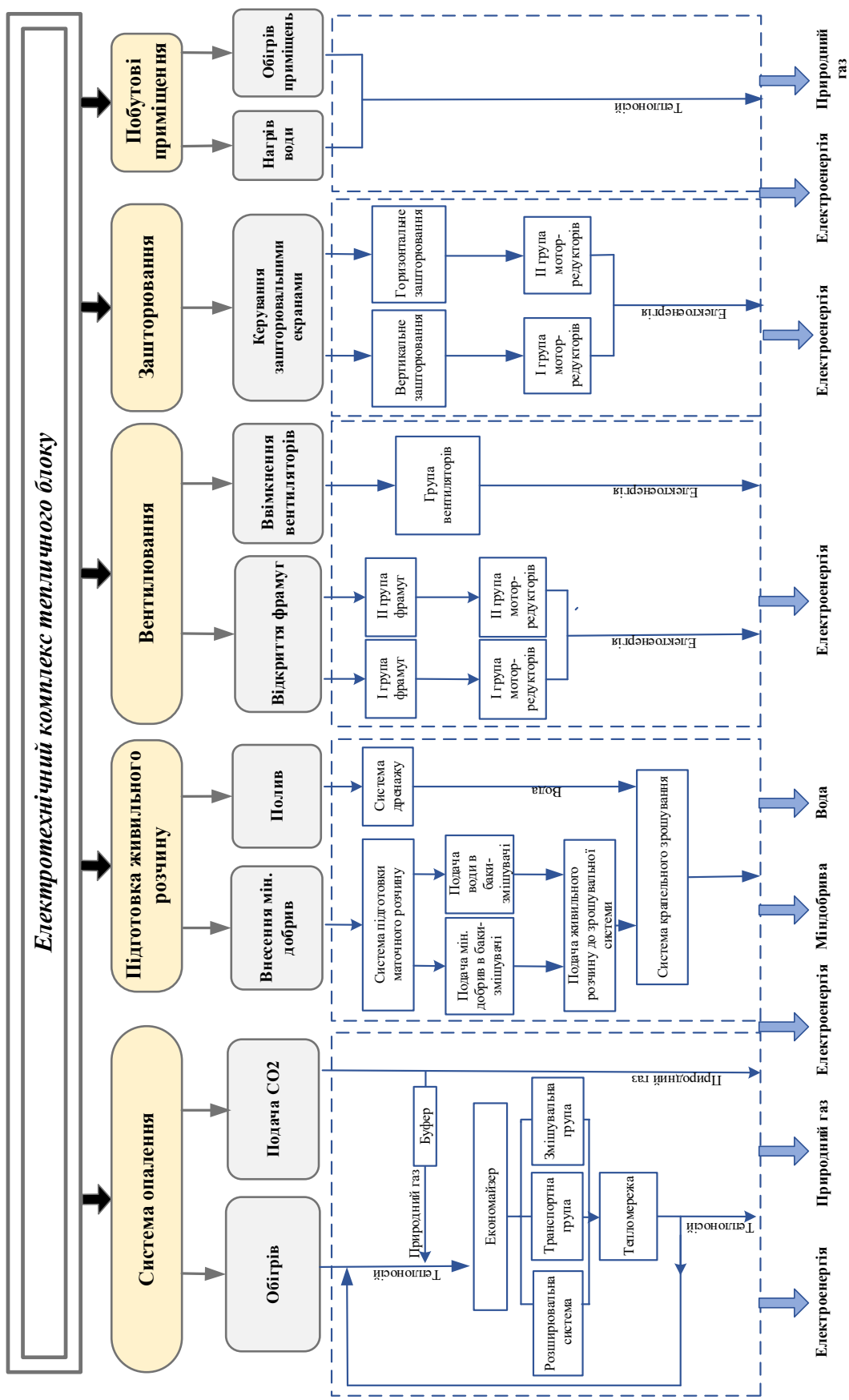


Рис. 2.9. Структурна схема обладнання промислової теплиці з урахуванням енергетичних потоків

Аналізуючи технологічний процес вирощування продукції в спорудах закритого ґрунту та наявні технічні системи його забезпечення з точки зору системного аналізу, визначаються такі ознаки, що характерні для складних систем:

- в системі виділяється структурна сукупність підсистем, які взаємодіють між собою;

- кожна із систем може входити, як підсистема в більш складну, в свою чергу підсистеми можуть представлятись як системи молодшого рангу;

- складні системи взаємодіють з зовнішнім середовищем також як одне ціле;

- процес функціонування складних систем включає різні аспекти (перетворення речовини, енергії, інформації);

- ціль функціонування складних систем керування полягає в підтриманні оптимальних режимів та адаптації до змінюваного зовнішнього середовища;

- процес функціонування складних систем керування – це сукупність процесів основного призначення та допоміжних (адаптація, розвиток, реконфігурація та ін.);

- в складних системах процеси керування реалізуються як з використанням зворотних зв'язків, так і формування комплексу цілей кожна з яких розв'язується своїм методом;

- в складних системах керування на кожному з етапів є свої особливості (збір інформації, її аналіз, вироблення управляючих дій, реалізація).

## 2.2. Технологічні передумови створення енергоефективної системи керування енергетичними потоками в теплиці

Технологічними передумовами створення енергоефективної системи керування енергетичними потоками в теплиці є:

- 1) економічність виробництва – можливість роботи тільки необхідної кількості контурів обігріву;
- 2) необхідність мінімізації енергетичних витрат;
- 3) підтримка заданих технологічних параметрів для конкретного сорту і культури, що вирощується у теплиці;
- 4) забезпечення високої якості кінцевого продукту та потреба мінімізації інших ресурсів (води, мінеральних добрив тощо).

Особливостями системного аналізу для досліджуваного комплексу є формування і врахування:

- цілей, які, зазвичай, складаються з цільових компонентів і подаються у вигляді графу типу дерева;
- операцій, які забезпечують досягнення цілей перетворенням об'єктів, що циркулюють у системі;
- об'єктів, які є результатом виконання операцій;
- ресурсів, що використовуються для проведення операцій;
- переходів, які відбуваються в системі й відображають факт передачі об'єктів між операціями;
- подій, які конкретизують передачу конкретних об'єктів між зазначеними операціями.

Для опису зв'язків між підсистемами використаємо один з методів математичного опису – теорію графів. Графові моделі поєднують в собі властивості графічного та множинного представлення з формуванням допоміжних матриць, які зручно використовувати для задач аналізу, синтезу та управління.

Тепличний комплекс являє собою складну систему, що складається з таких елементів: 1 – станція водопостачання; 2 – електростанція; 3 – газорозподільний пункт; 4 – система підготовки живильного розчину; 5 – система вентиляювання; 6 – система зашторювання; 7 – система опалення; 8 – побутові приміщення; 9 – робоча зона.

Кожна із виділених підсистем являє собою важливу складову тепличного комплексу, аналіз якого призведе до найбільш повного уявлення про сам процес і про можливість його регулювання. На основі технологічного та структурного аналізу складено повний потоковий граф тепличного комплексу (рис. 2.10), де вершинами є його функціональні елементи, а дугами – зв'язки між ними.

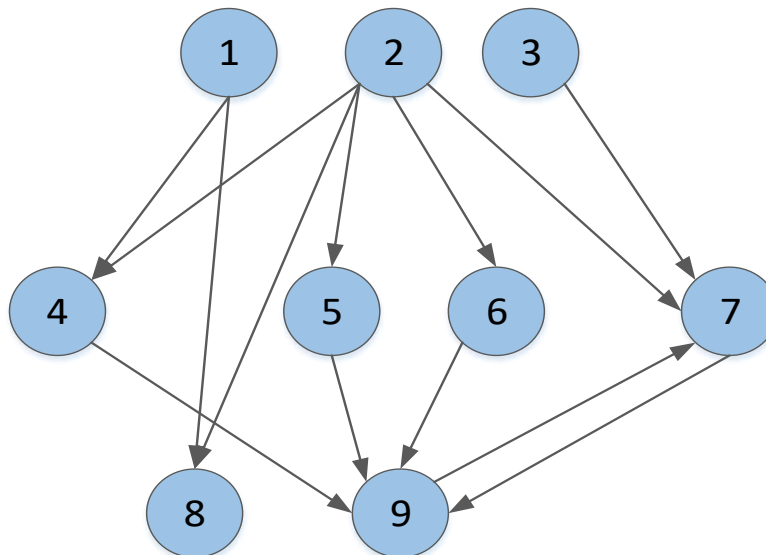


Рис. 2.10. Повний потоковий граф тепличного комплексу

Далі на основі повного потокового графу складаємо матрицю шляхів. Матриця шляхів є одною з трьох основних матриць за допомогою якої задається топографія графу, яка дозволяє спростити рішення багатьох задач. Основні галузі, де її можна використати такі: електроенергетика, водопостачання, газопостачання, транспорт, управління персоналом тощо. Основною задачею матриці шляхів є визначення взаємозв'язків між ланками графа.

Матриця є квадратною, кількість стовпців відповідає кількості елементів в складі технологічного комплексу. Якщо на графі є шлях будь-якої довжини з вершини  $i$  у вершину  $j$ , то на пересіченні  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпця ставиться одиниця, в протилежному випадку – 0.

Таблиця 2.2.

Матриця шляхів  $P$ 

Номер вершини графа, $i$	Номер вершини графа, $j$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	1	0	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	0	0	0	1	0	1
4	0	0	0	1	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	1	0	1	0	1
6	0	0	0	0	0	1	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	1

На основі матриці шляхів  $P$  будується допоміжна матриця  $S$  (табл. 2.3).

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } p_{ij} = p_{j1} = 1 \\ 0, \text{ в протилежному випадку} \end{cases} \quad (2.1)$$

Таблиця 2.3.

Допоміжна матриця  $S$ 

Номер вершини графа, $i$	Номер вершини графа, $j$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	1

На основі матриці  $S$  визначаються комплекси, які входять в склад системи. Якщо в  $i$ -му рядку є лише один ненульовий елемент  $S_{ii}$  (на головній діагоналі), то елемент системи з номером  $i$  можна розрахувати окремо від решти елементів та вважати окремим комплексом.

Рядки матриці  $S$ , які крім елемента  $S_{ii}$  мають інші ненульові елементи, називають комплексами. Ненульові елементи показують вершини графа, які входять у комплекс. Отже, у складі тепличного комплексу можна виділити сім окремих (вироджених) підсистем: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 та комплекс, що складається з підсистем 7 та 9.

Отже, проаналізувавши повний потоковий граф тепличного комплексу, матрицю шляхів та допоміжну матрицю, можна зробити висновок, що досліджуваний об'єкт має всі ознаки складної системи з можливістю виділення окремих підсистем. Оскільки кожна з виділених підсистем має свої локальні цілі, то при функціонуванні системи в цілому, можуть виникнути конфліктні ситуації. Таким чином виникає задача координації роботи керуючих підсистем, розв'язком якої є визначення взаємодії підсистем, при якій управління, оптимальні за критеріями ефективності кожної з підсистем, є також оптимальними за загальним критерієм для процесу в цілому.

### **2.3. Розробка концептуальної моделі багатозадачної системи регулювання мікроклімату в теплиці**

Мета створення концептуальної моделі електротехнологічного комплексу теплиці полягає у вивченні її поведінки в різних ситуаціях, а також знаходження ефективних та оптимальних режимів роботи.

Як було зазначено, для розробки та аналізу впровадження системи керування енергоефективністю тепличного господарства експериментальні дані та перелік основного електротехнологічного обладнання отримано на базі

тепличного господарства ПРАТ "Комбінат "Тепличний" смт. Калинівка, Броварського р-ну, Київської обл.

Основне завдання логічного проектування в разі об'єктного підходу є розробка класів для реалізації об'єктів, отриманих у результаті об'єктної декомпозиції, що передбачає повний опис полів і методів кожного класу.

Фізичне проектування згідно з об'єктним підходом включає в себе об'єднання класів та інших програмних ресурсів у програмні компоненти, а також розміщення цих компонентів на конкретних обчислювальних пристроях.

*Статичні моделі* об'єктно-орієнтованих програмних систем забезпечують подання структури систем у термінах базових будівельних блоків і відношень між ними. "Статичність" цих моделей полягає в тому, що вони не відбивають динаміки змін системи в часі. Утім слід розуміти, що ці моделі несуть у собі опис не тільки структури, а й операцій, які реалізують задану поведінку системи. Основний засіб для подання статичних моделей є діаграми класів.

*Динамічні моделі* забезпечують подання поведінки систем. "Динамізм" цих моделей полягає в тому, що вони відбивають зміну станів у процесі роботи системи (залежно від часу). Для моделювання поведінки системи використовують:

- автомати — описують поведінку в термінах послідовності станів, через які проходить об'єкт протягом свого життя;
- взаємодії — описують поведінку в термінах обміну повідомленнями між об'єктами.

Статичні і динамічні моделі описують логічну організацію системи, відбиваючи логіку програмного забезпечення. Моделі реалізації являють собою подання системи у фізичному світі, з охопленням питань упакування логічних елементів у компоненти та розміщення компонентів в апаратних вузлах. Засобом для побудови моделі реалізації виступають діаграми компонентів і діаграми розміщення.

Керування процесами в теплиці характеризується певною *ієрархією* в просторі і в часі: *теплиця – цех – розподільчі групи*. Процес керування виробництвом овочевої продукції в теплиці носить відносно замкнутий, циклічний характер. Він складається з повторюваної послідовності загальних функцій керування, до яких відносяться облік, контроль, аналіз, прогнозування, планування і регулювання. Саме енергоефективна система керування прийняття рішень дозволить особі брати участь у процесі керування, активно впливати на його хід, використовуючи практичний досвід з метою покращення енергоефективності.

*Концептуальна модель* характеризує статичні властивості розроблюваного програмного забезпечення. Для опису особливостей його поведінки, тобто можливих дій системи, доцільно використовувати діаграми класів і діаграми станів об'єктів.

Концептуальна модель ґрунтується на розгляді об'єкта на кількох рівнях декомпозиції. Як правило, виділяють явища на макро- і мікрорівні об'єкту. На макрорівні процеси розглядаються узагальнено, «великими мазками». Наприклад, рух потоків маси і енергії, надходження грошових коштів і т.п. На мікрорівні ці процеси розглядаються більш детально.

На кожному рівні декомпозиції виділяють явища і зв'язки між ними. При динамічному моделюванні під явищем будемо розуміти зміну деякої величини. У концептуальній моделі описується перебіг кожного явища. Зв'язки між явищами поділяються на взаємозв'язки явищ одного рівня декомпозиції і зв'язки між явищами різних рівнів декомпозиції. Наприклад, для гіпотези з двома рівнями декомпозиції можливі зв'язки трьох видів:

- зв'язки між явищами на мікрорівні;
- зв'язки між явищами на мікро- та макрорівні;
- зв'язки між явищами на макрорівні.

Для спрощення явищ об'єкта з метою їх формального опису приймається ряд припущень. Припущення стосуються особливостей протікання фізичних, економічних, хімічних та інших типів процесів на

об'єкті моделювання. Припущення є однією з основних частин концептуальної моделі і обов'язково підлягають узгодженню з замовником, тому що безпосередньо впливають на адекватність моделі.

Формалізація залежностей здійснюється на основі фізичних законів перебігу описаних явищ. Кожному явищу зазвичай відповідає звичайне диференціальне рівняння першого порядку. Права частина рівняння описує складові частини цього явища. Якщо явище має стохастичний характер, у праву частину рівняння включаються відповідні характеристики випадкових процесів. Величини, загальні для правих частин рівнянь і залежні від змінних, що стоять в лівій частині (які диференціюються за часом), розраховуються окремо. Відповідно до порядку та розмірності моделі задаються початкові або граничні умови. Крім того, праві частини можуть містити параметри, що характеризують специфіку конкретного об'єкта моделювання.

У результаті формалізації отримана структура математичної моделі керування енергетичними потоками в теплиці. Специфіку об'єкта моделювання визначають параметри моделі:

Вхідними параметрами керування є інформація з датчиків про зовнішні збурення:

$\Theta_{zov}$  – значення зовнішньої температури, °С;

$\varphi$  – значення вологості в теплиці, %;

$\Theta_{vn}$  – значення температури в теплиці, °С

$\Theta_{k1}$  – температура теплоносія в контурі 1 (основний обігрів), °С;

$\Theta_{k2}$  – температура теплоносія в контурі 2 (ліфтовий обігрів), °С;

$\Theta_{k3}$  – температура теплоносія в контурі 3 (підпокрівельний обігрів), °С;

$CO_2$  – рівень вуглекислоти в теплиці, ppm;

$Rad$  – значення сонячної радіації, Вт/м<sup>2</sup>;

Наступним етапом формування керуючої дії, для управління роботою обладнання - ввімкнення/вимкнення електродвигунів:

- системи опалення;
- системи охолодження (відкриття/закриття фрамуг);

- система вентилювання;
- система освітлення;
- система зашторювання;
- система туманоутворення;

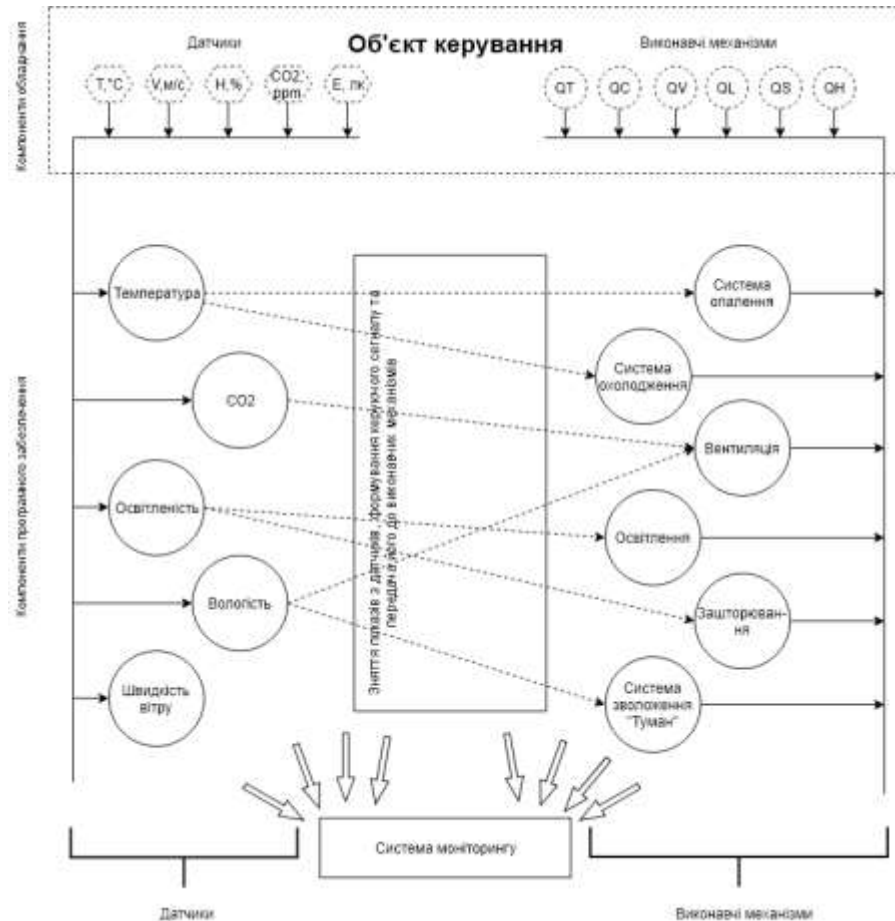


Рис. 2.11. Концептуальна модель багатозадачної системи регулювання мікроклімату в теплиці

Традиційні методи процедурного програмування та моделювання не можуть справитись зі складністю опису процесів, що проходять в тепличному цеху. Тому використання об'єктно-орієнтованого моделювання технологічного комплексу теплиці уніфікованою мовою моделювання UML (Unified Modeling Language) є актуальною задачею. Рішення завдання концептуального моделювання – визначення змістовної складової внутрішньо системних зв'язків, дозволить провести параметричний синтез відповідної системи керування.

Для опису в термінах UML процесу функціонування тепличного цеху виділені такі системи керування:

1. Система опалення.
2. Система регулювання вологості.
3. Система вентилявання.
4. Система регулювання освітленістю.

З більш ніж десяти типів модельних конструкцій UML – діаграм, що дозволяють розглядати систему під різними кутами зору, в роботі для відображення статички і динаміки системи використані основні типи діаграм: класів, яка показує статичну структуру системи та взаємодії, яка показує часову послідовність використання об'єктів; стану.

Діаграма класів (class diagram) служить для подання статичної структури моделі і не залежать від часу (рис. 2.12). Визначає типи об'єктів системи і різні статичні зв'язки та відношення між ними. На діаграмі клас зображають прямокутником, що поділений горизонтальними лініями на три секції: верхня містить ім'я класу, середня - перелік атрибутів, нижня - перелік операцій. Для того, щоб побудувати цю діаграму треба спочатку виділити у системі окремі відносно незалежні компоненти та визначити, яким чином вони взаємозв'язані.

Часовий аспект перебігу процесу може мати істотне значення при моделюванні таких процесів, що описують взаємодії об'єктів. Саме для цієї мети в мові UML використовуються діаграми послідовності.

Об'єкт є динамічним (рис. 2.13); за допомогою діаграми послідовності можна описати повний контекст взаємодій як своєрідний часовий графік "життя". Часові інтервали задаються технологічним регламентом. За допомогою цієї діаграми можливо проаналізувати часову послідовність стадій і операцій циклу та їх залежність від характеристик обладнання і регламенту технологічного процесу.

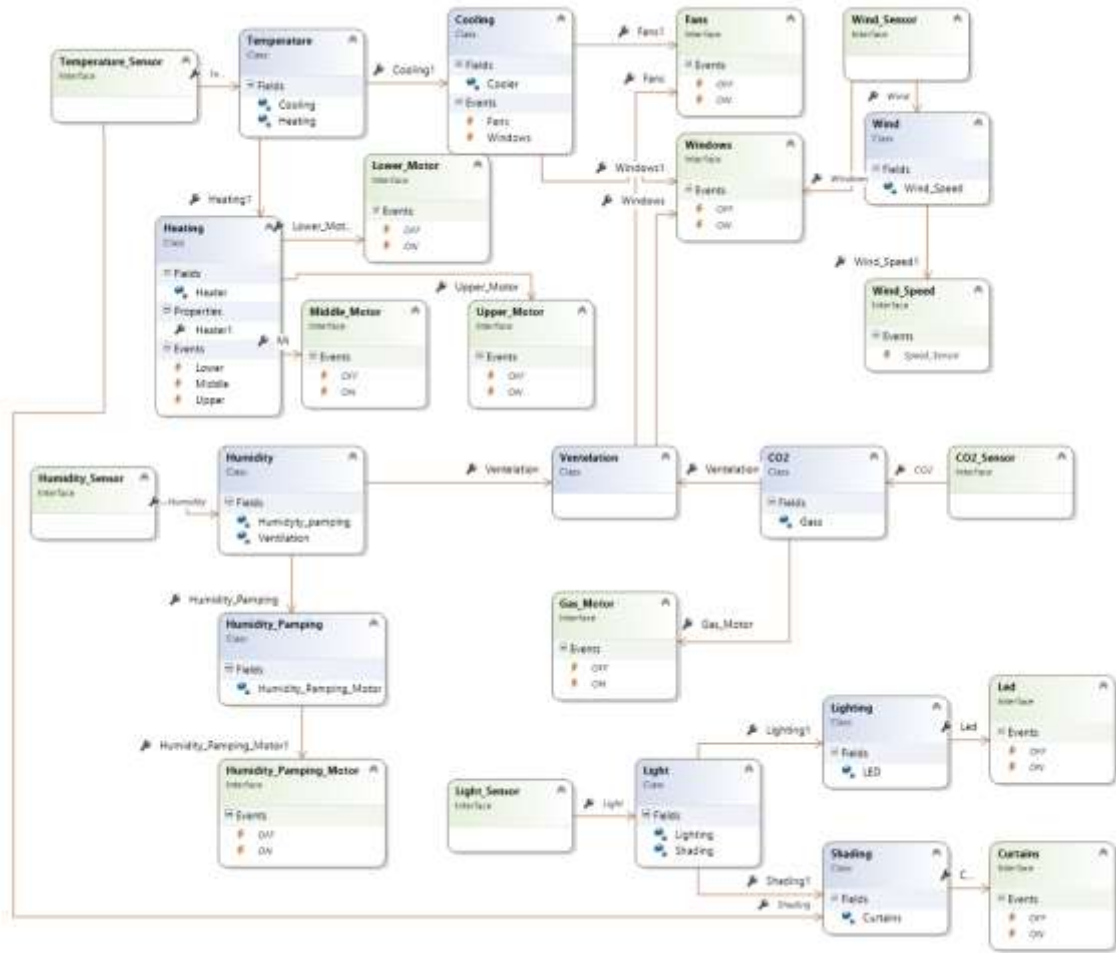


Рис. 2.12. Діаграма класів системи регулювання мікроклімату в промисловій теплиці

За допомогою вище наведених діаграми можна представити процес функціонування технологічного комплексу тепличного цеху, щоб були видні всі зв'язки між елементами, що входять до системи регулювання мікроклімату в теплиці.

На основі отриманих статичних моделей та структури системи регулювання мікроклімату в теплиці можна оцінити та обґрунтувати параметри (їх значення), які потрібно дослідити на виробничому об'єкті у контексті подальшого керування ними для зниження енергоємності виробництва.

Для розв'язку динамічних моделей, як правило, використовують відповідні чисельні методи. Особливістю цих методів є дискретизації часу, що

призводить до апроксимації моделі різницеvими рівняннями. Розв'язок моделі дозволяє отримати вихідні змінні у вигляді таблично-заданих функцій на заданому інтервалі часу.

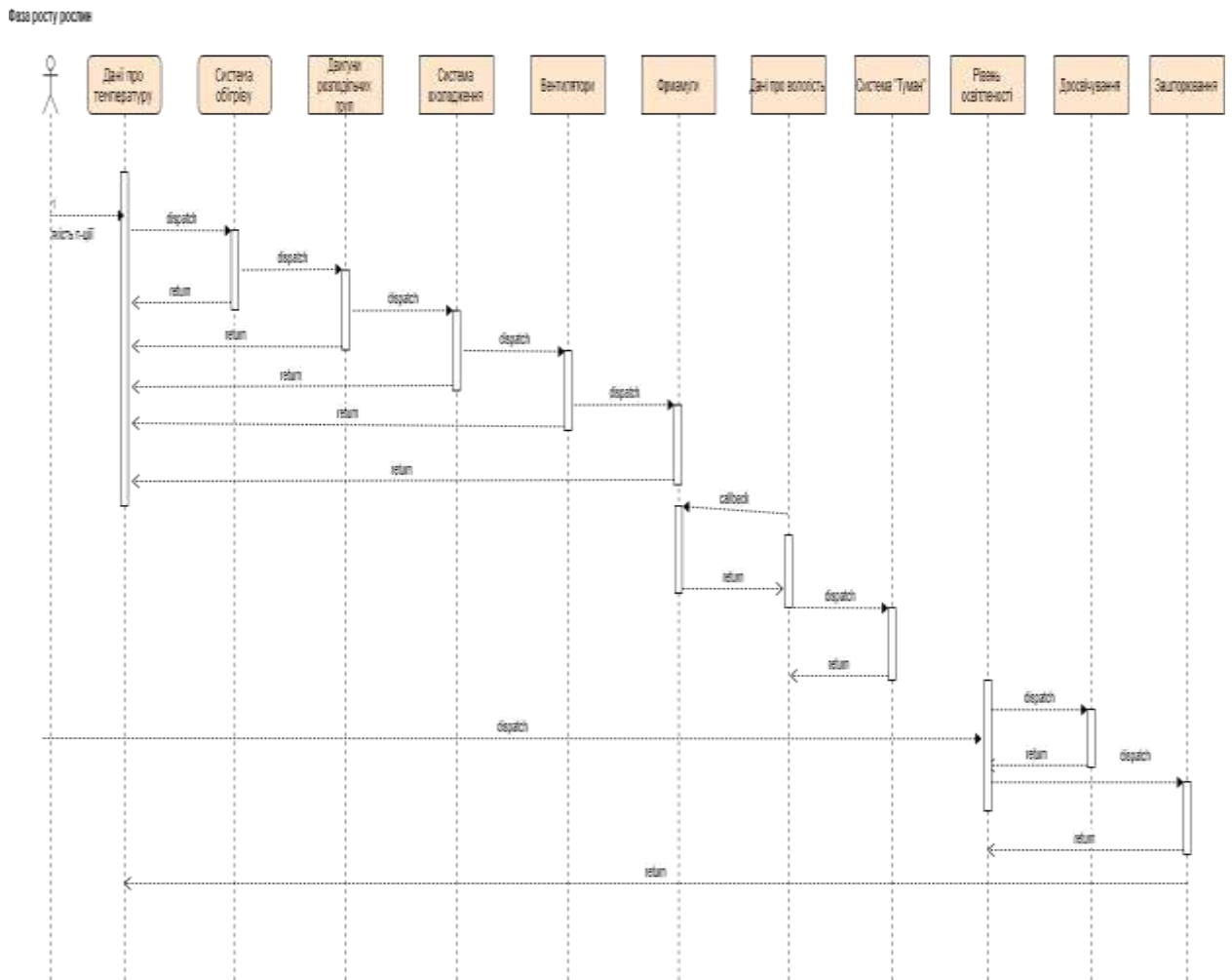


Рис. 2.13. Діаграма послідовності процесів керування мікрокліматом в промисловій теплиці

#### 2.4. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування параметрами мікроклімату в промисловій теплиці

Проектована система здійснює регулювання параметрів мікроклімату за ПІ-алгоритмом, індикацію технологічних параметрів, контури керування електродвигунами і електроклапанами.

Мікроклімат у теплиці регулюється такими каналами: температура теплоносіїв верхнього й нижнього рівнів, вологість повітря верхнього й нижнього рівнів, а також кут нахилу фрамуг на даху.

Усі сприймаючі елементи надсилають інформацію на програмований логічний контролер, який її обробляє і відсилає сигнали управління на певний РО або ВМ, якщо існують відхилення від заданих у програмі показників.

Функціональна схему САК параметрами мікроклімату в промисловій теплиці представлено на рис. 2.14.

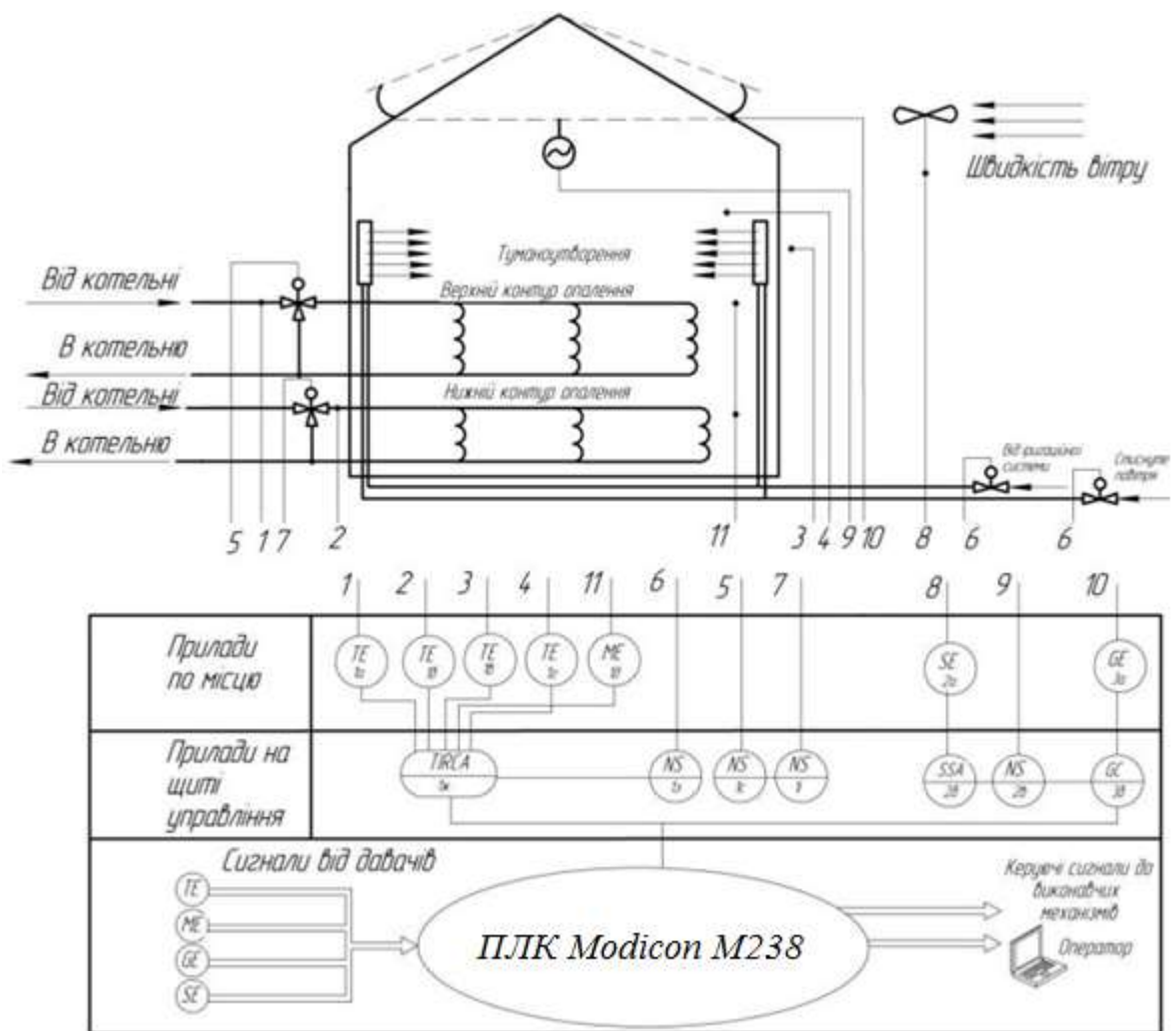


Рис. 2.14. Функціональна схема автоматизації системи керування параметрами мікроклімату в промисловій теплиці

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ТА ВОЛОГІСТЮ В ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ

### 3.1. Розробка математичної моделі керування температурою та вологістю повітря в теплиці

Теплиця являється багато параметричним об'єктом, в якому визначальним і затратним фактором є енергетична складова. Підтримання температурного режиму повітря і ґрунту в теплиці, який забезпечує оптимальні умови для вирощування плодів, є важливим фактором в технології тепличного господарства. Повітря в теплиці нагрівається за допомогою системи опалення і сонячної радіації, а охолоджується через заклені стіни і стелю, а також вентиляцією і через фрамуги. Ці ж параметри разом із поливом впливають також на вологість атмосфери і ґрунту. Вентиляція у великій мірі впливає разом із примусовою подачею вуглекислого газу в теплиці на вміст  $\text{CO}_2$ .

Всі ці фактори: температура повітря, вологість повітря і ґрунту, вміст  $\text{CO}_2$  впливають на процес фотосинтезу в рослинах, накопичення сухих речовин, перерахованих на вміст вуглецю, в стеблах і плодах рослин [1].

Поряд із обігрівом і освітленням теплиці, вентиляцією через відкриття фрамуг і за допомогою вентиляторів, на що витрачається лєвова частка енергії, велике значення мають природні фактори, як то сила і напрям вітру, сонячна радіація і температура навколишнього повітря, що слід враховувати при керуванні мікрокліматом в теплиці.

Найбільше значення для процесу росту й розвитку рослин є температурно-вологісним режим, підтримання якого в значній мірі піддається впливу зовнішніх природних збурень. Крім того, саме процесу опалення й

вентиляції, згідно проведених аналітичних досліджень, є найбільш енергозатратними. З метою отримання перехідних характеристик теплиці, як об'єкта керування, було синтезовано й вдосконалено математичну модель зміни температури й вологості внутрішнього повітря у вигляді диференціальних рівнянь. Також відомо, що ці технологічні параметри є взаємозалежними, тому маємо систему із двох диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\theta_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho C_{\text{п}} V_{\text{т}}} [Q_{\text{н}}(t) + S_{\text{п}}(t) - \lambda Q_{\text{т}}(t)] - \left( \frac{v_{\text{в}}(t)}{V_{\text{т}}} + \frac{k_{\text{т.ог.}}}{\rho C_{\text{п}} V_{\text{т}}} \right) [\theta_{\text{внутр}}(t) - \theta_{\text{зовн}}(t)], \quad (3.1)$$

$$\frac{d\varphi_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{V_{\text{з}}} Q_{\text{т}}(t) + \frac{1}{V_{\text{з}}} [E(S_{\text{н}}(t), \varphi_{\text{внутр}}(t))] - \frac{v_{\text{в}}(t)}{V_{\text{з}}} [\varphi_{\text{внутр}}(t) - \varphi_{\text{зовн}}(t)],$$

$$E[S_{\text{н}}(t), \varphi_{\text{внутр}}(t)] = \alpha \frac{S_{\text{н}}(t)}{\lambda} - \beta \varphi_{\text{внутр}}(t), \quad (3.2)$$

де  $\theta_{\text{внутр}}, \theta_{\text{зовн}}$  – температура повітря всередині та зовні теплиці відповідно, (°C);

$\varphi_{\text{внутр}}, \varphi_{\text{зовн}}$  – відносна вологість повітря всередині та зовні теплиці відповідно, (%);

$k_{\text{т.ог.}}$  – коефіцієнт тепловіддачі огороження теплиці, (Вт/К);

$V$  – повний геометричний об'єм теплиці, (м<sup>3</sup>);

$V_{\text{т}}, V_{\text{з}}$  – об'єм повітря, що обігривається та зволожується відповідно, (м<sup>3</sup>).

Зазвичай складає 60-70% від загального об'єму теплиці.

$\rho$  – густина повітря, (1,2 кг/м<sup>3</sup>);

$C_{\text{п}}$  – теплоємність повітря, (1,005 кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>),

$Q_{\text{н}}$  – потужність системи нагріву повітря теплиці, (Вт);

$Q_{\text{т}}$  – продуктивність системи туманоутворення, (Г<sub>води</sub>/с);

$S_{\text{п}}$  – поглинуте теплицею сонячне випромінювання, (Вт);

$\lambda$  – теплота пароутворення, (2256 кДж/кг);

$v_{\text{в}}$  – повітрообмін, що забезпечується системою вентиляції, (м<sup>3</sup>/с).

$E[S_{\text{н}}(t), \varphi_{\text{внутр}}(t)]$  – еватотранспірація рослин в функції від поглинутого сонячного випромінювання та вологості повітря в теплиці, (Г<sub>води</sub>/с),

$\alpha, \beta$  – масштабні коефіцієнти.

$$\frac{d\theta_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{\text{п}}} [Q_{\text{макс}} \widetilde{Q}_{\text{н}}(t) + S_{\text{п}}(t) - \lambda' \widetilde{Q}_{\text{т}}(t)] - \left( \frac{\widetilde{v}_{\text{в}}(t)}{T_{\text{в}}} + \frac{k_{\text{т.ог.}}}{C_{\text{п}}} \right) [\theta_{\text{внутр}}(t) - \theta_{\text{зовн}}(t)],$$

$$\frac{d\varphi_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{V'} \widetilde{Q}_{\text{т}}(t) + \alpha' S_{\text{н}}(t) - \frac{\widetilde{v}_{\text{в}}(t)}{T_{\text{в}}} [\varphi_{\text{внутр}}(t) - \varphi_{\text{зовн}}(t)],$$

де  $\widetilde{Q}_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{макс}}}$ ,  $\widetilde{Q}_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{т}}}{Q_{\text{макс}}}$ ,  $\widetilde{v}_{\text{в}} = \frac{v_{\text{в}}}{v_{\text{макс}}}$  – нормалізуючі керуючі змінні;

$\lambda' = \lambda Q_{\text{т}}^{\text{макс}}$ ,  $V' = \frac{V_{\text{т}}}{Q_{\text{т}}^{\text{макс}}}$ ,  $\alpha' = \frac{\alpha}{V_3 \lambda}$  – нормалізуючі коефіцієнти;

$T_{\text{в}} = \frac{V_3}{v_3^{\text{макс}}}$  – час, необхідний для повної заміни повітря в зволоженій

частині теплиці.

Для подальших розрахунків скористаємося даними таблиць 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1.

#### Координати стану об'єкта

Найменування	Значення початкові
$T_{\text{внутр}}$	15 °С
$\varphi_{\text{внутр}}$	50 %

Таблиця 3.2.

#### Вхідні змінні

Найменування	Значення
$T_{\text{зовн}}(t)$	°С
$\varphi_{\text{зовн}}(t)$	%
$Q_{\text{н}}(t)$	Вт
$Q_{\text{м}}(t)$	$\Gamma_{\text{води}}/\text{с}$
$S_{\text{н}}(t)$	Вт
$v_{\text{в}}(t)$	$\text{м}^3/\text{с}$
$E(S_{\text{н}}(t), \varphi_{\text{внутр}}(t))$	$E(S_{\text{н}}(t), \varphi_{\text{внутр}}(t)) = \alpha \frac{S_{\text{н}}(t)}{\lambda} - \beta \varphi_{\text{внутр}}(t)$

## Константи

Найменування	Значення
$k_{m\ oзp}$	29,81 Вт/°С
$V$	4000 м <sup>3</sup>
$V_m$	0,6* $V$ =2400 м <sup>3</sup>
$V_в$	0,6* $V$ =2400 м <sup>3</sup>
$\rho$	1,2 кг/м <sup>3</sup>
$C_в$	1,005 кДж/(кг·К)
$\lambda$	2256 кДж/кг
$\alpha$	$\alpha' = \frac{\alpha}{V_в \lambda} = \Gamma / (\text{м}^3 \cdot \text{хв} \cdot \text{Вт}) \rightarrow \alpha = 0.0033 / (2400 * 2256)$ $= 1/60 \text{ (год./год.)}$
$\beta$	1

Для дослідження математичної моделі технологічного процесу регулювання температури та вологості в теплиці використовуємо програмний додаток Simulink MathLab. Для отримання перехідних характеристик регулювання в якості керуючих дій задаємо значення потужності системи нагріву повітря теплиці  $Q_H$ , (Вт) та продуктивність системи туманоутворення  $Q_T$ , (Г<sub>води</sub>/с) значення яких отримані на попередніх етапах дослідження. у якості збруюючих впливів виступають: зовнішня температура повітря ( $\theta_{зovн}$ ), зовнішня вологість повітря ( $\varphi_{зovн}$ ), сонячне випромінювання ( $S_H$ ).

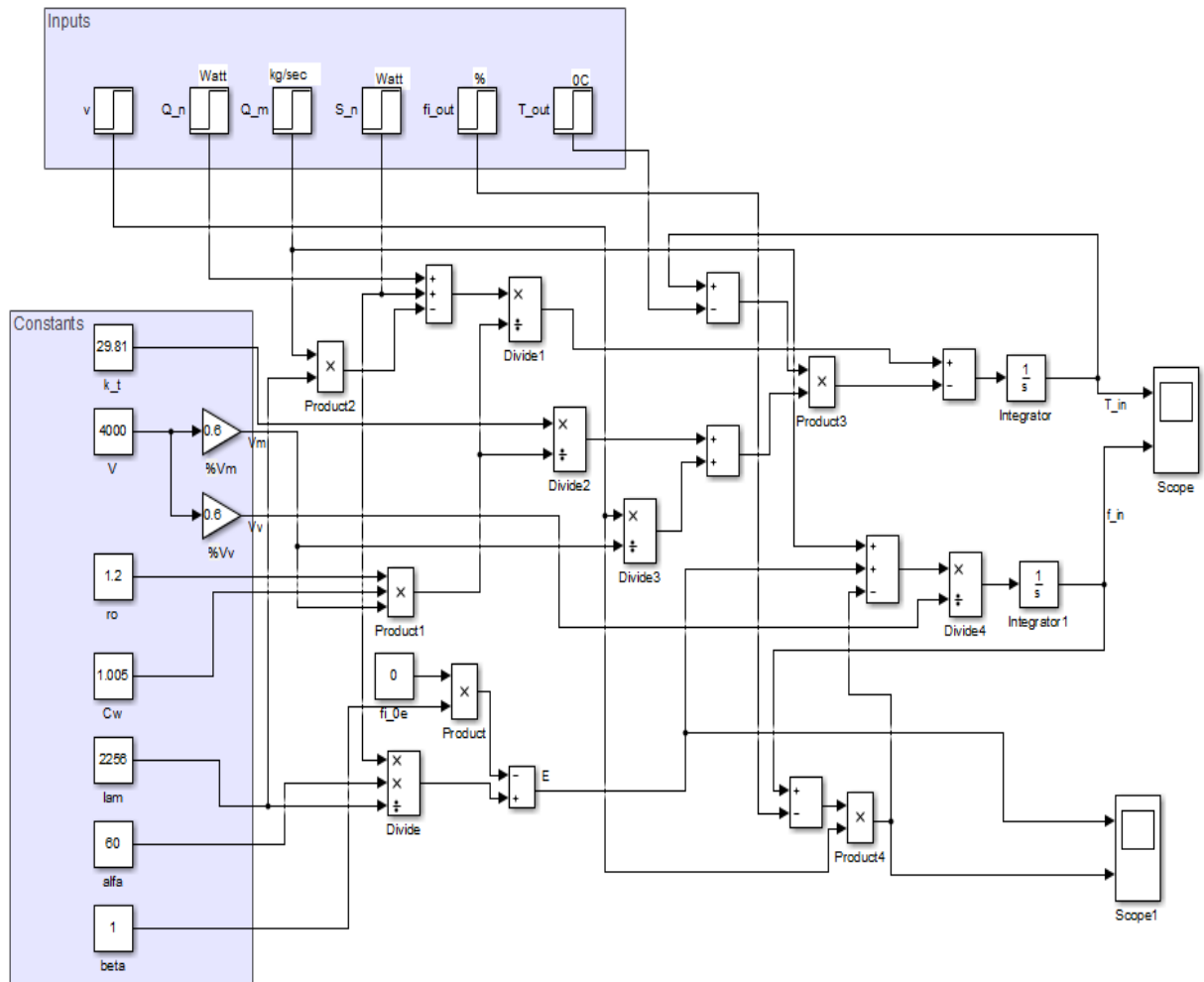


Рис. 3.1. Структура імітаційної моделі регулювання параметрів мікроклімату (температури та вологості) в теплиці

В результаті аналізу розгінних кривих (рис 3.2), можемо зробити наступні висновки:

- процес підтримання заданої вологості повітря є більш інерційним, тобто швидкодія системи вентилявання менше, що потребує врахування додаткових досліджень;
- процес опалення тепличного комплексу в значній мірі залежить від зовнішніх природних збурень, що можуть бути врахованими після застосування методики нейромережевого прогнозування.

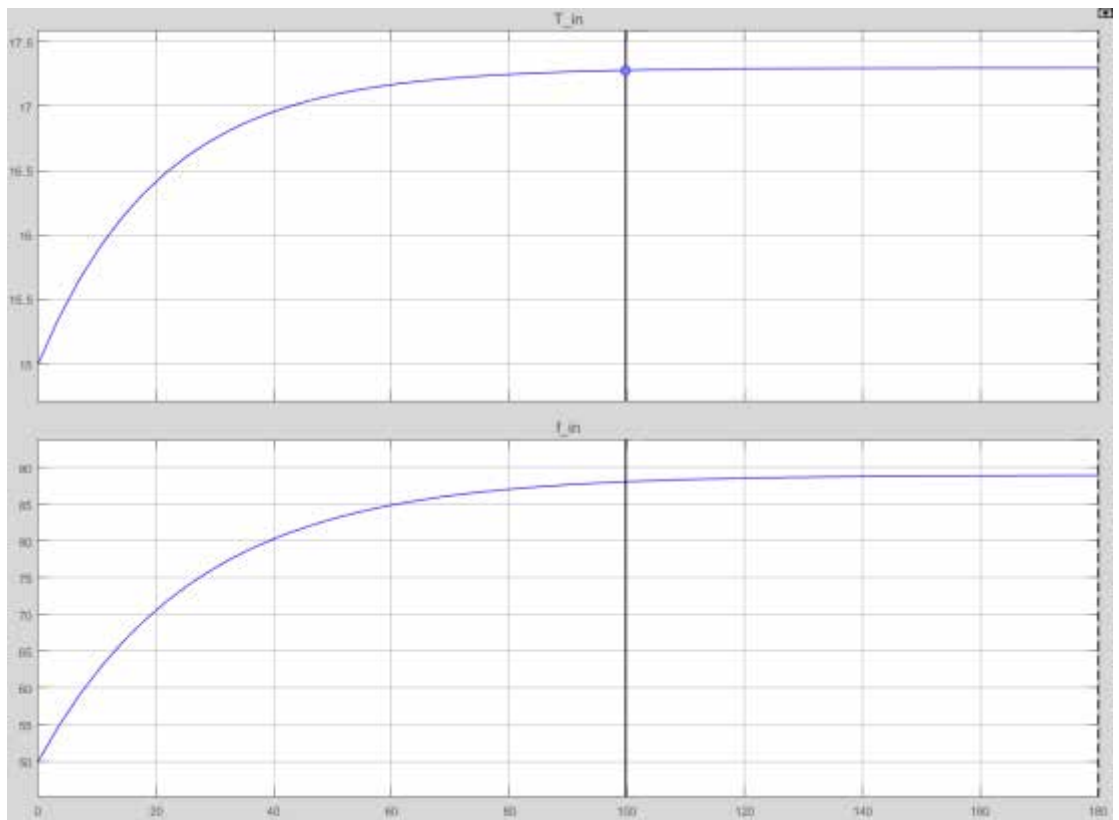
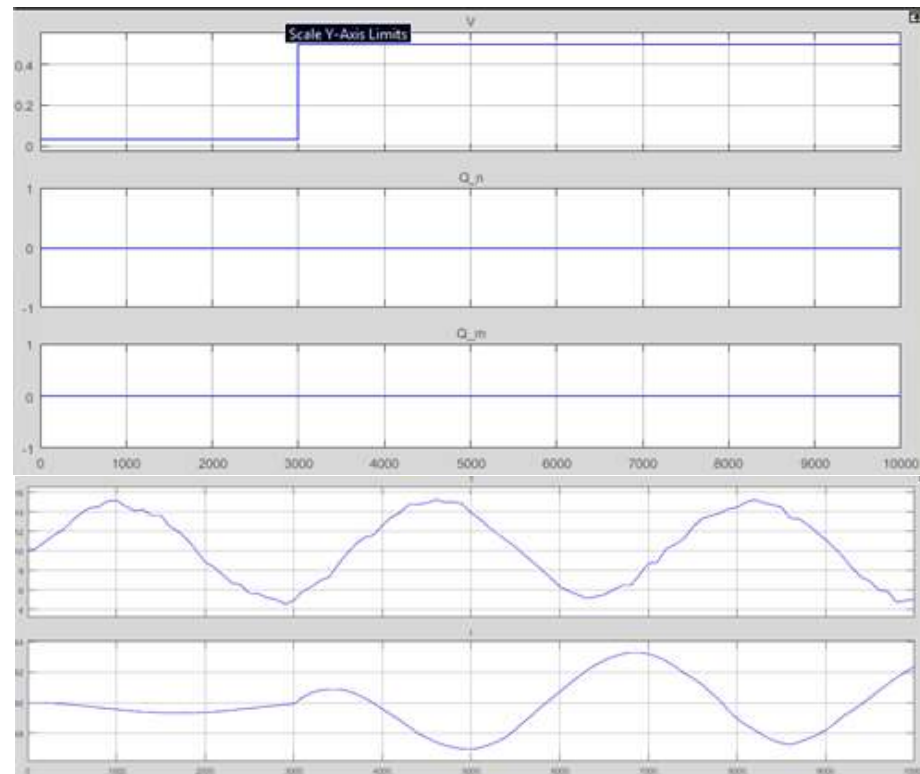


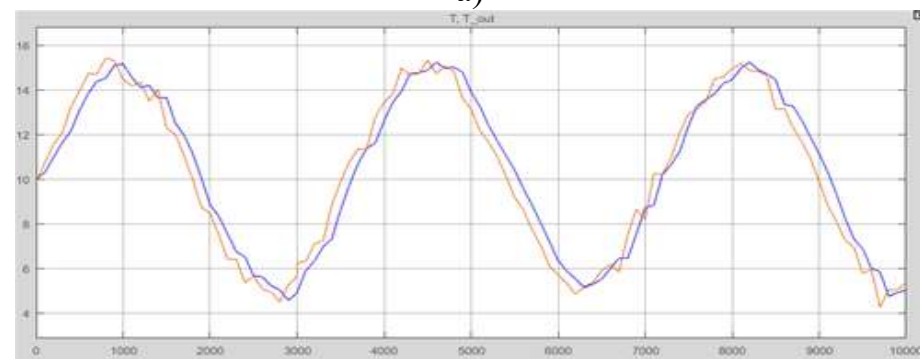
Рис. 3.2. Розгінні криві зміни температури й вологості повітря

### 3.2. Дослідження впливу параметрів мікроклімату на інерційність об'єкта

**Повітрообмін.** Повітрообмін в теплиці, як видно з математичної моделі прямопропорційно впливає на інерційність об'єкта (рис. 3.3).



а)



б)

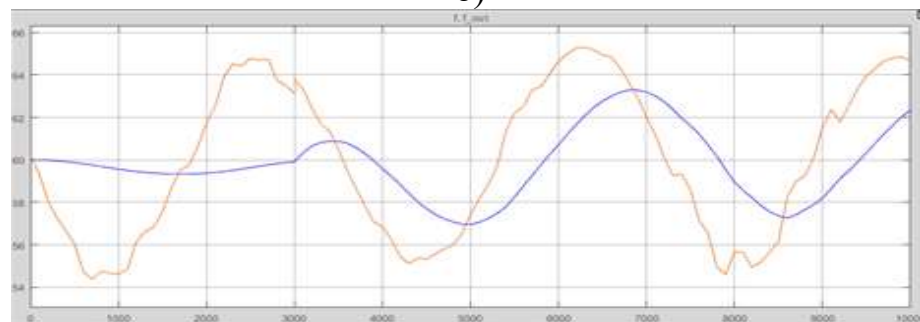
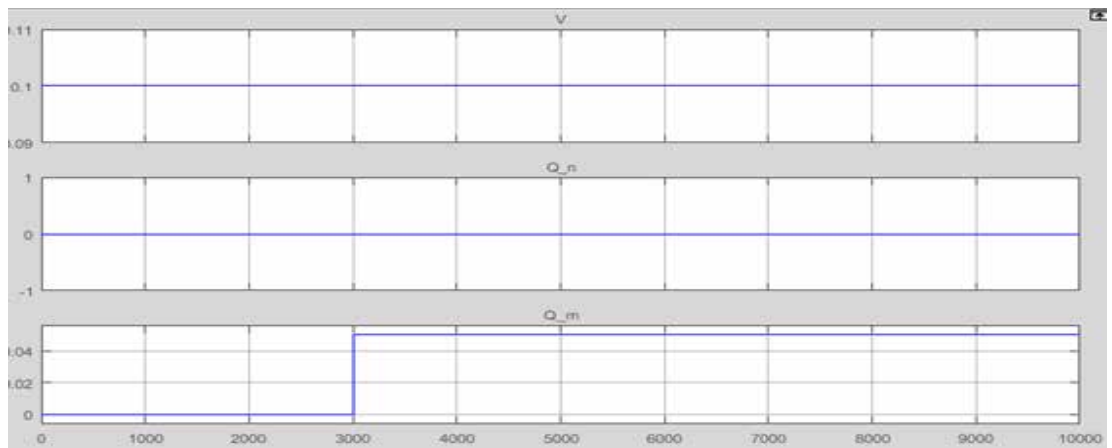
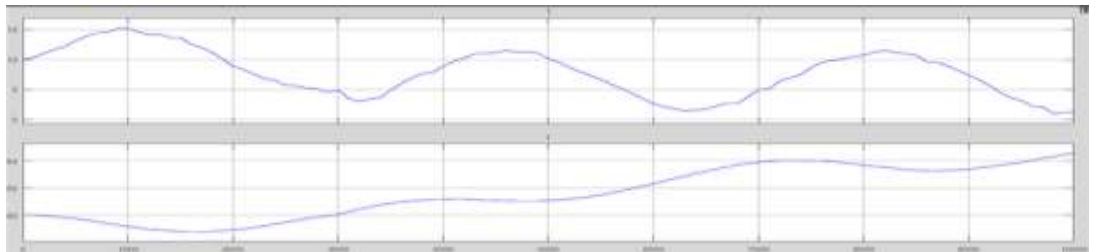


Рис. 3.3. Зміна повітрообміну у теплиці без впливу збурень (а) та із врахуванням дії збурень (б)

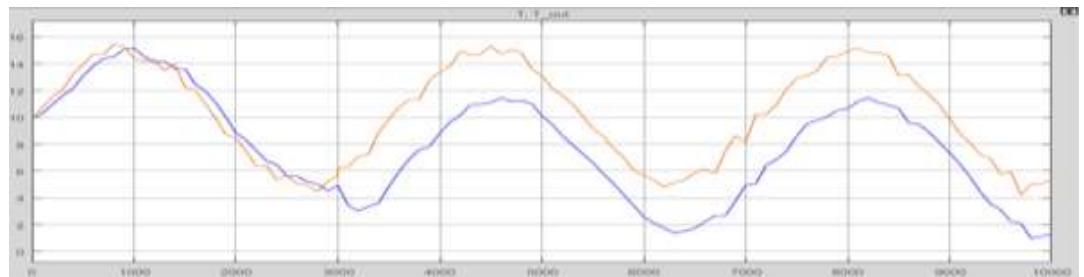
**Продуктивність системи туманоутворення.** Продуктивність системи туманоутворення прямо пропорційно впливає на вологість та обернено пропорційно на температуру (рис. 3.4).



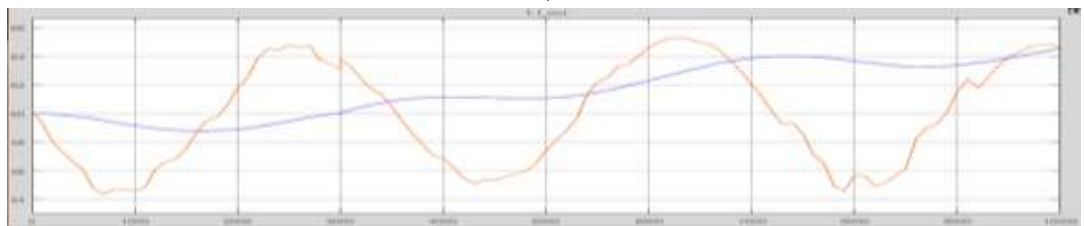
а)



б)



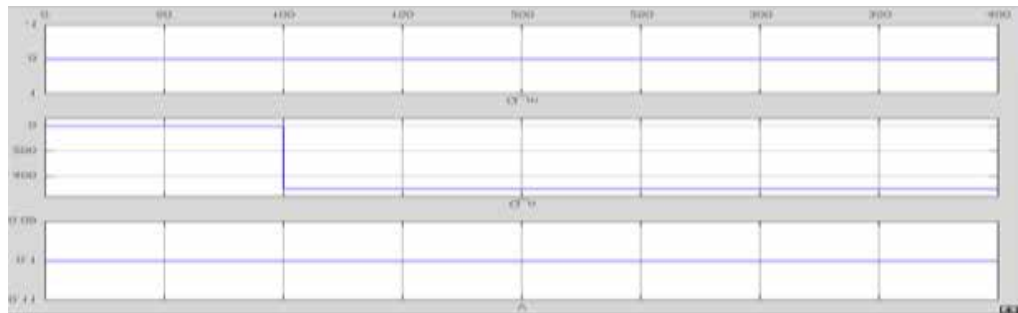
в)



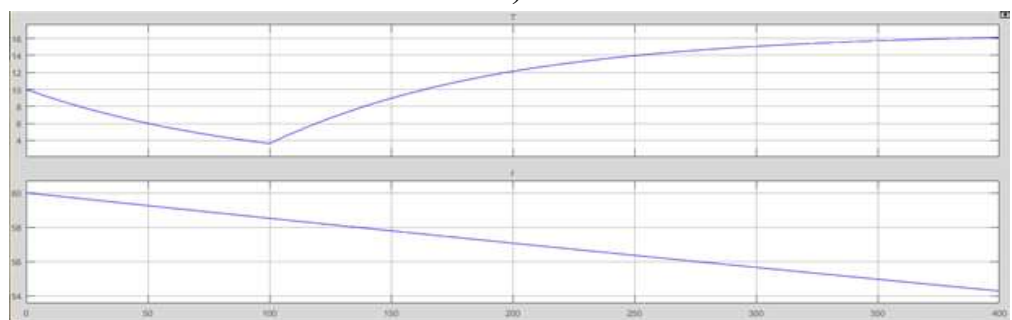
г)

Рис. 3.4. Зміна режимів роботи системи туманоутворення: а, б, в, г -  
режими роботи системи туманоутворення

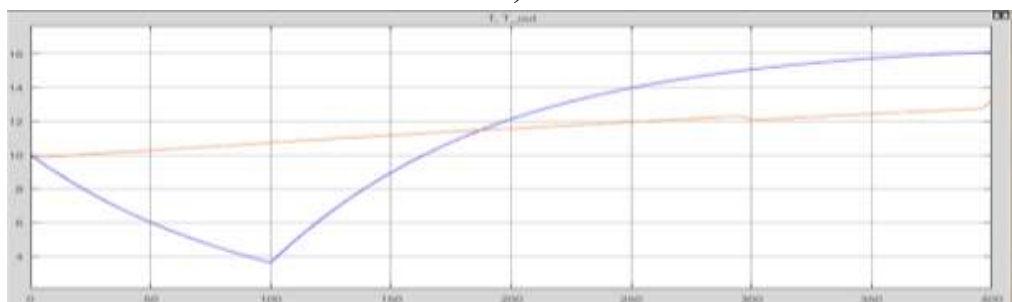
**Потужність обігрівачів повітря теплиці.** Одна з основних змінних, що впливає на температуру та вологість в теплиці прямопропорційно до температури та обернено пропорційно до вологості (рис. 3.5).



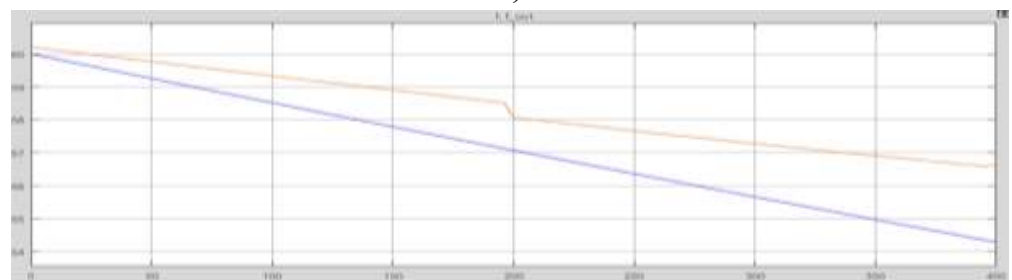
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.5. Зміна вологості повітря залежно від режиму роботи системи опалення: а, б в, г – зміни режимів роботи системи опалення

Для оцінки достовірності моделювання використовуємо методи кореляційно-регресійного аналізу:

*Коефіцієнт детермінації* свідчить про щільність взаємодії між факторами та результуючою змінною і визначається:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{SST}, \quad (3.3)$$

де  $RSS = \sum_{i=1}^n (y - \hat{y}_i)^2$ ;  $SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$ ;  $y_i$  – дані вимірювань;  $\hat{y}_i$  – дані отримані в результаті прогнозування за допомогою моделі;  $\bar{y}_i$  – усереднене значення даних.

*Скорегований коефіцієнт детермінації:*

$$R_k^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n}{n - s} \quad (3.4)$$

*Критерій «передбачення» квадратичної похибки :*

$$PSE(s) = \frac{1}{n} RSS + \frac{2}{n} \hat{\sigma}^2 \quad (3.5)$$

*Статистика Фішера* вказує на силу взаємозв'язку між залежною змінною та незалежними:

$$F(S) = \frac{n}{n - s} \frac{RSS}{\|y - \hat{y}\|^2} \quad (3.6)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії використовуємо *критерій Стьюдента*:

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}}, \quad (3.7)$$

де  $M_1, M_2$  – середнє арифметичне;  $\sigma_1, \sigma_2$  – стандартне відхилення;  $N_1, N_2$  – розмір вибірок.

Для проведення кореляційно-регресійного аналізу адекватності моделювання, виконано порівняння реальних значень температури та вологості в теплиці із змодельованими параметрами.

Для розробки та аналізу впровадження системи керування енергоефективністю тепличного господарства експериментальні дані отримано на базі тепличного господарства ПРАТ "Комбінат «Тепличний» смт. Калинівка, Броварського р-ну, Київської обл. Дослідження енергоємності об'єкта автоматизації, а саме витрат електроенергії та природного газу в залежності від умов навколишнього середовища проведено на прикладі цеху № 2 [18].

Таблиця 3.4.

## Вибірка даних

Реальні параметри						Змодельовані параметри	
$T_{\text{зовн}}$ , °C	$\Phi_{\text{зовн}}$ , %	$S_{\text{п}}$ , Вт /м2	$\Phi_{\text{внутр}}$ , %	$T_{\text{внутр}}$ , °C	$Q_{\text{н}}$ , Вт	$T_{\text{внутр}}$ , °C	$\Phi_{\text{внутр}}$ , %
-5,5	62,16	600	51,80	17,09	1800	17,95	51,98
-6,5	75,36	421	62,8	16,46	2320	16,47	62,93
-4	70,92	19,8	59,1	18,82	2520	18,42	59,11
-14	65,04	168	54,2	19,81	4500	19,49	54,25
2,04	91,39	0	89,6	17,27	2150	17,31	89,43
5,43	88,23	437	86,5	20,55	2050	20,38	86,32
12,3	79,08	464	65,9	19,29	1200	19,17	66,11
12,5	90,67	187	88,9	20,29	2300	20,12	88,43
12	88,02	243	86,3	20,67	2400	20,27	86,12
14,7	85,27	0	83,6	17,55	880	18,02	83,6

Було здійснено оцінку розробленої моделі на основі критеріїв: детермінації  $R^2$ , кореляції  $R$ , середньоквадратичної похибки  $PSE(s)$ , Фішера  $F(s)$  та Стюдента  $t$  (табл. 2.11).

Таблиця 3.5.

## Критерії адекватності математичної моделі

Вибірка	Критерії				
	$R$	$R^2$	$PSE(s)$	$F(s)$	$t$
$T_{\text{внутр}}$ , °C	0,997	0,9665	0,464	1,94	0,734
$\Phi_{\text{внутр}}$ , %	0,999	0,9208	0,138	6,93	0,01

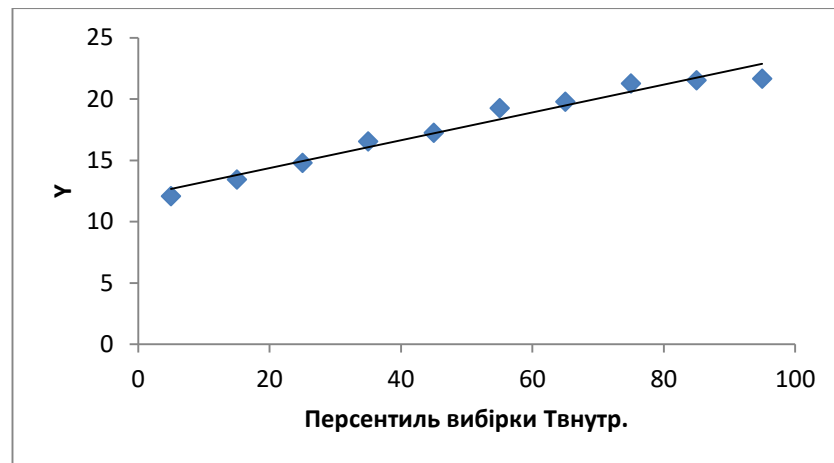


Рис. 3.6. Графік нормального розподілу вибірки зміни температури в телиці

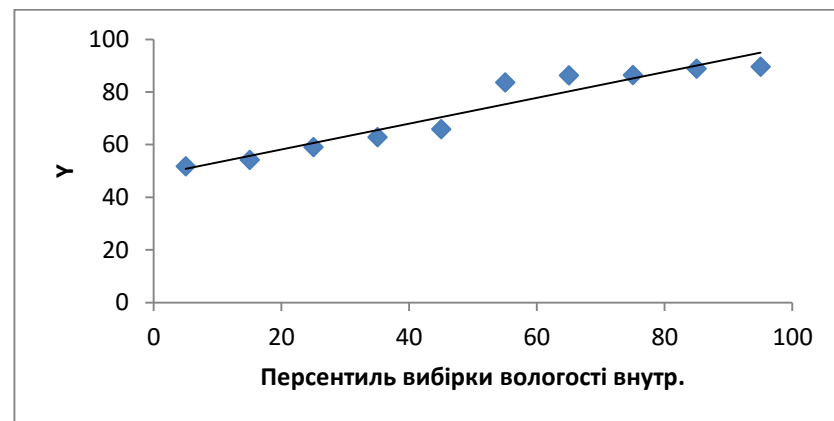


Рис. 3.7. Графік нормального розподілу вибірки зміни вологості в телиці

Виходячи із попередніх результатів, для оцінки температурних режимів роботи тепличного цеху та котельні використовуються вдосконалені динамічні математичні моделі. Проте для дослідження впливу зовнішніх факторів, якості продукції на енергетичні потоки при вирощуванні овочевої продукції необхідно розробити математичний апарат нейронних мереж здатний працювати в умовах невизначеності, нелінійності та неповноти інформації.

### 3.3. Аналіз роботи математичної моделі з ПІ регулятором в Simulink MatLab

Для аналізу роботи системи керування температурно-вологісним режимом в теплиці з ПІ-регулятором використовуємо попередню математичну модель (рис. 3.1).

В якості вхідних величин пр. моделюванні виступають задані значення температури та в теплиці:  $T_{in\_zad}$  та  $f_{in\_zad}$ . На виході системи отримуємо змодельовані значення температури та вологості в теплиці:  $T_{in}$ ,  $f_{in}$ . Регулювання відбувається згідно пропорційно-інтегрального алгоритму регулювання (ПІ).

Криві розгону (рис. 3.2), отримані за допомогою імітаційного моделювання, дозволяють визначити параметри налаштувань ПІ-алгоритму регулювання, виходчи із значень коефіцієнтів передачі об'єкта, часу регулювання та запізнення ( $K_{об}$ ,  $T_{об}$ ,  $\tau_{zn}$ ).

Розрахунок оптимальних налаштувань ПІ – регулятора проводиться за формулами:

$$k_{p.ПІ} = \frac{0,6}{k_{об} \cdot \tau_{об} / T_{об}}, \quad (3.8)$$

$$T_{із} = 0,6 \cdot T_{об}. \quad (3.9)$$

Підставляючи отримані аналітичним методом значення налаштувань ПІ-регулятора, отримуємо розгінні характеристики по каналах регулювання температури та вологості при зміні зовнішніх збурень для отримання усталених значень регульованих параметрів.

Структурна схема імітаційної моделі наведена на рис. 3.8. Розгінні характеристики та значення параметрів ПІ-регулятора представлені в таблиці 3.6 та 3.7 по каналу регулювання температури і вологості відповідно.

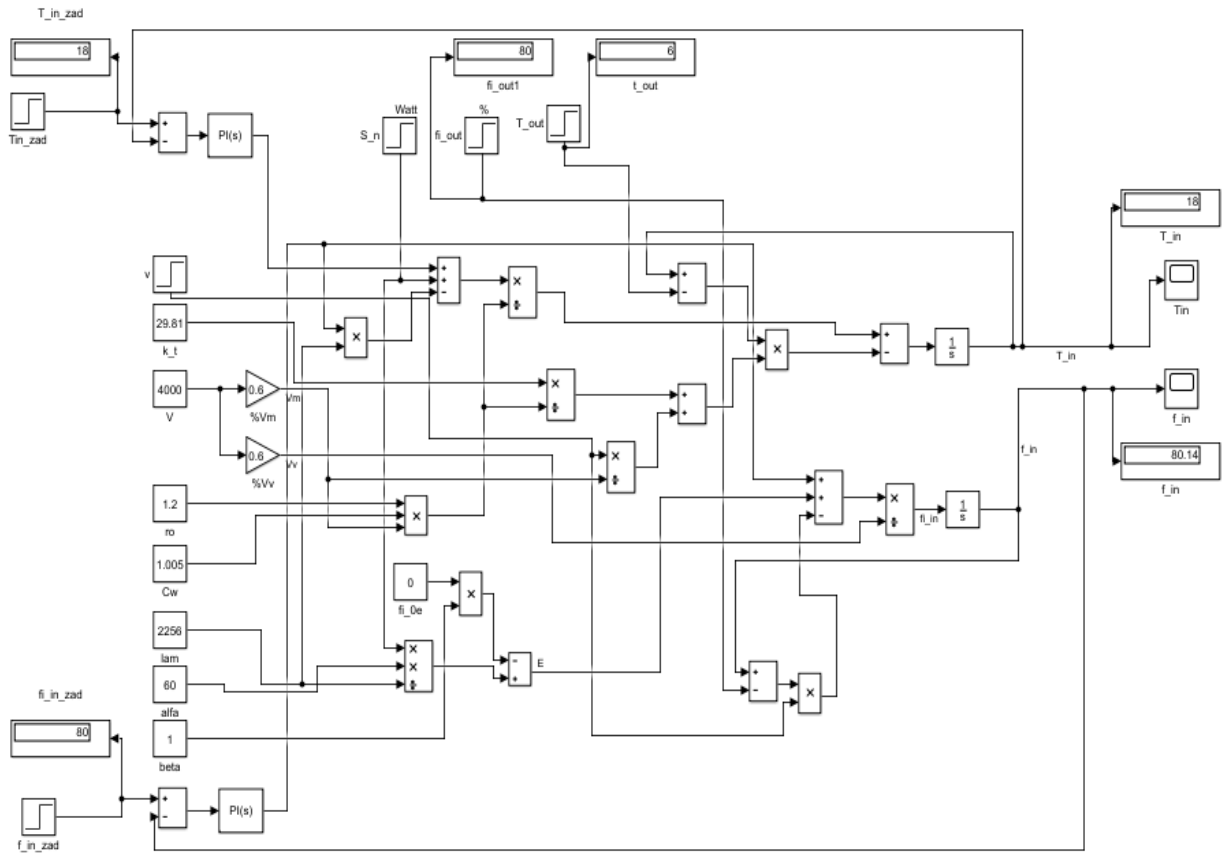


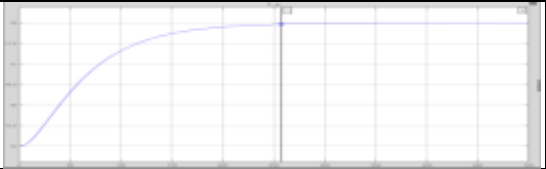
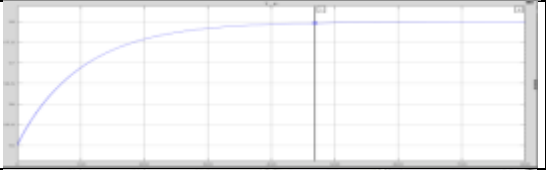
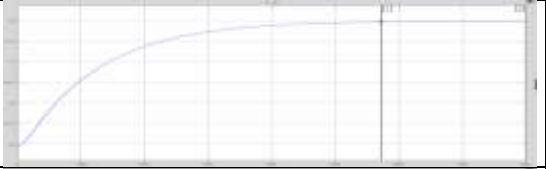
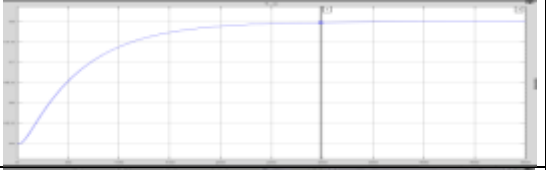
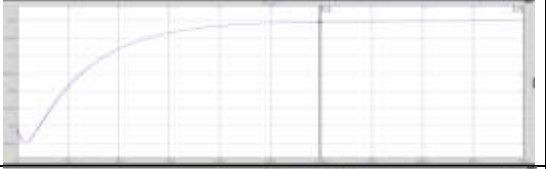
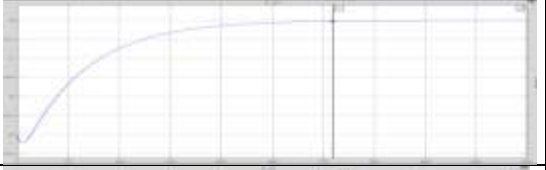
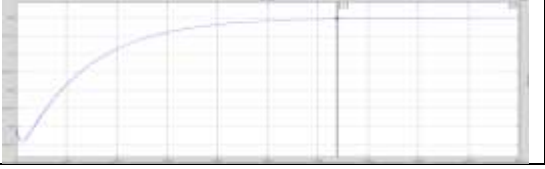
Рис. 3.8. Структура математичної моделі з використанням ПІ-регулятора

Таблиця 3.6.

Порівняння параметрів регулювання по каналу зміни температури



	T_in_zad	T_out	T_in	Kt	Ki	Treg	
1	18	16	18	60	3	350	
2	18	15	18	53	6	220	
3	18	13	18	50	3	125	


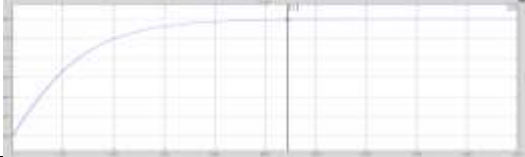


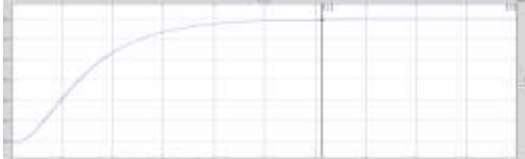

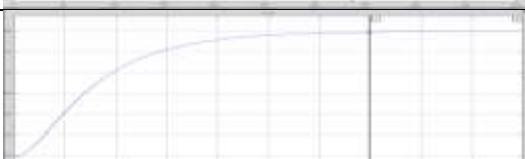
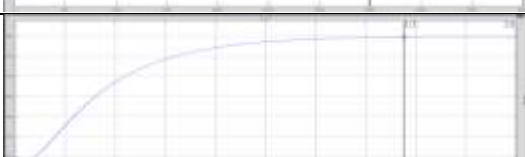
Продовження таблиці 3.6.

4	18	10	18	75	3	258	
5	18	8	18	120	3	440	
6	18	6	18	145	3	573	
7	18	3	18	280	8	300	
8	18	0	18	290	8	300	
9	18	-2	18	320	10	310	
10	18	-8	18	400	12	320	

Таблиця 3.7.

Порівняння параметрів регулювання по каналу зміни вологості

	$f_{in\_zad}$	$f_{out}$	$f_{in}$	$K_t$	$K_i$	$T_{reg}$	
1	80	60	80	45	1,5	255	
2	80	55	80	50	1,5	300	

3	80	45	80	60	2	260	
4	80	40	80	60	2	272	
5	80	35	80	60	2	295	
6	80	30	80	65	2	300	
7	80	25	80	60	2	306	
8	80	20	80	62	1,8	336	
9	80	15	80	80	2	350	
10	80	10	80	90	2	388	

Як видно з кривих розгону, для підтримання праматерів регулювання на заданому рівні, параметри ПІІ-регулятора носять змінний характер. Тому постає задача розробки методів пошуку таких налаштувань регулятора, які здатні забезпечити функціонування системи керування за заданому технологіями рівні.

## РОЗДІЛ 4

### ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ У ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

#### 4.1. Теоретичні передумови використання нейронних мереж для моделювання процесів у виробництві

Типово можна виділити наступні типи завдань з використанням штучних нейронних мереж для вирішення задач керування електротехнологічними комплексами, в тому числі і стосовно тепличних господарств:

1. Класифікація. Нейромережевий підхід особливо ефективний в задачах експертного оцінювання з тієї причини, що поєднує здатність комп'ютера до обробки чисел і здатність мозку до узагальнення і розпізнавання.

2. Пошук залежностей. Нейронна мережа дозволяє на основі навчальної вибірки побудувати залежність одного параметра від інших у вигляді складної функції.

3. Кластеризація – це розбиття різнорідного набору прикладів на кілька областей (кластерів), за певними загальними ознаками, причому число кластерів заздалегідь невідомо. Кластеризація дозволяє уявити неоднорідні дані в більш наочному вигляді і використовувати далі для дослідження кожного кластера різними методами.

4. Прогнозування. Нейронні мережі широко використовуються для прогнозування різних факторів, показників.

У контексті оцінки виробничих процесів у вирощуванні овочів в спорудах закритого ґрунту нас цікавить перш за все пошук залежностей, оскільки експериментальні та кореляційні продемонстрували складність (неможливість) класичної оцінки.

Отже, штучний нейрон має групу синапсів – однонаправлених вхідних зв'язків, з'єднаних з виходами інших нейронів, а також аксон – вихідний канал, через який сигнал (збудження або гальмування) надходить на синапси наступних нейронів. Кожний вхід множиться на відповідний ваговий коефіцієнт (вагу), аналогічній синаптичній силі, і всі добутки додаються, визначаючи рівень активації.

Поняття нечіткого виводу займає центральне місце в нечіткій логіці і в теорії нечіткого управління. Система нечіткого виводу – це процес отримання нечітких висновків про необхідному управлінні об'єктом на основі нечітких умов і передумов, що представляють собою інформацію про поточний стан об'єкта.

Цей процес поєднує в собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, методи нечіткої імплікації і т. п. Розробка і застосування систем нечіткого виводу включає в себе ряд етапів (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Діаграма процесу нечіткого виведення в нечітких САК

База правил систем нечіткого виведення призначена для формального представлення емпіричних знань експертів в тій або іншій предметній області у формі нечітких продукційних правил. Таким чином, база нечітких

продукційних правил системи нечіткого виводу – це система нечітких продукційних правил, що відображає знання експертів про методи управління об'єктом в різних ситуаціях, характер його функціонування в різних умовах тощо, тобто містить формалізовані людські знання.

#### 4.2. Використання нейронечіткої експертної системи щодо формування енергоощадних алгоритмів керування об'єктом

База нечітких правил такої системи відображає знання експертів про правила керування об'єктом у різних ситуаціях, характер його функціонування в різних умовах тощо, тобто містить формалізовані людські знання.

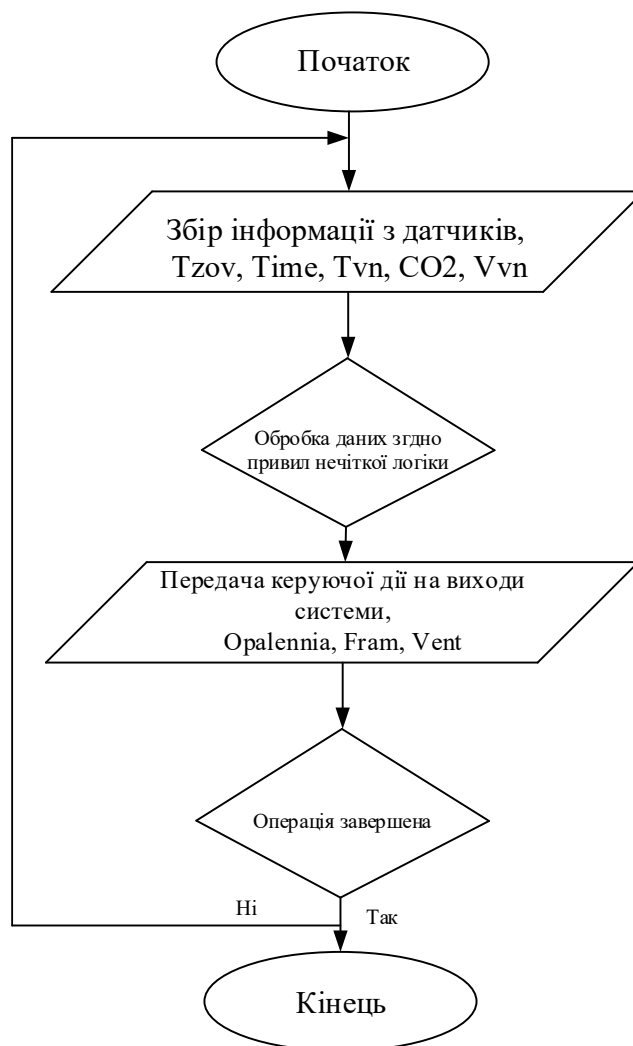


Рис. 4.2. Алгоритмічна схема система прийняття рішень

Для вирішення задачі зниження енерговитрат у спорудах закритого ґрунту розроблено систему нечіткого вводу для регулювання параметрів мікроклімату з урахуванням фіто температурного показника.

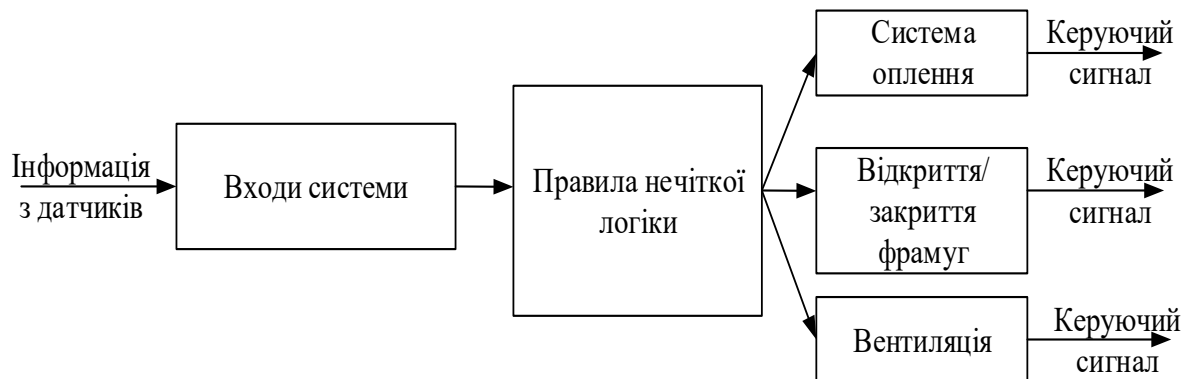


Рис. 4.3. Структурна схема системи прийняття рішень

Нечітким логічним висновком називається отримання висновку у вигляді нечіткої множини, відповідного поточним значенням входів, з використанням нечіткої бази знань і нечітких операцій.

У загальному випадку механізм логічного висновку включає чотири етапи: введення нечіткості, нечіткий висновок, композиція і приведення, до чіткості, або дефазифікації.

Фазифікатор перетворює безліч входних даних в нечітку множину, з допомогою функції приналежності, а дефазифікатор вирішує зворотну задачу - формує однозначне рішення щодо входньої змінної на підставі багатьох нечітких висновків, що виробляються виконавчим модулем нечіткої системи.

Алгоритми нечіткого виведення відрізняються головним чином видом використовуваних правил, логічних операцій і різновидом методу дефазифікації. Існують моделі нечіткого висновку Мамдані, Сугено, Ларсена, Цукамото. Найбільшого поширення набули саме моделі Мамдані та Сугено.

Модуль fuzzy дозволяє будувати нечіткі системи двох типів - Мамдані та Сугено. У системах типу Мамдані база знань складається з правил виду "Якщо  $x_1$  = низький і  $x_2$  = середній, то  $y$  = високий". У системах типу Сугено база знань складається з правил виду "Якщо  $x_1$  = низький і  $x_2$  = середній, то  $y$

$= a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$ ". Таким чином, основна відмінність між системами Мамдані та Сугено полягає в різних способах завдання значень вихідних змінних в правилах, що утворюють базу знань. в системах типу Мамдані значення вихідної змінної задаються нечіткими термами, в системах типу Сугено - як лінійна комбінація вхідних змінних.

У випадку розробки системи керування мікрокліматом з урахуванням правил нечіткої логіки вхідні та вихідні дані є комбінаціями лінійних змін, тому експертну систему розробляємо згідно моделі типу Сугено.

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням правил нечіткої логіки включає регулювання вологості повітря в теплиці шляхом поливу і подачі в теплицю повітря через зволожуючий пристрій і автоматичне регулювання температури повітря, і ґрунту шляхом інтелектуального регулювання подачі в теплицю нагрітого повітря шляхом прокачування по підґрунтових трубах води, згідно з корисною моделлю в алгоритм визначення керуючої дії введені правила нечіткої логіки, що визначають керуючу дію, де згідно правил нечіткої логіки враховано інтервал часу  $T$ , вхідні (зовнішня температура  $T_3$ , температура всередині теплиці  $T_n$ , рівень вуглекислоти в атмосфері теплиці  $C$ , вологість повітря  $B_n$ ), вихідні (стан двигунів системи опалення  $O$ , стан двигунів приводу фрамуг  $\Phi$ , стан двигунів вентиляції  $B$ ) значення, інтервал  $i$ , проводиться виведення керуючої дії:

$$T = T_i \ \& \ T_3 = T_{3i} \ \& \ T_n = T_{ni} \ \& \ C = C_i \ \& \ B_n = B_{ni} \ \text{then} \ O = X, \ \Phi = X, \ B = X,$$

де  $23.00 \text{ год.} < T_1 < 6.00 \text{ год.}$ ,  $6.00 \text{ год.} < T_2 < 8.00 \text{ год.}$ ,  $8.00 \text{ год} < T_3 < 10.00 \text{ год}$ ,  $10.00 \text{ год} < T_4 < 18.00 \text{ год}$ ,  $18.00 \text{ год} < T_5 < 22.00 \text{ год}$ ,  $22.00 \text{ год} < T_6 < 23.00 \text{ год}$ ;

$$-50 \text{ }^\circ\text{C} < T_{31} < -10 \text{ }^\circ\text{C}, \ -10 \text{ }^\circ\text{C} < T_{32} < +25 \text{ }^\circ\text{C}, \ +25 \text{ }^\circ\text{C} < T_{33} < +55 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$10 \text{ }^\circ\text{C} < T_{n1} < 18 \text{ }^\circ\text{C}, \ 18 \text{ }^\circ\text{C} < T_{n2} < 24 \text{ }^\circ\text{C}, \ 24 \text{ }^\circ\text{C} < T_{n3} < 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$100 < C_1 < 400, \ 400 < C_2 < 700, \ 800 < C_3 < 1200;$$

$X$  – ВКЛЮЧЕНО або ВИМКНЕНО

Таким чином, за умов, що входні параметри відповідають заданим інтервалам, виконується умова ввімкнення системи опалення, вентилявання чи провітрювання, що сприяє суттєвому зменшенню енерговитрат.

Система регулювання мікроклімату закритої споруди штучного клімату (рис.6) оснащується групою датчиків вимірювання температури рослини 1, датчиків вимірювання температури повітря теплиці 2 та зовнішнього повітря 3, аналогово-цифрового перетворювача 4, блока керування з правилами нечіткої логіки 5, цифро-аналогового перетворювача 6, виконавчих механізмів 7 та регулюючих органів 8 для регулювання мікроклімату.

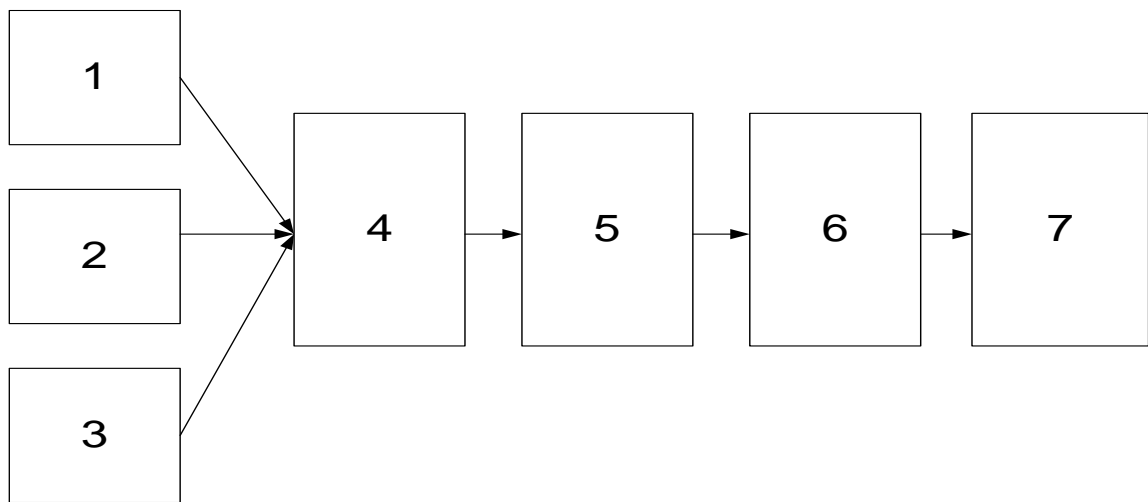


Рис. 4.4. Структурно-алгоритмічна схема регулювання параметрів мікроклімату в теплиці з урахуванням правил нечіткої логіки

Експертна система, відповідно до її структури (рис. 4.5), має такі входи: зовнішня температура  $T_{zov}$ , час доби  $Time$ , температура всередині теплиці  $T_{vn}$ , рівень вуглекислоти в атмосфері теплиці  $CO_2$ , внутрішня вологість  $V_{vn}$ ; виходи: ввімкнення двигунів системи опалення  $Opalennia$ , відкриття/закриття фрагм  $Fram$ , ввімкнення вентиляторів  $Vent$ .

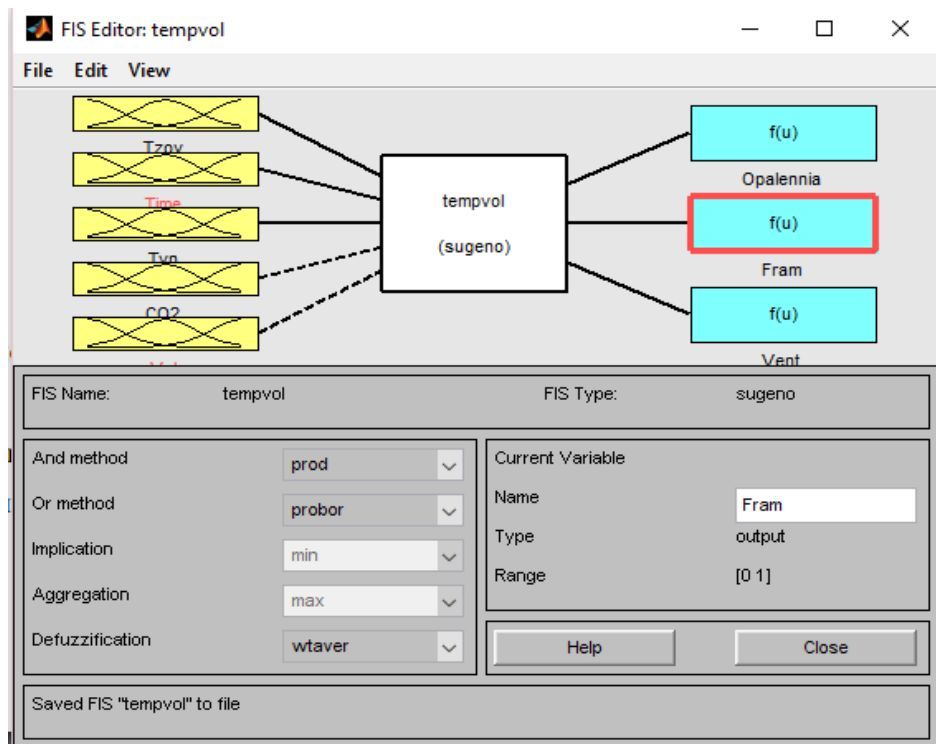


Рис. 4.5. Структурна схема системи прийняття рішень

Наступним кроком є завдання інтервалів функцій належностей змінних.

Приймаємо, що температура ззовні змінюється в межах від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ . Ділимо заданий інтервал на три блоки, виходячи з даних Гідрометцентру, що середнє значення температури взимку знаходиться в діапазоні від  $-7^{\circ}\text{C}$  до  $+1^{\circ}\text{C}$  отже, приймемо значення  $tz2$  за норму, а  $tz1$  і  $tz3$  - нижче і вище норми відповідно.

Параметри функції належності змінної часу обираємо виходячи з поділу на погодинні навантаження на електромережу, згідно тарифів Київенерго для промислових об'єктів. Інтервал  $T1$ - "нічний": з 00.00 до 6.00 год.,  $T2, T4, T6$  – "напівпіковий" – з 6.00 по 8.00 год., з 10.00 по 18.00 год. та з 22.00 по 24.00 год.,  $T3, T5$  – "пік" – з 8.00 до 10.00 год. та 18.00 по 22.00 год.

Завдання параметрів функції належності температури внутрішньої виконуємо, виходячи з технологічних параметрів при вирощуванні томатів в теплиці. Тобто за норму ( $tv2$ ) приймаємо значення  $+18$ - $+25^{\circ}\text{C}$ ,  $tv1$  в межах  $+25$ - $+30^{\circ}\text{C}$ , і  $tv3$  в діапазоні значень  $+10$ - $+18^{\circ}\text{C}$ .

Функція рівня вуглекислоти в теплиці має такі параметри: показники нижче норми  $100 < C1 < 400 \text{ см}^3 / \text{лм}^3$ , норма згідно технології вирощування томатів в спорудах закритого ґрунту  $400 < C2 < 700 \text{ см}^3 / \text{лм}^3$ , вище норми -  $800 < C3 < 1200 \text{ см}^3 / \text{лм}^3$ .

Функції належності внутрішньої вологості в теплиці обираємо згідно даних технологів, де значення нижче норми V1 знаходяться в межах від 0 до 40%, норма V2 - від 40 до 80 %, та значення вище норми до V3 від 80 % до 100%.

Продукційні правила складають основу бази знань нейронечіткої системи, задаються з урахуванням параметрів технологічного процесу.

```

1. If (tz is tz1) and (time is T1) and (tv is tv1) then (I is I)(II is I)(III is I) (1)
2. If (tz is tz1) and (time is T2) and (tv is tv1) then (I is I)(II is I)(III is I) (1)
3. If (tz is tz1) and (time is T3) and (tv is tv1) then (I is I)(II is I)(III is I) (1)
4. If (tz is tz1) and (time is T1) and (tv is tv2) then (I is I)(II is O)(III is I) (1)
5. If (tz is tz1) and (time is T2) and (tv is tv2) then (I is I)(II is O)(III is I) (1)
6. If (tz is tz1) and (time is T3) and (tv is tv2) then (I is I)(II is O)(III is I) (1)
7. If (tz is tz1) and (time is T3) and (tv is tv3) then (I is I)(II is O)(III is O) (1)
8. If (tz is tz1) and (time is T2) and (tv is tv3) then (I is I)(II is O)(III is O) (1)
9. If (tz is tz1) and (time is T1) and (tv is tv3) then (I is I)(II is O)(III is O) (1)
10. If (tz is tz2) and (time is T1) and (tv is tv1) then (I is O)(II is I)(III is I) (1)
11. If (tz is tz2) and (time is T2) and (tv is tv1) then (I is O)(II is I)(III is I) (1)
12. If (tz is tz2) and (time is T3) and (tv is tv1) then (I is I)(II is I)(III is I) (1)
13. If (tz is tz2) and (time is T1) and (tv is tv2) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
14. If (tz is tz2) and (time is T2) and (tv is tv2) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
15. If (tz is tz2) and (time is T3) and (tv is tv2) then (I is O)(II is I)(III is I) (1)
16. If (tz is tz2) and (time is T1) and (tv is tv3) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
17. If (tz is tz2) and (time is T2) and (tv is tv3) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
18. If (tz is tz2) and (time is T3) and (tv is tv3) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
19. If (tz is tz3) and (time is T1) and (tv is tv1) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
20. If (tz is tz3) and (time is T2) and (tv is tv1) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
21. If (tz is tz3) and (time is T3) and (tv is tv1) then (I is O)(II is I)(III is I) (1)
22. If (tz is tz3) and (time is T1) and (tv is tv2) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
23. If (tz is tz3) and (time is T2) and (tv is tv2) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
24. If (tz is tz3) and (time is T3) and (tv is tv2) then (I is O)(II is O)(III is I) (1)
25. If (tz is tz3) and (time is T1) and (tv is tv3) then (I is O)(II is O)(III is O) (1)
26. If (tz is tz3) and (time is T2) and (tv is tv3) then (I is O)(II is O)(III is O) (1)
27. If (tz is tz3) and (time is T3) and (tv is tv3) then (I is O)(II is O)(III is O) (1)

```

Рис. 4.6. Вікно перегляду продукційних правил

База правил систем нечіткого виведення призначена для формального представлення емпіричних знань експертів в тій або іншій предметній області у формі нечітких продукційних правил. Таким чином, база нечітких продукційних правил системи нечіткого виводу – це система нечітких продукційних правил, що відображає знання експертів про методи управління

об'єктом в різних ситуаціях, характер його функціонування в різних умовах тощо, тобто містить формалізовані людські знання.

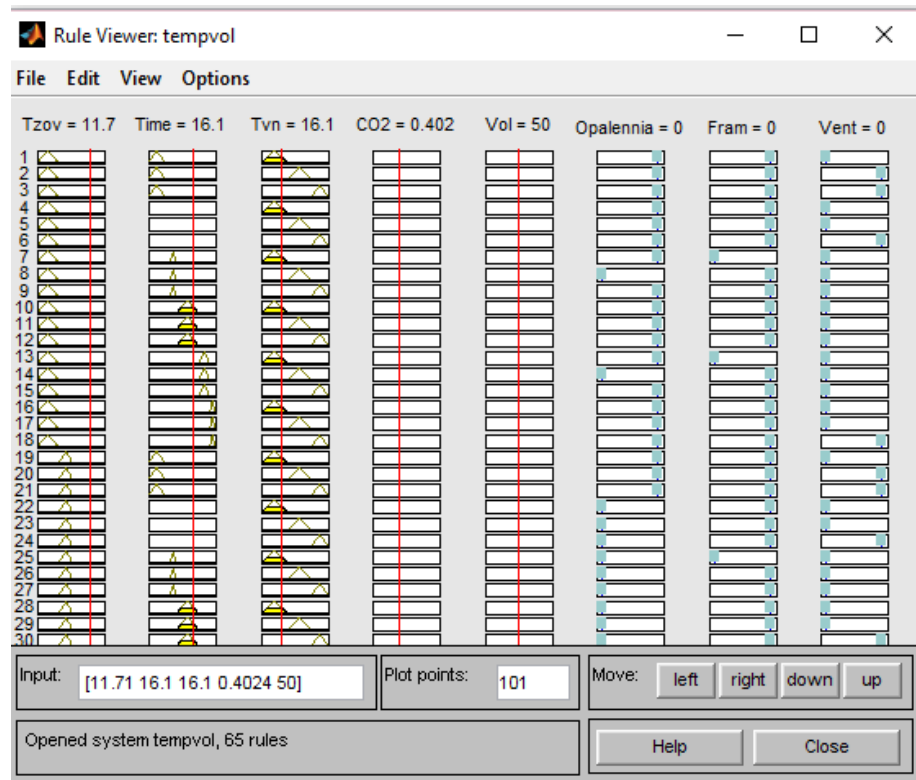


Рис. 4.7. Вікно перегляду результатів роботи системи прийняття рішень

Для відображення результатів моделювання використовуємо таблиці 4.1 та 4.2, при початкових умовах: температура зовні  $+7^{\circ}\text{C}$  протягом всієї доби, необхідна температура в теплиці  $18^{\circ}\text{C}$  протягом доби.

Для розрахунку показників в таблиці використовували значення навантаження двигунів систем, що працюють для забезпечення параметрів мікроклімату на заданому рівні, вартість електроенергії за кіловат згідно ПРАТ «Київобленерго» за 2022 рік, та отримуємо загальну кількість витрат електричної енергії протягом погодинної зони тарифікації.

В таблиці 4.1 наведені фактичні витрати електроенергії, в таблиці 4.2 прогнозовані витрати згідно результатів роботи нейронечіткої експертної системи.

Навантаження двигунів протягом доби без використання  
нейронечіткої експертної системи

Тариф		Нічний	Напів-пік	Пік	Напів-пік	Пік	Напів-пік	Всього
Вартість електроенергії, грн./ кВт		0,25	1,02	1,8	1,02	1,8	1,02	
Технологічний процес	Обладнання							
Система опалення	Циркуляційні насоси, кВт	35	35	35	35	35	35	
Вентилювання	Фрамуги, кВт		18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	
	Вентилятори, кВт	-	-	-	-	-	-	
Газовий режим	Циркуляційні насоси кВт	11	11		11	11		
Зашторювання	Мотор-редуктори, кВт		9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	
Всього спожито електроенергії, кВт		46	73,7	62,7	73,7	73,7	62,7	<b>392,5</b>
Спожито на загальну суму за період, грн.		11,5	75,17	112,86	75,17	132,66	63,95	<b>471,32</b>

Навантаження двигунів протягом доби з використанням  
нейронечіткої експертної системи

Тариф		Ніч-ний	Напів-пік	Пік	Напів-пік	Пік	Напів-пік	Всього
Вартість електроенергії, грн./ кВт		0,25	1,02	1,8	1,02	1,8	1,02	
Технологічний процес	Обкладання							
Система опалення	Циркуляційні насоси, кВт	35	17	28	35	17	28	
Вентилювання	Фрамуги, кВт		18,5		18,5		18,5	
	Вент-тори, кВт	-	-	-	-	-	-	
Газовий режим	Циркуляційні насоси, кВт	11	11		11	11		
Заштюрювання	Мотор-редуктори, кВт		7		7		7	
Всього спожито електроенергії, кВт		46	53,5	28	71,5	28	53,5	<b>280,5</b>
Спожито на загальну суму за період, грн.		11,5	54,57	50,4	72,93	50,4	63,95	<b>294,37</b>

Таким чином, за умов, що вхідні параметри відповідають заданим інтервалам, виконується умова ввімкнення системи опалення, вентилявання чи провітрювання, що сприяє суттєвому зменшенню енерговитрат.

На основі отриманих результатів можливо знизити витрату електроенергії при подачі теплоносія в контури опалення теплиці. Дана система дозволяє аналізувати стан навколишнього середовища, та спираючись на вартість електроенергії знизити її витрати на 10-15% за добу.

### **4.3. Використання генетичних алгоритмів для розрахунку оптимальних налаштувань системи автоматичного регулювання**

Більшість технологічних процесів аграрного сектору є багатовимірними об'єктами управління зі складними зв'язками між змінними, що характеризуються не стаціонарністю динамічних характеристик. Це призводить до погіршення якості управління, оскільки в типових системах вона залежить від зміни динаміки об'єкта з часом. Виникає необхідність побудови регуляторів, параметри яких адаптуються так, щоб при змінюваних параметрах об'єкта точність та якість системи автоматичного регулювання залишалися незмінними [9].

Неперервність оптимального управління може досягатися шляхом синтезу адаптивної системи з еталонною моделлю, вихід якої описує бажану ціль управління системою при заданій вхідній дії. Але недоліком такої системи є складність виведення еталонної математичної моделі, що повністю точно і адекватно відповідає об'єкту. Тому, досить актуальною задачею є розробка автоматичної системи керування, де оптимальні настройки регулятора визначаються за допомогою генетичного алгоритму з врахуванням обмежень та обраного критерію управління.

*Генетичний алгоритм (ГА)* – це послідовність керуючих дій і операцій, яка моделює еволюційні процеси на основі аналогів механізмів генетичного спадкування і природного відбору. При цьому зберігається біологічна термінологія в спрощеному вигляді [13].

Відбір у генетичному алгоритмі тісно зв'язаний із принципами природного відбору в такий спосіб:

- пристосованість особини відповідає значенню цільової функції на заданому варіанті;
- виживання найбільш пристосованих особин відповідає тому, що популяція наступного покоління варіантів формується з врахуванням цільової

функції. Чим більш пристосована особина, тим більша ймовірність її участі в кроссовері, тобто в розмноженні.

Таким чином, модель добору визначає, як варто будувати популяцію наступного покоління. Як правило, ймовірність участі особини в схрещуванні береться пропорційно її пристосованості. Часто використовується так звана *стратегія елітизму*, при якій кілька кращих особин переходять у наступне покоління без змін, не беручи участь у кроссовері і відборі. У будь-якому випадку кожне наступне покоління буде в середньому краще попереднього. Коли пристосованість особин перестає помітно збільшуватися, процес зупиняють і як розв'язку задачі оптимізації беруть найкращий зі знайдених варіантів [5].

Представимо незалежні змінні у виді хромосом. Для цього виконаємо кодування незалежних змінних або в двійковому форматі, або у форматі з плаваючою комою.

У випадку двійкового кодування використовується  $n$  біт для кожного параметру, причому,  $n$  може бути різним. Якщо параметр може змінюватися між мінімальним ( $min$ ) і максимальним ( $max$ ) значеннями, то можна використовувати наступні формули для перетворення [18]:

$$r = \frac{g(\max - \min)}{(2^n - 1)} + \min \quad g = \frac{(r - \min)}{(\max - \min)(2^n - 1)}. \quad (4.1)$$

де:  $g$  – значення параметру в двійковому форматі,

$r$  – значення параметру у форматі з плаваючою комою.

Найбільш гарні результати дає варіант представлення хромосом у двійковому форматі. Однак, у цьому випадку необхідно постійно здійснювати кодування/декодування параметрів (генів) [9].

Однією з найбільш актуальних областей застосування генетичних алгоритмів є задачі навчання нейронних мереж, у тому числі і нечітких, шляхом підбору адекватних параметрів [5]:

КРОК 1. Виділення керуючих параметрів задачі навчання.

КРОК 2. Одержання розв'язку при фіксованих значеннях параметрів.

КРОК3. Визначення неузгодженості отриманого і необхідного розв'язків.

КРОК 4. Вибір нових значень параметрів на основі роботи генетичного алгоритму.

КРОК 5. Зупинка у випадку одержання задовільного/неузгодженого розв'язку, інакше – перехід до кроку 2.

Як керуючі параметри навчання нечітких нейронних мереж, які впливають на якість розв'язку, можуть бути обрані параметри функцій належності, а також різні формалізації логічних правил.

### **Дослідження системи керування із застосуванням генетичного алгоритму.**

При зміні властивостей об'єкта в процесі роботи розраховані настройки регулятора не забезпечують в подальшому необхідної якості і виникає необхідність пристосування системи до нових умов роботи. Блок порівняння постійно порівнює координати стану об'єкта із їх заданим значенням, якщо виникає різниця  $\varepsilon = x_{зд} - x \neq 0$ , то сигнал поступає на блок оптимізації, задача якого полягає в знаходженні оптимальних настройок регулятора за допомогою генетичного алгоритму, таких, щоб в системі досягалась ціль управління.

В якості параметрів поставленої задачі виступають значення параметрів ПІ-регулятора  $K_p$  та  $K_i$ .

Алгоритм налаштування адаптивного нейронечіткого регулятора включає такі етапи:

- розробка структурної схеми САР
- збір інформації про поведінку об'єкта при дії на нього збурень
- розробка продукційних правил, враховуючи технологічні дані
- фазифікація вхідних і вихідних параметрів
- розробка структури нейронечіткої мережі та визначення методів

навчання

- навчання нейронечіткої експертної системи
- апробація результатів за допомогою моделювання.

Пошук оптимальних настройок ПІ регулятора відбувається за класичним генетичним алгоритмом (рис. 4.17). Вибір початкової популяції хромосом полягає в випадковому виборі хромосоми. Оцінка пристосованості хромосоми визначається з розрахунку функції належності, причому чим більше значення функції належності, тим краща "якість" хромосоми. Зупинка алгоритму відбувається після досягнення оптимального значення інтегрального критерію із заданою точністю. Також зупинка алгоритму можлива у випадку, коли його виконання не призводить до покращення вже досягнутого значення критерію або коли перевищено заданий час виконання чи задану кількість ітерацій [5].

Якщо умова зупинки виконана, то переходимо до вибору "найкращої" хромосоми. В іншому випадку – на наступному кроці виконується селекція, тобто вибираються хромосоми, що прийматимуть участь в створенні наступної популяції. Такий вибір відбувається відповідно принципу природного відбору, за яким найбільші шанси на участь у створенні нових особин мають хромосоми з найбільшим значенням функції належності.

На основі значень функції приналежності відбираються кращі генотипи до яких потім застосовуються генетичні оператори – схрещування (кросинговер) та мутація, в результаті чого з'являється нове покоління рішення, для котрих процедура повторюється.

Пошук рішень задачі оптимізації проводиться в середовищі Global Optimization Toolbox пакета MATLAB R 2018. Вихідні дані для розрахунку функцій приналежності отримуються із імітаційної моделі Simulink - моделі.

## Параметри роботи генетичного алгоритму

№1 п/п	Назва параметра	Значення
1	Population type	Double vector
2	Creation function	Uniform
3	Scaling function	Rank
4	Selection function	Stochastic uniform
5	Mutation function	Gaussian
6	Elite count	0.50 PopulationSize
7	Crossover fraction	0.8
8	Use parallel	1
9	Max Generations	150

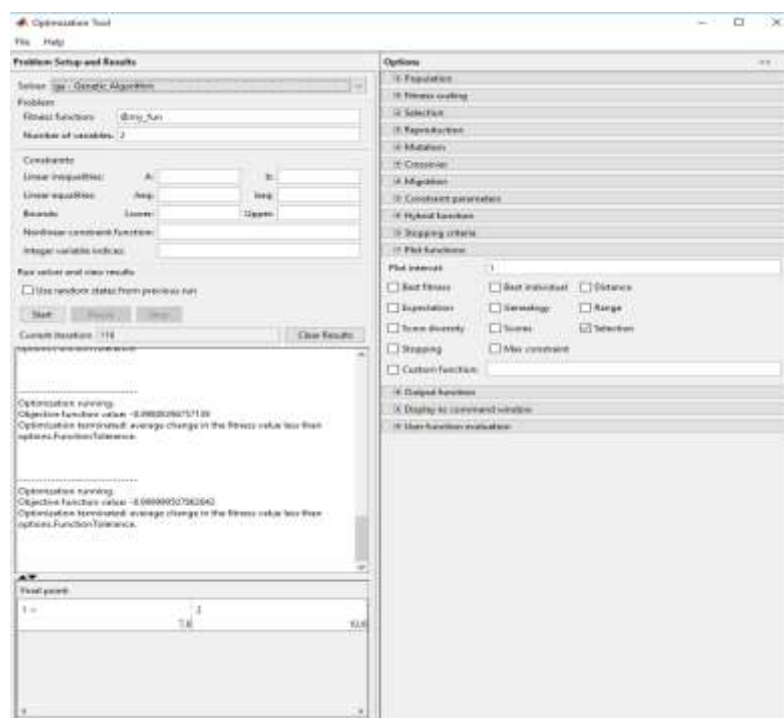


Рис. 4.8. Панель роботи генетичного алгоритму

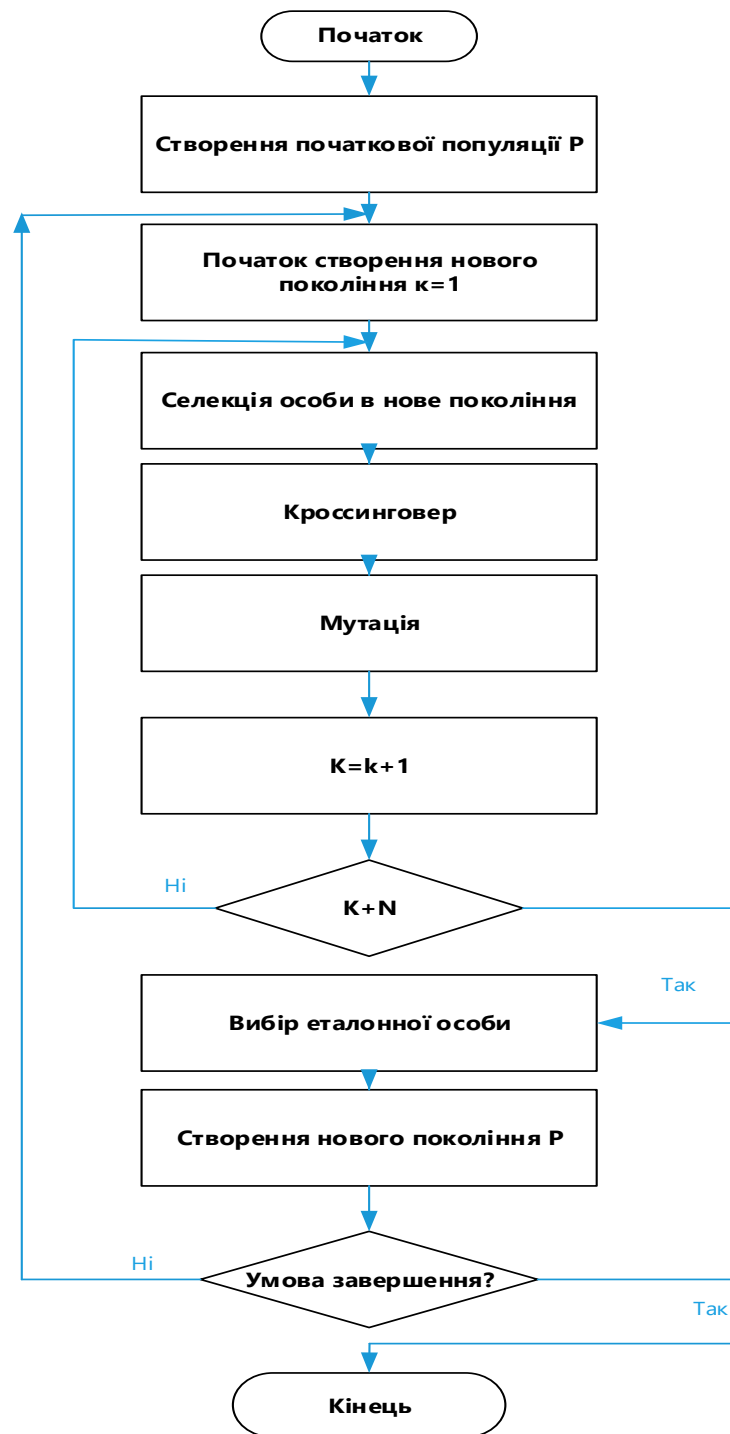


Рис. 4.9. Алгоритм роботи генетичного пошуку параметрів ПІ-регулятора

Генетичний алгоритм використовує 5 критеріїв зупинки в тому випадку, якщо алгоритм не зупинено за допомогою клавіші Stop ГА зупиняється, якщо виконується одна з наступних умов [5]:

- Генерації - алгоритм досяг встановленого числа генерацій

- Час - алгоритм запускається на певний часовий інтервал (в секундах).
- Межа фітнес-функції - найкраща величина фітнес-функції менше або дорівнює певного (-му) значення (-ю).
- Зупинка генерацій - алгоритм обчислює певне число генерацій і зупиняється якщо не відбувається поліпшення фітнес - функції.
- Зупинка часу - алгоритм виконується деякий інтервал часу і зупиняється, якщо не відбувається поліпшення фітнес - функції.

Панель графіків розташована нижче перших двох рядків, дозволяє відобразити різні графіки результатів ГА:

Best fitness відображає краще значення функції в залежності від номера генерації.

Expectation показує очікуване число нащадків в залежності від значення функції при кожній генерації.

Score diversity визначає гістограму значень функції на кожній генерації.

Stopping показує рівні критеріїв зупинки.

Best individual) відображає значення особини з кращим значенням ЦФ на кожній генерації.

Genealogy визначає генеалогію особин. Лінії від однієї генерації до наступної пофарбовані різними кольорами червоні лінії позначають нащадків після мутації; блакитні лінії - нащадків після схрещування: чорні - елітні особини.

Scores відображає значення особини на кожній генерації.

Distance показує середнє відстань між особинами на кожній генерації.

Range дає мінімальне, максимальне і середнє значення ЦФ при кожній генерації.

Selection відображає гістограму батьків.

Custom function дозволяє використовувати графіки функцій за власним вибором. Після вибору графічного відображення необхідно натиснути Start, і на екрані з'явиться відповідний графік.

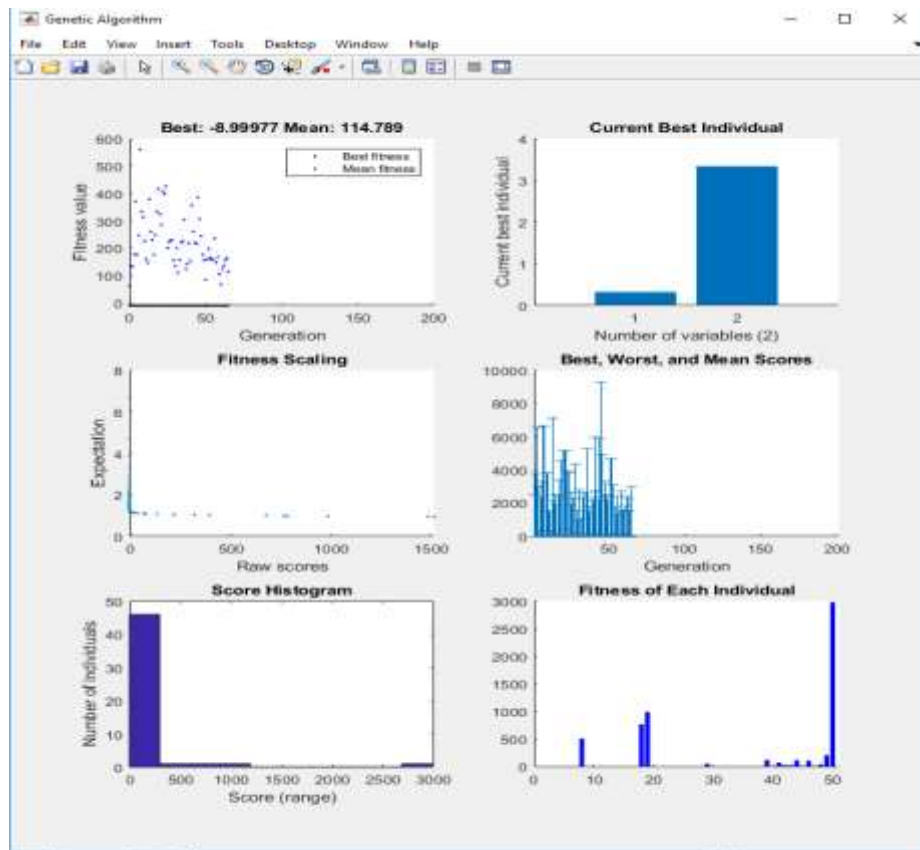


Рис. 4.10. Графічне відображення роботи генетичного алгоритму

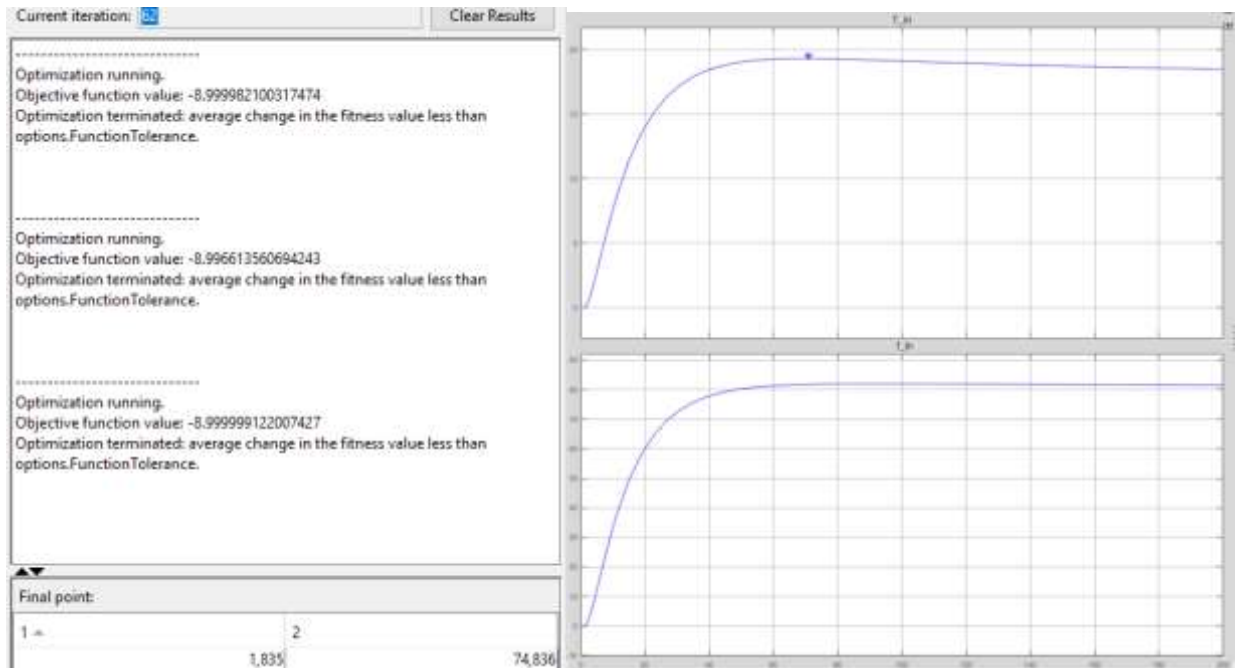
```

1  function ObjV=objfun(Phen)
2  Wc=Phen;
3  x=zeros(4,1);
4  ut=[(0:0.1:20),ones(201,1)];
5  ObjV=riset(y,t);
6  const=overshoot(y,t);
7  if const > 15
8      ObjV=ObjV+const\3;
9  end
10 LIND = 15;
11 NVAR=2;
12 NIND=40;
13 GGAP=0.9;
14 MUTR=0.0175;
15 MAXGEN=30;
16 FieldD=[LIND LIND; 1 1; 1000 1000;1 1; 0 0; 0 0; 0 0];
17 Chrom=ofjfun(bs2rv(Chrom,FieldD));
18 Gen=0;
19 while Gen < MAXGEN
20     FintV=rankin(ObjV);
21     plotgraphics
22     SelCh=mut(SelCh, MUTR);
23     ObjVsel=objfun(bs2rv(SelCh,FieldD));
24     [Chrom, ObjV]=reins(Chrom,SelCh,1,1,ObjV,ObjVsel);
25     Gen=Gen+1;
26 end
27 Phen=bs2rv(Chrom,FieldD);
28

```

Рис. 4.11. Лістинг функції оптимізації

На рис. 4.12 показана частина підсумкової панелі роботи ГА.



а)

б)

Рис. 4.12. Вікно перегляду процесу пошуку оптимальних параметрів ПІ-регулятора в середовищі Optimization Toolbox (а); та перехідна характеристика САР по каналу зміни температури, з визначеними за допомогою генетичного алгоритму, параметрами ПІ-регулятора (б)

У нашому випадку генотип складався з набору параметрів налаштувань регулятора (Додаток Б). Оптимальні налаштування для підтримання параметрів мікроклімату на рівні:  $\Theta_{вн} = 18^{\circ}\text{C}$ ,  $f_{вн} = 80\%$ , при зовнішніх збуреннях  $\Theta_{зовн}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $f_{зовн}=40\%$  становили: для каналу регулювання температури  $K_p=74,836$ ,  $K_i = 1,835$ ; для каналу регулювання вологості :  $K_p= 72,786$ , а час ізодрому  $K_i=2,173$ .

#### 4.4. Оптимізація налаштувань локальної системи із використанням нечіткої логіки

Використання різних методів керування параметрів мікроклімату дозволяє обрати найкращий алгоритм керування для досягнення ефективних показників регулювання мікроклімату.

Запропонований підхід дає необхідні можливості практичного застосування результатів для прогнозу подальшої поведінки об'єкта та формуванні в подальшому енергоефективних стратегій керування тепличним комплексом [22].

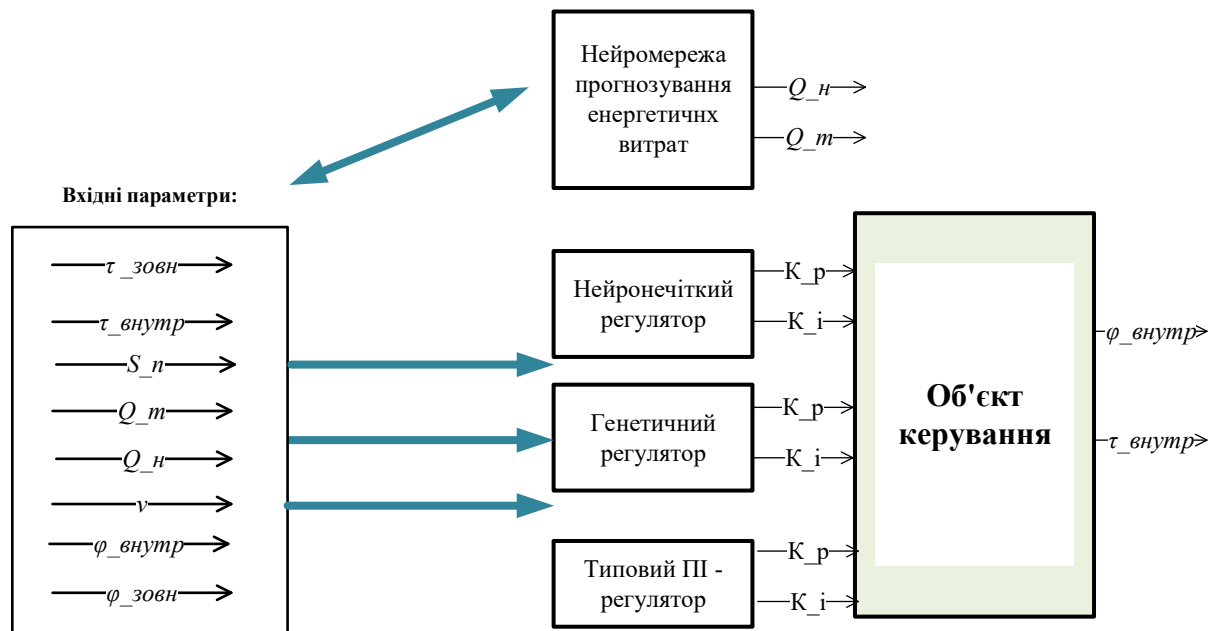


Рис. 4.13. Структурно-логічна схема ресурсоефективної системи керування

Найважливішими для росту й розвитку рослин є температурно-вологісним режим, підтримання якого в значній мірі ускладнюється впливом зовнішніх природних збурень. До того ж, саме процеси опалення й вентиляції технологічних приміщень, згідно проведених аналітичних досліджень, мають найбільшу енергетичну ємність. Теплиця, як об'єкт регулювання, є багатовимірною зі складними внутрішніми зв'язками, що впливає на стаціонарність динамічних характеристик. Зазначене призводить до

погіршення якості керування, оскільки в типових системах вона залежить від динамічних властивостей об'єкта. Слід також враховувати, що тепличне господарство є складною виробничою системою, де присутні збурення, що носять випадковий характер, а саме: зовнішні температура, вологість і повітря, сонячна радіація, сила й напрям вітру, тощо.

Для порівняльної оцінки методів настройок регуляторів (традиційні, нечіткої логіки та генетичного алгоритму) використаємо один із найбільш розповсюджених критеріїв якості, а саме лінійного інтегрального показника якості перехідного процесу, що мінімізує площу між перехідним процесом та часовою віссю:

$$I = \int_{t_0}^t (x_{3Д} - x) dt \rightarrow \min_{k_p, k_i}, \quad (4.2)$$

де  $x_{3Д}, x$  - задане значення параметра та його значення на виході об'єкта.

$k_p, k_i \in [k_{\min}, k_{\max}]$  - параметри настройки автоматичного регулятора.

Лінійні пропорційний (П), інтегральний (І) і диференціальний (Д) закони керування формують керуючу дію у регуляторів на об'єкт керування по значенню помилки  $\varepsilon$  [18]:

$$u_P = k_P \varepsilon, u_I = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon dt, u_D = \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (4.3)$$

Передатні функції лінійних регуляторів мають вигляд:

$$W_P(s) = K_P, W_I(s) = \frac{1}{T_I s}, W_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_D s + 1}. \quad (4.4)$$

Структурно-функціональна схема системи керування з використанням різного типу регуляторів схематично зображена на рис. 4.14.

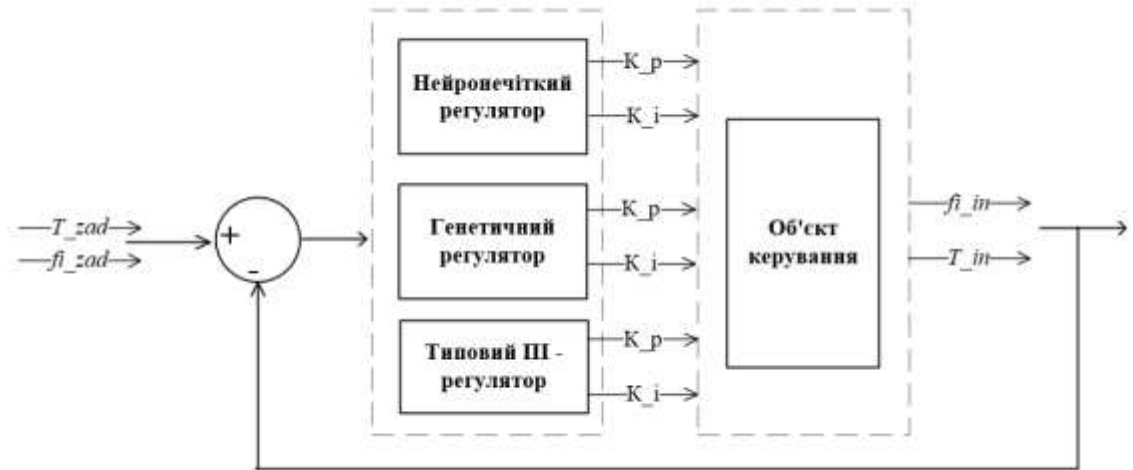


Рис. 4.14. Структурно-функціональна схема системи автоматичного керування

Для оптимізації налаштувань локальної системи використовуємо нечітку експертну систему з метою визначення параметрів налаштувань ПІ-регулятора по відхиленню. Використовуємо теорію нечіткої логіки та програму Fuzzy Logic Toolbox [19].

Продукційні правила для нечіткої бази знань розроблені на основі знань експерта та мають вигляд:

*Якщо  $E = \text{vid}$ ,  $I \int E = \text{dod}$ ,  $TO K_p = \text{zero}$ ,  $IT_I = \text{zero}$ , і т.д.,*

де *vid* – від’ємні значення, *dod* – додатні значення, *ser* – середні значення, *vel* – великі значення, *zero* – нуль.

*Значення похибки перерегулювання  $E$  (%) знаходиться в межах:  $\text{vid} = [-5 \dots 0]$ ,  $\text{zero} = [0]$ ,  $\text{dod} = [0 \dots 5]$ .*

*Інтеграл похибки, площа під кривою розгону та усталеним значенням –  $E_{int}$  лежить в межах  $[0 \dots 1000]$*

*Коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора,  $K_p$ :  $\text{min} [0 \dots 50]$ ,  $\text{aver} [50 \dots 250]$ ,  $\text{max} [250 \dots 500]$*

*Коефіцієнт інтегральної складової ПІ-регулятора,  $K_i$ :  $\text{min} [0 \dots 4]$ ,  $\text{aver} [1 \dots 9]$ ,  $\text{max} [6 \dots 14]$ .*

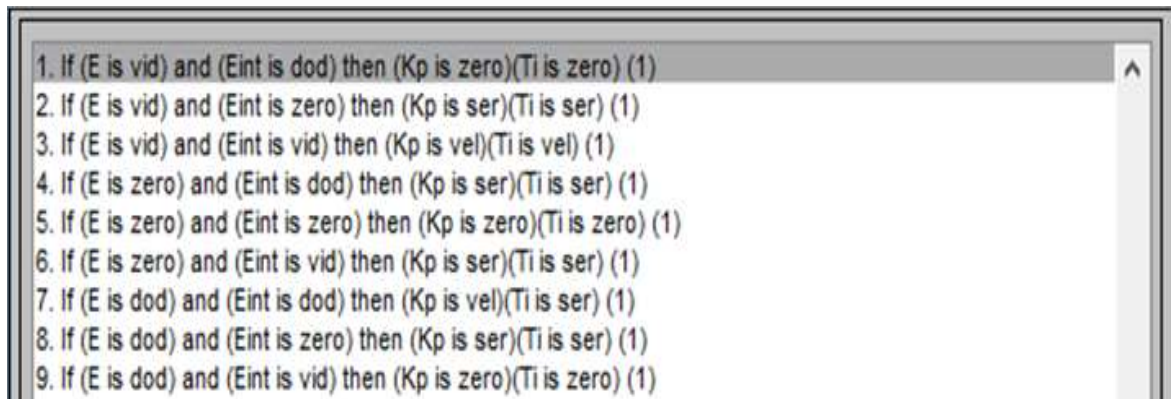


Рис. 4.15. Фрагмент вікна перегляду продукційних правил для визначення параметрів налаштувань ПП – регулятора

Графіки варіантів функцій належності помилки та інтегралу помилки задаємо як вихідні елементи нечіткої експертної системи:

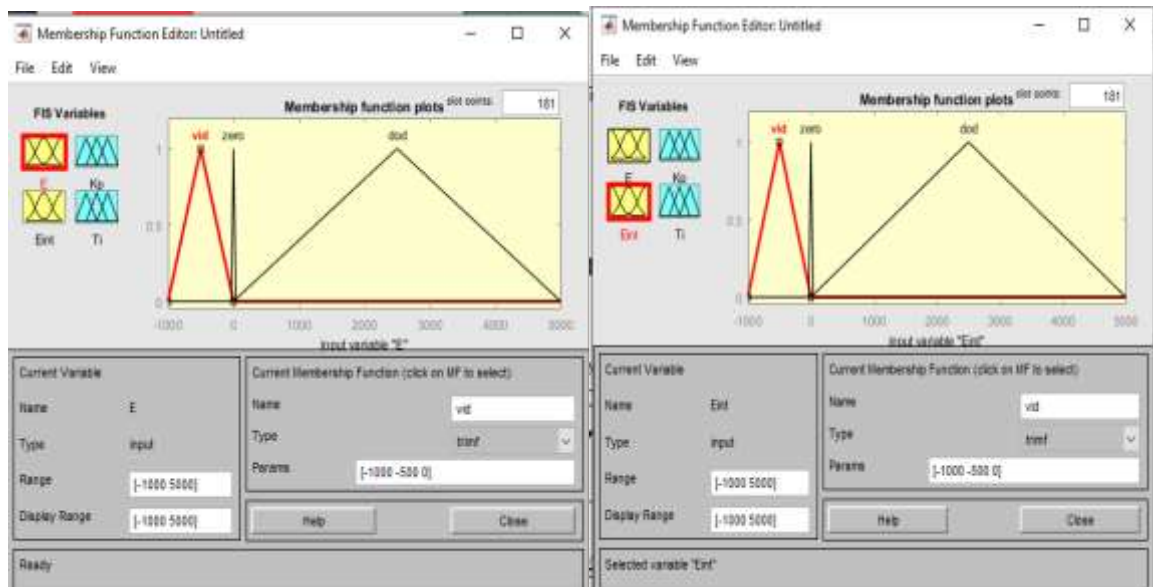
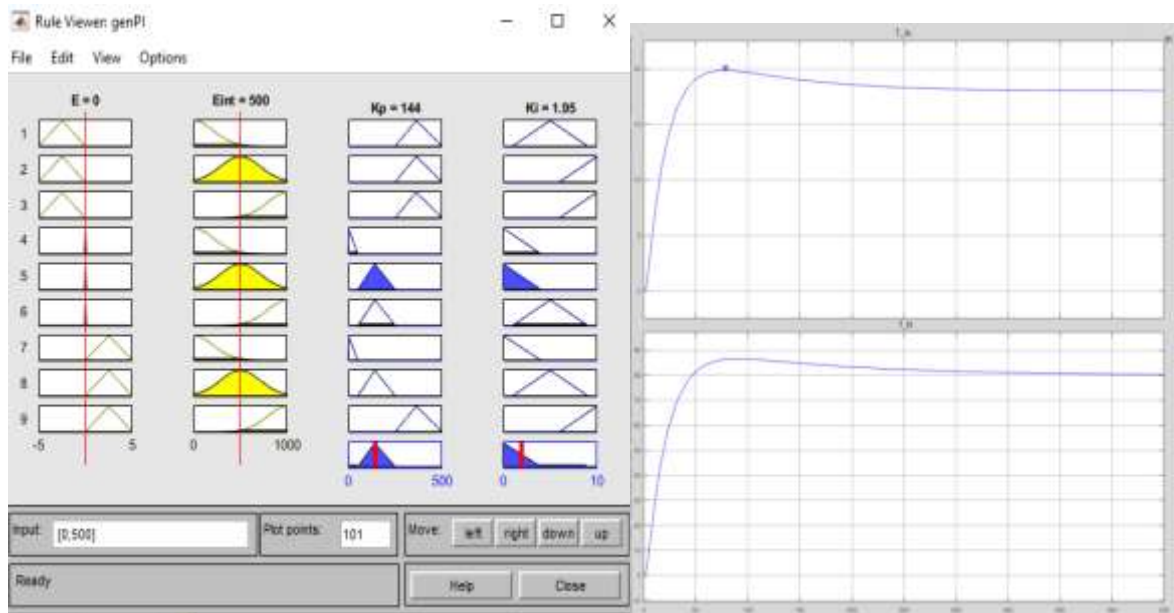


Рис. 4.16. Функції належності вхідних змінних "Похибка E" та "Інтеграл помилки"

У процесі навчання нейронечіткої експертної системи щодо визначення налаштувань ПП–регулятора використано 40 циклів для кожного параметра  $K_p$  та  $K_i$ .



а)

б)

Рис. 4.17. Вікно перегляду роботи експертної системи (а); перехідна характеристика САР по каналу зміни температури ( $T_{in}$ ) та вологості ( $f_{in}$ ), з визначеними за допомогою нейронечіткої експертної системи, параметрами ПІ-регулятора (б)

Отримуючи значення похибки та інтегралу похибки в програмі Simulink та підставляючи їх в нейронечітку експертну систему, було визначено оптимальні налаштування ПІ-регулятора для каналу регулювання температури для підтримання параметрів мікроклімату на рівні:  $\Theta_{вн} = 18^{\circ}\text{C}$ ,  $f_{вн} = 80\%$ , при зовнішніх збуреннях  $\Theta_{зовн} = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $f_{зовн} = 40\%$ :  $K_p = 73$ ,  $T_i = 3,3$ ; для каналу регулювання вологості :  $K_p = 71,2$ , а час ізодрому  $T_i = 3,6$ .

Таким чином, адаптивна нейронечітка експертна система успішно знаходить параметри налаштувань ПІ-регулятора при керуванні складним об'єктом. Використання приведенного алгоритму покращує процес адаптації системи, так як не потребує спеціальних методів активної ідентифікації параметрів об'єкта, що негативно впливає на якість керування процесом.

Результати оцінки якості перехідних процесів за результатами застосування різних методів налаштувань регуляторів (для фіксованого стану об'єкта)

Метод налаштувань	Канал регулювання температури та параметри налаштувань регулятора					Канал регулювання вологості та параметри налаштувань регулятора				
	$K_p$	$K_i$	Перерегулювання, $\sigma, \%$	Час регулювання $T, c$	Коливальність, $N$	$K_p$	$K_i$	Пере-регулювання, $\sigma, \%$	Час регулювання $T, c$	Коливальність, $N$
Традиційний метод	75,1	3,1	33,4	400	2	64,3	2,8	12,5	270	-
Нечіткий висновок	73,1	3,3	11,1	225	-	71,2	3,6	5	315	-
Генетичний алгоритм	74,8	1,8	0,3	140	-	72,7	2,1	0	62	-

Використовуючи традиційний метод розрахунку оптимальних параметрів налаштувань регуляторів, а саме метод Зиглера-Нікольса, отримали такі значення параметрів налаштувань ПІ-регулятора для підтримання параметрів мікроклімату на рівні:  $\Theta_{вн} = 18^\circ C$ ,  $f_{вн} = 80\%$ , при зовнішніх збуреннях  $\Theta_{зовн} = 10^\circ C$ ,  $f_{зовн} = 40\%$ : коефіцієнт передачі для каналу регулювання температури:  $K_p = 75$ , а час ізодрому  $T_i = 3$ ; для каналу регулювання вологості:  $K_p = 64$ , а час ізодрому  $T_i = 2,8$ . Перехідні процеси в системі з ПІ-регулятором, що має зазначені параметри налаштувань для каналів зміни температури та вологості повітря в теплиці, зображені на рис. 4.18.

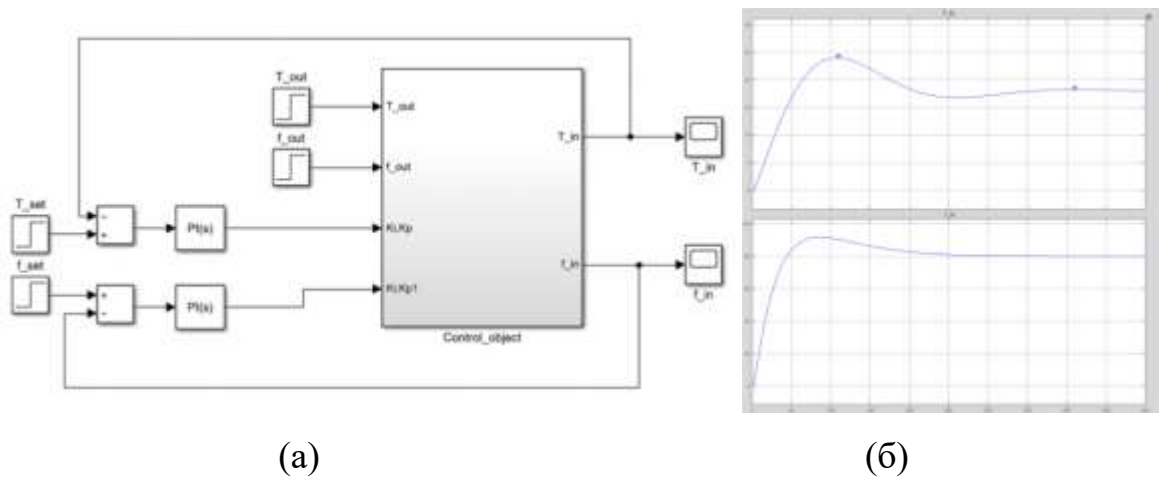


Рис. 4.18. Структурна схема системи керування з ПІ – регулятором (а), перехідна характеристики САР для каналу зміни температури ( $T_{in}$ ) та вологості ( $f_{in}$ ) повітря (б)

Запропонований підхід дає необхідні можливості практичного застосування результатів для прогнозу подальшої поведінки об'єкта та формуванні в енергоефективних стратегій керування тепличним комплексом.

#### 4.5. Розроблення моделі прогнозування енергетичних витрат шляхом використання методів нейромережевого прогнозування

Із врахуванням складності опису виробничих процесів класичними методами постає задача пошуку нових методів одним з яких використання методики нейромережевого прогнозування.

Запропонований підхід дає необхідні можливості практичного застосування результатів для прогнозу подальшої поведінки об'єкта, і розробки в подальшому енергоефективних стратегій керування тепличним комплексом.

Для синтезу та дослідження відповідних НМ використано програмний пакет Neural Time Series. У якості критерію зупинки навчання вибираємо мінімізацію відносної середньоквадратичної помилки навчання.

Для навчання нейромережі було обрано баєсівський метод лінійної регрес, так як в даному випадку виникає найменша середньоквадратична помилка по відхиленню.

Для розв'язку оптимізаційної задачі НМ був обраний багатошаровий перцептрон, так як таким чином реалізується алгоритм зворотного поширення помилки, що навчає всі шари та дозволяє використовувати нелінійні функції активації. Архітектура нейромережі наведена на рис. 4.19.

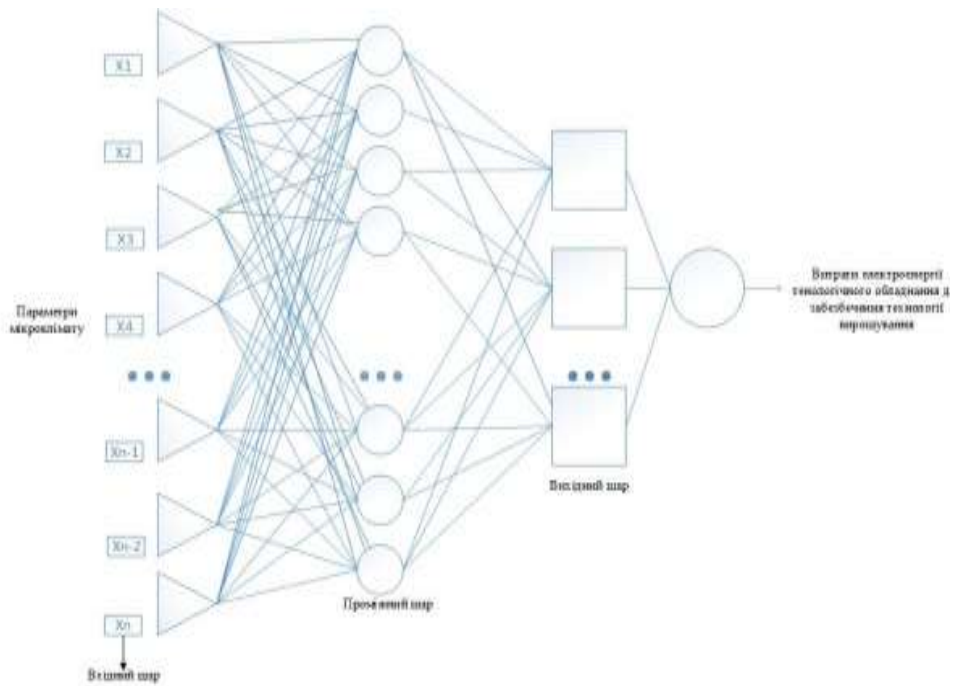


Рис. 4.19. Архітектура нейромережевої моделі енергетичних витрат

Дослідження нейромережі проводимо, використовуючи програмний пакет Neural Time Series MatLab. У якості критерію зупинки навчання вибираємо мінімізацію середньоквадратичної помилки навчання:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}, \quad (4.5)$$

де  $y_i$  – фактичне значення вихідного параметра,  $\hat{y}_i$  – розрахункове значення параметра, отримане за розрахунком за моделлю,  $i = 1 \dots 2$  вихідний параметр,  $N$  – кількість циклів навчання.

Вхідними параметрами НМ є: значення зовнішньої температури  $\Theta_{\text{зов.}}, ^\circ\text{C}$ ; поглинуте теплицею сонячне випромінювання  $S_{\text{п}}, \text{Вт}$ ; рівень вуглекислоти в теплиці  $C, \text{ppm}$ . Вихідними параметрами є витрата газу та електроенергії.

Дискретність зняття даних – щогодини. Для розв’язку оптимізаційної задачі НМ був обраний багатошаровий перцептрон, так як таким чином реалізується алгоритм зворотного поширення помилки, що навчає всі шари та дозволяє використовувати нелінійні функції активації.

Для навчання нейромережі було обрано баєсівський метод лінійної регресії, так як в даному випадку виникає найменша середньоквадратична помилка по відхиленню [7]. Кількість прихованих шарів – 50.

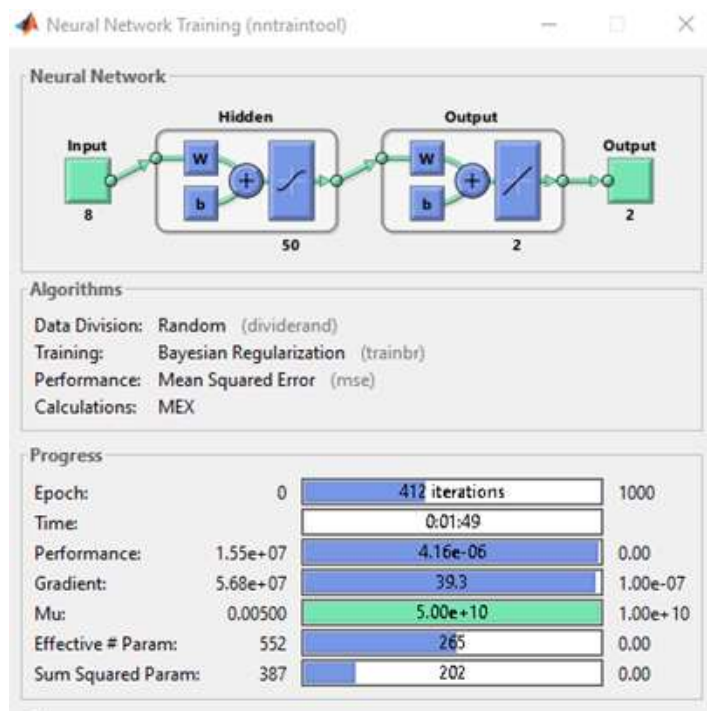


Рис. 4.20. Структурна схема нейромережі виду прямого поширення

Процес навчання ілюструється графіком залежності оцінки функціонування від номера циклу навчання (рис. 4.21).

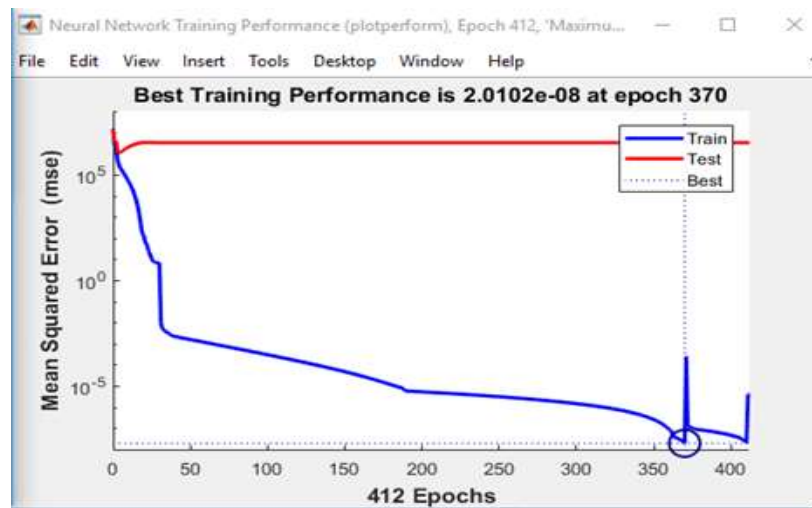


Рис. 4.21. Графік залежності оцінки функціонування від номера циклу навчання

Таким чином визначено, що цикл 370 дає найкращий результат навчання.

Для визначення ступеня достовірності результатів використовуємо тестовий масив даних. Виконуємо перевірку співпадіння прогнозованих даних з реальними значеннями енерговитрат на виробництві.

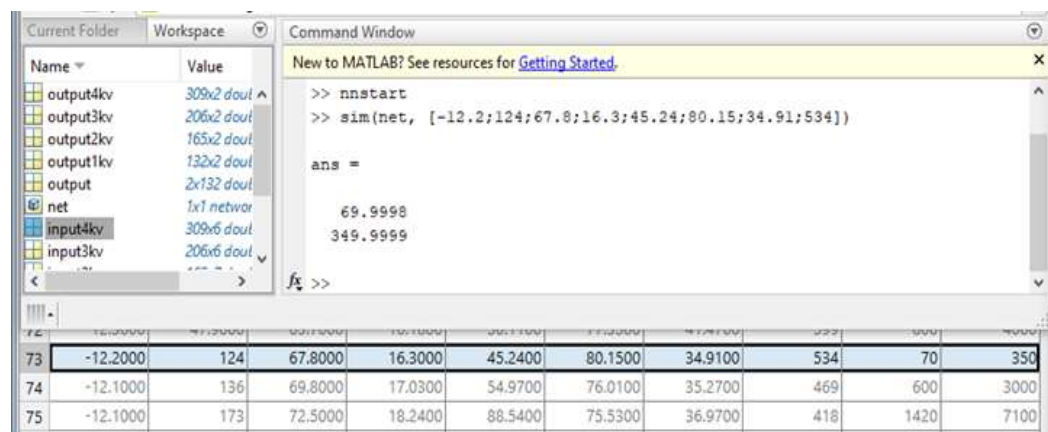


Рис. 4.22. Вигляд вікна перевірки тестових даних

Для визначення ступеня достовірності результатів використовуємо тестовий масив даних. Виконуємо перевірку співпадіння прогнозованих значень з реальними даними параметрів мікроклімату взятими на виробництві. Для оцінки достовірності результатів роботи нейромережі

використовуємо методи регресійного аналізу [4], отриманими при порівнянні еталонних значень зі значеннями на виході мережі.

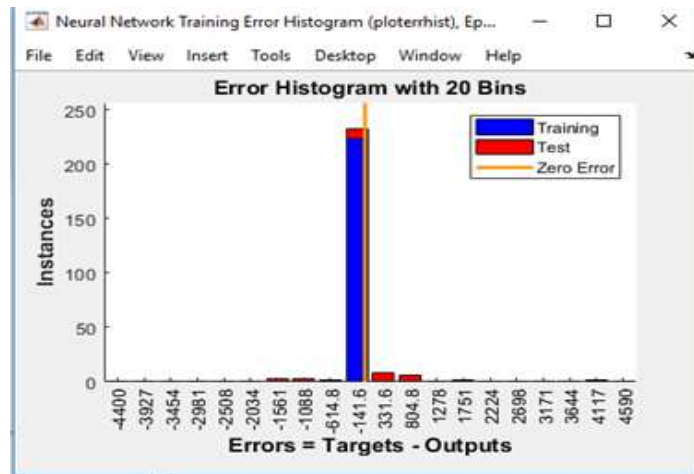


Рис. 4.23. Гістограма розподілу похибок навчальних даних в порівнянні з тестовим вектором

Таблиця 4.5.

Фрагмент вибірки даних прогнозованих даних з реальними значеннями

Фактичні значення		Прогнозовані значення	
Витрата газу $X, \text{ м}^3$	Витрата електроенергії $Y, \text{ Вт/год.}$	Витрата газу $X1, \text{ м}^3$	Витрата електроенергії $Y1, \text{ Вт/год.}$
624	3120	624,624	3123,12
860	4300	864,3	4321,5
220	1100	220,22	1101,1
70	350	70,7	353,5
600	3000	600,6	3003
230	1150	230,552	1152,76
520	2600	520,52	2602,6
180	900	180,18	900,9
224	1120	224,224	1121,12
176	880	178,112	890,56
536	2680	536,536	2682,68

Оцінка достовірності результатів моделювання. Оцінку розробленої моделі прогнозування витрат енергоресурсів здійснено на основі критеріїв: детермінації  $R^2$ , кореляції  $R$ , середньоквадратичної похибки  $\sigma$ , Фішера  $F$  та Стюдента  $t$  (табл. 4.6).

## Критерії адекватності математичної моделі

Вибірка	Критерії				
	$R^2$	$R^2_k$	$\sigma$	$F$	$t$
<b>Витрата газу, м<sup>3</sup></b>	0,99	0,903	0,00138	9,39	0,973
<b>Витрата електроенергії, Вт/год.</b>	0,99	0,904	0,00137	9,39	0,965

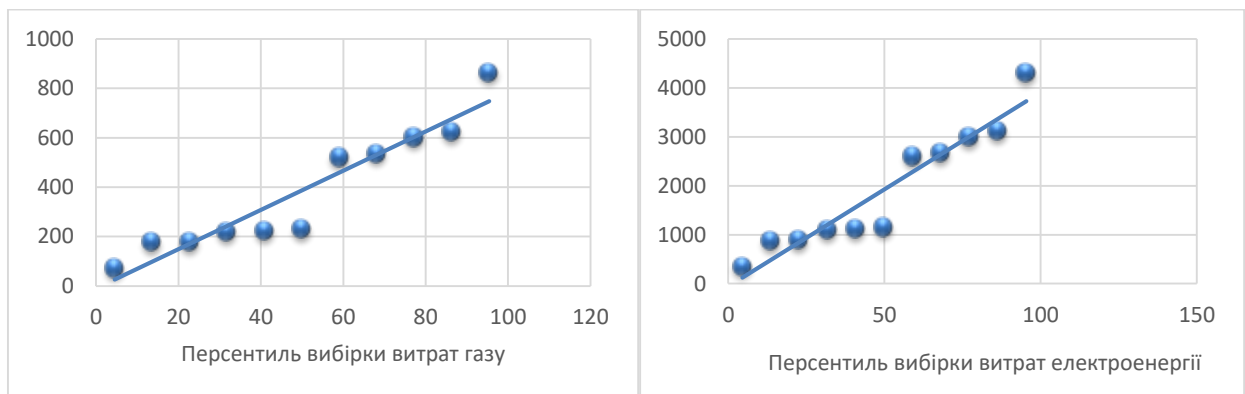


Рис. 4.24. Графік нормального розподілу вибірки витрат газу та електроенергії

Отже, згідно таблиці 4.6, коефіцієнти кореляції та детермінації знаходяться в межах 90%, що свідчить про тісноту зв'язків між величинами. Похибка вимірювань незначна – 0,0013. Критерій Стюдента вказує на значущість коефіцієнтів кореляції, що свідчить про адекватність нейромережевої моделі прогнозування енерговитрат.

## РОЗДІЛ 5

### СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 5.1. Вибір програмованого логічного контролера

Для керування технологічним обладнанням для створення мікрокліматичного режиму в теплиці згідно із завданням на виконання магістерської кваліфікаційної роботи обраний програмований логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT фірми Schneider Electric (рис. 5.1).

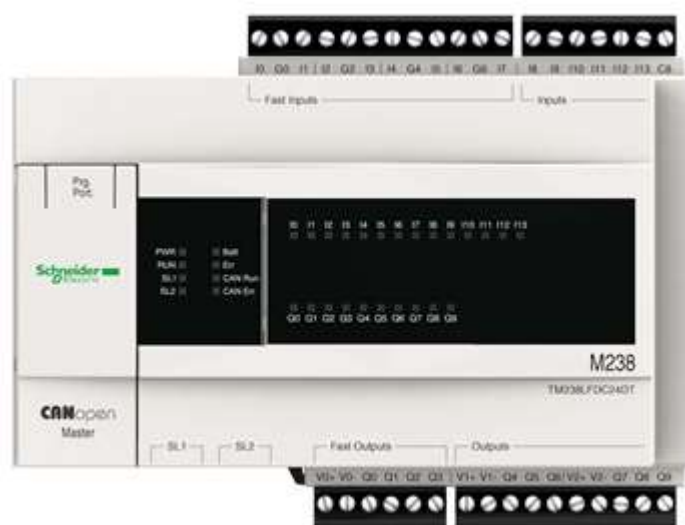


Рис. 5.1. Програмований логічний контролер  
MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric

Контролер MODICON TM238 – це універсальний модульний програмований контролер для вирішення задач автоматичного керування низького та середнього ступеня складності. Ефективному використанню контролерів сприяє наявність широкої гами центральних процесорів, модулів вводу-виводу дискретних і аналогових сигналів, функціональних і комутаційних модулів, модулів блоків живлення та інтерфейсних модулів.

Основні технічні характеристики ПЛК MODICON TM238 наведені в таблиці 5.1.

Для підключення датчиків об'ємного заряду повітря із уніфікованим вихідним сигналом 0-20 В використовується модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT Schneider Electric (рис. 5.2), розроблений для збільшення технічних можливостей ПЛК різних типів компанії Schneider Electric, зокрема MODICON TM238.

Таблиця 5.1.

## Технічні характеристики ПЛК MODICON TM238LFDC24DT

Напруга живлення	24 В постійного струму
Допустимі межі напруги живлення	19,2...28,8 В
Споживана потужність	17,2 Вт
Кількість дискретних входів/виходів	24
Кількість дискретних входів	8 швидкодіючих входів за EN/МЭК 61131-2 (тип 1) 6 входів за EN/МЭК 61131-2 (тип 2)
Напруга дискретних входів	24 В постійного струму
Кількість дискретних виходів	4 швидкодіючих виходів за EN/МЭК 61131-2 (тип 1) 6 виходів за EN/МЭК 61131-2 (тип 2)
Напруга дискретних виходів	24 В постійного струму
Пам'ять	Вбудована 1000 кБ
Напруга живлення датчиків	19,2...30,0 В
Струм дискретного входу	8 мА – швидкодіючий вхід 10,4 мА звичайний вхід
Струм дискретних виходів	500 мА швидкодіючий вихід (нормальний режим) 100 мА швидкодіючий вихід (режим ШІМ, режим РТО)
Час відклику	300 нс швидкодіючий вхід 3 мс звичайний вхід 0,25 мс швидкодіючий вихід < 1 мс звичайний вихід
Швидкість передачі даних CANopen	50 Кбіт/с (1000 м) 125 Кбіт/с (500 м) 250 Кбіт/с (250 м) 425 Кбіт/с (125 м) 800 Кбіт/с (50 м) 1000 Кбіт/с (20 м)
Робоча температура навк. середовища	-10...+55°C
Відносна вологість	95% без утворення конденсату
Ступінь захисту	IP20



Рис. 5.2. Модуль розширення аналогових входів TM2AMM6NT

Таблиця 5.2.

## Технічні характеристики TM2AMM6NT

Характеристики	0 - 10В і 4 - 20 мА діапазон вхідних сигналів
Опис	Дозвіл 10 біт
Виходи	8 x Аналогові входи (напруга 0-10 / Поточна 4-20)
Напруга живлення	24 В постійного струму
Електричне підключення	Клемник
Інформація про Продукт	Аналоговий модуль розширення введення
Виробник	Schneider Electric
Серія	Twido
Асортимент продукції	контролери програмувальні
Висота (мм)	90
Ширина (мм)	23,5
Глибина (мм)	70
Вага (кг)	0,085

Логічний контролер Modicon TM238 підтримує та програмується програмним забезпеченням SoMashine, який надає наступні мови програмування згідно стандарту MEK 61131-3:

- Instruction List (IL), мова списку інструкцій;
- Structured Text (ST), мова структурованого тексту;
- Функціональний блок Diagram (FBD), мова функціональних блокових схем;
- Sequential Function Chart (SFC), мова послідовних функціональних блоків;
- Ladder Diagram (LD), мова багатоступінчатих схем;
- Continuous Function Chart (CFC), мова безперервних функціональних блоків.

Логічний контролер Modicon TM238 може керувати максимум сьома задачами (одна головна задача (MAST) і до шести інших задач).

Бібліотеки контролера Modicon M238: IoStandard; Standard; Util; M238 PLC System; M238 HSC; M238 PTO/PWM; Таблиця переадресації контролера M238.

Вузол конфігурування задач в схемі приладів SoMashine дозволяє визначити одну або декілька задач для управління виконанням додатку.

Задачі можуть бути наступними: циклічні; періодичні; такі, що запускаються по події; такі, що запускаємі по зовнішній події.

Контролер Modicon M238 з живленням постійним струмом має:

- 14 дискретних входів, в т.ч. 8 швидкодіючих;
- 10 дискретних входів, в т.ч. 4 швидкодіючих;

Контролер Modicon M238 з живленням змінним струмом має:

- 14 дискретних входів, в т.ч. 8 швидкодіючих;
- 10 дискретних входів, в т.ч. 6 релейних;

Кількість входів та виходів може бути збільшена шляхом додавання з правої сторони базового контролера до 7 модулів розширення відносного типу:

- дискретні модулі TM2 DDI/DDO/DDM/DRA;
- аналогові модулі TM2 AMI/ALM/ARI/AMO/AVO/AMM;
- до 3 швидкодіючих лічильників NM200 HS206DT/DF;
- до 2 ведучих модулів AS-Interface TWD NOI 10M3.

Модеми або комунікаційні шлюзи можуть бути підключені до послідовних інтерфейсів для розширення можливостей мережевої взаємодії на основі протоколів Ethernet Modbus/TCP, Profibus DP, DeviceNet та ін.

### **Розробка програмно-апаратного забезпечення для реалізації алгоритму на базі контролерів**

Для полегшення програмування і введення в дію машинного устаткування, в даній магістерській кваліфікаційній роботі, для контролера Modicon TM238 обране програмне забезпечення SoMachine, яке дозволяє проектувати, вводити в дію і обслуговувати машини за допомогою єдиного програмного пакета.



Рис. 5.3. Графічне представлення улаштування комп'ютерно-інтегрованої системи керування Schneider Electric:

1 – ПК, в якому виконується SoMachine; 2 – термінал людино-машинного інтерфейсу; 3 – програмований логічний контролер

## 5.2. Розробка схем погодження між первинними перетворювачами – промисловим регулятором і промисловим регулятором – виконавчими механізмами

Рішення на базі контролерів Modicon M238 з вбудованим портом CANopen (рис. 5.4).

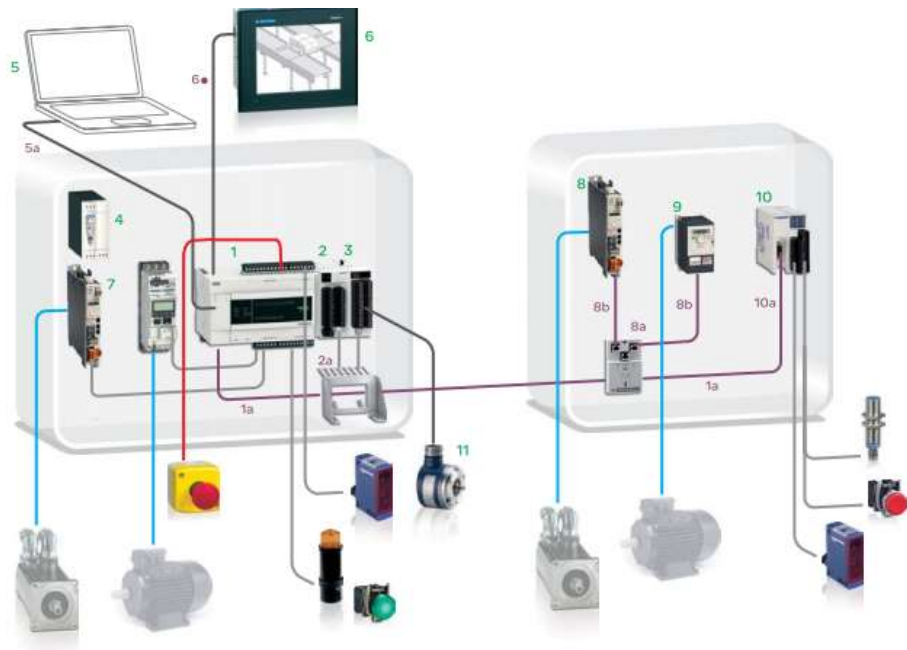


Рис. 5.4. Приклад організації пристроїв Schneider Electric з підтримкою шини CANopen.

Компактні базові блоки логічного контролера Modicon M238:

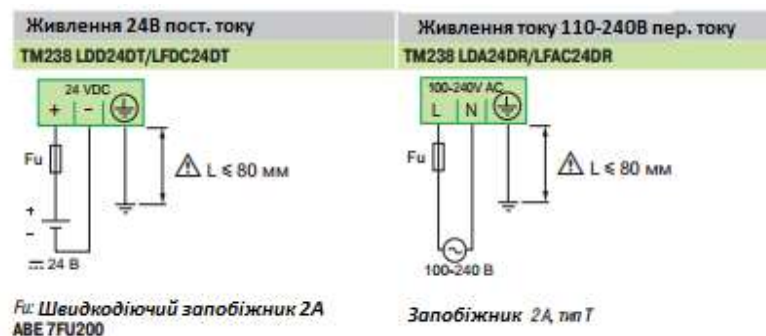


Рис. 5.5. Схема підключення до джерела живлення контролера TM238

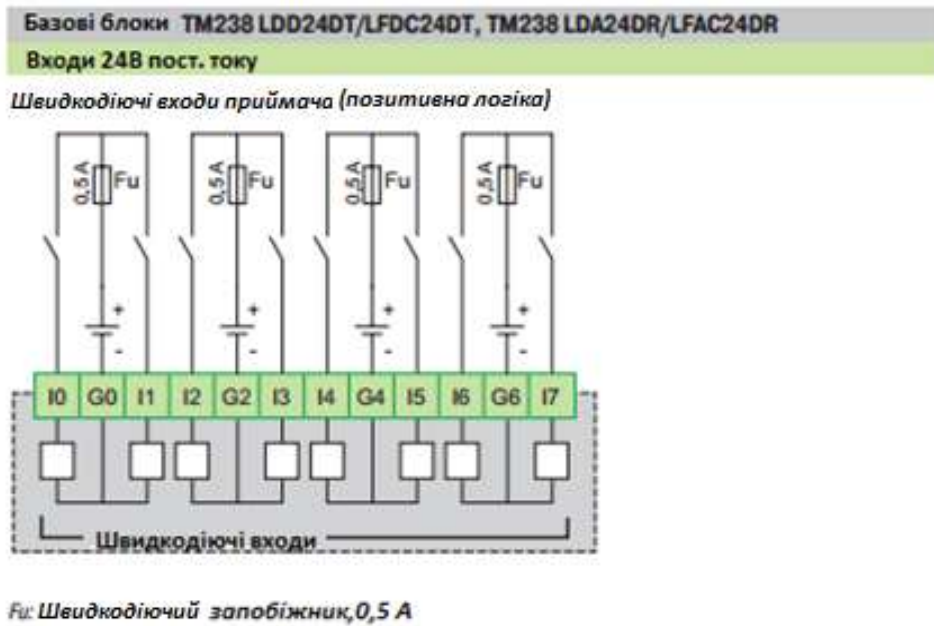


Рис. 5.6. Схема підключень швидкодіючого входу приймача контролера M238

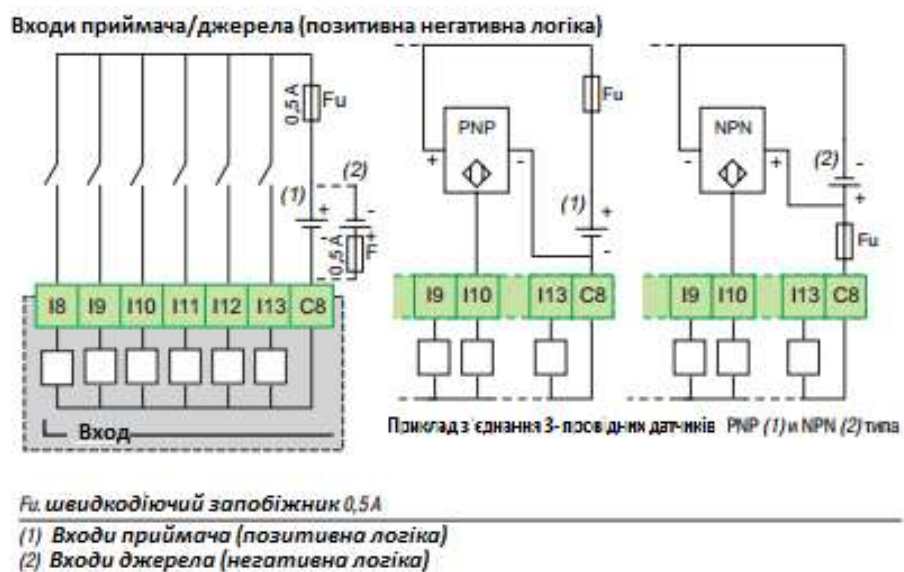


Рис. 5.7. Схема підключень входів приймача/джерела логічного контролера M238

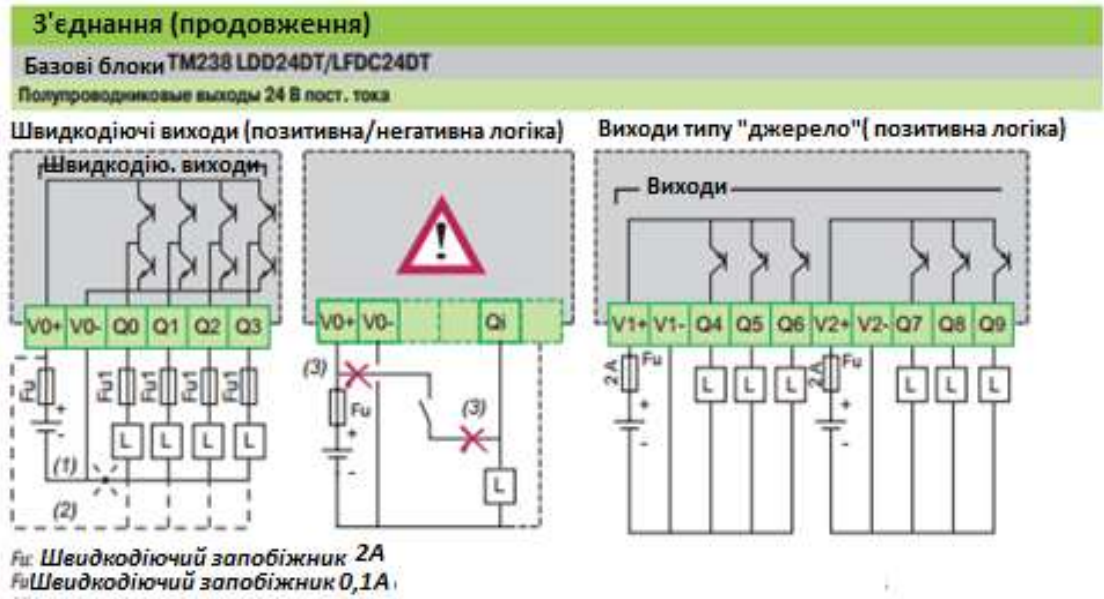


Рис. 5.8. Схема підключень швидкодіючих входів контролера TM238

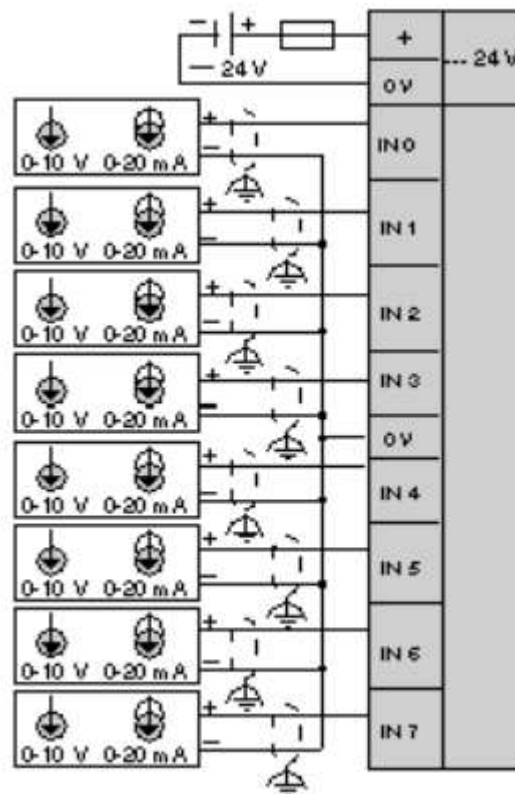


Рис. 5.9. Монтажна схема TM2AMM6HT

Схема електрична принципова системи керування температурним режимом в теплиці наведена на рис. 5.10.

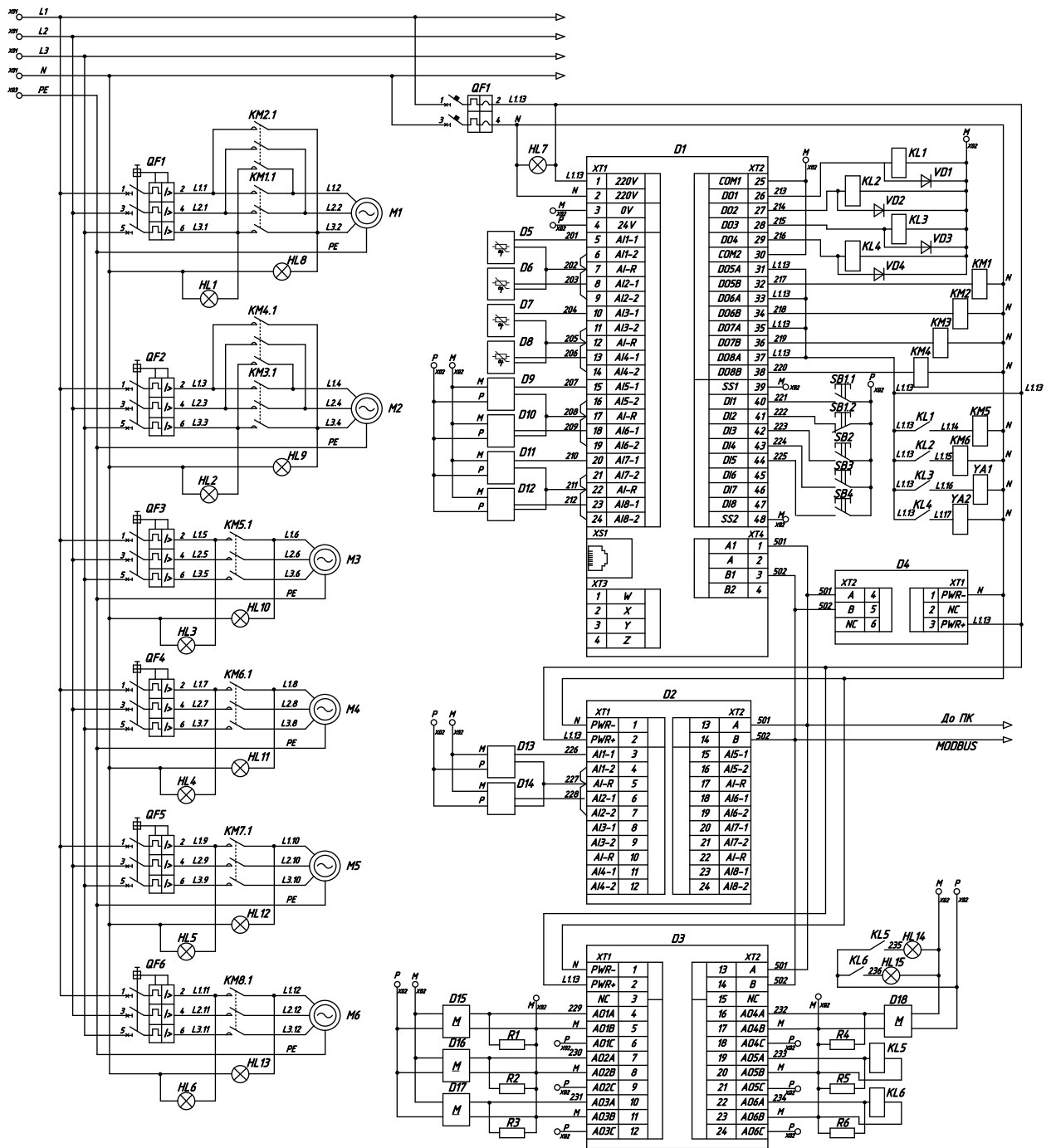


Рис. 5.10. Система керування температурним режимом у промисловій теплиці.

Схема електрична принципова

## РОЗДІЛ 6

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ В ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ

### 6.1. Методика визначення енергоефективності роботи обладнання тепличного комплексу із енергоефективною системою автоматичного керування

Основною задачею енергоефективного управління обладнанням тепличного господарства є забезпечення безперервного керованого балансу між попитом і пропозицією енергії. Для цього елементи мережі повинні постійно обмінюватися між собою інформацією про параметри енергії, режими її споживання і генерації, кількості споживаної енергії і планованому споживанні, комерційною інформацією. Методика визначення енергоефективності роботи обладнання тепличного комплексу включає послідовність обґрунтованих кроків із залученням відповідних функціонально-інформаційних підходів та техніко-технологічних засобів із реалізацією відповідної структури методичного забезпечення (рис. 6.1).

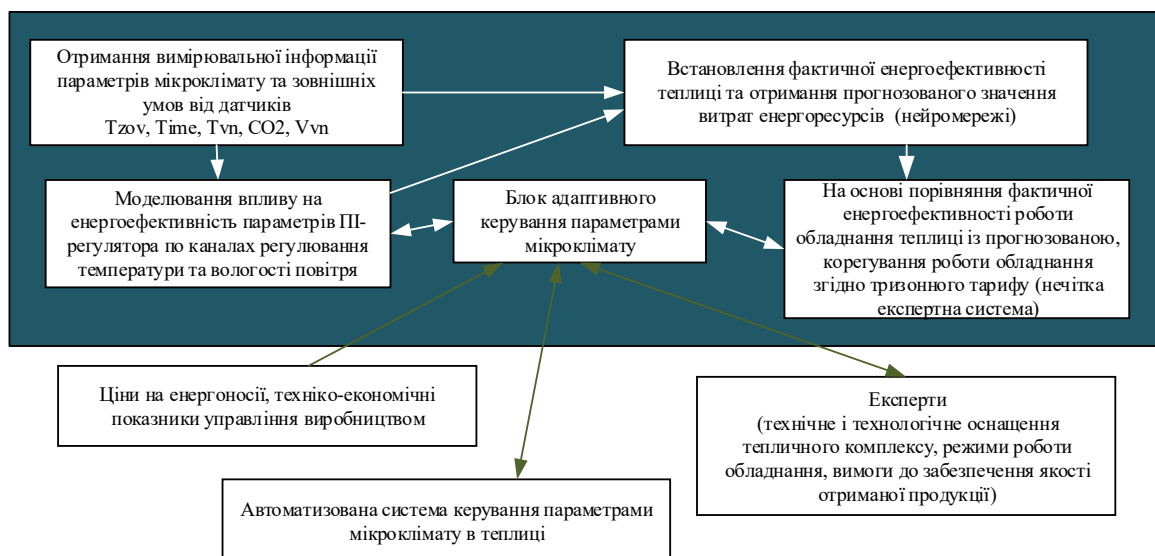


Рис. 6.1. Схема функціонування оптимізаційної системи керування енергоефективного управління тепличними комплексами

Практична реалізація алгоритму розробки системи енергоефективного керування створюється в уніфікованій мові моделювання UML.

Встановлюємо, що в системі є "актори-люди":

- Експерти (беруть участь у формуванні правил нечіткої експертної системи);

та "актори зовнішні системи":

- Технічні засоби моделювання технологічного процесу регулювання температури та вологості в теплиці;

- База знань регулювання параметрів мікроклімату конкретного підприємства;

- Математичні засоби (нейромережа прогнозування енерговитрат, нечітка експертна система, генетичний алгоритм);

*Основний потік подій:*

1. Проведення експериментальних досліджень.
2. Формування бази даних параметрів мікроклімату всередині та ззовні теплиці.
3. Створення нечіткої експертної системи для керування груп обладнання подачі теплоносія в теплицю та вентиляції повітря.
4. Формування експертами правил на основі вимог щодо забезпечення якості вирощуваної продукції.
5. Опрацювання інформації, щодо прогнозованих значень витрат енергоносіїв.
6. Вибір стратегії керування обладнанням для забезпечення мінімізації енерговитрат, шляхом коригування налаштувань регулятора.
7. Визначення параметрів ПІ-регулятора та проведення моделювання.
8. Синтез енергоефективної системи управління параметрами мікроклімату в теплиці.

Логічна послідовність такого методу наведена на рис. 6.2.

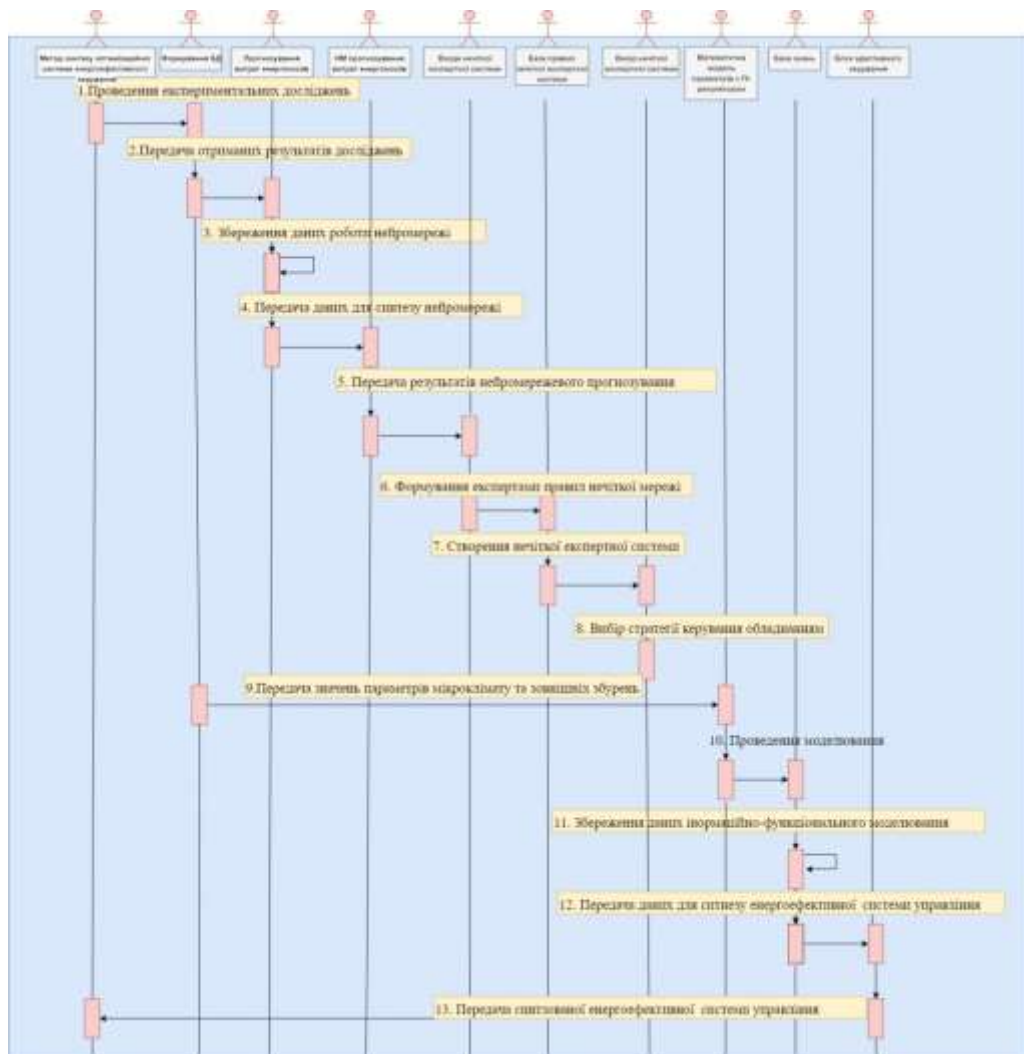


Рис. 6.2. Діаграма послідовності (нотація UML) розробки методу оптимізаційної системи керування енергоефективного управління тепличними комплексами

## 6.2. Оцінювання економічної ефективності системи автоматичного керування режимами вирощування овочевої продукції у тепличних комплексах

В сучасних умовах господарювання дослідження економічної ефективності функціонування підприємств набуває особливого значення. Адже діяльність всіх підприємств спрямована не лише на задоволення потреб споживачів, але й на досягнення максимальних результатів роботи при мінімізації витрат, зокрема зниження собівартості продукції та

необґрунтованих втрат ресурсів. Не менш важливим питанням є вибір оптимальної системи показників, яка б дозволила максимально точно та всебічно оцінити ефективність функціонування підприємств. Оцінка економічної ефективності виробничо-господарської діяльності підприємств визначається за допомогою різних науково обґрунтованих і взаємопов'язаних показників, які повинні забезпечувати порівнянність витрат, які понесені на виробництво продукції з кінцевими результатами роботи. До загальних показників, які характеризують економічну ефективність слід віднести: фонд оплати праці; загальну рентабельність продаж; енергомісткість виробництва та ін., а до специфічних показників: якість випущеної продукції; ефективність використання основних виробничих фондів та матеріальних ресурсів, обігових коштів щодо конкретної промисловості [18].

Для оцінки економічної ефективності системи автоматичного керування режимами вирощування овочевої продукції у тепличних комплексах використовуємо показники мінімізації енергетичних ресурсів та термін окупності впроваджених методів:

$$\begin{cases} \text{Витрати природнього газу} \rightarrow \min \\ \text{Витрати електроенергії} \rightarrow \min \\ \text{Прибуток підприємства} \rightarrow \max \end{cases} \quad (6.1)$$

На основі використання інтелектуальних методів (викладений вище матеріал), синтезовано функції приналежності вхідних параметрів системи автоматичного керування температуро-вологісним режимом, які рекомендується використовувати під час технічного регулювання параметрів мікроклімату у спорудах закритого ґрунту (Додаток В). Для всіх вхідних параметрів використано терміни: "Незначний вплив на енергоефективність", "Середній вплив на енергоефективність", "Значний вплив на енергоефективність" (рис. 6.3)



а)



б)

Рис. 6.3. Функції приналежності енергоефективних параметрів якості регулювання а) температури б) вологості в спорудах закритого ґрунту

Отримані функції приналежності (рис. 6.3) термів "Незначний вплив на енергоефективність", "Середній вплив на енергоефективність", "Значний вплив на енергоефективність" параметрів якості регулювання температурно-вологісного режиму в спорудах закритого ґрунту дають змогу: прогнозувати потенційну дію розроблених методик керування технологічними процесами в теплиці з урахуванням поточних збурень та відслідковувати якісні зони значень вхідних параметрів, що впливають на енергозатратність процесу вирощування овочевої продукції в спорудах закритого ґрунту.

Розрахунок капітальних витрат на автоматизацію:

$$K = K_z + K_m + K_o + K_p - K_r \quad (6.2)$$

де  $K_z$  – вартість засобів автоматики з урахуванням їх доставки, монтажу і налагодження;  $K_m$  – витрати на модернізацію діючої техніки і

технології, зумовлену автоматизацією;  $K_b$  – вартість будівництва і реконструкції будівель пов'язаними з впровадження автоматизації;  $K_o$  – залишкова вартість основних засобів, що підлягають ліквідації при впровадженні пристроїв автоматики;  $K_p$  – вартість отриманої від реалізації частини основних коштів, які ліквідуються.

Річні експлуатаційні витрати:

$$B = B_a + B_p + B_z + B_e + B_n, \quad (6.3)$$

де  $B_a$  – амортизаційні відрахування;  $B_p$  – відрахування на поточний ремонт;  $B_z$  – витрати на зарплату обслуговуючого персоналу;  $B_e$  – вартість електроенергії;  $B_n$  – вартість палива і змащувальних матеріалів.

Прибуток за рахунок зміни річних експлуатаційних витрат:

$$П = B_n - B + Д \quad (6.4)$$

де  $B_n$  – річні витрати без САК;  $B$  – річні витрати на САК;  $Д$  – додатковий прибуток за рахунок зниження витрат на енергоносії.

Термін окупності капітальних витрат розраховуємо за формулою:

$$T = \frac{K}{Д - B} \quad (6.5)$$

Виходячи із такої послідовності (6.1-6.5), враховуючи можливість управляти включенням обладнання у часи мінімальної вартості електроенергії, та із використанням спеціалізованого програмного забезпечення, досліджуємо економічні аспекти експлуатації обладнання у складі електротехнологічного комплексу теплиці прийнявши наступні початкові дані:

- вартість засобів автоматики з урахуванням їх доставки, монтажу і налагодження та витратами на модернізацію 267000, грн.;
- тариф за електроенергію – трьохзонний;
- тарифи станом на грудень 2023 року;
- обслуговуючий персонал – 4 особи (середня заробітна плата 300 доларів);
- амортизаційна норма – 6%.

У процесі теоретичних досліджень розраховували: капітальні витрати, експлуатаційні витрати, прибуток від впровадження системи та терміни окупності оптимізаційних методи керування. Результати обчислень наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1.

Результати розрахунку економічної ефективності впровадження інтелектуальної САК температурно-вологісним режимом

	Нейронечітка експертна система керування групами подачі теплоносія	Оптимізована САК з використанням генетичного алгоритму	Оптимізована САК з використанням нечіткої нейромережі
Капітальні витрати, тис. грн.	85,0	95,0	87,0
Експлуатаційні витрати, тис. грн.	165,1	168,3	165,74
Прибуток, тис. грн.	353,45	327,85	331,13
Термін окупності, днів	333,2	360,1	338,8

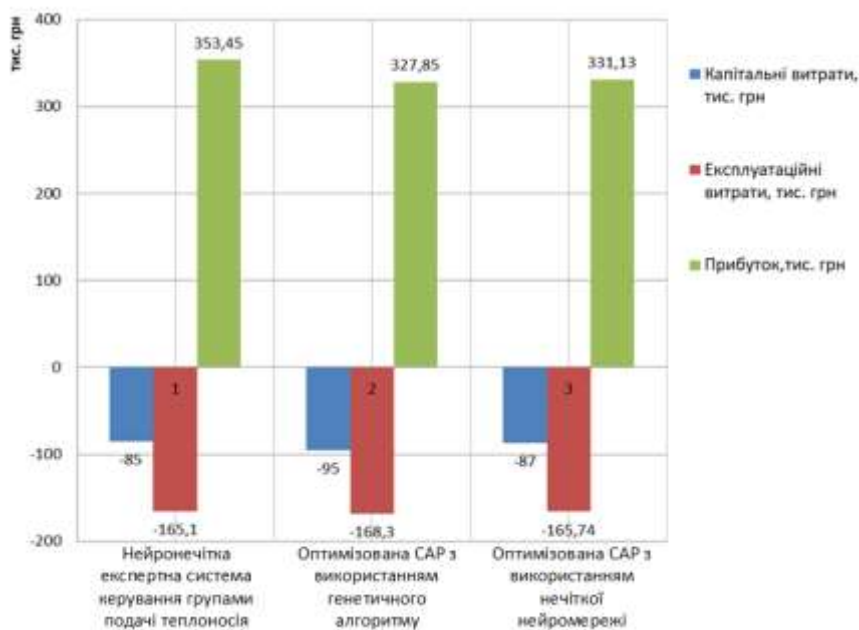


Рис. 6.4. Дослідження економічної ефективності впровадження інтелектуальної САК температурно-вологісним режимом

Отже, робимо наступний висновок:

1. Розроблена методика енергоефективного керування теплицею згідно структури (рис. 6.1), забезпечує безперервний штатний режим функціонування обладнання з адаптацією в режимі реального часу, крім етапу проектування, оскільки періодично поновлюється база даних стану параметрів мікроклімату в теплиці та зовнішніх збурень, отриманих від вимірювальних пристроїв, та відбувається передача даних на входи системи прогнозування, нечіткої логіки та автоматизовані системи керування. Такий метод дозволяє враховувати потенційний вплив зовнішніх збурень на всіх етапах дослідження енергоефективності тепличного господарства.

2. Упровадження запропонованих режимів вирощування овочевої продукції в тепличних комплексах дозволить заощадити природний газ на опалення та електричну енергію на привод електротехнологічних комплексів – до 10%, підвищити точність підтримання агротехнічних параметрів вирощування на 8-10%, що дозволить збільшити прибуток підприємства.

## ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи отримані наступні результати:

1. За результатами досліджень встановлено, що системи опалення й вентиляції мають найбільшу енергозатратність (в середньому за добу на обігрів та вентилявання в теплиці витрачається понад 4,0 тис.м<sup>3</sup> природного газу та майже 1 тис. кВт електроенергії).

2. Аналіз якості перехідних процесів, як реакцію на збурення в автоматичних системах з ПІ-регулятором та вдосконаленою моделлю об'єкта щодо температурно-вологісного режиму показав, що параметри налаштувань регулятора носять змінний характер. Зазначене доводить актуальність розроблення методів пошуку налаштувань регулятора, які адаптуються до зміни умов функціонування системи автоматизації.

3. Для мінімізації енергетичних витрат розроблено модель інтелектуальної нейронечіткої системи автоматизованого керування ввімкненням груп двигунів опалення й вентилявання з урахуванням трьох-зонності тарифу на електроенергію. Така система дозволяє знизити витрату електроенергії при вентиляванні та подачі теплоносія в контури опалення теплиці на 10-15%.

4. На основі використання методів нечіткої логіки та генетичного алгоритму розроблено та досліджено моделі пошуку оптимальних параметрів налаштувань ПІ-регулятора, що адаптуються до зміни умов функціонування системи автоматизації. За лінійним інтегральним показником якості кращу якість перехідного процесу демонструє система, ПІ-регулятор котрої налаштований із використанням генетичного алгоритму на такі показники:  $K_p=74,8$ ,  $K_i=1,8$  (для дотримання параметрів мікроклімату:  $\Theta_{вн}=18^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_{вн}=80\%$ ).

5. Розроблена інтелектуальна система енергоефективного керування параметрами мікроклімату в спорудах закритого ґрунту складається з:

- блоку нейромережевого прогнозування енергетичних витрат;
- блоку підтримки прийняття рішень, де враховуються ціни на енергетичні ресурси;
- блоку оптимізації параметрів регуляторів на основі використання

Упровадження такої системи дозволяє заощадити природний газ на опалення та електричну енергію – до 10 %.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Авдєєва З.К. Когнітивне моделювання для вирішення задач управління малоструктурованими системами [Текст] / З.К. Авдєєва, С.В. Коврига, Д.І. Макаренко // Управління великими системами. – 2007. – № 16. – С. 26 – 39.
2. Аналіз енергетичних характеристик виробничих процесів тепличних комплексів та обґрунтування шляхів підвищення їх енергоефективності. Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика». І. Ю. Якименко, В. П. Лисенко, А. О. Дудник.
3. Заєць Н.А. Експериментально-статистичне дослідження теплиці як об'єкта керування з метою підвищення ресурсоефективності виробництва/ Н.А.Заєць, А.О. Дудник, І.Ю. Якименко. // Енергетика і автоматика. - 2017. - № 4. - С. 200-211.
4. Згуровський М.З. Нелінійний аналіз і управління нескінченномірними системами / М.З. Згуровський, В.С. Мельник. – К.: Наукова думка, 1999. – 630 с.
5. Кононюк А.Ю. К65 Нейроні мережі і генетичні алгоритми – К.:«Корнійчук», . 2008. – 446 с. ISBN 978-966-7599-50  
<http://fs.onu.edu.ua/clients/client11/web11/metod/imem/neyron.pdf>
6. Купер Дж. Ймовірнісні методи аналізу сигналів і систем / Дж. Купер, К. Макгілем. – ЦТІ "Енергетика і електрифікація", 2009 – 376 с.
7. Лисенко В. П. Природні збурення біотехнічних об'єктів, їх моделювання та прогнозування/ В. П. Лисенко, Н.А. Заєць, Б.Л. Головінський, В.М. Штепа – К.: НУБіП України. – 2014. – 112 с.
8. Лисенко В.П. Наукові основи керування електротехнічними комплексами для виробництва сільськогосподарської продукції. - Дисертація д-ра техн. наук: 05.09.03, Кабінет Міністрів України, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. - Київ, 2014.- 370 с.
9. Лисенко В. П. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм / В. П. Лисенко, Н. А. Заєць, А. О. Дудник, В. О. Мірошник. - К.: НУБіП України, 2014. – 341 с.
10. Луцька Н.М. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами: монографія / Н. М. Луцька, А. П. Ладанюк. – К.: Видавництво "ЛіраК", 2015. – 288 с
11. Мартиненко І. І. Автоматика в сільськогосподарському виробництві / І. І. Мартиненко, Б. Л. Головінський, Р. Д. Проценко. – К.: Урожай, 1989. – 168 с.
12. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Лукач В.С. Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства. – К.: Вища школа, 1999. – 201 с.

13. М. Корчемний, В. Федорейко Основи методики розробки інтелектуальних систем управління та прийняття рішень на основі нечіткої логіки в середовищі Matlab // Вісник тернопільського державного технічного університету. 2008. Том 13. № 3 СС. 126-137  
[http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17217/2/TSTUB\\_2008v13n3\\_Korchemny\\_N-Bases\\_of\\_a\\_technique\\_127-137.pdf](http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17217/2/TSTUB_2008v13n3_Korchemny_N-Bases_of_a_technique_127-137.pdf)
14. Решетюк В.М., Мірошник В.О. Типові технологічні процеси і об'єкти виробництва. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2008. – 62 с.
15. Сучасне овочівництво закритого і відкритого ґрунту: Навчальний посібник для навч. закл. I-IV рівнів акредитації за спец. 1310 "Агрономія" / Білогубова Є.Н., Васильєв А.М., Гиль Л.С. та ін. – К.: ОАО "Видавництво Київська Правда", 2014. – 528 с.
16. Фізіологія рослин: підручник для студ. ВНЗ / Н.Д. Альохіна, Ю.В. Балнокін, В.Ф. Гавриленко та ін.; Під. ред. І.П. Єрмакова. Харків: Видавничий центр "Прогрес", 2015. 640 с.
17. Щиренко В.В., П.П. Говоров, І.А. Велит, Р.В. Пилипчук. Джерела світла для вирощування овочів в умовах закритого ґрунту. Навчальний посібник для студентів спеціальності "Світлотехніка та джерела світла". // Тернопіль: Джура, 2011. – 156 с.
18. Якименко І.Ю. Інтелектуальна система енергоефективного керування мікрокліматом у спорудах закритого ґрунту з прогнозуванням енерговитрат: дис. докт. Філософії за спеціальністю 151 / Якименко Інна Юріївна – Київ: 2021. – 196 с.
19. Fuzzy Regulator Synthesis in Microclimate Control System in the Greenhouses. Матеріали XXV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика 2018». Pylypenko O., Dudnyk A., Zaets N., Lysenko V.
20. Dudnyk A. Features of Intelligent Control Systems of Biotechnological Objects // A. Dudnyk/ Proceedings of the International Scientific and Practical Conference // Nowy Sacz, Poland, 2018. - P. 161-162.
21. Information support of the remote nitrogen monitoring system in agricultural crops /Lysenko, V., Opryshko, O., Komarchuk, D., Pasichnyk, N., Zaets, N., Dudnyk, A. // International Journal of Computing. - 2018. – Volume 17, Issue 1. - p.47-51.
22. Lysenko V. P., Dudnyk A. O., Yakymenko I.Yu. Neuro fuzzy control system of electrotechnical complexes in greenhouses. // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології і автоматизація – 2017".
23. Lysenko, V., Opryshko, O., Komarchuk, D., Pasichnyk, N., Zaets, N., Dudnyk, A. Information support of the remote nitrogen monitoring system in agricultural crops. - International Journal of Computing.
24. Shurub, Y. Realization techniques of statistical optimization modes of induction drives /Shurub, Y., Dudnyk, A. /MEES Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems. - 2018. - p. 68-72.

25. Адаптивні та робастні системи – 1. Аналіз і синтез систем керування [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» / НТУУ «КПІ»; уклад. О. А. Жученко, В. С. Цапар. – Електронні текстові дані. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012.
26. Обробка і передача інформації. Сучасні комп'ютерні технології. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://subject.com.ua/article/article2018/152.html>
27. Електронний архів Національного університету харчових технологій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/26587/1/%25D0%25B0.pdf> (дата звернення 11.07.2020). – Назва з екрана
28. Probability Theory with Applications to Science and Engineering – A Series of Informal Lectures [Електронний ресурс]. Е.Т. Jaynes' manuscript entitled: "Probability Theory with Applications to Science and Engineering – A Series of Informal Lectures", 1974. – Режим доступу: <https://cnx.org/contents/hDU5uzaA@2/The-Q-function>
29. Промислові теплиці типу «Venlo» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agrotechnical.net.ua/uk/industrial-greenhouses-of-the-venlo-type/>
30. Вартість електроенергії для підприємств. Як затримати ріст цін? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://inteleng.com.ua/blog-uk/vartist-elektroenergii-dlya-pidpriie/>

## ДОДАТОК А1

Технічні характеристики електродвигунів, що входять до складу транспортної та змішувальних груп системи опалення теплиці

№ п/п	Бойлерна кімната	Потужність, кВт	К-ть, шт.	Ділянка обігріву
	Транспортна група			
1	Циркуляційний насос	2,2	1	Нижній обігрів Е
2	Циркуляційний насос	1,5	2	Верхній обігрів В + Е
3	Циркуляційний насос	7,5	1	Подача С + D
4	Циркуляційний насос	3,0	1	Подача А + В + Е
5	Циркуляційний насос	1,1	2	Верхній обігрів А
6	Циркуляційний насос	0,25	1	Сервісна зона
7	Циркуляційний насос	4	1	Подача з котла
8	Двигун	11,0	1	Подача CO <sub>2</sub>
	Змішувальна група А			
	I-пол. А			
9	Циркуляційний насос	0,37	1	Підґрунтовий обігрів
10	Циркуляційний насос	1,1	1	Рельсовий обігрів
	II – пол. В + Е			
11	Циркуляційний насос	0,75	1	Підґрунтовий обігрів
12	Циркуляційний насос	2,2	1	Рельсовий обігрів
	Змішувальна група С			
	II – пол. С + D			
13	Циркуляційний насос	0,75	1	Нижній обігрів
14	Циркуляційний насос	1,5	2	Верхній обігрів
15	Циркуляційний насос	2,2	1	Рельсовий обігрів С
16	Циркуляційний насос	2,2	1	Рельсовий обігрів D

**ДОДАТОК А2**

Технічні характеристики електродвигунів, що входять до складу системи підготовки живильного зрошення

№ п/п	Система підготовки живильного зрошення	Потужність, кВт	К-ть, Шт.	Призначення
	<i>Вид двигуна</i>			
1	Циркуляційний насос	7,5	3	Подача живильного розчину до зрошувальної системи
2	Циркуляційний насос	1,4	2	Подача мінеральних добрив в баки-змішувачі
3	Циркуляційний насос	2,2	1	Подача води до в баки-змішувачі
4	Циркуляційний насос	5,0	1	Подача води
5	Циркуляційний насос	7,5	2	Підготовка маточного розчину

**ДОДАТОК А3**

Технічні характеристики засобів, що входять до складу системи вентиляції

№ п/п	<i>Вид двигуна</i>	Потужність, кВт	К-ть, шт	Призначення
1	Мотор-редуктор Ridder RW240	2,3	8	Відкриття/закриття фрамуг
2	Вентилятор	0,12	10	Циркуляція повітря в шатрі теплиці

## ДОДАТОК А4

## Технічні характеристики зашторювального екрану

Вид екрану	Використовувана тканина	Характеристики тканини
Горизонтальний	SLS 10 ULTRA Plus	Коеф. світлопроникності в сонячну погоду 88% Коеф. світлопроникності в пахмурну погоду 81% Коеф. енергозбереження 43 %

## Технічні характеристики двигунів, що входять до складу зашторювання

№ п/п		Потужність, кВт	К-ть, шт	Призначення
	<i>Вид двигуна</i>			
1	Мотор-редуктор	2,3	4	Підіймання/опускання штор

**Додаток Б**  
**Навчальний набір параметрів налаштувань регулятора , що складають генотип моделі генетичного алгоритму**

<i>По каналу зміни температури</i>					<i>По каналу зміни вологості</i>				
$\Theta_{in\_zad}$	$\Theta_{out}$	$\Theta_{in}$	Kp	Ki	$f_{in\_zad}$	$f_{out}$	$f_{in}$	Kp	Ki
18	16	18	60,0	3,0	80	60	80	45,0	1,5
18	15	18	53,0	6,0	80	55	80	50,0	1,5
18	13	18	50,0	3,0	80	45	80	60,0	2,0
18	10	18	75,0	3,0	80	40	80	60,0	2,0
18	8	18	120,0	3,0	80	35	80	60,0	2,0
18	6	18	145,0	3,0	80	30	80	65,0	2,0
18	3	18	280,0	8,0	80	25	80	60,0	2,0
18	0	18	290,0	8,0	80	20	80	62,0	1,8
18	-2	18	320,0	10,0	80	15	80	80,0	2,0
18	-8	18	400,0	12,0	80	10	80	90,0	2,0
18	-12,1	18	435,0	7,0	80	72,5	80	76,5	2,6
18	-13,1	18	480,0	9,0	80	71,9	80	85,0	2,6
18	-11,2	18	600,0	13,0	80	74,2	80	102,0	3,4
18	-9,1	18	435,0	7,0	80	78,2	80	102,0	3,4
18	-5,2	18	480,0	5,0	80	81,4	80	102,0	3,4
18	-5,7	18	600,0	6,0	80	84,9	80	110,5	3,4
18	-5,3	18	435,0	8,0	80	79,5	80	102,0	3,4
18	-3,5	18	480,0	11,0	80	82,9	80	105,4	3,1
18	0,4	18	600,0	13,2	80	83,5	80	136,0	3,4
18	-1,2	18	567,0	7,7	80	84,9	80	153,0	3,4
18	4,1	18	75,0	5,5	80	85,3	80	81,0	2,7
18	3,5	18	120,0	6,6	80	90,3	80	90,0	2,7
18	6,2	18	145,0	36,0	80	87,7	80	108,0	3,6
18	5,9	18	183,3	6,0	80	76,1	80	108,0	3,6
18	6	18	218,3	6,0	80	84,7	80	108,0	3,6
18	6	18	253,3	7,0	80	85,3	80	117,0	3,6
18	1,7	18	112,5	4,0	80	79,7	80	108,0	3,6
18	9,5	18	180,0	2,7	80	88,4	80	111,6	3,2
18	3,8	18	217,5	5,4	80	66,9	80	144,0	3,6
18	2,5	18	275,0	2,7	80	87,8	80	162,0	3,6
18	8,6	18	327,5	2,7	80	85,1	80	85,5	2,7
18	7,5	18	380,0	2,7	80	79	80	95,0	2,9
18	8,8	18	72,0	2,7	80	73	80	114,0	3,8

## Продовження таблиці. Додаток Б

18	6,8	18	63,6	7,2	80	83,3	80	114,0	3,8
18	8,3	18	60,0	7,2	80	71	80	114,0	3,8
18	10,1	18	90,0	9,0	80	78,2	80	123,5	3,8
18	9,2	18	84,0	8,0	80	74,3	80	114,0	3,8
18	10,1	18	89,0	6,3	80	87,3	80	117,8	3,4
18	9,7	18	94,1	8,1	80	87,3	80	152,0	3,8
18	11	18	99,1	11,7	80	83	80	171,0	3,8
18	5,9	18	93,7	6,3	80	79,1	80	40,5	1,4
18	9,4	18	98,3	4,5	80	75,8	80	45,0	1,4
18	10,7	18	64,8	5,4	80	77,7	80	54,0	1,8
18	7,1	18	57,2	7,2	80	84,1	80	54,0	1,8
18	7,5	18	54,0	9,9	80	75,6	80	54,0	1,8
18	10,4	18	81,0	11,9	80	86	80	58,5	1,8
18	9,9	18	75,6	6,9	80	71,3	80	54,0	1,8
18	9,9	18	80,1	5,0	80	69,8	80	55,8	1,6
18	9,2	18	84,7	5,9	80	82,7	80	72,0	1,8
18	5,9	18	99,1	32,4	80	85,4	80	81,0	1,8
18	4,8	18	104,2	5,4	80	88,2	80	42,8	1,4
18	8	18	109,2	5,4	80	88,2	80	47,5	1,4
18	8,9	18	56,0	6,3	80	74,4	80	57,0	1,9
18	15,5	18	30,0	3,6	80	65,6	80	57,0	1,9
18	7,9	18	62,3	6,2	80	86,8	80	57,0	1,9
18	10,6	18	65,9	4,5	80	56,3	80	61,8	1,9
18	6,2	18	69,4	5,3	80	80,2	80	57,0	1,9
18	5,1	18	65,6	29,2	80	84,4	80	58,9	1,7
18	7,8	18	68,8	4,9	80	74	80	76,0	1,9
18	13,3	18	45,4	4,9	80	56,5	80	85,5	1,9
18	12,8	18	40,1	5,7	80	74,7	80	42,8	1,4
18	9,8	18	56,1	3,6	80	64,6	80	55,0	1,7
18	9,8	18	59,3	6,9	80	80,6	80	66,0	2,2
18	10,3	18	62,4	4,9	80	85,3	80	66,0	2,2
18	19,2	18	59,1	5,9	80	54,5	80	66,0	2,2
18	21,1	18	61,9	32,1	80	50,8	80	71,5	2,2
18	16,7	18	40,8	5,3	80	59,9	80	66,0	2,2
18	14,9	18	36,1	5,3	80	66,8	80	68,2	2,0
18	16,9	18	72,9	6,2	80	68,4	80	88,0	2,2

## ДОДАТОК В

Енергоефективні навчальні набори даних для нечіткої нейромережі

По каналу регулювання температури повітря в середині теплиці										
Вхідне значення	Значення, яке буде забезпечено на виході	Традиційний метод			Нечіткий висновок			Генетичний алгоритм		
		Перерегулювання	Час регулювання, Т	Коливальність, N	Перерегулювання	Час регулювання, Т	Коливальність, N	Перерегулювання	Час регулювання, Т	Коливальність, N
16,8	16,9	30	360,0	2	10	202,5	0	0	126,0	0
17,3	17,3	33	400,0	2	11	225,0	0	0	140,0	1
17,7	17,8	31	360,9	3	11	224,9	1	1	126,9	1
18,2	18,3	33	390,0	2	11	219,4	0	0	136,5	0
18,7	18,8	33	381,0	3	12	241,3	1	1	134,0	1
19,3	19,2	34	391,0	3	11	224,6	1	1	137,5	1
19,5	19,6	33	362,7	5	11	213,5	3	3	128,7	3
19,7	19,7	34	381,9	4	9	192,5	2	2	134,9	2
19,8	19,7	34	401,0	3	11	230,3	1	1	141,0	2
20,2	20,2	35	392,0	4	10	198,1	2	2	138,5	2
20,6	20,7	35	382,9	5	11	213,8	3	3	135,9	3
20,7	20,7	36	421,1	3	10	208,4	1	1	148,1	2
21,2	21,2	35	392,9	5	11	223,7	3	3	139,4	3
21,7	21,8	37	422,1	4	12	235,3	2	2	149,1	3

**Додаток В**  
Продовження таблиці

22,2	22,3	37	413,1	5	10	193,2	3	3	146,6	4
22,8	22,8	39	442,2	4	11	219,2	2	3	156,2	3
22,8	22,8	38	423,2	5	9	187,7	3	3	150,2	4
23,1	23,2	40	443,3	6	10	203,3	3	4	157,3	4
<b>По каналу регулювання вологості повітря всередині теплиці</b>										
56,4	56,5	11	243,0	0	5	283,5	0	0	55,8	0
57,3	57,4	12	243,9	1	5	284,4	1	1	56,7	1
58,2	58,3	13	244,8	2	6	285,3	2	2	57,6	2
59,6	59,7	12	256,5	0	5	299,3	0	0	58,9	0
60,5	60,6	13	257,5	1	6	300,2	1	1	59,9	1
61,1	61,3	12	263,3	0	5	307,1	0	0	60,5	0
62,1	62,2	13	264,2	1	6	308,1	1	1	61,4	1
62,7	62,8	13	270,0	0	5	315,0	0	0	62,0	0
63,7	63,8	14	271,0	1	6	316,0	1	1	63,0	1
64,3	64,4	13	276,8	0	5	322,9	0	0	63,6	0
64,7	64,8	15	272,0	2	7	317,0	2	2	64,0	2
65,3	65,4	14	277,8	1	6	323,9	1	1	64,6	1