

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 004.738.5:004.942:631.544:551.583:631.3

**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)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**02.06.-КМР.1667"С".2024.09.26.018.ПЗ**

на тему **«РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЦІ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТ-РЕЧЕЙ»**

**Спеціальність:**

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

**Освітньо-наукова програма:**

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

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_  
(підпис)

В.В. Іващук, д.т.н., доцент  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав \_\_\_\_\_  
(підпис)

Є.В. Якушко  
(П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Т.І. Лендел, к.т.н., доцент  
(П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

**КИЇВ-2025**

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

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

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

**Якушку Єгору Владиславовичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

**Спеціальність:**

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

**Освітньо-наукова програма:**

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

**Тема магістерської роботи:**

**«РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ  
ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В ТЕПЛИЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТ-РЕЧЕЙ»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 року №1667«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.05.2025 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 технологічного процесу вирощування овочів у промисловій теплиці як об'єкта автоматизації.
2. Дослідження промислової теплиці для вирощування овочів як об'єкта автоматичного керування.
3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань. визначення показників якості роботи цифрової системи керування.
4. Методи контролю параметрів мікроклімату теплиць.
5. Реалізація методів та засобів для контролю параметрів мікроклімату теплиць.

**Дата видачі завдання «27» вересня 2024 року**

**Керівник магістерської роботи**

\_\_\_\_\_ (Підпис)

Лендел Т.І.  
(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_ (Підпис)

Якушко Є.В.  
(Прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Вступ	5
.....	
РОЗДІЛ 1. Аналіз технологічного процесу вирощування овочів у промисловій теплиці як об'єкта автоматизації	7
.....	
1.1. Вплив факторів навколишнього середовища на зростання і розвиток рослин у теплиці	7
.....	
1.2. Класифікація теплиць. Системи технологічного та інженерного обладнання для створення мікроклімату у промисловій теплиці	14
.....	
1.3. Енергозберігаючі технології у тепличному господарстві	24
.....	
1.4. Сучасні енергозберігаючі системи зашторювання теплиць	27
.....	
1.5. Концепція «Розумна теплиця»	29
.....	
1.6. Інтернет речей в сільському господарстві	32
.....	
РОЗДІЛ 2. Дослідження промислової теплиці для вирощування овочів як об'єкта автоматичного керування	34
.....	
2.1. Аналіз відомих математичних моделей стану мікроклімату теплиць	34
.....	
2.2. Розробка математичної моделі технологічного процесу, дослідження її характеристик і визначення передатної функції	39
.....	
2.3. Функціональна схема автоматизації системи керування параметрами мікроклімату в теплиці	47
.....	
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань. визначення показників якості роботи цифрової системи керування	51
.....	
3.1. Вибір алгоритму керування	51
3.2. Реалізація алгоритму керування	56
3.3. Розробка цифрової системи керування	56
3.4. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК	57
3.5. Дослідження цифрового регулятора	59
3.6. Дослідження цифрової системи на стійкість та якість	62

РОЗДІЛ 4. Методи контролю параметрів мікроклімату теплиць	64
.....	
4.1. Аналіз існуючих систем для контролю параметрів мікроклімату теплиць	64
.....	
4.2. Дистанційний моніторинг параметрів мікроклімату теплиць на основі технології "Інтернет речей"	67
.....	
4.3. Методи та засоби для вимірювання параметрів мікроклімату теплиць	68
.....	
4.4. Реалізація системи керування з технологією інтернет речей	70
.....	
4.5. Програмне забезпечення системи для контролю параметрів мікроклімату теплиці	73
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	
Висновки	82
.....	
Література	83
.....	
Додатки	86
.....	

## ВСТУП

*Актуальність теми.* У сучасному світі все більше уваги приділяється якості людського життя. Це поняття включає в себе таку важливу сферу, як харчування. Воно відіграє важливу роль для забезпечення комфортного життя людини та загалом має вагомий вплив на суспільство. Сільське господарство є одним із основних способів забезпечення людини їжею.

Все більше технологій з'являється для розвитку сільського господарства. Це особливо відчутно в рослинництві, яке ведеться зі застосуванням тепличних комплексів. Для цієї сфери розробляються нові системи моніторингу процесу вирощування рослин та устаткування для збору урожаю.

Сучасні тепличні господарства характеризуються використанням великих обсягів енергетичних ресурсів, які необхідні для підтримки процесу вирощування овочевих культур. Висока вартість енергоресурсів формує умови для створення спеціалізованих систем, які спрямовані на мінімізацію енерговитрат. Існуючі системи використовують найпростіші алгоритми, які не спроможні забезпечити високий рівень ресурсо- та енергоефективності.

Актуальною задачею є зменшення вартості таких систем та підвищення зручності їх застосування для того, щоб вони могли використовуватись не лише в промислових масштабах виробниками аграрної продукції, але і приватними домогосподарствами.

*Мета і завдання дослідження.* Метою роботи є підвищення ефективності функціонування теплиць завдяки впровадженню дистанційних методів контролю параметрів мікроклімату.

### *Задачі дослідження:*

– провести огляд літературних джерел та проаналізувати методи та засоби, які застосовуються для контролю параметрів мікроклімату теплиць, виділити питання, які потребують удосконалення;

– удосконалити метод контролю параметрів мікроклімату теплиць на основі використання технологій *інтернету речей* з можливістю передачі даних на віддалену IoT платформу;

– розробити апаратне забезпечення системи для дистанційного моніторингу параметрів мікроклімату теплиць;

– розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для комп'ютеризованої системи енергоефективного контролю параметрів мікроклімату теплиць.

**Об'єкт дослідження** – процес моніторингу і керування параметрами мікроклімату теплиць.

**Предмет дослідження** – зв'язки і закономірності апаратно-програмних методів і засобів контролю параметрів мікроклімату теплиць із якістю створення мікрокліматичного режиму.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ ОВОЧІВ У ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

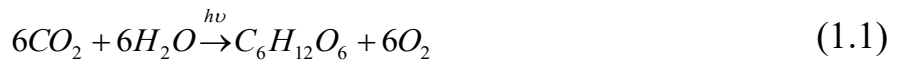
#### 1.1. Вплив факторів навколишнього середовища на зростання і розвиток рослин у теплиці

Рослини, що вирощуються у теплиці, по своїй суті є живими організмами. На рослину в теплиці діє складний комплекс факторів, які можна умовно поділити на чотири групи:

- біотичні фактори (такі, що залежать тільки від рослини): розвиток (реакція на живлення); фотоперіодична реакція; ріст; чисельність та густота садіння; біотичний потенціал; швидкість розмноження; родючість; урожайність; якість урожаю; старіння та стійкість до патогенів і шкідників;
- абіотичні фактори (такі, що не залежать від рослини): метеорологічні фактори (магнетизм, гравітація, сонячна радіація, опади, швидкість вітру) параметри мікроклімату в культиваційній споруді (температура та відносна вологість повітря, концентрація CO<sub>2</sub> для забезпечення фотосинтезу, ґрунти або субстрати, гідроаeropоніка, досвічування рослин, повітряний режим);
- географічний фактор (кліматична зона; широта; висота над рівнем моря);
- антропогенні фактори (зумовлені діяльністю людини): автоматичне керування параметрами мікроклімату; агротехніка; хімічний захист рослин; біологічний захист рослин; сорти та гібриди; зберігання; транспортування; маркетинг і торгівля.

*Фотосинтез* – процес перетворення сонячної енергії в хімічну, яка накопичується рослинами у вигляді поживних органічних речовин.

Підсумковим рівнянням, що відображає сумарний процес фотосинтезу, є наступне:



де  $h\nu$  - промениста енергія Сонця (кванти світла).

Інтенсивність фотосинтезу, в свою чергу, залежить від властивостей культивованої рослини, а також від рівня забезпеченості рослин умовами зовнішнього середовища: опромінення фотосинтетично активною радіацією (ФАР), температури та вологості ґрунту та повітря, концентрації  $CO_2$  в повітрі, режиму мінерального живлення.

Розвиток рослин забезпечується сукупністю ґрунтових та атмосферних умов у відповідності із законом "мінімум – оптимум – максимум": якщо хоча б один із факторів буде в недостатній кількості, то життєдіяльність рослин та врожай будуть знаходитись у прямій залежності від цього фактора [3].

**Температурний режим** є одним з найважливіших факторів управління зростанням та плодоношенням рослини. Температура визначає інтенсивність таких процесів рослин, як фотосинтез, дихання, транспірація, переміщення речовин, метаболізм (сукупність процесів обміну речовин у живому організмі), зростання та плодоношення. Температурний оптимум для фотосинтезу у теплолюбних овочевих культур знаходиться між 20 та 35°C. До 20°C процес відбувається повільно, потім посилюється, а вище 35°C уповільнюється. При температурах вище 45°C відбувається пригнічення рослин (рис. 1.1) [27].

Температура, при якій рослини ростуть і розвиваються найбільш інтенсивно, є оптимальною. Відхилення від неї сповільнює ріст і розвиток рослин або згубно діє на них.

Оптимальна температура сприяє активному процесу фотосинтезу. Коливання її негативно впливає на ріст і розвиток рослин і часто призводить до ураження їх хворобами. Так, при різких змінах температури огірок уражується борошнистою росою, пероноспорозом, помідор – фітофторозом. З підвищенням температури посилюються процеси асиміляції і синтезу органічних речовин, але одночасно підвищується інтенсивність дихання. При

різкому зниженні температури в рослинах порушуються процеси обміну речовин, які призводять до їх загибелі.

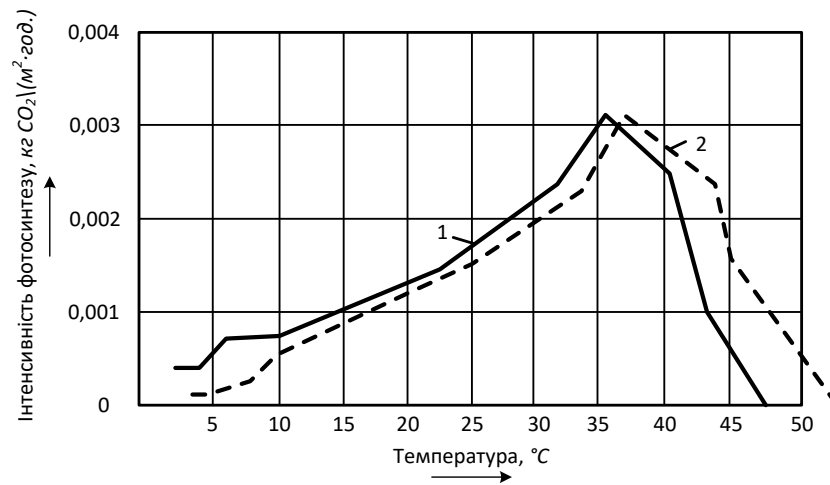


Рис. 1.1. Залежність інтенсивності фотосинтезу від температури повітря (за Лундегордом): 1 – томат; 2 – огірок

Вимогливість овочевих культур до тепла залежить від їх *біологічних особливостей* та *географічного походження*, сорту та умов вирощування, а також неоднакова також у різні *фази росту* [3].

Зміна температури рослини у повітряному та кореновому середовищі в теплиці можуть відбуватися у різних напрямках. Так, при більш високих температурах ґрунту у рослин посилюється надходження води, пришвидшується переміщення фосфору та кальцію і може мати місце порушення водного режиму і живлення, поява опіків, розтріскування стеблин та плодів; при температурах ґрунту нижче оптимуму утруднюється надходження води та елементів живлення. При швидкому збільшенні інтенсивності сонячної радіації та дефіциті вологи у повітрі витрата води листовою масою не встигає компенсуватися кореневою системою навіть при достатньо зволоженому ґрунті і тоді спостерігається явище фізіологічної сухості.

*Денні температури* в культиваційному приміщенні встановлюються в залежності від інтенсивності потоку сонячної радіації, а рівень *нічних* – в залежності від освітленості попереднього дня. Зазвичай режими температури диференціюють в залежності від погоди: один для сонячної, інший – для

похмурої. При наявності автоматичного обладнання задають визначені для видів і сортів температурні режими, які безперервно змінюються в залежності від рівня освітленості.

*Нічні температури* відіграють важливу роль у розвитку овочевих культур. Низька нічна температура (17-18°C) посилює зростання коренів та листової поверхні, призводить до утворення більшої кількості зав'язів, але налив відбувається повільно і в усіх плодів одночасно, на шкоду якості. Відносно висока температура (21-22°C) дає меншу кількість зав'язів, але забезпечує їх швидкий налив та високу якість. Тому температуру періодично змінюють [18].

***Вологісний режим теплиці.*** Основним джерелом вологи в теплиці є поливна вода. Вона витрачається рослинами на транспірацію  $G_{II}^P$ , випаровується  $G_{II}^F$  з ґрунту, видалається через дренажну систему  $G_{др}$ :

$$G = G_{II}^P + G_{II}^F + G_{др} \quad (1.2)$$

Одна доросла рослина огірка в теплиці випаровує в процесі транспірації щоденно в період плодоношення 1,2...1,5л води. Потреба рослин томату у воді протягом усього періоду вегетації складає 800...900 л/м<sup>2</sup>.

При високій сонячній радіації поряд із вегетаційними поливами використовуються додаткові поливи в середині дня. Норма поливу складає 0,5...1,5л/м<sup>2</sup> [17].

Функції дощування та підтримки вологісного режиму рослин в теплиці може виконувати система водоаерозольного охолодження. Для видалення надлишку вологи з повітря теплиці слід використовувати провітрювання, активну аерацію або механічну вентиляцію.

***Повітряно-газовий та радіаційний режими в теплиці*** мають велике значення для зростання та розвитку рослин, які в процесі газообміну поглинають або виділяють вуглекислий газ CO<sub>2</sub>, кисень O<sub>2</sub> та водяну пару. Якщо перенос газів, що оточують рослину, з повітряним потоком є незначним, то нестача вуглекислого газу у поверхні листя утруднює фотосинтез, а повільне виділення водяної пари обмежують транспірацію, що призводить до значного підвищення температури листя. Значні коливання концентрації CO<sub>2</sub> обумовлені

газообміном між рослиною і повітрям внаслідок фотосинтезу та дихання та повітрообміном в теплиці [16].

Дефіциту  $\text{CO}_2$  в теплиці запобігають за допомогою систем підживлення рослин вуглекислим газом, який отримують при роботі водогрійних котлів у поєднанні із вентиляторами системи рециркуляції повітря у теплиці.

**Світловий режим.** Тільки при світлі в зеленому листі здійснюється найважливіший фізіологічний процес – фотосинтез, у процесі якого утворюється близько 95% органічної маси врожаю і акумулюється уся енергія, що накопичується в організмі. Як характеристику світла використовують його інтенсивність ( $\text{Вт/м}^2$ ) або освітленість (лк).

На початку розвитку рослин, коли площа листя невелика, підвищення темпу фотосинтезу відбувається при більш низьких рівнях освітленості, ніж при розвиненому листовому покриві дорослих рослин. Тому на загальному слабкому світловому фоні навіть незначне додаткове освітлення – досвічування розсади – дає відчутний ефект. У літній час при високому загальному світловому фоні його невелике зниження не спричиняє значного впливу на інтенсивність фотосинтезу.

У той же час, невелике зниження світлового рівня, особливо у червоній частині спектру, дозволяє знизити перегрів рослин, збалансувати тепловий та водяний режими, і тим самим не просто зберегти вихідний, але й отримати більш високий рівень інтенсивності фотосинтезу. У зв'язку з цим у літній час доцільним є використання *спеціальних захисних екранів*.

Спектральний склад світла також є надзвичайно важливим для рослин, а саме частина оптичного опромінення (380–710 нм) (рис. 1.2), що сприймається людським оком як світло. Її часто називають фотосинтетично активною радіацією (ФАР).

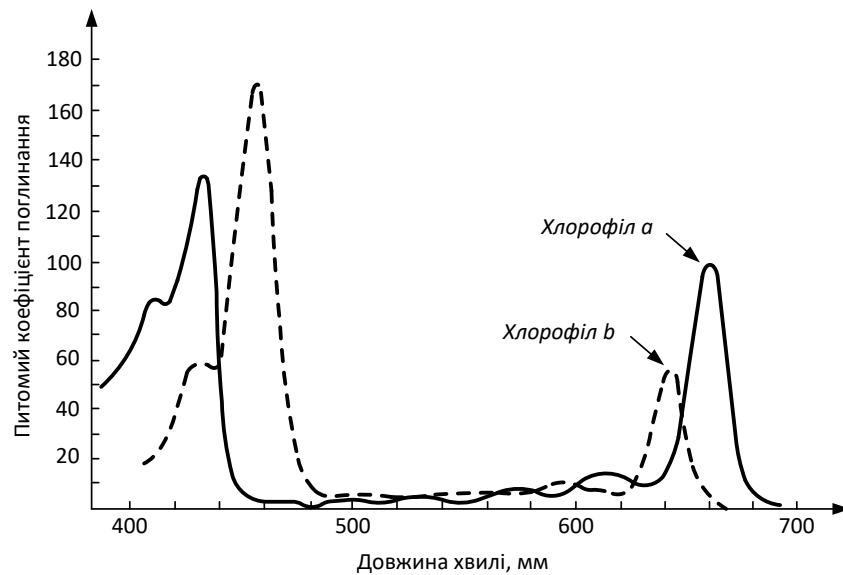


Рис. 1.2. Спектральна крива фотосинтезу

Ультрафіолетові промені (довжина хвиль – 380-400 нм) сприятливі для розсади і небажані у період активної вегетації та плодоношення. Помаранчево-червоні промені (595-750 нм) сприяють інтенсивному накопиченню біомаси та ранньому цвітінню. При перевазі у спектрі синьо-фіолетових променів (400-490 нм) активізуються процеси плодоношення. Жовто-зелені промені найменше поглинаються рослинами, під їх впливом збільшується витрата енергії на дихання. Найменш сприятливою для рослин є інфрачервона радіація (750 нм), що викликає перегрів та висушування рослин [23].

Мінімальне значення радіаційних параметрів, при яких можливий нормальний розвиток тепличних культур, наведено в таблиці 1.1., а у таблиці 1.3 наведені допустимі граничні значення параметрів середовища при різній освітленості.

Таблиця 1.1.

Значення радіаційних параметрів для розвитку огірків і томатів [23]

Культура	Освітленість, кЛк	Інтенсивність ФАР, $\frac{МДж}{м^2 \cdot год.}$	Приток ФАР за сонячний день
Огірок	6	0,12	3,6
Томат	8	0,16	7,8

Нормативні значення параметрів мікроклімату в теплиці при вирощуванні різних овочів наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

## Технологічні параметри мікроклімату в теплиці [19]

Параметр середовища	Од. вимір.	Вирощування розсади	Вирощування рослин	Плодоношення
<b>Культура – томати</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
<b>Культура – огірок партенокарпічного сорту</b>				
Температура повітря:	°C			
- нічна		20...22	20...22	18...20
- денна (похмуро)		22...24	22...24	22...24
- денна (сонячно)		22...24	24...26	26...28
Відносна вологість повітря	%			
- нічна		65...75	60...70	75...80
- денна (похмуро)		65...75	50...60	70...75
- денна (сонячно)		65...75	50...60	65...75
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...30	20...40	20...50
- нижнього		-	10...20	10...20
Рухомість повітря	м/с	0,1...0,5	0,1...0,5	0,1...0,5

Допустимі граничні параметри середовища в теплиці  
при різній освітленості [19]

Параметр	Од. вим.	Значення параметрів середовища				
		0...10	10...20	20...30	30...40	40...50
Освітленість	кЛк	0...10	10...20	20...30	30...40	40...50
Температура:	°С					
- 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. Класифікація теплиць. Системи технологічного та інженерного обладнання для створення мікроклімату у промисловій теплиці

Теплиці класифікують (рис. 1.3) за експлуатаційними і будівельними ознаками: призначенням, сезонністю, технологіями вирощування в них рослин, видами світлопроникного огороження, способами обігріву, конструктивно-планувальними вирішеннями, профілями поперечного перерізу.

Блокові теплиці належать до багатопрогонових, а двосхилі – до однопрогонових. Однопрогонові теплиці, ще названі ангарними, вони не мають внутрішніх опор. Їхнє будівництво обходиться дорожче, але, на відміну від блокових, вони витримують значні снігові навантаження, а їхнє огороження забезпечує кращу освітленість рослин. Багатопрогонова блокова теплиця в порівнянні з ангарною характеризується меншим коефіцієнтом огороження, що забезпечує зниження витрат засобів і матеріалів на одиницю площі при будівництві, та економію тепла за рахунок зменшення тепловтрат.

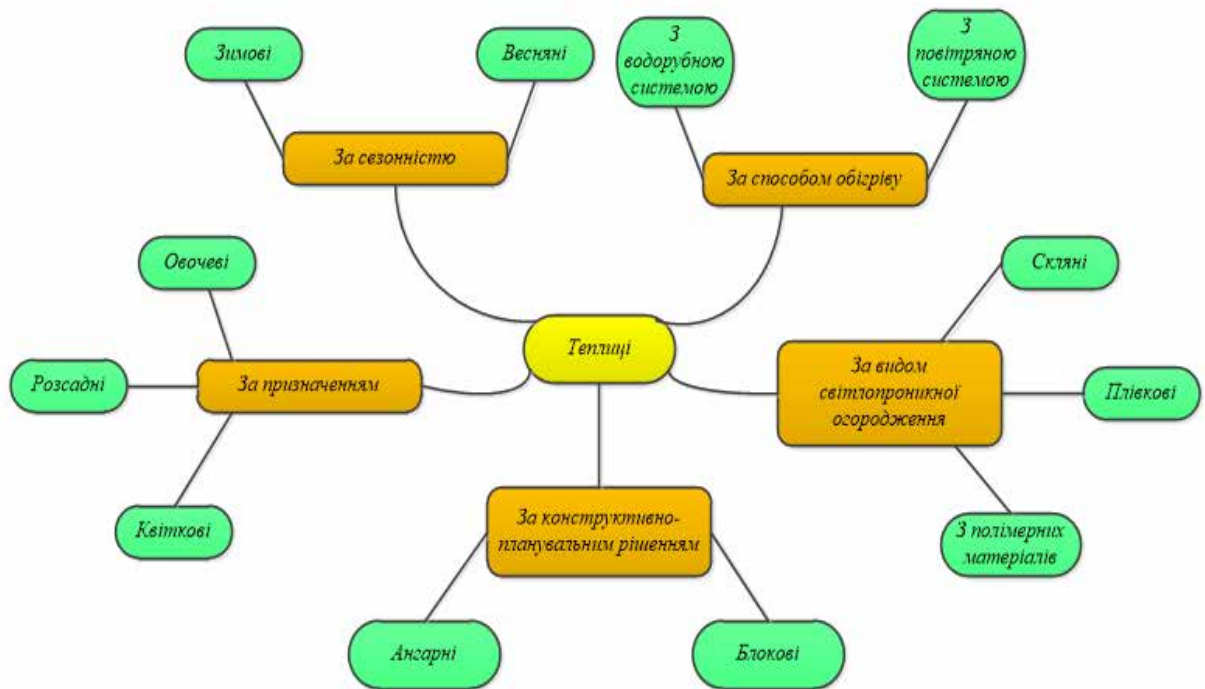


Рис. 1.3. Класифікація теплиць

При тепличному методі вирощування використовується частина зовнішніх кліматичних умов (температура повітря в тієї чи іншої місцевості + природне сонячне світло) і частина умов, штучно створених і необхідних для нормального розвитку рослин (штучне досвічування для подовження сонячного дня + опалення приміщення). Решта параметрів середовища, що необхідні для розвитку рослин, формуються штучно.

Основою тепличних споруд є так званий "холодний будинок", до складу якого входять сталеві оцинковані несучі конструкції, алюмінієві конструкції, резинові ущільнювачі, метизи та скло. "Холодний будинок" виконує цілий ряд функцій, що забезпечують захист рослин в умовах несприятливих кліматичних факторів, мікроклімат, встановлення і роботу інженерних систем, надійну експлуатацію всієї споруди в цілому на протязі всього періоду експлуатації. Вартість "холодного будинку" складає приблизно 25-30% від вартості будівництва теплиці "під ключ" [25].

Сучасна промислова теплиця обладнується наступними системами інженерно-технологічного обладнання для створення мікроклімату:

- система опалення та система підживлення рослин вуглекислим газом;
- система вентиляції;
- система водопостачання та каналізації;
- система рециркуляції повітря;
- система електродосвічування (при вирощуванні томату – тільки в розсадному відділенні);
- система електрообладнання та електроосвітлення;
- автоматизованою системою управління мікрокліматом.

***Система опалення та підживлення рослин вуглекислим газом.***

Найбільш поширена з існуючих систем опалення теплиць – *трубна*, теплоносієм в якій є гаряча вода. Рівномірності температурного поля досягають розподілом і розміщенням труб обігріву по периметру всередині теплиці у відповідних зонах (*підлотковий, верхній (шатровий), нижній (основний) технологічний обігрів*), в підґрунтовому або підкореновому середовищі, та встановленням у верхній частині теплиці додаткових вентиляторів невеликої потужності для створення руху повітря з технологічно допустимою швидкістю. Додатковим засобом є влаштування бокового огородження із поліетиленової плівки або горизонтальної штори паралельно покрівельному огородженню всередині теплиці.

Призначення контурів обігріву (рис. 1.4):

- *контур підлоткового обігріву* розташовується у площині верхніх горизонтальних конструкцій і призначений для попередження утворення намерзання на склі даху теплиці та танення снігу у верхніх жолобах;
- *контур підпокрівельного технологічного обігріву* (шатровий) призначений для регулювання температурного режиму у верхній частині теплиці для виключення проникнення холодного повітря в зону рослин при різкому зниженні температури навколишнього середовища;

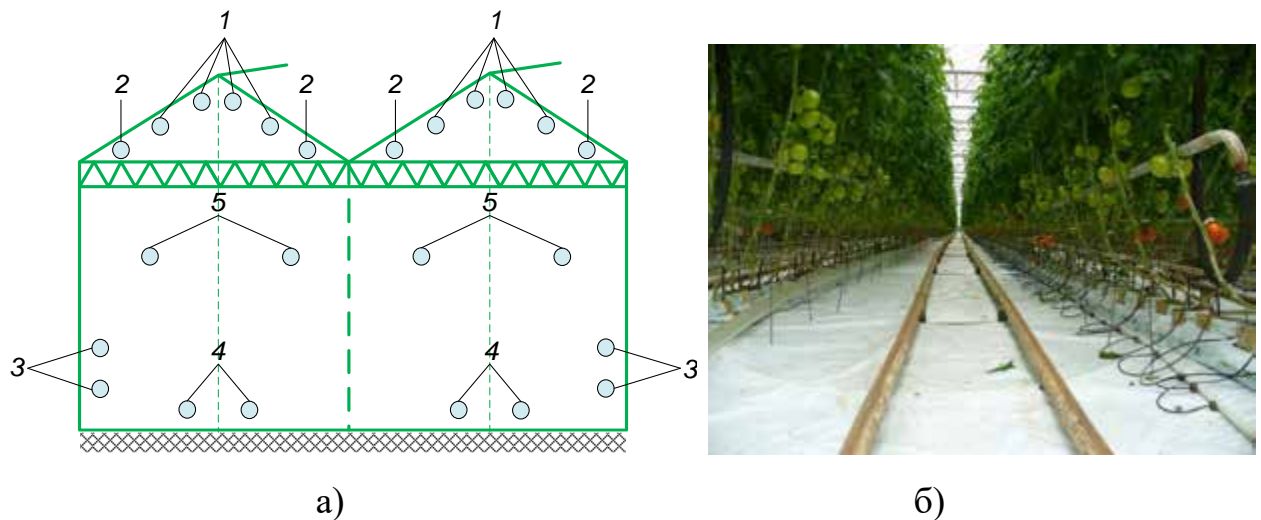


Рис. 1.4. Переріз секцій теплиці блочного типу

- а) 1 – підпокрівельний обігрів; 2 – підлотковий обігрів; 3 – торцевий обігрів; 4 – контур нижнього технологічного обігріву; 5 – контур верхнього технологічного обігріву;
- б) труби нижнього технологічного обігріву в теплиці для вирощування томатів (ПАТ Комбінат "Тепличний")

- *контур верхнього та нижнього технологічного обігріву* – основні регулюючі контури для створення теплового режиму в зоні росту рослини. Труби нижнього обігріву використовуються також в якості направляючих конструкцій при переміщенні возиків для збору продукції (рис. 1.4, б).

Вузол управління (рис. 1.5) розміщується в з'єднувальному коридорі і складається зі змішувальних клапанів, циркуляційних насосів, трубопроводів і арматури. Контурні системи обігріву працюють в автоматичному режимі від датчиків температури. Кожен вузол обслуговує одну теплицю, працює в автономному незалежному режимі управління, при цьому в теплицях блоку паралельно можуть забезпечувати однакові задані параметри мікроклімату. Розділення опалення блоку по теплицям покращує керованість систем обігріву у кожній, забезпечує підтримку заданих параметрів мікроклімату в межах допустимого відхилення ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ).

Системи обігріву виконуються зі сталевих труб  $\text{Ø}51 \times 2,5$ . Гаряча вода з розрахунковими параметрами  $95\text{-}60^{\circ}\text{C}$  подається від котельної.



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд вузла управління системами обігріву

Для підігріву води для системи опалення теплиць використовуються трьохходові водогрійні котли Viessmann типу Vitomax 200 WS (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Водогрійний котел Viessmann типу Vitomax 200 WS  
(ПАТ Комбінат "Тепличний")

Цей тип водогрійних котлів, пальник і вся система опалення спроектовані спеціально для експлуатації у промислових теплицях. Конструкція первинної камери згорання пальника забезпечує низький викид NO та CO, що дозволяє подавати вихідні гази до теплиці для підживлення рослин CO<sub>2</sub>. У випускній системі котла встановлюється конденсор димових газів (економайзер), який використовується для охолодження вихідних димових газів з 120 до 50-60°C. Вихідні гази – CO<sub>2</sub> – відбирають безпосередньо

у конденсора і направляють безпосередньо до рослин, що дозволяє отримати додаткове тепло для опалення внутрішнього простору теплиці. Конструкція такого типу котлів зображена на рис. 1.7, де чітко виділені три незалежних газоходи для руху робочих газів. Перший газохід – циліндрична камера згоряння (позиція 1), розташована в нижній частині котла та охоплюється водяною сорочкою. Продукти згоряння, що виникають в роботі пальника, переміщуються по жаровій трубі до задньої частини камери згорання і далі до жарових труб (позиція 2) другого газоходу котлового блоку. Після повернення газів, що відводяться, в передню частину котла, знову змінюється напрямок їх потоку. Жаровими трубами третього газоходу (позиція 3) вони рухаються до камери збору продуктів згорання котла (позиція 4).

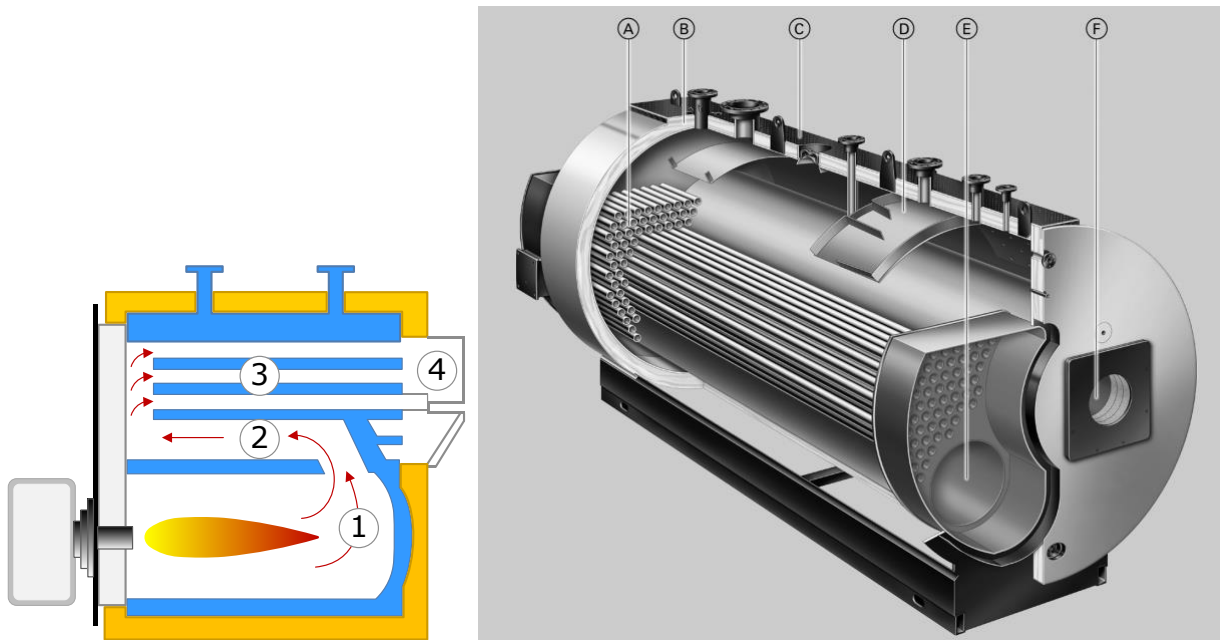


Рис. 1.7. Переріз трьохходового котла Viessmann Vitomax 200 WS

A – третій газохід; B – теплоізоляція (100мм); C – верхній прохідний майданчик; D – водонаправляючий щиток; E – другий газохід; F – камера згорання

Для цих котлів характерний високий середньорічний ККД та низький вміст токсичних речовин у газах, що відводяться. Крім того, перевагою трьохходової конструкції котлів є зменшення часу перебування продуктів згорання в зоні високих температур, що сприяє зниженню емісії оксидів азоту.

Охолодження димових газів на виході з котла (170-180°C) до температури 50-60°C відбувається за допомогою спеціальних теплообмінних апаратів – економайзерів. Разом з котлами Viessmann Vitomax 200 WS використовуються економайзери Viessmann Vitotrans 333c (рис. 1.8).

Димові гази в таких економайзерах охолоджуються за допомогою води системи опалення теплиці, що прямує до котла на нагрівання.



Рис. 1.8. Економайзери Viessmann Vitotrans 333c

А – отвір для очищення; В – поверхня конденсації із нержавіючої сталі; С – теплоізоляція

**Система вентиляції (контролю положення фрамуг)** теплиці тісно пов'язана з системою контролю тепла. На розрахункове положення фрамуг впливають: розрахункова температура в теплиці; поточне значення температури в теплиці; температура назовні теплиці; швидкість руху повітря; напрямок руху повітря; рівень CO<sub>2</sub> в повітрі теплиці. При морозі та шквальних поривах вітру (умови задаються користувачем) фрамуги зачиняються автоматично.

У блочній теплиці типу "Venlo" вентиляція здійснюється через фрамуги, розташовані по конькам даху в шаховому порядку. Загальна площа вентиляційних прорізів у даху складає 22,5% від площі теплиці. Кут відкриття фрамуг складає 46°. Система відкриття фрамуг з приводом від мотор-редукторів та рейкових редукторів зображена на рис. 1.9.

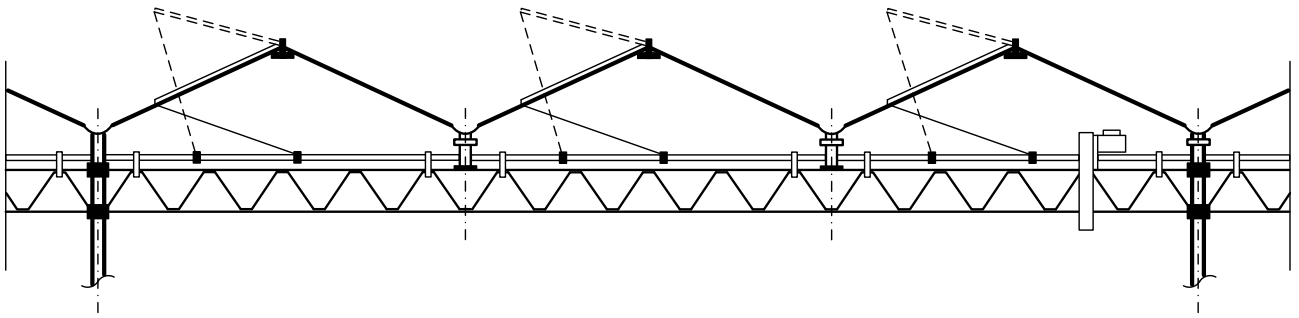


Рис. 1.9. Улаштування системи вентиляції промислової теплиці

**Системи водопостачання та водовідведення.** У тепличному блоці передбачаються наступні системи інженерного обладнання водопостачання та каналізації: система поливного водопроводу; система господарсько-питного водопроводу; система крапельного поливу рослин; система резервного поливу зі шлангів; система випарного охолодження; система внутрішніх водостоків; система технологічного дренажу; система виробничої каналізації.

*Система поливного водопроводу.* Джерелом водопостачання теплиці поливною водою є зовнішні мережі технічного водопроводу. Н ввводі в тепловому пункті встановлюється водомірний вузол для обліку витрат води на полив. Після водомірного вузла поливна вода з прийнятою розрахунковою температурою потрапляє у водопідігрівачі, де нагрівається до температури +25°C, після чого – у розчинний вузол, систему резервного поливу та установку випарного охолодження повітря. Система поливного водопроводу виконується із сталевих оцинкованих труб.

Джерелом *господарсько-питного водопроводу* є господарська питна мережа Ø32мм.

*Система крапельного поливу рослин* призначена для приготування живильного розчину необхідної концентрації та його транспортування в кореневу зону кожної рослини через розподільчу трубопровідну мережу і крапельниці.

Використання системи крапельного живлення в технологічному циклі виробництва продукції захищеного ґрунту дозволяє оптимально планувати полив протягом доби. Система забезпечує точне підтримання заданої

концентрації мінеральних добрив у живильному розчині в залежності від припливу фотосинтетичної активної радіації (ФАР) у відповідності з алгоритмом управління, що закладений в автоматичну систему управління мікрокліматом і мінеральним живленням рослин.

Система складається з розчинного вузла (змішувача-дозатора), трубопроводів з крапельницями та необхідної запірної арматури. При будівництві теплиці у складі блоку споруд один розчинний вузол обслуговує декілька теплиць загальною площею до 2-3га.

*Система резервного поливу* передбачається для дозволення за необхідністю окремих ділянок площі теплиці, а також миття підлоги, проходів, технологічного обладнання та інвентарю. Джерелом системи резервного поливу є поливний водопровід із підігрітою водою.

*Система випарного охолодження та зволоження (СВОЗ)* повітря призначена для штучного зниження температури повітря в теплиці на 5...7°C порівняно з температурою зовнішнього повітря за рахунок адіабатичного поглинання тепла при випаровуванні мілкодисперсної вологи, що подається в об'єм теплиці. Джерелом водопостачання системи СВОЗ є система поливного водопроводу. Підігріта чиста вода температурою 25-26°C потрапляє в проміжну ємність, а звідти, після попереднього очищення в механічному фільтрі, насосом подається в систему трубопроводів з форсунками розпилення.

Установка СВОЗ теплиці площею 1га містить ємність з об'ємом 2м<sup>3</sup>, насос продуктивністю 2,70м<sup>3</sup>/год. з напором 50м, запірну арматуру та фільтр.

Система випарного охолодження виконується секційною. Кожна секція обслуговується одним електромагнітним клапаном Ду=25мм. Вмикання клапанів здійснюється автоматично за показами датчиків вологості та температури. Розрахунковий інтервал вмикання – 3 хв. Вмикання клапанів почергове.

Система СВОЗ у режимі роботи для зниження температури повітря при автоматичному режимі роботи вмикається після відключення опалення.

Клапанна секція складається з електромагнітного клапана, шарового крану (для регулювання тиску в період пуско-налагоджувальних робіт та відключення секції за необхідністю), фільтра, манометра, розподільного трубопроводу ПВХ та зрошувача з форсунками.

*Система внутрішніх водостоків* передбачена для відведення дощової і талої води з покрівлі теплиці. Відведення стоків з покрівлі передбачається через приймальні воронки по стоякам та підземному колектору в мережу дощової каналізації або в накопичувальну ємність.

*Система технологічного дренажу* призначена для попередження попадання дренажних стоків в ґрунтові води з організованим збором та відведенням стоків в каналізацію.

*Система виробничої каналізації* призначена для відведення відводу стоків від трапів та раковини в розчинному вузлі, з'єднувальному коридорі (після миття підлоги), вузлах регулювання системи обігріву. Відведення стоків передбачається в колектор підземного дренажу.

*Система рециркуляції повітря.* Система рециркуляції повітря в теплиці призначена для його штучного перемішування з метою більш рівномірного розподілу температурних полів у об'ємі споруди, зниження перегріву рослин, активізації фізіологічних процесів в рослинах, ліквідації зон з підвищеною вологістю особливо в ті періоди, коли природна вентиляція через вентиляційні фрамуги неможлива або є мало ефективною. До складу системи входять осьові вентилятори (рис. 1.10) та електротехнічне обладнання.



Рис. 1.10. Рециркуляційний осьовий вентилятор теплиці  
*Система електродосвічування рослин (в розсадному відділенні).*

Система електродосвічування рослин передбачена для утворення штучного освітлення культур до технологічно обумовленого рівня. В якості основного освітлювального обладнання зазвичай використовуються натрієві дзеркальні лампи Reflux (ДнаЗ) одиничною потужністю 400 та 600 Вт у світильниках типу ЖСП.

*Система електрообладнання та електроосвітлення.* Силowymi електроприймачами блоку теплиці є насосні групи вузлів управління системами обігріву, зрошення рослин, випарного охолодження та зволоження повітря, електродвигуни системи зашторювання та вентиляції, технологічне обладнання розчинного вузла мінеральних добрив, пересувні механізми, система електродосвічування рослин, освітлювальне обладнання системи чергового освітлення.

### **1.3. Енергозберігаючі технології у тепличному господарстві**

Основне завдання овочівників щодо зниження затрат виробничих ресурсів полягає у зменшенні затрат газу й електроенергії. Переважна більшість тепличних підприємств України витрачає до 70м<sup>3</sup> газу на 1м<sup>2</sup> площі теплиці. Для порівняння ПАТ "Комбінат Тепличний" – 61м<sup>3</sup>, у Нідерландах цей показник не перевищує 30м<sup>3</sup> [9].

Одним з вагомих важелів економії ресурсів є вибір палива, а саме: рідкого (продукти перегонки нафти); твердого – буре та кам'яне вугілля, деревина, солома, різні відходи виробництва та життєдіяльності людини; газоподібного – біогаз, газ.

Паливо можна економити за рахунок заміни котлів з високим ККД та застосування акумулюючих резервуарів, в яких запасється гаряча вода та подається в теплиці при відключеному котлі у нічний час. Застосування акумулюючих резервуарів дозволяє заощадити до 0,5 млн. м<sup>3</sup> газу на рік для

спеціалізованих тепличних господарств за наявності теплиць голландського типу та міні-котелень.

ПАТ "Комбінат Тепличний" також застосовує нові котли з пальниковим пристроєм марки "Zantingh" (Нідерланди). Відмінна особливість використовуваних пальників – широкий діапазон регульованої потужності – від 10 до 100%. Порівнюючи нові пальники із попередніми, необхідно зазначити наявність частотних перетворювачів на вентиляторах подачі повітря, що дозволяє істотно економити на електроенергії.

Для підвищення ККД горіння, а також для можливості відбору CO<sub>2</sub> котли обладнуються економайзерами відпрацьованих газів (рис. 1.10, пп. 1.2). Ефект підвищення ККД полягає у тому, що у економайзері відпрацьовані гази охолоджуються з 180°C до 60°C, нагріваючи при цьому теплоносій, а охолоджені таким чином гази після вимірювання рівня вуглекислого газу можна безперешкодно подавати в теплицю. Використання CO<sub>2</sub> для підживлення рослин забезпечує до 15% приросту врожайності [2].

Централізоване опалення тепличних споруд дуже витратне з низьким ККД через значні втрати. Кардинальне рішення – окрема міні-котельня в кожній теплиці, що зводить втрати до мінімуму. Усі труби обігріву, що оперізують внутрішню частину промислових теплиць, у більшості випадків можна розділити на 4 контури: шатровий (покрівельний), надземний, торцевий (у блочних теплицях по периметру стін по шість труб), підземний. З метою економії теплової енергії застосовують окреме керування контурами, що дозволяє економити до 20% від загального обсягу затрат тепла [2].

Ще одним технологічним прийомом для економії теплової енергії є встановлення в цехах із голландською технологією на рівні перекриття термоекранів (система зашторювання), які захищають споруду від втрат тепла через скати, адже через них теплиця втрачає 87% тепла. Використання системи зашторювання в нічний час зменшує щорічне споживання енергії на 16%. Термоекрани використовують також для захисту від перегрівання в літній період [9].

Недоліком технології застосування екранів є та обставина, що при значному зменшенні теплового потоку через світлопрозору огорожу погіршується сніготанення на даху теплиці, тому під час снігопадів екрани повинні бути згорнуті для більш повного прогрівання покрівлі та поліпшення сніготанення.

Проведений науковцями аналіз показав, що суттєву економію в сучасних теплицях дає система контролю, яка отримує інформацію від зовнішніх датчиків: швидкості і напрямку вітру, температури повітря, освітленості, вологості, наявності дощу, інтенсивності опадів, положення вентиляційних фрамуг і екрану, а також датчиків, розташованих всередині теплиці: температури і вологості в різних частинах відділень, концентрації CO<sub>2</sub>, температури рослин (одна спеціальна ІЧ-камера здатна "бачити" температуру рослин на площі до 15м<sup>2</sup>, передаючи дані в систему), датчиків ФАР, що вимірюють природне і штучне світлове випромінювання у найбільш важливій для фотосинтезу області спектра – між 400 і 700 нм.

Останнім часом в сучасному тепличному виробництві з розвитком енергозберігаючих технологій все більшого поширення набуває використання LED-світильників (світлодіодних світильників). При цьому використовують комбінації червоних та синіх світлодіодів у різних пропорціях в залежності від призначення. Наприклад, при вирощуванні томатів у розсадних відділеннях (рослини, що активно розвиваються і переходять до цвітіння в умовах червоного світла) дослідники частіше використовують пропорцію 4:1 (на 4 червоних припадає 1 синій світлодіод). Світлодіодні світильники встановлюються над рослинами або у міжряддях (рис. 1.11). Висновки про енергозберігаючі характеристики будь-яких світлових приладів можна зробити за таким їх показником, як світловіддача. Так, світловіддача ламп розжарювання становить до 15 Лм/Вт, люмінесцентних – 60 Лм/Вт, металогалогенних – 85 Лм/Вт, а світлодіодних – 100 Лм/Вт і більше.

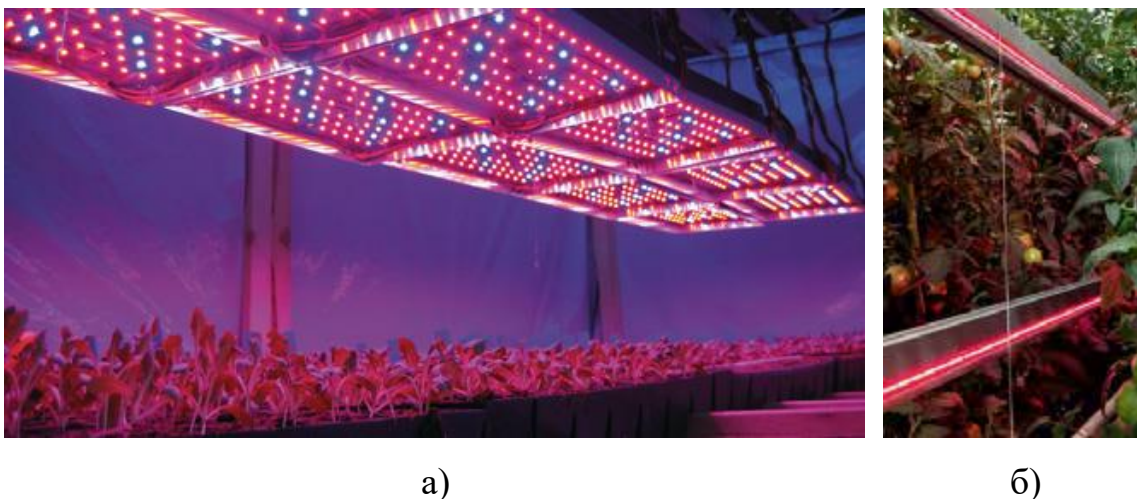


Рис. 1.11. Варіант встановлення світлодіодного освітлення:  
а) в розсадному відділенні; б) у міжряддях

#### 1.4. Сучасні енергозберігаючі системи зашторювання теплиць

Одним зі шляхів збільшення ефективності виробництва за рахунок зниження енерговитрат і покращення контролю умов вирощування продукції є впровадження сучасних систем зашторювання (екранування). У холодний період вирощування рослин, системи зашторювання дозволяють зменшити тепловтрати через огорожуючі конструкції теплиць і забезпечують оптимальний мікроклімат. У весняно-літній період системи зашторювання дозволяють боротися з надлишковою сонячною радіацією, яка обумовлює тепловий стрес та опіки рослин, що в свою чергу стимулює посилене випаровування.

В залежності від призначення, функцій, які вони виконують, та конструктивних рішень, системи зашторювання можна подати у вигляді, що зображений на рис. 1.12.

В стаціонарних системах зашторювання, в основному, використовують екрани, виготовлені з поліетиленової плівки або полімерної тканини. В холодну зиму стаціонарний поліетиленовий екран дозволяє економити 1,5...4,0 (м<sup>3</sup>

газу/м<sup>2</sup> площі) за місяць експлуатації, екран з полімерної тканини – 7...13 (м<sup>3</sup> газу/м<sup>2</sup> площі) за місяць експлуатації, в залежності від опалювального режиму та температури навколишнього середовища [10].



Рис. 1.12. Класифікація систем зашторювання теплиць

Екраном розсувних (мобільних) систем зашторювання є полімерна тканина з вплетеною алюмінієвою ниткою або полосами з алюмінієвої фольги з різними теплофізичними властивостями. Матеріал тканини має високу міцність на розрив, тому дозволяє без пошкоджень багаторазово зсувати та розсувати екран, та гарантує довгострокову експлуатацію теплиці.

В залежності від матеріалу, з якого виготовлена тканина, вона буває: *теплоізоляційною* (теплозберігаючою); *світловідбиваючою* (затінюючою); *комбінованою* (з різним співвідношенням теплоізоляційних та світлопропускних характеристик).

Горизонтальне зашторювання використовується в усіх відділеннях теплиці в кожному прольоті між верхніми або нижніми поясами ферм. Таке розташування системи забезпечує практично повне перекриття верхньої частини теплиці, а конструкція механізму зашторювання забезпечує переміщення полімерного екрану одночасно в усіх прольотних відділеннях теплиці від одного мотор-редуктора із самогальмуючою черв'ячною передачею та вбудованою системою кінцевих вимикачів.

Вертикальне зашторювання буває одинарним або подвійним. В якості екрану в даній системі може виступати полімерна тканина або поліетиленова плівка як чорного, так і білого кольору.



Рис. 1.13. Горизонтальна (а) та вертикальна (б) системи зашторювання

За конструктивним виконанням системи зашторювання бувають пушпульними та трособлоковими. Вони відрізняються виконанням привідної рухомої частини, за допомогою якої мотор-редуктори пересувають шторні екрани: при пушпульному виконанні використовуються зубчасті рейки, до яких кріпляться алюмінієві балки з екраном, при трособлоковому виконанні – троси, які намотуються на круглі привідні вали.

Велика висота сучасних теплиць дозволяє встановлювати до чотирьох екранів, що виконують різноманітні функції.

Керування системами зашторювання здійснюється централізовано від єдиної системи автоматичного керування мікрокліматом, або системою ручного керування, що розташоване безпосередньо в теплиці. Ручне керування використовується рідко, тільки під час проведення профілактичних або ремонтних робіт у верхній частині теплиці.

### 1.5. Концепція «Розумна теплиця»

Розумна теплиця – це автоматизована система, яка дає змогу регулювати параметри мікроклімату. Сучасні теплиці будуються за стандартними проєктами, вони обладнуються базовими інженерними системами для підтримки параметрів мікроклімату:

- 1) водопостачання, водовідведення та каналізації;
- 2) циркуляції повітря та вентиляції;
- 3) поливу;
- 4) опалення.

Такі системи використовуються у великих підприємствах. Вони не пристосовані до застосування для дрібних приватних фермерських господарств, оскільки мають високу вартість, є складними в монтажі та експлуатації (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Приклад реалізації концепції «Розумна теплиця»

Автоматизація роботи теплиці передбачає моніторинг різних показників і керування параметрами мікроклімату з метою забезпечення росту рослин. До

основних параметрів, які може контролювати розумна теплиця, можна віднести:

- освітлення – регулювання рівня підсвічування або затемнення рослин;
- водопостачання – необхідно керувати процесом поливу рослин, оскільки в теплицю опади не потрапляють;
- температуру – для унеможливлення замерзання чи перегріву рослин;
- циркуляцію повітря та вологість – закриті приміщення теплиці спричиняє підвищення рівня вологості та не достатню кількість вуглекислого газу та кисню для рослин залежно від часу доби.

Потрібно здійснювати одночасне регулювання цих показників для забезпечення кращого росту рослин. Для цього використовують такі підсистеми:

- вентиляція – відкривання та закривання вентиляційних фрамуг, ввімкнення та вимкнення вентиляторів;
- зрошення – регулярна подача води відповідно до графіку;
- дозування поживних речовин – аналізуючи ґрунт можна здійснювати розподіл поживних речовин по зрошувальній системі.

Для ефективного регулювання параметрів мікроклімату теплиці усіма цими підсистемами потрібно керувати одночасно об'єднавши їх у одну велику систему, котра дозволить оптимізувати їх роботу.

## 1.6. Інтернет речей в сільському господарстві

*Інтернет речей (IoT - Internet of Things)* є сучасною концепцією, яка створена з метою інтеграції різних об'єктів за допомогою мережевої інфраструктури для обміну даними з використанням IP протоколу.

Можливості інтернету речей надзвичайно широкі, вони можуть бути використані майже в усіх сферах людської, промислової та суспільної діяльності.

В сільському господарстві IoT дає змогу автоматизувати велику кількість напрямків діяльності виробництва сільськогосподарської продукції, збільшуючи ефективність і фінансові результати.

В наш час прогрес у розвитку галузі інтернету речей дає змогу розробляти комп'ютеризовані системи, які можуть бути доступні буквально усім користувачам. Вони є значно ефективнішими, гнучкішими та фінансово вигіднішими в порівнянні з системами, які використовують принципи ручного керування.



Рис. 1.15. Схема обміну інформацією в технології «розумного» землеробства на основі концепції IoT

На рис. 1.15 зображена схема обміну інформацією відповідно до технології «розумного» землеробства на основі концепції IoT.

Технологія «розумного» землеробства передбачає застосування інтелектуальних систем контролю та прийняття керуючих рішень. Вони дають змогу реалізувати управління технологічними процесами вирощування рослин в реальному часі, базуючись на отриманих даних. Важливим компонентом при цьому виступають датчики, за допомогою яких є можливість отримувати інформацію про стан рослин в оперативному режимі. Для отримання даних від датчиків виникає необхідність побудови бездротових сенсорних мереж на основі технологій передачі даних.

Використовуючи технології концепції *Інтернету речей*, можна створити комп'ютеризовану систему, яка здатна регулювати параметри мікроклімату тепличних комплексів. Це дасть змогу забезпечити якісніший процес догляду за рослинами, що призведе до збільшення урожайності. Витрати ресурсів будуть знижуватись, оскільки така система дасть змогу забезпечити їх оптимальне застосування.

Отже, підсумовуючи можна сформулювати висновок, що застосування технологій *Інтернету речей* в сфері сільського господарства дають змогу:

- економити водні та енергетичні ресурси, завдяки використанню групи датчиків, які призначені для визначення рівня вологості ґрунтів, що дозволить регулювати частоту поливу;
- оптимізувати витрати, які необхідні для отримання урожаю, завдяки використанню датчиків, що здатні визначати в якому місці рослини потребують додаткове освітлення чи добриво;
- сприяти в боротьбі зі шкідниками, шляхом розпилення спецзасобів для їх відлякування більш точково, не зачіпаючи ділянок, де вони відсутні.

Це лише частина з багатьох критеріїв, враховуючи які можна зробити висновок про доцільність і корисність використання технологій *Інтернету речей* в цій сфері.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ ОВОЧІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

#### 2.1. Аналіз відомих математичних моделей стану мікроклімату теплиць

Математичне моделювання є широко використовуваною технікою для кількісного визначення параметрів і характеристик теплиць. Моделювання тепличного мікроклімату є важливим механізмом під час пошуку оптимальних характеристик внутрішнього середовища вирощування з обліком певних типів і періодів вегетації рослин. Головною метою моделювання тепличного мікроклімату є кількісна оцінка процесів переносу енергії та речовин за механізмами дифузії й конвекції між повітряним середовищем, ґрунтом, поливним розчином і біологічними процесами під час зростання культур.

На теперішній час відома значна кількість наукових результатів щодо розробки й дослідження математичних моделей (статичних і динамічних) процесів, які протікають у зоні вирощування культур на захищених ґрунтах. Так, наприклад, у роботі [26] авторами запропоновано розглядати теплицю, як нелінійну динамічну систему. В цій роботі автори пропонують використовувати наступну узагальнену модель теплового балансу (2.1) всередині теплиці:

$$\begin{cases} Q_{total} = Q_{gain} - Q_{loss}; \\ Q_{gain} = Q_s + Q_h; \\ Q_{loss} = Q_k + Q_g + Q_r + Q_v + Q_i + Q_c, \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $Q_{total}$  – загальна теплова енергія зони вирощування теплиць, Вт;

$Q_{gain}$  – кількість енергії, що надходить до теплиці, Вт;  $Q_{loss}$  – кількість енергії, що споживається в теплиці, Вт;  $Q_s$  – корисна сонячна енергія, що надходить до теплиці, Вт;  $Q_h$  – теплова енергія, що надходить від систем опалення, Вт;  $Q_k$  – втрати тепла через теплопровідність, Вт;  $Q_g$  – втрати тепла через поглинаючу здатність тепличного ґрунту, Вт;  $Q_r$  – теплопередача через довгохвильове випромінювання, Вт;  $Q_v$  – тепловіддача через вентиляцію, Вт;  $Q_i$  – тепловіддача через процес інфільтрації, Вт;  $Q_c$  – теплопередача через конденсацію, Вт.

Авторами наукового дослідження [27] розроблено математичну модель і представлено відповідні результати щодо температурних режимів вирощування культур у двох різних кліматичних зонах: південний схід Іспанії та північ Китаю.

В якості базової автори використовували наступну (2.2) динамічну модель:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, U, D, V, C, t), \quad (2.2)$$

де  $X=X(t)$  – вектор змінних стану теплиці;  $U=U(t)$  – вектор вхідних параметрів;  $D=D(t)$  – вектор зовнішніх впливів;  $V=V(t)$  – вектор системних змінних;  $C$  – вектор системних констант;  $t$  – час;  $f$  – нелінійна функція, що базується на рівняннях математичної фізики.

У наукових статтях [28] досліджено математичні моделі процесу вентиляції теплиці, які покладено в основу регулювання режимів вирощування.

Запропонована авторами цих робіт система рівнянь (2.3) має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho\xi V} (q_{heat}(t) + \varepsilon AS(t) - \lambda q_{fog}(t)) - \\ - \frac{q_{vent}(t)}{V} (T_{in} - T_{out}) - \frac{\mu}{\rho\xi V} (T_{in} - T_{out}); \\ \frac{dH_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V} q_{fog}(t) + \frac{1}{\rho V} E(S(t), H_{in}(t)) - \\ - \frac{q_{vent}(t)}{V} (H_{in} - H_{out}), \end{array} \right. \quad (2.3)$$

де  $T_{in}$  – температура повітря всередині теплиці, °С;  $T_{out}$  – температура повітря зовні теплиці, °С;  $H_{in}$  – вологість повітря всередині теплиці, %;  $H_{out}$  – вологість повітря зовні теплиці, %;  $\mu$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/К;  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг;  $\varepsilon$  – к.к.д. сонячного нагріву, відн. од.;  $\xi$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);  $S$  – промениста енергія, Вт/м<sup>2</sup>;  $E(S(t), H_{in}(t))$  – швидкість випаровування рослин, г/с;  $q_{heat}$  – теплова енергія, що надходить від стаціонарних систем опалення зони вирощування теплиць, Вт;  $q_{fog}$  – пропускна здатність системи генерації туману, г/с;  $q_{vent}$  – потужність системи вентиляції, м<sup>3</sup>/с;  $A$  – площа основи теплиці, м<sup>2</sup>;  $V$  – об'єм теплиці, м<sup>3</sup>.

У науковому джерелі [29] авторами проведено дослідження з розробки математичної моделі мікроклімату грибною теплиці під час керування температурою й вологістю повітря та концентрацією вуглекислого газу в зоні вирощування. В основу запропонованої та аналітично розв'язаної моделі покладено систему диференціальних рівнянь (2.4), що описує процеси динаміки вищевказаних параметрів мікроклімату теплиць:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho V C \frac{dT(t)}{dt} = G_{менл.} C_{менл.} (t_2 - t_0) - \sum kF (t_6 - t_3) - \\ - L_{свіж} C_{нос} (t_6 - t_3); \\ \rho V \frac{dX(t)}{dt} = L_{свіж} X_{свіж} - L_{відх} X_{відх} + L_{нар}; \\ \rho V \frac{dC_{CO_2}(t)}{dt} = L_{свіж} C_{CO_2свіж} - L_{відх} C_{CO_2відх} + V_{CO_2}, \end{array} \right. \quad (2.4)$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – об’єм повітря, м<sup>3</sup>;  $C$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°C);  $T(t)$  – температура повітря всередині теплиці, °C;  $G_{менл.}$  – витрати теплоносія, кг/с;  $C_{менл.}$  – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·°C);  $t_2, t_0$  – температура теплоносія на вході й виході теплообмінника, відповідно, °C;  $F$  – площа огорожень теплиці, м<sup>2</sup>;  $t_6, t_3$  – температура повітря всередині й ззовні теплиці, відповідно, °C;  $L_{свіж}$  – витрата свіжого повітря для вентиляції теплиці, м<sup>3</sup>/с;  $X(t)$  – абсолютна вологість повітря в теплиці, л/м<sup>3</sup>;  $X_{свіж}$  – абсолютна вологість свіжого повітря, л/м<sup>3</sup>;  $L_{відх}$  – витрата повітря, що відходить із теплиці, м<sup>3</sup>/с;  $X_{відх}$  – абсолютна вологість повітря, що відходить із теплиці, л/м<sup>3</sup>;  $L_{нар}$  – витрата пари, м<sup>3</sup>/с;  $C_{CO_2}(t)$  – абсолютний вміст CO<sub>2</sub> у зоні вирощування теплиці, л/м<sup>3</sup>;  $C_{CO_2свіж}$  – абсолютний вміст вуглекислого газу в атмосфері, л/м<sup>3</sup>;  $C_{CO_2відх}$  – абсолютний вміст CO<sub>2</sub> у повітрі, що видаляється із зони теплиці, л/м<sup>3</sup>;  $V_{CO_2}$  – швидкість виділення вуглекислого газу в повітря теплиці в процесі окислення, м<sup>3</sup>/год.

Авторами наукового дослідження [30] запропоновано математичні моделі внутрішнього теплового й вологісного балансу в зоні вирощування (2.5), а також наведено результати моделювання цих процесів у середовищі Matlab & Simulink®.

У якості базової використано наступну (2.5) систему диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} \rho_a C_a V \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{short} - Q_{conv,cond} - Q_{infiltr} - Q_{long}; \\ \rho_a V \frac{dH_{in}}{dt} = G_v \rho_a (H_{out} - H_{in}), \end{cases} \quad (2.5)$$

де  $\rho_a$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $C_a$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°C);  $V$  – об'єм теплиці, м<sup>3</sup>;  $T_{in}$  – температура повітря в зоні теплиці, °C;  $t$  – час, с;  $Q_{short}$  – енергія від дії короткохвильового випромінювання, що поглинається теплицею, Вт;  $Q_{conv,cond}$  – кількість енергії, що витрачається в теплиці через конвекцію й теплопровідність, Вт;  $Q_{infiltr}$  – тепловіддача шляхом інфільтрації, Вт;  $Q_{long}$  – теплопередача шляхом довгохвильового випромінювання, Вт;  $H_{in}$  – відносна вологість повітря в теплиці, %;  $H_{out}$  – відносна вологість повітря зовні теплиці, %;  $G_v$  – інтенсивність циркуляції повітряного потоку всередині теплиці, м<sup>3</sup>/с.

У наукових роботах [7,9,11] представлено результати розробки динамічних моделей впливу параметрів мікроклімату на якість вирощування овочевих культур, а також наведено основні алгоритми й результати чисельного розв'язання запропонованих моделей. Також автори цих та інших робіт зазначають, що запропоновані математичні моделі можуть бути використані під час розробки засобів прогнозування впливу параметрів мікроклімату на врожайність культур.

## 2.2. Розробка математичної моделі технологічного процесу, дослідження її характеристик і визначення передатної функції

Щоб забезпечити врожай томатів протягом цілого року тепличному господарству потрібна система обігріву повітря і ґрунту. Виходячи з цієї потреби буде розроблена математична модель обігріву теплиці.

Приймаємо, що температура повітря  $t_p$  однакова на всій площі теплиці, а температура теплоносія  $t_v$  дорівнює середньоарифметичному значенню різниці між температурами гарячої води, що подається у труби  $t_g$  і води, що виходить з теплиці  $t_y$ . Схема потоків тепла може бути представлена у вигляді двох ланок – води, котра слугує джерелом тепла, і повітря, котре приймає це тепло.

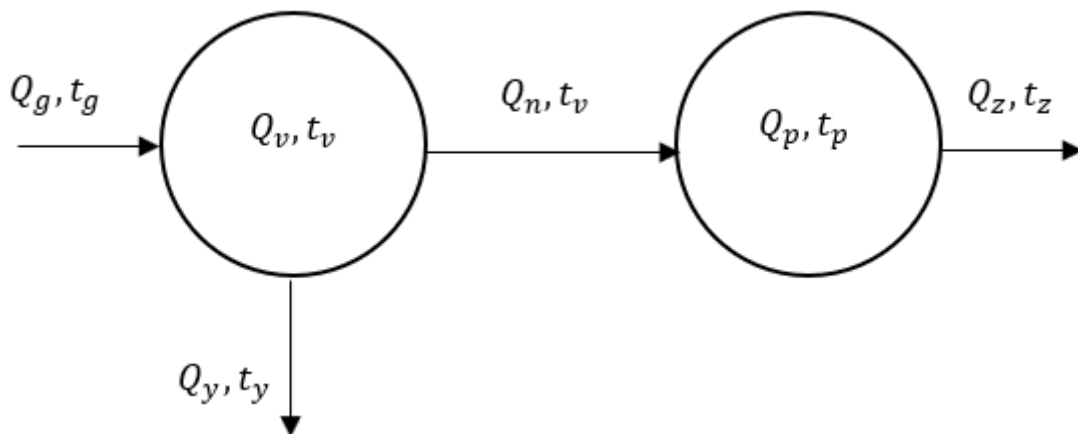


Рис. 2.1. До складання рівнянь теплового балансу

де  $t_g$ - температура води на вході;

$t_v$ - температура води в трубах;

$t_y$ - температура води на виході;

$t_p$ - температура повітря;

$t_z$ - зовнішня температура;

$Q_g$ - тепло введене водою;

$Q_v$ - тепло у воді;

$Q_y$ - тепло виведене водою;

$Q_n$ - тепло перейняте повітрям;

$Q_p$ - тепло у повітрі;

$Q_z$ - втрачене тепло.

У статичному режимі тепло у воді  $Q_v$  і тепло у повітрі  $Q_p$  не змінюється, тому ми отримуємо рівняння теплового балансу для води і рівняння теплового балансу для повітря теплиці:

$$Q_g - Q_y - Q_n = 0, Q_n - Q_z = 0, \quad (2.6)$$

де  $Q_g$ - тепло введене водою;

$Q_y$ - тепло виведене водою;

$Q_n$ - тепло перейняте повітрям;

$Q_z$ - втрачене тепло.

На тепло, що поступає і виходить з системи опалення за секунду впливає теплоємність теплоносія  $C_v$ , продуктивність насоса  $G_n$ , густина теплоносія  $\rho_v$ , температура теплоносія. Кількість тепла у системі опалення також залежить від об'єму теплоносія у системі  $V_v$ . Маємо:

$$\begin{aligned} Q_g &= C_v G_n \rho_v t_g, \\ Q_y &= C_v G_n \rho_v t_y, \\ Q_v &= C_v V_v \rho_v t_v. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тепло в даному приміщенні має залежність від теплоємності повітря  $C_p$ , густини повітря  $\rho_v$ , температури повітря  $t_p$ , і об'єму опалюваного приміщення  $V_p$ :

$$Q_p = C_p V_p \rho_p t_p \quad (2.8)$$

Тепло, що переходить від води до повітря теплиці, а потім до навколишнього повітря, розраховуємо за законом Фур'є:

$$\begin{aligned} Q_n &= k_1 F_t (t_v - t_p), \\ Q_z &= k_2 F_c (t_p - t_z), \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти теплопередачі через стінки труб системи опалення теплиці і через скло теплиці;

$F_t, F_c$  – поверхні труби і теплиці;

$t_z$  – зовнішня температура. Ці коефіцієнти розраховані по наступній формулі:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{vt}} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{1}{\alpha_{tp}}},$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pc}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{cz}}}, \quad (2.10)$$

де  $\alpha_{vt}, \alpha_{tp}, \alpha_{pc}, \alpha_{cz}$  – коефіцієнти тепловіддачі від води до стінки, від стінки до повітря, від повітря до скла, від скла назовні;

$\lambda_t, \lambda_c$  – коефіцієнти теплопровідності труби та скла;

$\delta_t, \delta_c$  – товща стінки та скла.

Наразі потрібно перейти від статичної моделі до динамічної. З урахуванням попередніх рівнянь буде отримана система диференціальних рівнянь, що визначає зміну кількості тепла в часі у воді та у повітрі. Знаходимо похідні по середній температурі води  $t_v$ , і повітря  $t_p$ :

$$C_v V_v \rho_v \frac{dt_v}{d\tau} = C_v G_n \rho_v t_g - C_v G_n \rho_v t_y - k_1 F_t (t_v - t_p),$$

$$C_p V_p \rho_p \frac{dt_p}{d\tau} = k_1 F_t (t_v - t_p) - k_2 F_c (t_p - t_z). \quad (2.11)$$

Приймаючи  $t_v = (t_g + t_y)/2$ , з рівняння отримуємо температуру охолодженої води у теплиці й підставляємо до рівняння (2.11). Далі приводимо рівняння (2.11) до вигляду рівняння Коші:

$$\frac{dt_v}{d\tau} = \frac{2G_n}{V_v} (t_g - t_v) - \frac{k_1 F_t (t_v - t_p)}{C_v V_v \rho_v},$$

$$\frac{dt_p}{d\tau} = \frac{k_1 F_t (t_v - t_p) - k_2 F_c (t_p - t_z)}{C_p V_p \rho_p}. \quad (2.12)$$

Також у теплиці протікає обмін вологи. На нього впливає температура, процес фотосинтезу у рослин й інші фактори. Складемо схему для потоків вологи у теплиці. Схема статичного режиму представлена на рис 2.2:

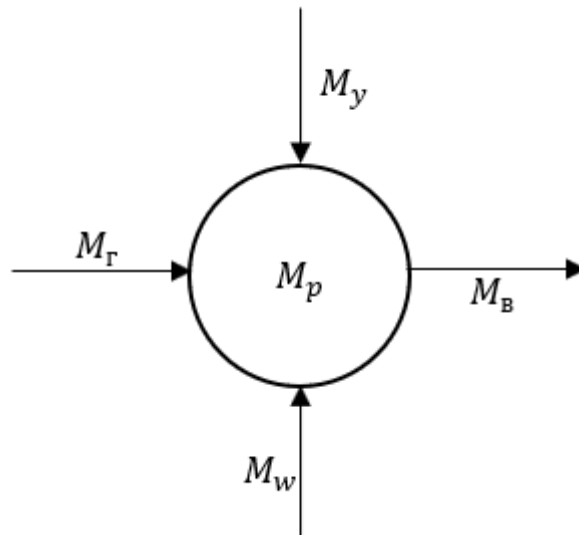


Рис. 2.2. До складання рівнянь балансу вологи

де  $M_{\Gamma}$  – вологість що випаровується з ґрунту;

$M_p$  – вологість у теплиці;

$M_w$  – вологість від розпилюваної води;

$M_y, M_B$  – вологість яку вводить і виводить вентиляційне повітря.

Ефективність підтримки рівня вологи у повітрі визначається дисперсністю рідкої фази й різницею у парціальних тисках. Кількісно вона може бути виражена інтенсивністю, з якою випаровуються краплини, шляхом застосування формули Максвелла:

$$\frac{dm_{k(\tau)}}{d\tau} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_k(\tau) \cdot D(\theta) \cdot m_w \cdot [P_H(\theta_w) - P(d)]}{R \cdot T}, \quad (2.13)$$

де  $m_k, r_k$  – маса та радіус краплини;

$D(\theta)$  – коефіцієнт дифузії пари;

$m_w, R$  – молекулярна вага води та газова стала для пари;

$T$  – температура пари;

$P_n, P_c$  – парціальний тиск пари в оточуючому середовищі.

Також рівняння Максвелла записується у виді:

$$-\frac{dm_k}{d\tau} = 4 \cdot \pi \cdot r_k \cdot D \cdot \frac{\rho_v}{\rho_w} (d_n - d_c) \cdot 10^3, \quad (2.14)$$

де  $d_c, d_n$  – вологовміст у повітрі та краплі;

$\rho_w$  – густина повітря.

При протіканні ізобарно-адіабатичного процесу змішування у вологому повітрі отримане рівняння буде мати наступний вигляд:

$$m_v \frac{di_2}{d\tau} = G_w \cdot i_w - G_v(i_2 - i_1), \quad (2.15)$$

$$m_w C_w \frac{d\theta_w}{d\tau} = G_v(d_2 - d_1)r + G_w(\theta_w1 - \theta_w2)C_w + G_v C_v(t_1 - t_2), \quad (2.16)$$

$$i_w = \frac{i_2 - i_1}{(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}}, \quad (2.17)$$

де  $i_w$  – ентальпія води, кДж/кг;

$$i_w = c_w \theta_w = 4.19 \overline{\theta_w}, \quad (2.18)$$

де  $\theta_w$  – температура води, °С.

З урахуванням  $i_w = a_1 t - b_1 d$ , розв'язок для сталого режиму буде у вигляді рівняння:

$$t_2 = \frac{G_w}{G_v a} (4.19 \cdot \overline{\theta_w} - b \cdot 10^{-3}) + t_1, \quad (2.19)$$

з нього можна визначити – температура повітря під час зволоження розпилюванням води не має залежності від вологовмісту й визначається кількістю повітря, що витрачається, а також температурою води, котру подають до розпилювача.

$$m_v \frac{dM_p}{d\tau} = G_w \cdot d_w - G_v(M_p - d_1) \quad (2.20)$$

Застосуємо запис, що є наближенням до ентальпії вологого повітря:

$$i_v = c_p t_v + r_0 d_v r_0 = 2500 \quad (2.21)$$

Диференційне рівняння динамічної зміни вологості у повітрі ми отримаємо з розв'язку рівняння (2.22):

$$\frac{m_v}{G_v} \cdot \frac{dM_p}{d\tau} + M_p = G_w \cdot 10^3 + G_v d_1. \quad (2.22)$$

У підсумку ми отримали математичну модель, яка відображає зміни температури та вологості у теплиці. Її можна описати наступною системою диференційних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dt_v}{d\tau} &= \frac{2G_n}{V_v} (t_g - t_v) - \frac{k_1 F_t (t_v - t_p)}{C_v V_v \rho_v}, \\ \frac{dt_p}{d\tau} &= \frac{k_1 F_t (t_v - t_p) - k_2 F_c (t_p - t_z)}{C_p V_p \rho_p}, \\ \frac{m_v}{G_v} \cdot \frac{dM_p}{d\tau} + M_p &= G_w \cdot 10^3 + G_v d_1.\end{aligned}\quad (2.23)$$

Щоб створити модель об'єкту знайдемо коефіцієнти системи рівнянь (2.10). Знайдемо коефіцієнти теплопередачі, враховуючи розмірності наших змінних:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0.002}{50} + \frac{1}{15}} = 11.837, \text{ Вт/м град} \quad (2.24)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{7.5} + \frac{0.004}{0.74} + \frac{1}{10}} = 4.189, \text{ Вт/м град} \quad (2.25)$$

Нагріваючі труби, маючи об'єм  $80 \text{ м}^3$  і діаметр  $44 \text{ мм}$ , матимуть довжину:

$$L = \frac{80}{\frac{\pi \cdot 0.044^2}{4}} = 51613.2, \text{ м}, \quad (2.26)$$

поверхня теплообміну буде рівна:

$$F_t = 51613.2 \cdot \pi \cdot 0.048 = 7933.9, \text{ м}^2. \quad (2.27)$$

Якщо вважати, що наша теплиця прямокутна, то застелена поверхня вираховується за формулою:

$$F_c = 10000 + 500 \cdot 2 \cdot 3 + 20 \cdot 2 \cdot 3 = 13120, \text{ м}^2, \quad (2.28)$$

об'єм повітря всередині неї обраховується за формулою:

$$V_v = 10000 \cdot 3 = 30000, \text{ м}^3. \quad (2.29)$$

Отриманий час запізнення:

$$\tau_\zeta = \frac{80}{4 \cdot \frac{270}{3600}} = 266.7, \text{ с}. \quad (2.30)$$

Введемо додаткові значення коефіцієнтів для зручності створення моделі:

$$a1 = k_1 F_1 = 11.837 \cdot 7933.9 = 93913.6,$$

$$a2 = k_2 F_c = 4.189 \cdot 13120 = 54959.7,$$

$$b1 = C_v \rho_v V_v = 100 \cdot 4174 \cdot 80 = 3.353 \cdot 10^8,$$

$$b1 = C_p \rho_p V_p = 1005 \cdot 1,293 \cdot 30000 = 3.898 \cdot 10^7. \quad (2.31)$$

Розв'язки для рівняння вологості:

$$t_2(\tau) = B - (B - t_{20})e^{\frac{\tau}{T_v}}; \quad (2.32)$$

$$d_2(\tau) = A_1 - (A_1 - d_{20})e^{\frac{\tau}{T_v}}; \quad (2.33)$$

$$\varphi_2 = \frac{10^5 \cdot dz}{622(232.7t_2 - 2394)}, \quad (2.34)$$

де 
$$T_v = \frac{m_v}{G_v};$$

$$B = \frac{G_w}{G_v C_p} (4.19 \cdot \overline{\Theta_w} - r_0) + t_1; \quad (2.35)$$

$$A_1 = \frac{G_w}{G_v} 10^3 + d_1. \quad (2.36)$$

Перехідний процес зволоження повітря дрібними каплями води описують наступні залежності:  $t_2(\tau)$  і  $d_2(\tau)$ .

Представимо математичну модель у операторному вигляді:

$$\begin{cases} T_1 \frac{dt_v}{d\tau} + t_v = k_1 t_g + k_2 t_p \\ T_2 \frac{dt_p}{d\tau} + t_p = k_3 t_v - k_4 t_z \\ T_3 \frac{dM_p}{d\tau} + M_p = k_5 G_w + k_6 G_v - k_7 t_z \end{cases}, \quad (2.37)$$

де коефіцієнти передачі і сталі часу розраховуються за наступними формулами:

$$T_1 = \frac{C_v V_v \rho_v}{k_1 F_1}; T_2 = \frac{C_p V_p \rho_p}{k_2 F_2}; T_3 = \frac{m_v}{G_v}; k_1 = \frac{2}{V_v}; k_2 = \frac{k_1 F_1}{C_v V_v \rho_v}; k_3 = \frac{k_1 F_1}{C_p V_p \rho_p}; k_4 = \frac{k_2 F_2}{C_z V_z \rho_z}; k_5 = d_w; k_6 = d_1; k_7 = \frac{G_v}{F_c}.$$

Представлена система буде промодельована у MATLAB Simulink. За допомогою даного пакету побудуємо структурну схему (рис. 2.3) мат. моделі. Щоб визначити динамічні властивості об'єкту потрібно отримати розгінні характеристики за каналом регулювання вологості та за каналом регулювання температури. Реалізується це шляхом подачі на вхід стрибкоподібного сигналу, величина якого рівна номінальному значенню управляючого параметра. З рівнянь можна побачити, що керуючою дією для підтримки температури у

теплиці слугує постачання теплоносія (гарячої води) до трубопроводу  $t_g$ , а для регулювання температури керуюча дія полягає у подачі стисненого зволоженого повітря  $G_v$ . У ролі збурюючої дії виступає температура ззовні  $t_z$ .

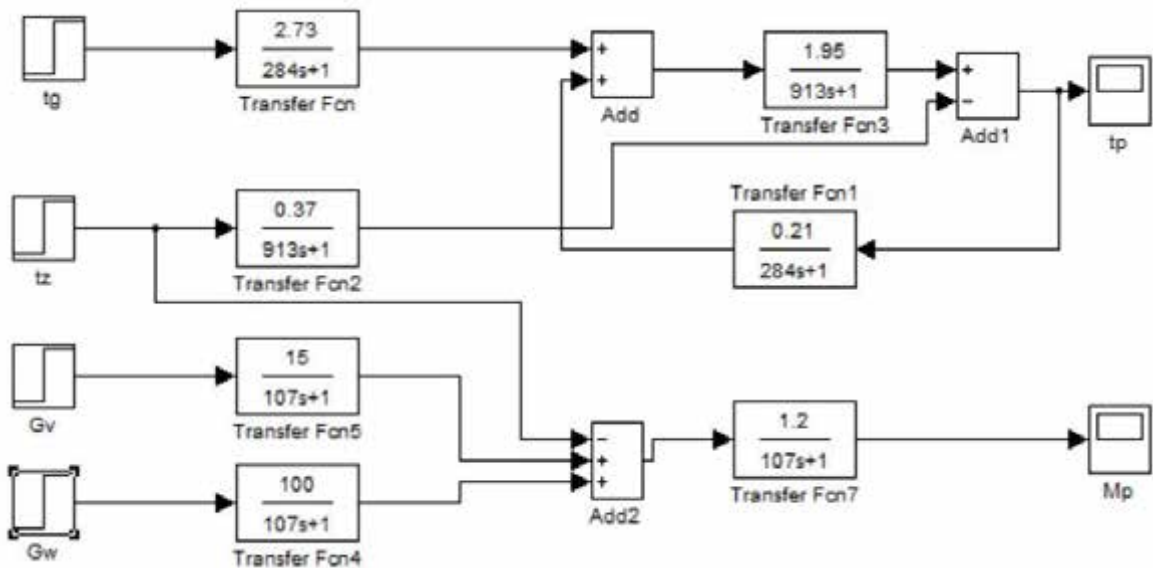


Рис. 2.3. Математична модель об'єкта у пакеті MATLAB

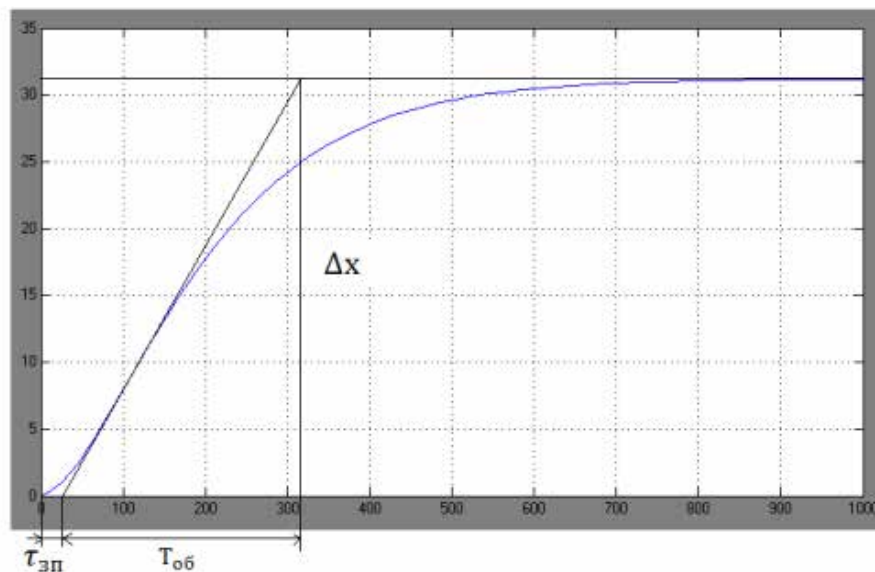


Рис. 2.4. Крива розгону по каналу регулювання вологості

Вхідний сигнал  $\Delta U = 35 \frac{\text{м}^3}{\text{хв}}$ , отже визначаємо динамічні властивості нашого об'єкту за каналом вологості (рис. 2.4):

$$\tau_{зп} = 27\text{с}, T_{об} = 27\text{с}, K_{об} = \frac{\Delta x}{\Delta U} = \frac{31.5}{35} = 0,9.$$

$$w_{0y}(s) = \frac{0.9}{310s + 1} e^{-s27}.$$

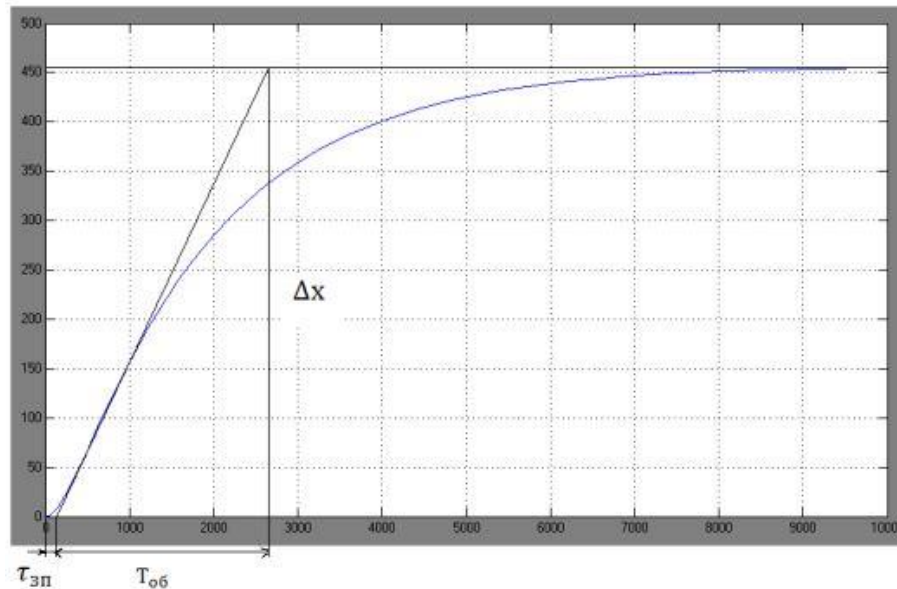


Рис. 2.5. Крива розгону по каналу регулювання температури

Вхідний сигнал  $\Delta U = 90^\circ\text{C}$ , отже визначаємо динамічні властивості нашого об'єкту за каналом температури (рис. 2.5):

$$\tau_{зп} = 100\text{с}, T_{об} = 2500\text{с}, K_{об} = \frac{\Delta x}{\Delta U} = \frac{455}{90} = 5.05.$$

$$w_{0y}(s) = \frac{5.05}{2500s + 1} e^{-s \cdot 100}.$$

### 2.3. Функціональна схема автоматизації системи керування параметрами мікроклімату в теплиці

Опис контурів схеми автоматизації, зображеної на рис. 2.6.

**Контур 1.** Призначення контуру – інформування та регулювання температурою у приміщенні теплиці шляхом зміни витрати теплоносія у верхньому контурі обігріву. До контуру входить засоби автоматизації – термометр опору (позиція *1а*), прилад регулювання *1б*, прилад ручного регулювання *1в*, перетворювач для виконавчого механізму *1г*, та виконавчий механізм *1д*. Значення температури теплоносія читається термометром опору та передається на регулюючий прилад. Оператор може скоригувати значення за допомогою приладу ручного керування. Передача сигналу на виконавчий

механізм здійснюється через пускач, який забезпечує гальванічну розв'язку кіл та додатковий захист обладнання. Регулюючий прилад *1б* додатково приймає сигнал від контуру 3 про значення температури у теплиці. Положення виконавчого механізму *1д* визначає подачу теплоносія до верхньої гілки системи нагрівання.

**Контур 2.** Призначення контуру – інформування та регулювання температурою у приміщенні теплиці шляхом зміни витрати теплоносія у нижньому контурі обігріву. До контуру входить засоби автоматизації – термометр опору (позиція *2а*), прилад регулювання *2б*, прилад ручного регулювання *1в*, перетворювач для виконавчого механізму *2с*, та виконавчий механізм *2д*. Значення температури теплоносія читається термометром опору та передається на регулюючий прилад. Оператор може скоригувати значення за допомогою приладу річного керування. Передача сигналу на виконавчий механізм здійснюється через пускач, який забезпечує гальванічну розв'язку кіл та додатковий захист обладнання. Регулюючий прилад *2б* додатково приймає сигнал від контуру 3 про значення температури у теплиці. Положення виконавчого механізму *2д* визначає подачу теплоносія до верхньої гілки системи нагрівання.

**Контур 3.** Призначення контуру – інформування оператора про значення температури повітря у теплиці, сигналізацію граничних значень температур та передачі даних про неї до контурів 1 і 2. До контуру входить засоби автоматизації – термометр опору (позиція *3а*), показуючий прилад *3б*, сигнальні лампи *HL1* і *HL2*.

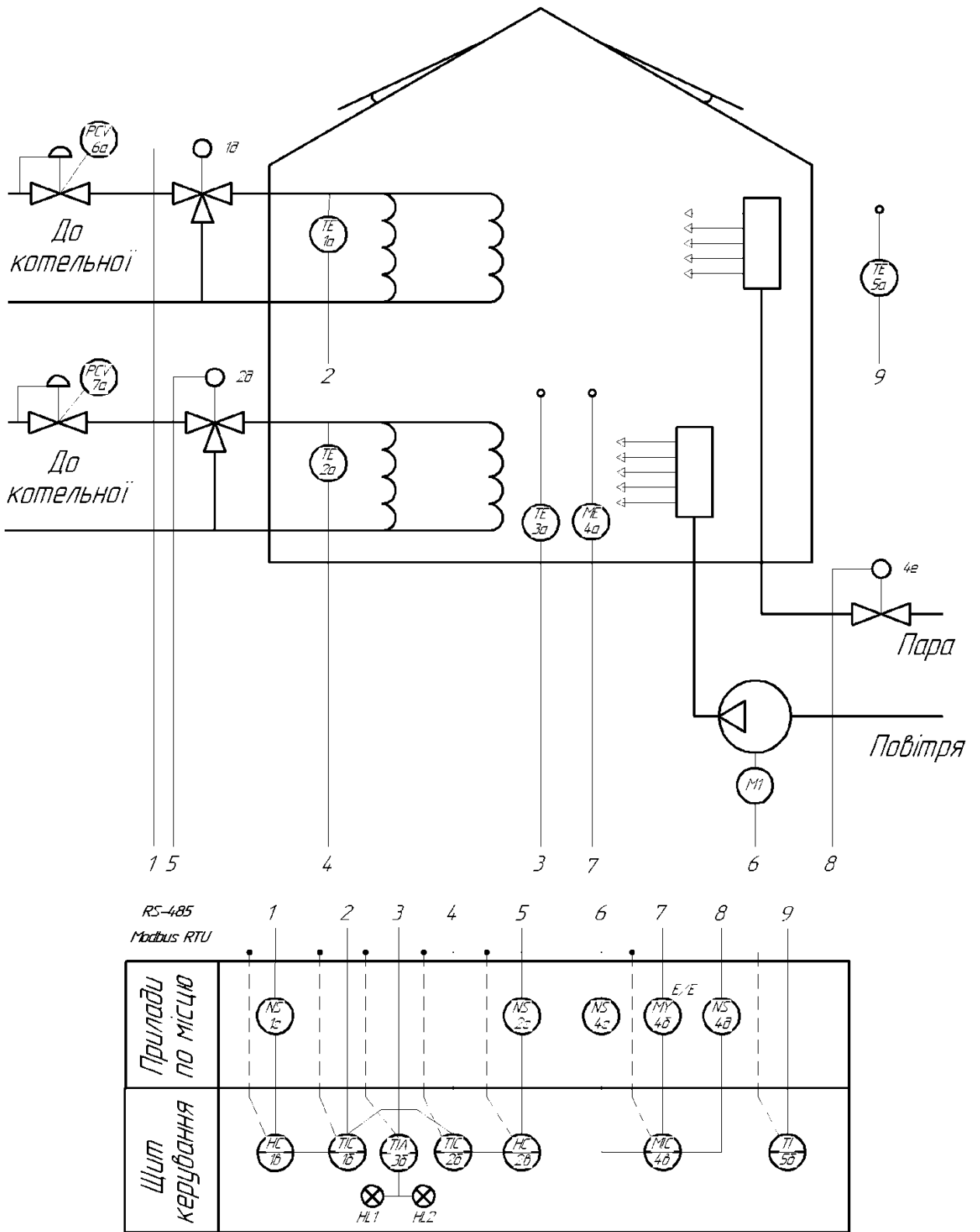


Рис. 2.6. Схема автоматизації теплиці (без елементів оформлення)

**Контур 4.** Призначення контуру – інформування та регулювання вологістю у приміщенні теплиці шляхом подачі додаткової пари та свіжого повітря. До контуру входить засоби автоматизації – датчик вологості (позиція *4a*), перетворювач показань датчика на уніфікований сигнал (позиція *4б*) прилад регулювання *4в*, перетворювачі для вмикання насосу *4г* та для виконавчого механізму *4д*, та виконавчий механізм *4е*. Значення вологості теплоносія читається датчиком та через перетворювач передається на регулюючий прилад. Регулюючий прилад може автоматично вмикати або насос (мотор *М1*) повітря якщо значення вологості занадто велике або відкрити клапан подачі пари *4е* якщо вологість занадто мала.

**Контур 5.** Призначення контуру – інформування оператора про значення температури повітря навколишнього середовища. До контуру входить засоби автоматизації – термометр опору (позиція *5a*) і показуючий прилад *5б*.

### РОЗДІЛ 3

## ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ. ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РОБОТИ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 3.1. Вибір алгоритму керування

Для визначення алгоритму керування визначимо динамічні властивості об'єкта та показники якості, які повинні бути забезпечені по технологічним вимогам. Регулятор обирають за величиною відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта керування:

$0,2 \leq \tau/T \leq 1$  лінійний алгоритм керування;

$\tau/T > 1$  імпульсний алгоритм керування;

$\tau/T < 0,2$  позиційний алгоритм керування.

$$\frac{\tau}{T} = \frac{100}{2500} = 0,04. \quad (3.1)$$

За розрахунками підходить пропорційний алгоритм керування.

Динамічний коефіцієнт регулювання дає змогу обрати найкращий алгоритм для конкретного об'єкта керування.

Методика вибору найкращого алгоритму керування полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання. Для статичних об'єктів:

$$R_d = y_1 / (K_0 u_{max}) \quad (3.2)$$

де:  $y_1$  – максимальне динамічне відхилення

$K_0$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування

$u_{max}$  – максимально можливе значення збурення по навантаженням.

За даними нашого об'єкта визначаємо динамічний коефіцієнт регулювання:

$$R_d = 1.5 / (5.05 * 2500) = 0.0002.$$

Далі за графічними залежностями обирають алгоритм керування.

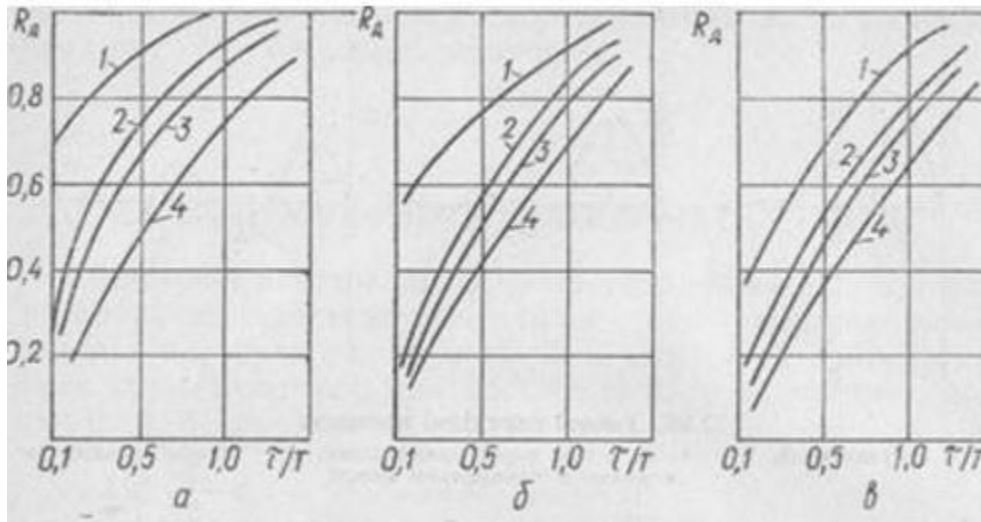


Рис3.1 Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування;

(а – для типового аперіодичного перехідного процесу; б – для типового перехідного процесу з 20% перерегулюванням; в – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості.)

Обираємо для даного об'єкта аперіодичний перехідний процес. За рис.3.1 обираємо пропорційний алгоритм керування. Перевіримо, чи забезпечується при цьому потрібний час регулювання: за таблицею 3.1 беремо  $\Psi=4.5$ , тоді  $tr_{п}=4.5 \cdot 0.5=2.25$ . Оскільки  $tr_{п} < tr$ , тобто  $2.25 < 2500$ , перевіримо виникнення при цьому статичної похибки. Визначаємо  $\Delta=K_o \cdot y_{\max} \cdot 0.37=25.75^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 3.1

Відносний час регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		аперіодичний	із 20% перерегулюванням	із мінімальним інтегральним показником
Пропорційний	Статичний	4,5	6,5	9,0
	Астатичний	6,0	8,0	-
Пропорційно-інтегральний	Статичний	8,0	12,0	16,0
	Астатичний	14,0	16,0	18,0
Пропорційно-інтегральний-диференціальний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

Оскільки  $0.3 < 20.52$ , то П-алгоритм керування не задовольняє всіх вимог. Для ПІ-регулятора  $tp_{PI} = 8.0 \cdot 0.5 = 4$ . Оскільки,  $tp_{PI} < tp$ , то ПІ-алгоритм керування забезпечує час регулювання, який вимагається.

Для даної зони в секції теплиці регулючим органом обрано вентилятор. Основною функцією якого буде розповсюдження теплого повітря по всіх зонах секції для урівнювання температури у всьому просторі теплиці.

Обрано вентилятор «Турбовент ВСХ 1100» (рис. 3.2)



Рис. 3.2 Зовнішній вигляд вентилятора «Турбовент ВСХ 1100»

Технічні характеристики вентилятора представлено в таблиці 3.4.

Табл. 3.4 Технічні характеристики вентилятора

Діаметр лопатів, мм	Швидкість обертів, об/хв	Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	Потужність, кВт	Напруга живлення, В
1000	600	32500	0.75	380

Габаритні розміри вентилятора рівні 1100x1100x400 (мм).

Передаточна функція вентилятора має вигляд:

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1} \quad (3.4)$$

Постійну часу виконавчого механізму визначаємо:

$$T_{BM} = \frac{I(S \cdot \omega_n)}{2M_x} \quad (3.5)$$

де  $S=0.1 \text{ мм}^2$  (ковзкість);  $I=17 \cdot 10^{-3}$  (момент інерції)

Постійна часу буде рівна 22 секунди.

Визначасмо коефіцієнт виконавчого механізму, знаходиться з відношення номінальної частоти обертання до номінальної напруги:

$$k_{BM} = \frac{\omega_H}{U_H} = \frac{600}{380} = 1,5$$

Передатна функція матиме вигляд:

$$W_{BM}(s) = \frac{1,5}{22 \cdot s + 1}$$

Для вимірювання поточної температури повітря обрано цифровий датчик температури «DHT22» (рис. 3.3).



Рис.3.3 Датчик температури

Даний датчик за своїми технічними характеристиками відповідає умовам використання для теплиці. Технічні характеристики сприймаючого елемента наведено в таблиці 3.2

Табл.3.3 Характеристики датчика

Наруга:	Робоча температура, °С	Теплова інерція ,с	Точність: °С	Тип інтерфейсу передачі даних:
3-5.5В	-40 до +125	0.75	+/- 0.5% С	I <sup>2</sup> С

Згідно розрахунків передатна функція сприймаючого елемента приймає вигляд:

$$W(s) = \frac{0.044}{1s+1}.$$

Головна функція **вентиляції в теплиці** – забезпечення оптимального мікроклімату для правильного розвитку рослин. Це означає, що в літню спеку застоєне перегріте повітря необхідно вчасно вивести з приміщення і замінити свіжим, а в прохолодне міжсезоння, при необхідності і взимку, повітря необхідно підсушити і забезпечити його рівномірну температуру в будь-якій точці теплиці.

В залежності від площі, крім одного або декількох вентиляторів включає і хорошу систему провітрювання, що забезпечує подачу свіжого повітря. Для провітрювання служать вентиляційні отвори, двері, а також вбудовані в дах і стіни фрамуги і кватирки. Для невеликої теплиці досить пари кватирок чи фрамуг, розташованих в даху або ж в стінах навпроти один одного, а щоб уникнути протягів, у різних рівнях. У великих теплицях систему вікон для провітрювання розташовують з розрахунку – одне вікно на кожні 1,5-2 метри довжини. Їх можна обладнати автоматичною системою відкриття-закриття або жалюзі.

Ефективна природна вентиляція – важлива умова забезпечення сприятливого мікроклімату в теплиці.

Для створення сприятливого мікроклімату, переміщення повітряного потоку і рівномірного розподілу тепла і вологи в приміщенні найбільш ефективно використання двох вентиляторів – циркуляційного і витяжного. Завдання переміщення повітряного потоку може вирішити промисловий або навіть побутовий вентилятор максимальної потужності. У теплиці завдовжки від шести метрів можна встановити два циркуляційних вентилятора.

### 3.2. Реалізація алгоритму керування

Алгоритм керування реалізуємо для цифрової системи керування.

Аналогічно з неперервними системами в цифрових системах можна реалізувати ПІ-закон регулювання.

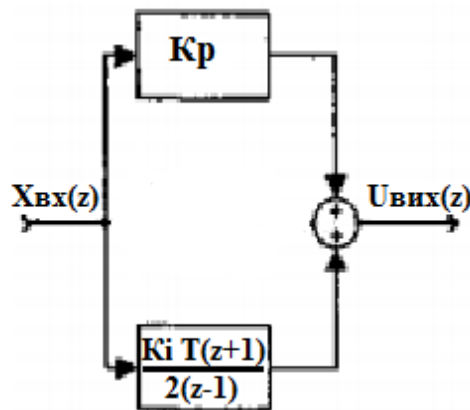


Рис. 3.4. Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІ-регулятора

$K_p, K_i$  – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора,

$T$  – період квантування.

### 3.3. Розробка цифрової системи керування

Цифрова система керування (ЦСК) – система, в якій безперервний сигнал перетворюється в цифровий код і керування здійснюється з застосуванням алгоритмів цифрової обробки інформації.

Синтез ПІ-регулятора полягає у знаходженні параметрів  $K_p, K_i$ .

Параметр інтегральної складової регулятора, який залежить від добротності за швидкістю  $K_v$  неперервної частини, визначається за формулою 4.1:

$$K_i = K_v \lim_{z \rightarrow 1} W_{н.ч.}(z)$$

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (таб. 4.4).

Таблиця 4.4 Співвідношення добротності за швидкістю від постійної часу об'єкта

$T_o, c$	$K_v$
$\sim 1$	3...10
$\sim 10$	0,3...1
$\sim 100$	0,01...0,04
$\sim 1000$	0,004...0,012

### 3.4. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Задача вибору раціонального часу квантування  $T_k$  є однією з основних проблем реалізації ЦСК.

Згідно з теоремою Котельникова для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати  $2\omega_c$ , де  $\omega_c$  – частота зрізу вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує, що сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $\omega_c$  рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом:  $T_k = \pi / \omega_c$ .

Визначення передаточної функції неперервної частини розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s) = \frac{K_{\theta}}{T_{\theta}s+1} \frac{K_o}{T_o s+1} \frac{K_{\theta}K_o}{T_{\theta}T_o s^2 (T_{\theta}+T_o)s+1}. \quad (3.6)$$

Виведено дану функцію в середовище Matlab для дослідження:

```
>> w=tf([5.05],[2500*22 2500+22 1])
Transfer function:
      5.05
-----
55000 s^2 + 2522 s + 1
```

Визначаємо передаточну функцію неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}^{\text{н.ч.}} = \frac{W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s)}{1+W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s)} = \frac{K_{\theta}K_o}{(T_{\theta}T_o s^2 + (T_{\theta}T_o)s + 1) + K_{\theta}K_o}. \quad (3.7)$$

Визначення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}(j\omega) = \frac{K_{\theta}K_o}{(T_{\theta}T_o(j\omega)^2 + (T_{\theta}T_o)(j\omega) + 1) + K_{\theta}K_o}. \quad (3.8)$$

У результаті розв'язання рівняння :

$$A(\omega) = \frac{K_{\theta}K_o}{\sqrt{(-T_{\theta}T_o\omega^2 + 1 + K_{\theta}K_o)^2 + (T_{\theta}T_o)^2\omega^2}} = 0.01. \quad (3.9)$$

Отримаємо значення частоти з рис. АЧХ системи:

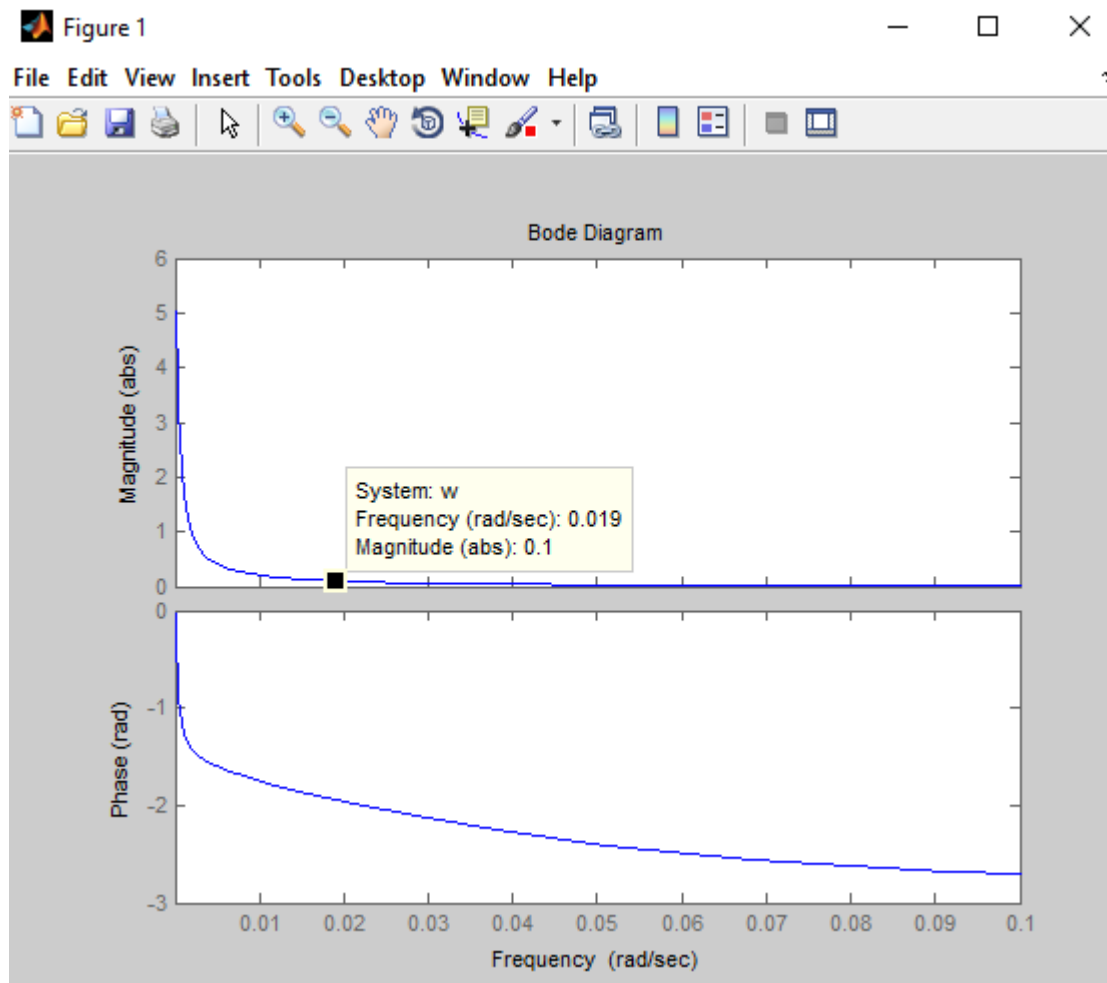


Рис. 3.5 АЧХ АСК

$$\omega_c = 0,019$$

і значення часу квантування:

$$T_k = \pi / \omega_c = 165 \text{ (с)}$$

### 3.5. Дослідження цифрового регулятора

Згідно з таблицею визначення відношення добротності за швидкістю від сталої часу об'єкта керування  $K_v = 0,01$ , оскільки  $T_o = 2500$  с. Для визначення передаточної функції  $W_{н.ч.}(z)$  застосовуємо пакет програм MATLAB (рис 3.8.). Для цього вводимо в консоль програмування MATLAB операції:

- завдання передаточної функції неперервної системи:  
 $w = \text{tf}([K_o], [T_b \cdot T_o \quad T_b + T_o \quad 1]);$

- Z-перетворення неперервної передаточної функції на дискретну  $wz=c2d(w,T)$ ,

де  $w$  – змінна виразу неперервної передаточної функції,  $T$  – крок квантування, с.

При синтезі ПІ-регулятора ми нехтуємо малою постійною часу  $CE$ , оскільки ПІ-регулятор компенсує лише один полюс Z-перетворення неперервної частини.

```
>> wz=c2d(w,165)

Transfer function:
    0.2806 z + 0.04177
-----
z^2 - 0.9367 z + 0.0005178

Sampling time: 165
fx >>
```

Рис. 3.6. Визначення передатної функції  $W_{н.ч.}(z)$

Тоді

$$K_i = \frac{0.01}{\left( \frac{0.002708 \cdot 1 + 0.003232}{1^2 - 0.7107 \cdot 1 + 0.0001974} \right)}$$

Після знаходження  $K_i$  параметр  $K_p$  визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z-перетворення неперервної частини системи.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{PI}(z) &= \frac{K_i \times T z + 1}{2} \frac{1}{z-1} = \frac{2 \times K_p \times z - 2 \times K_p + K_i \times T \times z + K_i \times T}{2z-2} = \\ &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T)z + (K_i \times T - 2 \times K_p)}{2(z-1)} = \\ &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[ z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z-1)} \end{aligned}$$

Рис 4.6 Передаточна функція ПІ-регулятора

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий  $K_p$ , який би задовольняв рівняння:

Параметр знаходимо за допомогою програми Mathcad (рис. 3.7.).

$$K_i := \frac{1}{\left( \frac{0.2787 \cdot 1 + 0.04368 + 0.000009478}{1^2 - 0.9367 \cdot 1 + 0.0005178 + 0.00000000000172486} \right)} = 0.198$$

Given

$$\frac{K_i \cdot T - 2 \cdot K_p}{K_i \cdot T + 2 \cdot K_p} = 0.00000000000172486$$

$$\text{Find}(K_p) = 0.099$$

+

Рис 3.7 Скрін екрану знаходження параметру  $K_p$  та  $K_i$  за допомогою програми Mathcad

Для дослідження показників якості роботи системи використовуємо модель у програмному середовищі MATLAB/Simulink (рис.4.8 ).

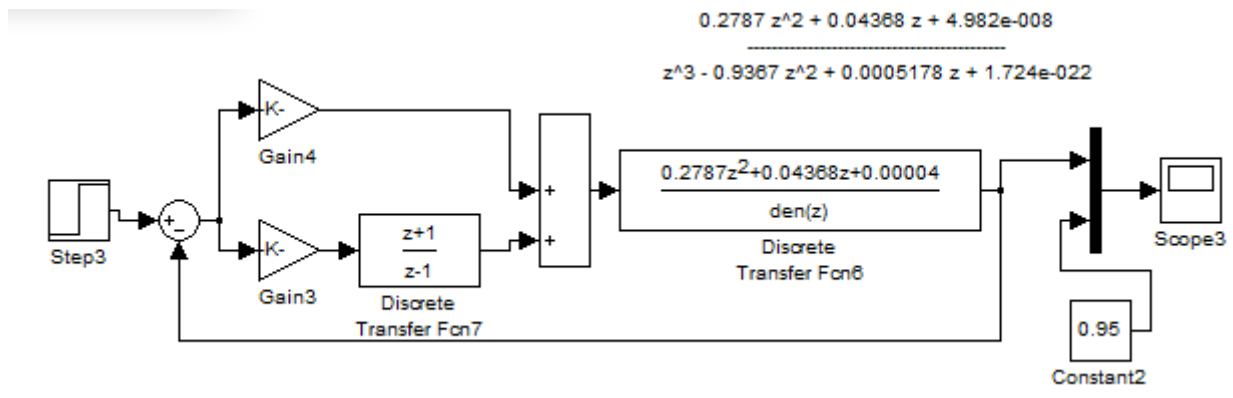


Рис. 3.8. Simulink-модель цифрової КІС

Після отримаємо перехідний процес системи з ПІ-регулятором.

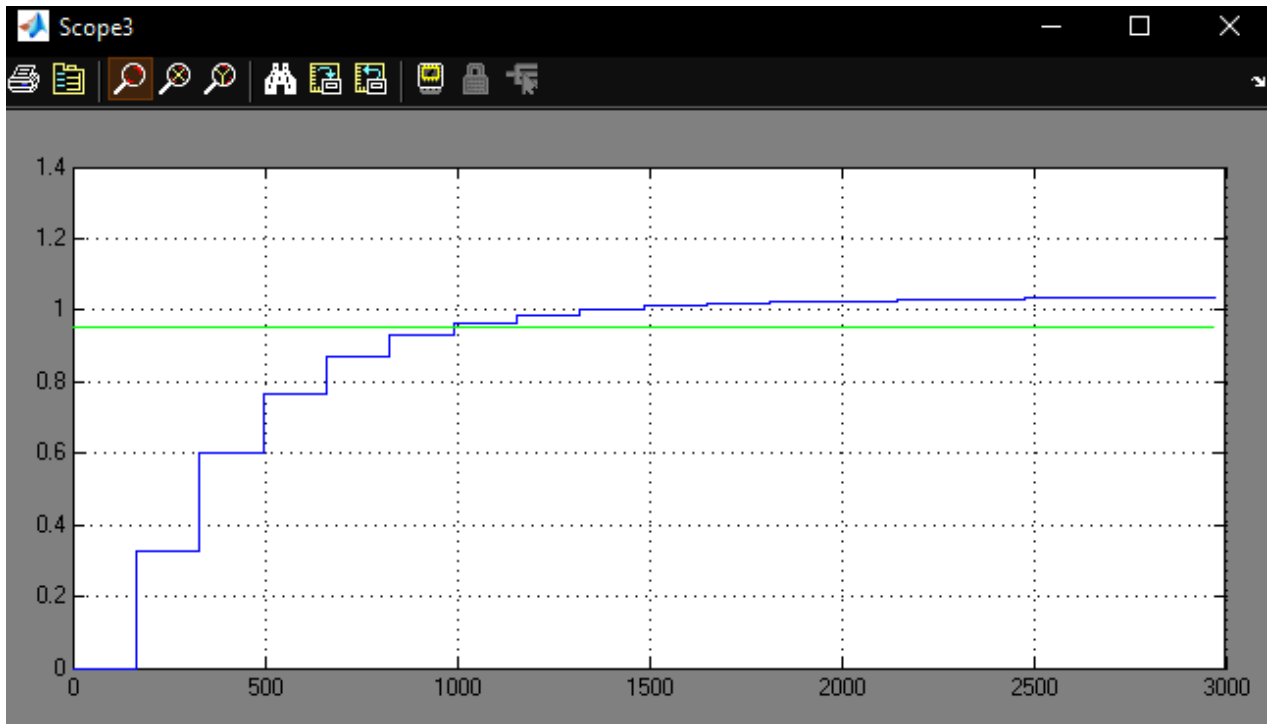


Рис.3.9 Перехідний процес системи керування з ПІ-регулятором.

### 3.6. Дослідження цифрової системи на стійкість та якість

Використовуючи розімкнуту передаточну функцію цифрової системи  $W_{роз}(z)$ , знайдемо  $W_{зам}(z)$ , розв'яжемо рівняння та знайдемо характеристичні корені.

$$W_{роз}(z)W_{зам} = \frac{0.975z-0.001}{2z-2} * \frac{0.002708z+0.003232}{z^2-0.707z+0.0001974} \quad (3.10)$$

У результаті було отримано наступне характеристичне рівняння:

$$2z^3 - 3.4214z^2 + 1.4217948z - 0.003948$$

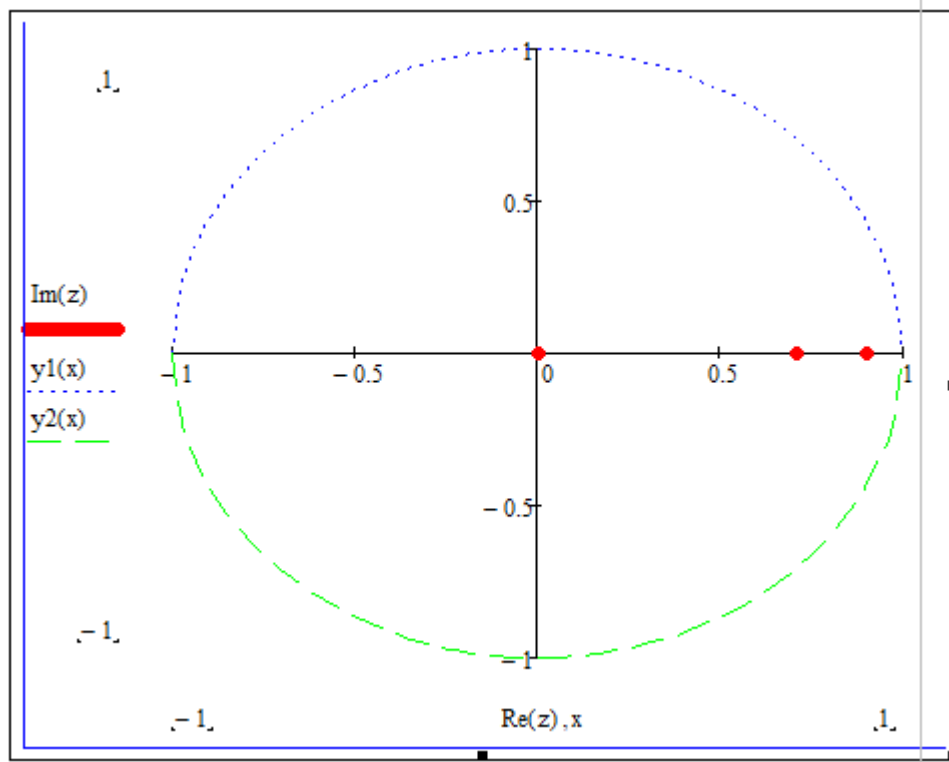


Рис 3.10 Корені характеристичних рівняння на площині.

Згідно рис 3.10 визначаємо:

- час регулювання  $tp=1270c$ ;
- перерегулювання  $\sigma=1$   
коливальність  $n = 0$ .

## РОЗДІЛ 4

### МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦЬ

#### 4.1. Аналіз існуючих систем для контролю параметрів мікроклімату теплиць

*SoilSense* – це система зрошення на основі розумних датчиків, яка дає змогу економити воду і одночасно підвищувати урожайність рослин. Для використання системи потрібно лише встановити датчі в ґрунті теплиці і інсталиувати на смартфон додаток. Система SoilSense дозволяє зменшити витрати води і збільшити кількість зібраного врожаю [31]. Зовнішній вигляд апаратного забезпечення та веб-інтерфейс користувача системи SoilSense зображені на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Зовнішній вигляд компонентів системи SoilSense

Система зрошення SoilSense являє собою сучасний апаратно-програмний комплекс. Процес поливу рослин відбувається в автоматичному режимі завдяки запатентованому інноваційному алгоритму. Оскільки система SoilSense є повністю цифровою, вона не потребує технічного обслуговування

механізмів. Це дає змогу виробникам зосередитися безпосередньо на оптимізації процесу свого виробництва. Недоліком цієї системи є обмежений набір датчиків, який не дозволяє контролювати весь спектр параметрів мікроклімату тепличного комплексу.

**GroLab** являє собою програмно-апаратний комплекс для управління процесом вирощування рослин в теплиці. Основна мета цієї системи – забезпечити можливість налаштовувати компоненти та пристрої, що відповідають за вирощування сільськогосподарської продукції [32]. Інтерфейс користувача системи GroLab зображений на рис. 4.2.

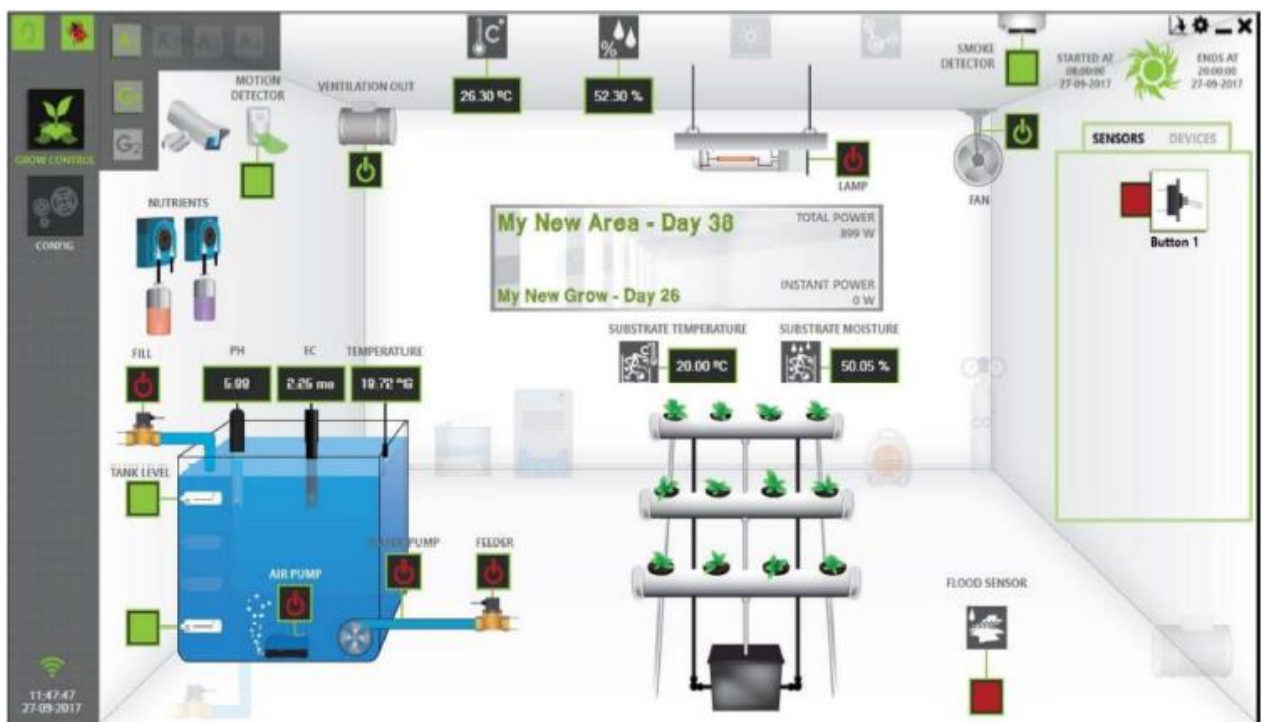


Рис. 4.2. Інтерфейс користувача системи GroLab

Система забезпечує можливість відстеження росту рослин за допомогою *IP-камер*. Є можливість експорту усіх даних, які отримані від датчиків чи виконавчих механізмів, у файл для глибшого аналізу. Програмне забезпечення GroLab дає змогу створювати графіки для освітлення та зрошення. До недоліків цієї системи можна віднести необхідність купівлі апаратних засобів разом із спеціалізованим програмним забезпеченням для повноцінної роботи.

Система *Intelligrow* дає змогу допомогти виробникам сільськогосподарської продукції, які вирощують її у тепличних умовах, досягти більшої врожайності впродовж цілого року. Система *Intelligrow* забезпечує можливість дистанційного моніторингу стану врожаю через веб-браузер з комп'ютера, планшета чи телефону [33]. На рис. 4.3 зображений додаток *Intelligrow* від компанії *Autogrow*.

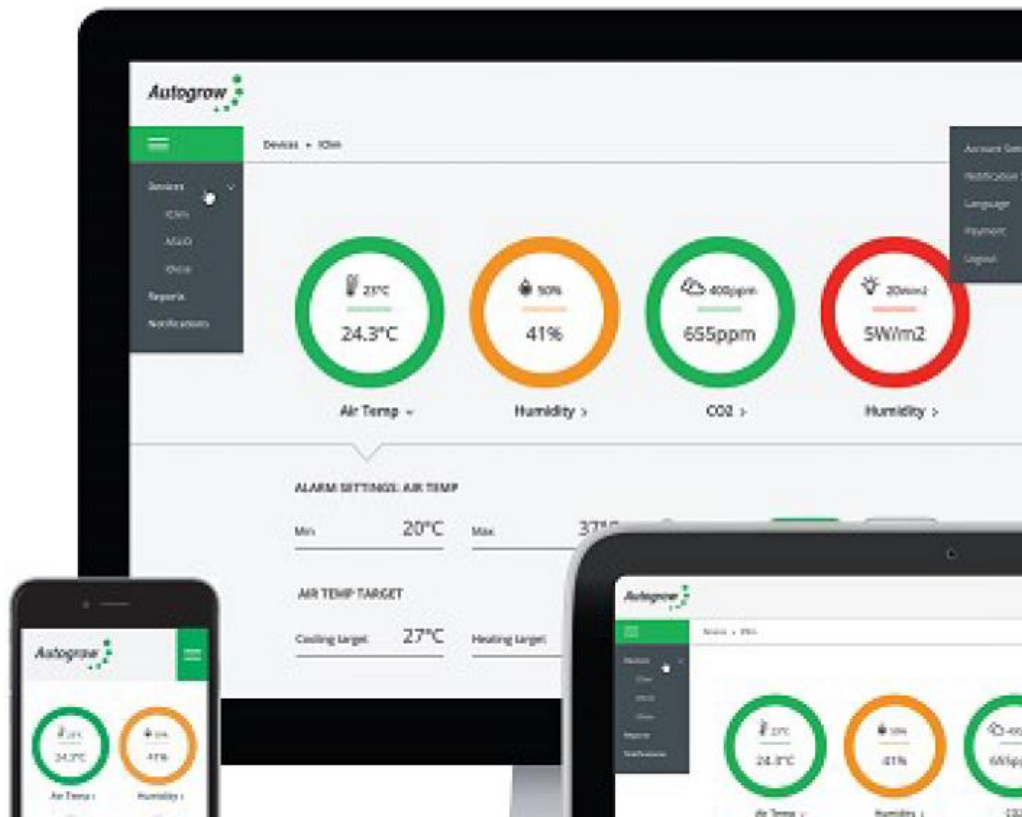


Рис. 4.3. Інтерфейс користувача системи *Intelligrow*

Недоліком системи *Intelligrow* є відносно висока вартість апаратного забезпечення. Крім того, для використання програмного забезпечення необхідно вносити щомісячну плату.

## 4.2. Дистанційний моніторинг параметрів мікроклімату теплиць на основі технології "Інтернет речей"

Мікроклімат теплиці формують всі системи інженерного обладнання – джерело штучного освітлення, подача вуглекислого газу, система зрошення, вентиляції та опалення. Для оптимізації росту рослин під час їх вирощування потрібно забезпечити оптимальне співвідношення між вологістю та температурою в повітрі та ґрунті, концентрацією вуглекислого газу та інтенсивністю світла.

В роботі запропонований метод дистанційного моніторингу параметрів мікроклімату теплиць, на основі використання принципів концепції *інтернету речей*. Його суть полягає у реалізації можливості віддаленого моніторингу параметрів мікроклімату теплиці та, за необхідності, керування процесом ввімкнення та вимкнення виконавчих механізмів для регулювання цих параметрів та підтримки їх в оптимальному діапазоні значень. Схема включає в себе такі основні компоненти:

- блок датчиків;
- виконавчі пристрої;
- блок керування;
- WiFi - модуль;
- веб-сервер.

Для реалізації методу дистанційного моніторингу параметрів мікроклімату теплиць потрібно розробити основні модулі та вузли проєктованої системи: блок датчиків, блок керування та блок виконавчих пристроїв.

### **4.3. Методи та засоби для вимірювання параметрів мікроклімату теплиць**

Однією з основних функцій проєктованої системи є отримання інформації від датчиків. Розглянемо детальніше особливості процесу опитування датчиків проєктованої системи. Для забезпечення високої продуктивності тепличних комплексів необхідно підтримувати велику кількість параметрів на певному рівні або у певному оптимальному діапазоні значень.

Вологість та температура в теплиці вимірюються датчиком DHT22. Він передає отримані дані в мікроконтролер у вигляді цифрового сигналу через одно-направлену шину.

Одразу після подачі живлення датчик перебуває в нестабільному стані, який триває приблизно одну секунду. Тому варто перечекати цей період, не починаючи процесу його опитування. Управління датчиком DHT22 здійснюється шляхом встановлення стану логічного нуля на інформаційній лінії і встановлення логічної одиниці після її відпускання. Для цього використовується резистор налаштування номіналом 4,7 кОм, який встановлюється між інформаційною лінією датчика та шиною живлення.

На початку встановлюється логічна одиниця на інформаційному виводі датчика. Впродовж цього часу він перебуває у сплячому стані. Для початку роботи з датчиком необхідно надіслати команду для його запуску. Це робиться шляхом подачі логічного нуля на 18 мілісекунд, після чого потрібно подати логічну одиницю.

У випадку підключення датчика до шини і готовності його до роботи, він через 20 мілісекунд відповість встановленням логічного нуля. Потім, після періоду тривалістю 80 мілісекунд DHT22 встановиться логічна одиниця на лінії зв'язку. Після ще часового інтервалу у 80 мілісекунд датчик інформації розпочинається процес передачі інформації. Процес отримання даних від датчика DHT22 зображений у вигляді часової діаграми на рис. 4.4.

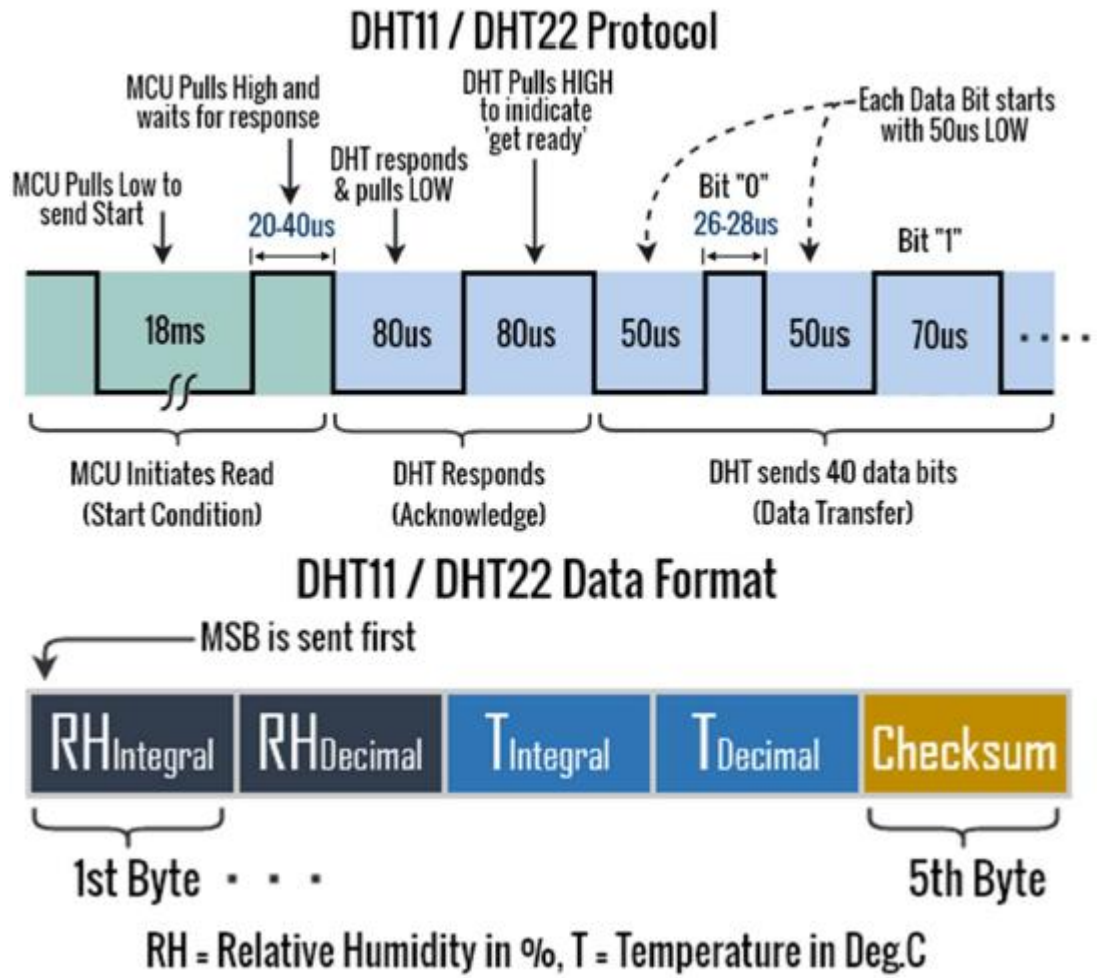


Рис. 4.4. Часова діаграма процесу опитування датчика DHT22

#### 4.4. Реалізація системи керування з технологією інтернет речей

Реалізація системи керування у вигляді веб-сервера, як складової технології інтернет речей. Реалізація інтернет речей у такому випадку реалізується Ethernet

Пропонується створити Ethernet станцію вимірювання параметрів мікроклімату на базі апаратного забезпечення Arduino

Як керуючий елемент використовується апаратна складова Arduino MEGA2560 (рис. 4.5)

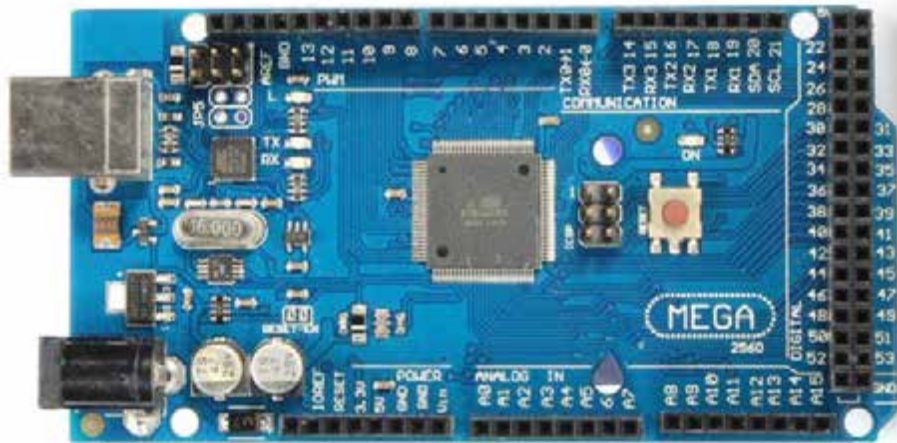


Рис. 4.5 Зовнішній вигляд Arduino MEGA2560

Характеристики Arduino MEGA2560:

- Мікроконтролер - ATmega2560 - 16AU
- Спосіб підключення до USB - ATmega16U2-MU USB контролер
- Робоча напруга 5В
- Вхідна напруга (граничне) 7-11V
- Цифрові входи/виходи- 54 (15 з яких забезпечують вихід PWM / ШІМ)
- Аналогові входи - 16
- Постійний струм контактів введення/виведення 40 мА
- Постійний струм на 3,3В Pin - 50 мА
- Флеш-пам'ять 256 Кб, з яких 8 КБ використовуються завантажувачем

- 8 КБ SRAM
- EEPROM 4 КБ
- Тактова частота 16 МГц

Для створення веб-сервера для апаратної складової використовується комунікаційний модуль Шилд W5100 ethernet shield (рис. 4.6)



Рис. 4.6 Зовнішній вигляд модуля Шилд W5100 ethernet shield

Характеристики W5100 ethernet shield:

- Мікросхема інтерфейсу: W5100
- Мережевий інтерфейс: Ethernet 10/100 Мбіт
- Напруга живлення: 5В
- Сумісність з контролерами Arduino Mega2560/Uno R3/Arduino Duemilanove та Mega series
- Додає слот для карти micro-SD, може використовуватися для зберігання файлів для обслуговування по мережі
- Підтримка TCP / IP протоколів

Форм-фактор даного модуля створено для відповідних плат Arduino UNO і Arduino MEGA2560. З'єднання відбувається безпосередньо за протоколом SPI. На рис. 4.7 показано відповідно приєднання модуля до апаратної платформи Arduino MEGA2560.

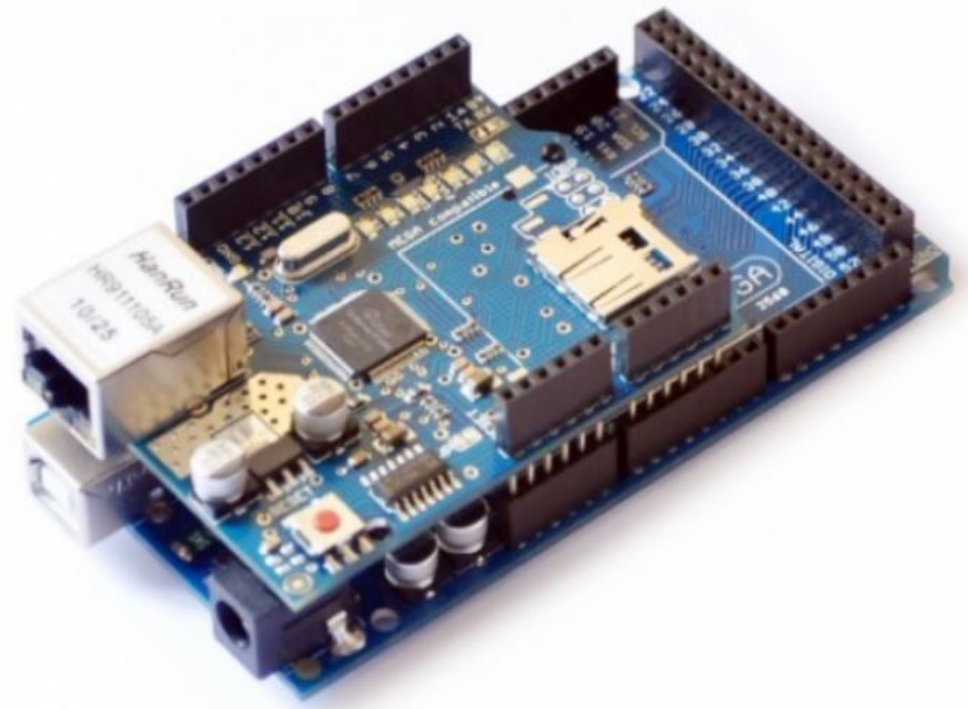


Рис. 4.7 Зовнішній вигляд модуля веб-серверу

Структурна схема пристрою для контролю параметрів мікроклімату теплиці наведена на рис. 4.8.

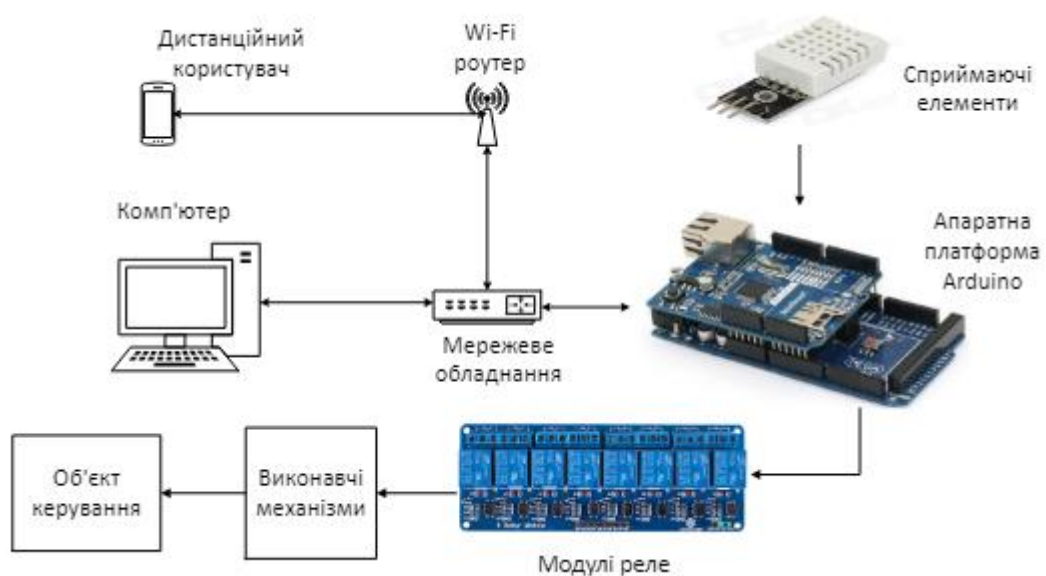


Рис. 4.8. Структурна схема пристрою для контролю параметрів мікроклімату теплиці

Мікроконтролер є найважливішим і необхідним компонентом даної системи, оскільки він відповідає за управління системою загалом. WiFi модуль також є важливим елементом, оскільки він забезпечуватиме комунікацію з зовнішніми пристроями через мережу.

Набір сприймаючих елементів призначений для вимірювання найважливіших показників мікроклімату тепличних комплексів: температури та вологості повітря, можливе також доповнення сприймаючими елементами рівня освітленості, вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу в повітрі.

Керування виконавчими механізмами теплиці для регулювання параметрів мікроклімату в автоматичному або ручному режимі буде виконуватись за допомогою перемикання контактів модуля реле.

#### **4.5. Програмне забезпечення системи для контролю параметрів мікроклімату теплиці**

В цій роботі обрано **Arduino IDE** (рис. 4.9) в якості середовища написання коду для мікроконтролерів.

Arduino IDE містить велику кількість вбудованих бібліотек з об'єктами та функціями для взаємодії з зовнішніми пристроями, які використовуються в проєктованій системі. Це значно спрощує написання програмного забезпечення.

Після компіляції програмного коду IDE генерує файл, який має розширення \*.cpp. Платформа Arduino IDE є відкритою та безкоштовною, що дає змогу використовувати її без порушення авторських прав.

За замовчуванням середовище Arduino IDE має вбудований компілятор для коду, який написаний для плат Arduino. Для того, щоб додати можливість

написання та компіляції коду для мікроконтролера плати ESP8266, необхідно інсталювати у середовищі Arduino IDE відповідний плагін. Для цього у вікні «Preferences» потрібно вставити посилання на файл додатку з розширенням .JSON (додаток Б).

Потім у вікні «Boards Manager» можна знайти та встановити модуль «esp8266» (додаток В).

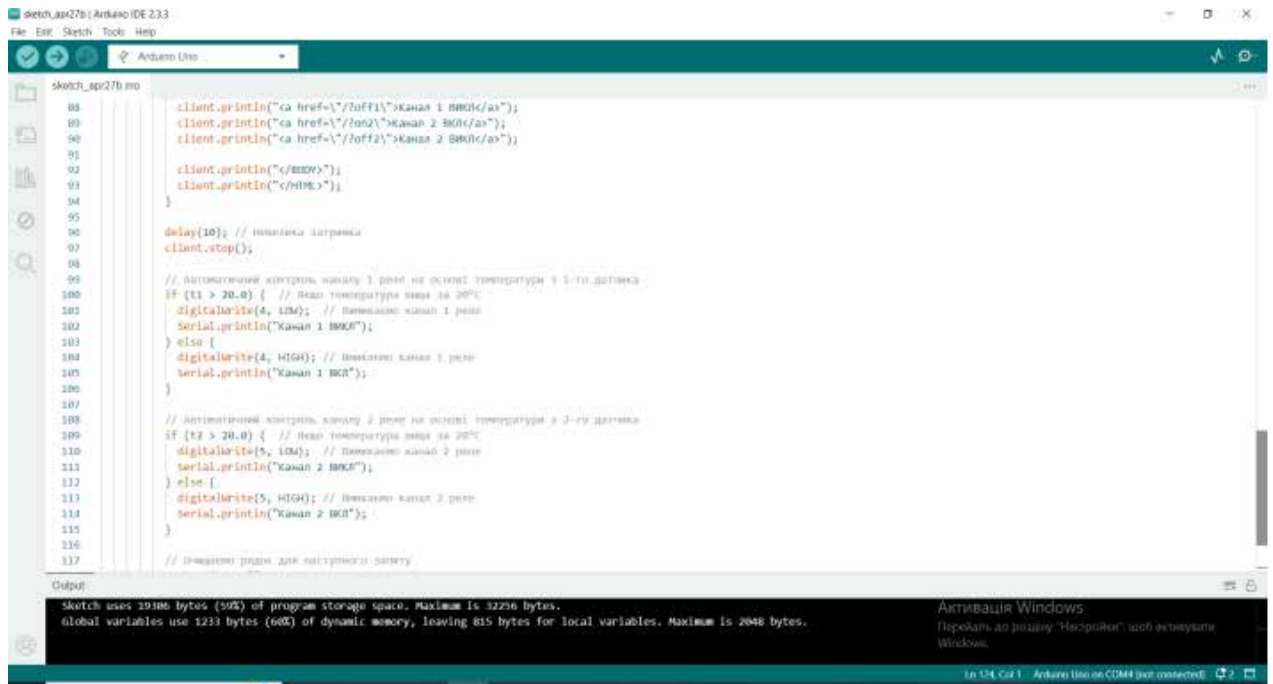


Рис. 4.9 Середовище Arduino IDE

В процесі написання коду для отримання даних від датчика DHT22 було встановлено бібліотеку DHT.h в середовищі Arduino IDE.

Для вимірювання температури повітря в теплиці підключено бібліотеку:

```
#include "DHT.h"
```

Створено об'єкт *dht* в якому налаштовано тип датчика та номера виводу, до якого він підключений:

В підпрограмі *setup()* виконано налаштування цього об'єкта:

```
dht.begin();
```

В головному циклі процес опитування датчика реалізований з використанням функції *readTemperature()*:

```
// Read temperature as Celsius (the default)
float t = dht.readTemperature();
```

Приклад скріну тексту програми оголошення веб серверу та циклу встановлення початкових змінних наведено на рис.

```
// Enter a MAC address and IP address for your controller below.
// The IP address will be dependent on your local network:
byte mac[] = {
  0x5C, 0x62, 0x8B, 0x75, 0x23, 0x5D };
IPAddress ip(92, 168, 0, 101); // вказуємо собі MAC та IP адреси

// Initialize the Ethernet server library
// with the IP address and port you want to use
// (port 80 is default for HTTP):
EthernetServer server(80);

// Relay state and pin
String relayState = "Off";
const int relay = 7;

// Client variables
char linebuf[80];
int charcount=0;

void setup() {
  // Relay module prepared
  pinMode(relay, OUTPUT);
  digitalWrite(relay, HIGH);

  // Open serial communication at a baud rate of 9600
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for Leonardo only
  }
}
```

Рис. 4.10 Скрін фрагменту тексту програми

Скрін налаштування веб-сервера показано на рис. 4.11.



Рис. 4.11 Знімок екрану налаштування web-сервера

При запиті клієнта у внутрішній мережі адреси сервера (<http://10.11.0.105>), сервер звертається до контролера Arduino, який пересилає виміряні дані до браузера. Також програмою передбачено висвітлення кнопок перемикання реле для включення та виключення складових системи керування.

Можливостями апаратної платформи передбачено дистанційне вимірювання температури (T) та вологості ( $\varphi$ ) повітря через запит з персонального комп'ютера на її IP-адресу. Загальний алгоритм означеного показано на рис. 4.12.

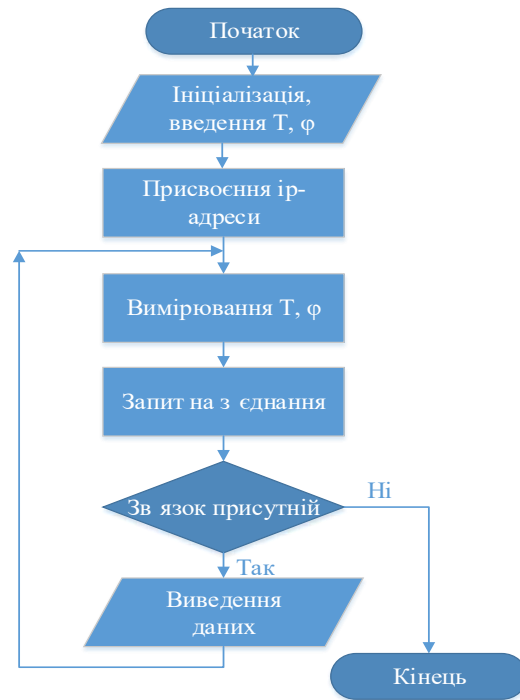


Рис. 4. 12 Загальний алгоритм дистанційного вимірювання  $T$  та  $\phi$

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Економічна ефективність автоматизації вимірюється ступенем зменшення сукупної живої праці, що витрачається на виробництво одиниці продукції. Слід відзначити, що ефективність автоматизації виробництва характеризується сумарним скороченням затрат на виробництво одиниці продукції.

Загальна вартість для технічних засобів системи автоматичного управління:

$$K_z = K_{TO} + K_d + K_p + K_{щ}, \quad (5.1)$$

де:  $K_{TO} = 21065$  грн. – вартість технологічного обладнання;

$K_d = 30$  грн. – вартість датчиків температури та вологості;

$K_p = 200$  грн. – контролер «Arduino»;

$K_{щ} = 600$  грн. – вартість щита керування.

Отже:

$$K_z = 21065 + 30 + 1300 + 1600 = 23995, \text{ грн.}$$

Торгівельно-транспортні витрати будуть становити:

$$K_{TT} = 0,11 * K_z, \quad (5.2)$$

$$K_{TT} = 0,11 * 23995 = 2319,56 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж технічних засобів автоматики КІС становлять:

$$K_M = 0,17 * K_z, \quad (5.3)$$

$$K_M = 0,17 * 21895 = 3\,439,32 \text{ грн.}$$

Витрати на прокладання проводу:

$$КПР=КПР1*L, \quad (5.4)$$

де:  $КПР1 = 16$  грн/м – вартість проводки системи та її монтаж;

$L = 360$  м – довжина проводки системи.

$$КПР=16*360=5760 \text{ грн.}$$

Інші капітальні витрати будуть становити 2% від капітальних вкладень:

$$ККВ=0,02*21895=419,92 \text{ грн.}$$

Капітальні витрати визначаємо за формулою:

$$К=КЗ+КТТ+КМ+КПР+ККВ \quad (5.5)$$

$$К=21895+2319,56+3\,439,32+5760+419,92=33\,854,48 \text{ грн.}$$

Визначивши суму капіталовкладень, можна знайти відрахування на амортизацію

$$Са=0,142*К, \quad (5.6)$$

$$Са=0,142*33\,854,48=4\,578,26 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт будуть становити:

$$СПР=0,18*К, \quad (5.7)$$

$$Са=0,18*34\,354,48=6\,183,8 \text{ грн.}$$

Витрати на енергоресурси будуть становити :

$$C_e = P \cdot \Gamma \cdot 1,9. \quad C_e = P \cdot \Gamma \cdot 1,9, \quad (5.8)$$

де  $P = 0,95$  кВт - потужність автоматизації;

$\Gamma = 153 \cdot 24 = 3\,672$  год. - кількість годин роботи (теплиця працює 153 днів на рік).

Отже:

$$C_e = 0,95 \cdot 3\,672 \cdot 1,9 = 6\,627 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці персоналу, що пов'язаний з експлуатацією системи автоматизації становить:

$$C_z = 1 \cdot 60 \cdot 8 \cdot 153 = 73\,440 \text{ грн,} \quad (5.9)$$

де: 1 – кількість операторів;

60 грн/год. – ставка оператора;

8 - години роботи на добу;

153 - кількість днів роботи на рік.

Отже річні експлуатаційні витрати будуть становити:

$$C = 4\,878,26 + 6\,183,8 + 6\,627 + 73\,440 = 91\,128 \text{ грн.}$$

Розрахунок основних показників економічної ефективності. Знайшовши річні експлуатаційні витрати і капітальні вкладення можна знайти зведені витрати:

$$B_{zv} = C + E_n \cdot K, \quad (5.10)$$

$$B_{zv} = 73\,440 + 0,15 \cdot 34\,354,48 = 78\,593 \text{ грн.}$$

Тоді чистий прибуток буде визначатись за формулою:

$$Ч_{пр} = \Delta C_z + \Delta C_v, \quad (5.11)$$

$\Delta C_в$ - прибуток за рахунок економії електричної енергії;

$$\Delta C_з = C_з - (1,2 * Г * 1,6), \quad (5.12)$$

$$\Delta C_з = 73\,440 - (1,2 * 3\,672 * 1,6) = 66\,390 \text{ грн.}$$

$$\Delta C_в = C_в - (P * Г * 1,6 * \Delta П), \quad (5.13)$$

$$\Delta C_в = 6\,627 - (0,95 * 3\,672 * 1,6 * 0,4) = 4\,394,42 \text{ грн.}$$

$\Delta П = 40\% = 0,4$  - економія часу енергоспоживання при автоматизації.

$$Ч_{пр} = 66\,390 + 4\,394,42 = 70\,784,42 \text{ грн.}$$

Термін окупності установки визначається за формулою:

$$T_{окуп} = K / Ч \quad (5.14)$$

$$T_{окуп} = 34\,353,47 / 70\,784,42 = 0,485 \approx 5 \text{ місяці.}$$

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі розв'язана важлива задача щодо розроблення системи для контролю параметрів мікроклімату теплиці на основі технології IoT (інтернет речей).

1. Проведено огляд та аналіз літературних джерел на тему технології вирощування овочів в промислових теплицях та застосовуваного технологічного обладнання, дистанційного контролю параметрів мікроклімату в теплицях, окреслено питання, які потребують удосконалення.

2. Розроблена математична модель температурно-вологісного режиму в промисловій теплиці, отримані передатні функції для каналів керування температурою і вологістю повітря. Виконано вибір сприймаючого елемента та керуючого елемента системи автоматизації. Виконано розрахунок параметрів регулятора цифрової системи керування.

3. Удосконалено метод контролю параметрів мікроклімату теплиць на основі використання технологій інтернету речей з можливістю передачі даних на IoT платформу, використовуючи протокол Ethernet.

4. Розроблено апаратне забезпечення системи для дистанційного моніторингу параметрів мікроклімату теплиць. Зокрема, синтезовано структурну схему системи та схему електричних з'єднань.

5. Створено алгоритмічне та програмне забезпечення для комп'ютеризованої системи енергоефективного контролю параметрів мікроклімату в теплицях з використанням технології інтернет речей. Впровадження розробленої системи дозволить в режимі реального часу здійснювати моніторинг параметрів мікроклімату теплиці, що дасть змогу підвищити якість вирощеної продукції.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Аутко А.А. Овочівництво захищеного ґрунту. Технології, інновації, економіка / А.А. Аутко, Г.И. Гануш, Н.Н. Долбик. – К: ВВР, 2006. – 311 с.
3. ВНТП АПК-19-07. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування. [Чинний від 2007-08-01]. Вид. офіц. Київ: М-во аграр. політ. України, 2007. 140 с.
4. Драганов Б.Х., Міщенко А.В., Борхаленко Ю.О. Основи теплотехніки і гідравліки: Навчальний посібник / За ред. Б.Х. Драганова. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 495с.
5. Іваненко В.Ф. Енергетичний моніторинг і економічна оцінка тепличних господарств / В.Ф. Іваненко // Продуктивність агропромислового виробництва. – 2012. – №21. С.58–66.
6. 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.
7. Кошкін Д.Л., Павлюченко І.С. Математична модель керування мікрокліматом грибною теплиці. Вісник аграрної науки Причорномор'я. 2012. Вип. 1. С. 165–170.
8. Лактіонов І.С., Вовна О.В., Зорі А.А. Комп'ютеризовані вимірювачі комплексу фізичних параметрів ґрунтів та мікроклімату промислових теплиць: монографія. Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2016. – 212 с.
9. Лисенко В.П. Оптимізація витрат енергії в теплицях / В.П. Лисенко, А.О. Дудник, І.Ю. Якименко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Технічні науки. Випуск 187 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНУТСГ, 2017.–С. 72-73.
10. 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.
11. Математична модель енерговитрат у теплиці / А.О. Дудник, В.П. Лисенко, В.О. Мірошник // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК" / Редкол.: Д.О. Мельничук (відп. Ред.) та ін. – К.: ВЦ НУБіП України, 2013. – Вип. 184, Ч.2 – С. 119-128.

12. Міненко С.В., Савченко В.М., Крот В.В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустриальних теплицях. Вісник ЖНАЕУ. 2016. № 1 (53), т. 1. С. 270–276.
13. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1) / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2012. – 540 с.
14. Особливості автоматизації у спорудах закритого ґрунту: монографія // В. П. Лисенко, А.О. Дудник, Т.І. Лендел. – К. : НУБіП України, 2017. – 153 с.
15. Повітряна система опалення та кондиціонування теплиць із використанням геотермального джерела / В.Г. Олініченко, А.О. Александров, В.В. Величко. Ін-т поновлюваної енергетики НАН України. – К.:, 2007.
16. Промислове виробництво овочевої продукції у теплицях. Під редакцією С,Ф. Кащенко та М.М. Йорданова. – К.: Урожай, 1997. – 353 с.
17. Решетюк, В. М. Вибір структури та розробка моделі системи керування мікрокліматом при ідентифікації теплиці в класі біотехнічних систем. / Решетюк, В. М., Мірошник, В. О., Лендел, Т. І., Куляк, Б. В. // Енергетика та автоматика. – 2017. № 2. - С. 116-127.
18. Решетюк В.М., Мірошник В.О. Типові технологічні процеси і об'єкти виробництв.– К.: Видавничий центр НУБІПУ, 2008.– 62 с.
19. Сучасне овочівництво захищеного та відкритого ґрунту: Навч. посібник для агр. навч. закладів I-IV рівнів акредитації за спец. 1310 "Агрономія" / Білогубова Е.Н., Васильєв А.М., Гіль Л.С. та ін. – К.: ПАТ "Видавництво "Київська Правда", 2006. – 528 с.
20. Токмаков Н.М., Грудинін В.С. Математична модель системи керування мікрокліматом ангарних теплиць // Гавриш. – 2008. –№3. – С.28-32.
21. Чепурна Н.В., Чепурний В.В. Сучасні енергозберігаючі системи зашторювання теплиць // Нова тема. – 2009. – №2. – С. 29-31.
22. Шишко Г.Г., Потапов В.А., Злобін Л.А. Опалення та вентиляція теплиць.– К.: Будівельник, 1984. – 467 с.
23. 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. ISBN 978-966-185-062-9.
24. Закон України "Про енергозбереження" від 1 липня 1994 р. №75/94-ВР // Відомості Верховної Ради України. – офіц. вид. – К.: Парлам. вид-во, 1994. – 283 с.
25. Промислові теплиці типу «Venlo»  
Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.agrotechnical.net.ua/uk/industrial-greenhouses-of-the-venlo-type/>

26. Atia D.M., El-madany H.T. Analysis and design of greenhouse temperature control using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2017. Vol. 4 (1). P. 34–48.
27. Sanchez-Molina J.A., Li M., Rodriguez F., Guzman J.L., Wang H., Yang X.T. Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouses. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. Vol. 10 (4). P. 66–76.
28. Hameed I.A., Kim S. A system with pseudo-derivative feedback control for short-term greenhouse operation. *International Control Conference (ICC2006) (Glasgow, 30 Aug. – 01 Sep. 2006)*. Glasgow, 2006. P. 1–6.
29. Кошкін Д.Л., Павлюченко І.С. Математична модель керування мікрокліматом грибної теплиці. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2012. Вип. 1. С. 165–170.
30. Ben Ali R., Aridhi E., Mami A. Dynamic model of an agricultural greenhouse using Matlab-Simulink environment. *16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA) (Monastir, 21 – 23 Dec. 2015)*. Monastir, 2015. P. 346–350.
31. Науковці з Данії розробили розумну систему зрошення для теплиць. URL: <https://superagronom.com/news/13793-naukovtsi-z-daniyi-rozrobili-rozumnu-sistemuzroshennya-dlya-teplits>  
(дата звернення: 22.10.2024)
32. GroLab – Agricultural Automation System. URL: <https://opengrow.pt/software/>  
(дата звернення: 24.10.2024)
33. IntelliGrow – Cloud-based Greenhouse Crop Management Application. URL: <https://autogrow.com/our-products-solutions/intelligrow>  
(дата звернення: 24.10.2024)
34. Євсеєнко О. М. Розробка апаратно-програмної системи керування мікрокліматом теплиці. *Технічна інженерія*, № 1 (85), 2020. С. 104–109.

## ДОДАТКИ ДОДАТОК А

### Процес встановлення бібліотеки DHT.h

