

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

МІДИК АНДРІЙ-ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.2; 681.5

**ПІДСИСТЕМИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЮ КІБЕРФІЗИЧНИХ
СИСТЕМ**

05.11.04 – *прилади та методи вимірювання теплових величин*

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

15 «Автоматизація та приладобудування»

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.-В. В. Мідик

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
Доктор технічних наук, професор
Яцишин С.П.

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар разової спеціалізованої
вченої ради*

О.Й.Гонсьор

Львів - 2022

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сільськогосподарська продукція, зокрема овочі, є важливою складовою валового продукту України. Завдання продукту ефективного та низького за вартістю стає дедалі актуальнішим, позаяк у світі суттєво зросла потреба у такій продукції. Зростає важливість вирішення питань автоматизації та приладобудування для сільськогосподарського комплексу у зв'язку з Промисловою революцією 4.0, яка у галузі метрології та інформаційно-вимірювальних технологій трансформувалась у Метрологію 4.0. Стикування між собою різних поколінь засобів автоматизації часто призводить до виникнення конфліктних ситуацій у галузі, а впровадження сучасних засобів вимагає поглибленого навчання персоналу. Кардинальна перебудова технологій на основі впровадження досягнень Метрології 4.0 та Інтернету речей дають змогу істотно зменшити кількість працівників, підвищити ефективність, енергоекономність тощо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до планів наукової діяльності кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка», в рамках науково-дослідної теми ДБ Медтест «Основи технології та засоби моніторингу, профілактики і реабілітації органів кровообігу людини, зумовлених віковими і травматичними змінами» (№ 0120U102205, з 01.04.2020 р. по 31.12.2021 р.)

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є дослідження температурних підсистем кіберфізичних систем, як ефективних засобів автоматизації сільського, зокрема тепличного, господарства та удосконалення методологічного й метрологічного забезпечення шляхом впровадження інформаційно-обчислюваних та інформаційно-вимірювальних технологій на основі апаратно-програмних платформ та засобів.

Для реалізації окресленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз стану розвитку кіберфізичних систем та можливостей їх розвитку та адаптування для потреб сільського господарства;

- вивчити особливості кіберфізичних систем, на основі чого обґрунтувати склад і вибрати види апаратно-програмного забезпечення, а також компоненти обладнання;
- на основі аналізу вихідних вимог до кіберфізичних систем розробити методологію формування їх температурних підсистем шляхом визначення і вивчення критичних контурів регулювання (повітря, ґрунт, вода, освітленість, тощо);
- послідовно дослідити прийоми керування та засоби регулювання роботою згаданих систем
 - для сушіння деревини, тютюну, тощо розробити алгоритм для ефективного конструювання та використання сучасних кіберфізичних систем сільськогосподарського призначення;
- розробити на базі графічної мови програмування технологічне обладнання для сільськогосподарського виробництва, на прикладі віртуального засобу керування їх режимом роботи;
- сформулювати вимоги та розробити засоби віддаленого адміністрування (програмні засоби та закритий доступ) низкою просторово рознесених теплиць.

Об'єкт дослідження - вимірювання температури та інших зв'язаних з нею електричних характеристик кіберфізичних систем.

Предмет дослідження – методи та засоби вимірювання і регулювання температурних параметрів.

Методи дослідження. У дисертації використано теоретичні аспекти термометрії, вимірювальної техніки й моделювання, програмування, зокрема на основі апаратно-обчислювальної платформи LabVIEW та з використанням Веб-дизайну. Експерименти проводились за допомогою вимірювальних приладах контактної та безконтактної термометрії; у дослідженнях використано модернізований тепловізійний метод з урахуванням значення коефіцієнту чорноти вимірюваної поверхні.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у оптимізації температурно-енергетичних показників об'єктів сільського господарства, включаючи об'єкти вегетації рослин за змінних умов оточуючого середовища, як результату

розроблення й впровадження на основі апаратно-програмних платформ гнучко-регульованих кіберфізичних систем з їх температурними підсистемами. В дисертаційній роботі отримано такі наукові результати:

1. Досліджено та розроблено кіберфізичні системи для потреб сільського господарства, де головна увага приділяється якості та ефективності вирощування продукції овочівництва шляхом оптимізації температурно-вологісно-інсоляційних режимів завдяки цифровизації та інтелектуалізації підсистем моніторингу та керування, що дає змогу оперативно коректувати режими вирощування.

2. Вперше доведено, що тепловізійний метод моніторингу температури, який вважається якісним, оскільки вимагає знання коефіцієнту випромінювання, може бути реалізований як кількісний метод. Для цього розроблено метод і засіб повторюваного вимірювання температури, що дає змогу у два такти, тобто за 2-х відмінних температур приймача засобу, визначити невідомий коефіцієнт випромінювання і автоматично ввести поправку на нього, а на третьому такті отримати дійсні значення температури з методичною похибкою, зменшеною в 2-3 рази.

3. На основі розгляду вимог до виробничого циклу того чи іншого сільськогосподарського продукту запропоновано методи і засоби керування об'єктами різного ступеню складності, а також показано, що при вирощуванні овочів у теплицях доцільно здійснювати регулювання температури повітря з допомогою засобів контактної термометрії, а ґрунту – засобів безконтактної термометрії..

4. На підставі результатів досліджень послідовно ускладнюваних сільськогосподарських об'єктів, що характеризуються значною кількістю чинників впливу, через які можна ефективніше впливати на процеси в біологічній сировині, вдосконалено технологію вирощування і обробки сільськогосподарської продукції. Показано, що підвищення вимог до метрологічних аспектів автоматизації за рахунок залучення досконаліших засобів вимірювання і регулювання у кіберфізичних системах призводить до покращення якості сільськогосподарської продукції та продуктів її переробки.

5. Розвиток засобів вимірювання та програмних засобів віддаленого адміністрування кіберфізичними системами дає змогу враховувати територіально-природні відмінності у циклах розвитку тих самих сільськогосподарських культур для рознесених теплиць однакового типу, для чого на основі платформи Arduino з додатковим програмним забезпеченням розроблено прилад температурної підсистеми кіберфізичної системи тепличного виробництва.

Практичне застосування отриманих результатів. Результати досліджень використано для моніторингу і керування, в тому числі віддаленого, об'єктами тепличного овочівництва. Це дає змогу, на основі аналізу поточної ситуації в режимі реального часу, оперативно коректувати режимами вирощування сільськогосподарської продукції.

Товариство з обмеженою відповідальністю «АГРО-ЛАН» (код ЄДРПОУ 32141207) використало результати при моніторингу і керуванні режимами вирощування сільськогосподарської продукції у тепличних комплексах на основі аналізу поточної ситуації в режимі реального часу.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», в тому числі аспірантів - дисципліни «Платформа та середовище розроблення обчислювально-вимірювального обладнання в межах візуальної мови програмування LabVIEW» та «Кіберфізичні системи».

Особистий внесок здобувача. Здобувачем сформовано основні проблеми об'єктів сільськогосподарського виробництва, в тому числі тепличного овочівництва. Розроблено засіб керування температурним режимом об'єкта. Створені методи, засоби та розроблено програмне забезпечення для віддаленого адміністрування роботою групи теплиць на території району.

Апробація результатів. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та результати досліджень доповідались і обговорювались на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних і науково-технічних конференціях: Міжнародній

науково-технічній конференції «Системи-2018» до 50-річчя ДП НДІ «Система», 22-23 листопада 2018 р. м. Львів; XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ'2019) «Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019» до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 р. м. Львів; V Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 20–21 травня 2021 р. м. Львів; VI Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології «Technical Using of Measurement-2020», 4–7 лютого 2020 р. м. Славське; Міжнародній науково-практичній конференції «Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграції», 12-13 травня 2020р. м.Дубляни; II Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Актуальні проблеми сучасного бізнесу: обліково-фінансовий та управлінський аспекти», 18-20 березня 2020 р. м. Львів; II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми обліково-аналітичного забезпечення управління підприємницькою діяльністю» присвяченій 100-річчю Полтавської державної аграрної академії, 23 квітня 2020 р. м. Полтава; I Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Актуальні проблеми сучасного бізнесу: обліково-фінансовий та управлінський аспекти», 19-21 березня 2019 р. м. Львів; III Міжнародній науково-практичній конференції «Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграцій», 27-28 травня 2019 р. м.Львів; Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Обліково-аналітичне забезпечення інноваційного розвитку економіки», 14-15 березня 2018 р. м. Львів; V Міжнародній науково-практичній конференції «Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграції» 27 – 28 травня 2021 р. м.Львів; Proceedings of the 23rd International Conference on Information Technology for Practice «IT for Practice 2020» December 3, 2020, Ostrava, Czech Republic.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень та скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 127 сторінок, з

яких 126 сторінок основного тексту, що містять 24 рисунки та 9 таблиць. Список використаних джерел налічує 126 найменувань на 12 сторінках.

Публікації: За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 20 наукових праць, з них 4 статті у фахових виданнях України, 2 статті у наукових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 1 стаття – у науковому періодичному виданні іншої держави, що включене до міжнародної наукометричної бази даних, 12 тез доповідей та 1 консультаційна (дорадча) публікація з наукової та професійної тематики.

Підсистеми температурного контролю кіберфізичних систем

АНОТАЦІЯ

Мідик А.-В.В. Підсистеми температурного контролю кіберфізичних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти та науки України, Львів, 2022.

Дисертація присвячена дослідженню та подальшому розвитку кібер-фізичних систем, а саме їх температурних підсистем, для потреб сільського господарства та його переробної промисловості.

У *першому розділі* наведено області застосування кіберфізичних систем, розглянуто їх особливості, проаналізовано можливості систем, виходячи з поставленої задачі. Для цього, враховуючи новизну області досліджень, вивчено історію виникнення у контексті подальшого розвитку інформаційно-вимірвальних систем, теорії автоматичного керування та інших галузей, покладених в основу кіберфізичних систем. Дано сучасне визначення згаданих систем, встановлене у колективній монографії, опублікованій з участю дисертанта. Основний ухил досліджень стосується кіберфізичних систем, що розвиваються у сільськогосподарському секторі. Вивчено об'єкти щодо яких можуть найбільш ефективно застосовуватись підходи створення, розвитку та впровадження кіберфізичних систем. Коротко охарактеризовано зазначені об'єкти, обґрунтовано їх переваги та недоліки у зв'язку з темою, що розвивається. Показано збіжність поставлених завдань стосовно методів і засобів регулювання технологічних процесів у сільському господарстві та переробній промисловості. Так, сушіння сільськогосподарської сировини (деревини, тютюну, сухофруктів, тощо), багато-в-чому, за енергетичними підходами близьке до вирощування продукції у парниках та теплицях. При цьому, засоби метрологічного контролю на рівні смарт-сенсорів входять до складу кіберфізичних систем. Так формується метрологія 4.0, як фундамент, на якому розвиваються згадані системи. Уніфікація виготовлення будь-

яких розумних приладів, їх оснащеність USB-роз'ємами створила підстави для взаємозамінності різних типів засобів вимірювання та виконавчих елементів (смарт-актуаторів).

На основі проведеного огляду особливостей формування кіберфізичних систем встановлено, що найбільш ефективно дослідити та реалізувати для потреб сільського господарства України можна температурні підсистеми, враховуючи направленість та досягнення розвитку ІТ-інженерії та приладобудування, з одного боку, а потреби сільського господарства, з іншого боку. Адже температурні режими вирощування овочів та іншої продукції у теплицях, їх сушіння та переробка формують основу і водночас перспективу подальшого розвитку науково-технічного та виробничого потенціалу держави, досягнутого у попередні роки. При цьому, доведено, що наявні засоби потребують вдосконалення, зокрема щодо підвищення чутливості та швидкості керування роботою кіберфізичних систем в тому числі за рахунок оптимізації елементів систем температурного контролю.

У *другому розділі* вивчено низку методів вимірювання та контролю температури технологічних процесів, причому увагу зосереджено на потребах подальшого розвитку технологій сільського господарства, що включають як вирощування, так і переробку сільськогосподарської продукції. Відзначу, що методи вимірювання, які, в основному, розглядаються – це методи температурних вимірювань. До них відносять методи прямого або безпосереднього вимірювання температури та методи безконтактного вимірювання або ж пірометричні методи. Контактні методи включають ряд методів, що базуються на застосуванні термометрів опору, термопар та інших. Безконтактні методи, до яких відносяться різні методи вимірювання температури з використання енергетичної та яскравісної температур, відношення яскравостей тощо, охарактеризовані стосовно їх причетності до вимірювання кімнатних температур, за яких проростає та розвивається рослина. Показано доцільність використання енергетичної пірометрії або ж пірометрії повного випромінювання. Усі перелічені та досліджені методи вимірювання температури є достатньо автоматизованими та надаються для формування температурних підсистем кіберфізичних систем. Проте, за

метрологічно-експлуатаційними характеристиками, для уникнення істотних похибок методичного плану, зокрема, при регулюванні температурних режимів роботи проєктованих систем необхідно брати до уваги наступне. Стала температурної інерції сенсорів, що плануються використовувати, повинна бути принаймні, на 2 порядки нижчою від сталої контрольованого об'єкта. Якщо таким вважати теплицю, де стала температурної інерції становить десятки хвилин, то для мінімізації методичної похибки, зумовленої інерційністю сенсора, остання повинна не перевищувати декількох секунд. Вищеприведене стосується підсистеми вимірювання температури повітря. Вимірювання температури ґрунту характеризується власними труднощами: ґрунт характеризується значною теплоємністю та поганою теплопровідністю. Тому, щоб отримати його температурний розподіл по значній площі, слід використовувати значну кількість контактних сенсорів (термометрів). Виходячи з наведеного, при виборі сенсорів взяли до уваги можливість залучення безконтактного термометрів – пірометрів, в даному разі повного випромінювання. Такі пірометри, названі тепловізорами, призначені для термометрування значних площ об'єктів, що знаходяться за кімнатних температур. Проте, вони видають тільки якісне зображення, кожній точці якого приписують певне значення температури, оскільки невідомим є коефіцієнт випромінювання термометрованої поверхні. Його ще називають коефіцієнтом чорноти випромінювання. За умови, що даний коефіцієнт – відомий, термометрія перетворюється на кількісну.

Такий підхід дав змогу розробити методику оптимізації регулювання об'єкту сільськогосподарської технології, взявши за основу регулювання температурних режимів, причому за умови залучення контактних методів термометрування для регулювання температури повітря і безконтактних тепловізійних методів для регулювання температури ґрунту теплиці, враховуючи температуру води для зволоження та за результатами прямої дії сонячного випромінювання.

У розробленні методики оптимізації роботи температурної підсистеми кіберфізичної системи виходили з найпростішої методики регулювання тютюносушіння, де оцінювання якості сушіння прямо характеризує якість виготовленої продукції –

тютюну, а звідти і сигарет. Складнішою вважається методика регулювання на прикладі сушильної камери, де розглядається низка вхідних та вихідних характеристик, а модель розрахунку базується на досягненнях класичної теорії аналогового автоматичного керування.

У зв'язку з поширенням програмно-технічних засобів у дисертаційній роботі розвинуто підходи цифрового автоматичного керування, яскраво виражені у кіберфізичних системах. Таким чином, дійшли до методики оптимізації роботи температурної підсистеми кіберфізичної системи керування теплицею, основна модель якої включає взаємозв'язані контури регулювання для повітря, ґрунту й води для зволоження. Зв'язок реалізується, як через програмно-технічні засоби керування, так і через параметри контрольованого об'єкта.

У *третьому розділі* набули подальшого розвитку кіберфізичні системи для сільськогосподарського виробництва: по мірі складності вони включають кіберфізичну систему температурно-вологісного контролю теплиці, кіберфізичну систему для вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму, кіберфізичну систему для переробки сільськогосподарських продуктів,

Такий підхід дав змогу розробити методику оптимізації регулювання об'єкту сільськогосподарської технології, взявши за основу регулювання температурних режимів, причому в сукупності з режимами зволоження (температурний режим води для зволоження) та режимами інсоляції. Розроблено схеми керування, взявши за основу вхідні та вихідні чинники, моделі їх зв'язків: прямих і зворотніх, їх кореляцію з одночасною оцінкою оцінки якості отримуваних продуктів.

У *четвертому розділі* вивчено метрологічні аспекти автоматизації виробництва сільськогосподарської продукції. Засоби регулювання режимів роботи та керування роботою сільськогосподарського об'єкту здійснювалось у 3-х принципово різних виконаннях. Перший із них – на прикладі серійно випущеної науково-технічної продукції, включаючи смарт-сенсори, смарт-актуатори та програмовані ПД-регулятори. Друге виконання базувалось на спеціально розробленій конструкції, головним елементом якої стала апаратно-програмна платформа Arduino; до неї підключались ті самі сенсори та актуатори, що й у

першому випадку; платформа підлягала програмуванню на спрощеній мові C++. Третє виконання реалізовано, як віртуальний засіб регулювання. Його створено і реалізовано на основі апаратно-програмної платформи LabVIEW та з блоком NI USB 6009. Віртуальний прилад у складі ПК з програмним забезпеченням LabVIEW, блоку NI USB 6009, до якого під'єднано 4 цифрові сенсори температури/вологості та освітлення (інсоляції), вжито для керування процесом вирощування овочів.

У цілому, для всіх трьох виконань показано, що у виробничих умовах при незначних витратах можна з мінімальними затратами забезпечити високу якість продукції.

Окрім того, вивчено екологічно-економічні аспекти будівництва та використання теплиці, як споруди пасивного типу. При цьому, оскільки управління роботою теплиці одночасно реалізовувалось у 3-х взаємозв'язаних контурах – повітря, води та ґрунту, досліджувались саме зазначені аспекти, адже загальна ефективність сільськогосподарського виробництва та конкурентна спроможність його порівняно з південними регіонами визначається і енергетичними затратами на одиницю продукції.

Ключові слова: кібер-фізична система, смарт-сенсор, смарт-актуатор, температура, вологість, інсоляція, температурні підсистеми, віртуальний засіб вимірювання, апаратно-програмна платформа, сенсорні мережі, програмне забезпечення, регулювання параметрів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мідик А.-В.В., Лиса О.В. Дослідження точності визначення температурно-вологісних характеристик системи температурно-вологісного контролю теплиці/ Мідик А.-В.В., Лиса О.В./ Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та метрологія”, 2020. Львів: том.81 (2). Сс.7-12. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.02.007>
2. Про похибку безконтактного вимірювання температури, зумовлену невідомим значенням коефіцієнта чорноти / Яцишин С.П., Гамула П.Р., Мідик А.-В.В., Ван Чунжі / Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та

- метрологія ”, 2018. Львів: том.79 (4). Сс.30-33.
<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.04.030>
3. Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення / Ван Чунжі, Яцишин С.П., Лиса О.В., Мідик А.-В.В. / Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та метрологія ”, 2018. Львів: том.79 (1). Сс.34-38.
<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.034>
 4. Яцишин С.П., Мідик А.-В.В., Лиса О.В. Кіберфізична система для вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму / Яцишин С.П., Мідик А.-В.В., Лиса О.В./ Науково-виробничий журнал «Метрологія та прилади» . – 2020. Харків: №5 (85). Сс. 23-27.
 5. Оцінка якості сільськогосподарської продукції та вибір оптимального варіанту / О.В. Лиса, А.-В.В.Мідик // Вісник ЛНАУ: Агроінженерні дослідження. – Львів.: Львівський нац. агроруніверситет, 2013.- №17.-с.103-110.
 6. Яцишин С., Бубела Т., Мидык А.-В., Лыса О. Устойчивое развитие киберфизических систем для сельского хозяйства // Журнал „Устойчивое развитие“, Республика Болгария: 2021. том.2. с.97-102.
 7. Andrii-Volodymyr Midyk, Olga Lysa Analysis of the characteristics of the cyberphysical system for growing vegetables, Proceedings of the 23rd International Conference on Information Technology for Practice «IT for Practice 2020», December 3, 2020, Ostrava, Czech Republic / Edited by J. Ministr, M. Tvrdikova. – Ostrava: HSB-TU,2020. – P. 95-102.
 8. Яцишин С.П., Мідик А.-В.В., Снітинський В.В., Янишин Я.С. Кіберфізична система для переробки сільськогосподарських продуктів. Системи-2018: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ДП НДІ «Система», 22-23 листопада 2018 року. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. – с. 43-44.
 9. Яцишин С., Мідик А.-В., Лиса О. Кіберфізична система для парників та теплиць Міжнародна конференція метрологів МКМ’2019: Тези доповідей XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ’2019) до 100-річчя кафедри

інформаційно-вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 року / Відп. За випуск М. М. Микийчук. – Львів, 2019. – С. 186.

10. Яцишин С.П., Мідик А.-В.В. Метрологічні аспекти системи контролю температурно-вологісного режиму теплиці. Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, 20–21 травня 2021 року / Відп. За випуск М. М. Микийчук – Львів: ЛА «Піраміда», 2021. – с.203-204.
11. Микийчук М.М., Яцишин С.П., Мідик А.-В.В., Лиса О.В. Кіберфізична система для тепличного вирощування овочів. - «Technical Using of Measurement-2020»: Тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4–7 лютого 2020 року / Відп. За випуск Володарський Є. Т. Академія метрології України. – Львів: ТЗОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. – С.104.
12. Лиса О. В., Мідик А.-В. В. Автоматизація роботи теплиць як ефективний засіб покращення діяльності суб'єктів господарювання. – Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграції: Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 травня 2020. – Дубляни, 2020. – С.123-125.
13. Yatsyshyn S.P. Midyk A.-V.V. Lysa O.V. Development of software for instrumental method of rehabilitation of patients with obliterating vase atherosclerosis. Актуальні проблеми сучасного бізнесу: обліково-фінансовий та управлінський аспекти: матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 18-20 березня 2020 р. Львів: ЛНАУ, 2020. С. 420-422.
14. Лиса О. В., Мідик А.-В. Економічні аспекти стартап-проекту «розумна теплиця». Проблеми обліково-аналітичного забезпечення управління підприємницькою діяльністю: II Міжнародна науково-практична конференція присвячена 100-річчю Полтавської державної аграрної академії, 23 квітня 2020 р. Полтава: ПДАА. – 2020. С. 125-126.
15. Lysa O. V. Midyk A.-V. V. On accuracy of contactless temperature measurement limited by unknown emissivity factor. Актуальні проблеми сучасного бізнесу: обліково-фінансовий та управлінський аспекти: матеріали I Міжнародної науково-

практичної інтернет-конференції, 19-21 березня 2019 р. Ч. 2. – Львів: ЛНАУ, 2019. – с. 179-181.

- 16.Лиса О.В., Мідик А.-В.В. Особливості кіберфізичних систем для сільського господарства. Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграцій: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 27-28 травня 2019 року. – Львів: ЛНАУ, 2019. –с. 53-54.
- 17.Лиса О.В. Мідик А.-В.В. Розвиток технічних засобів для підвищення конкурентоспроможності підприємств. Обліково-аналітичне забезпечення інноваційного розвитку економіки: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 14-15 березня 2018 року. – Львів: ЛНАУ, 2018. – с. 390-393.
- 18.Лиса О.В., Мідик А.-В. В. Розробка системи автоматичного поливу рослин/ Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграції: збірник тез V Міжнародної науково-практичної конференції / 27 – 28 травня 2021. – Дубляни, 2021. – 106-108 с.
- 19.Andrii-Volodymyr Midyk, Victor Semerak et al, Chapter 4. Metrology 4.0 and Standardization for Agricultural Cyber-Physical Systems / Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0. /S. Yatsyshyn and B. Stadnyk, Editors, IFSA Publishing, Barcelona, Spain, 2021, s. 159-234.
- 20.Лиса О.В. Кібер-фізична система теплиці з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму /О.В. Лиса, А.-В.В.Мідик // Вчені Львівського національного аграрного університету виробництву: каталог інноваційних розробок / за заг. Ред. В.В.Снітинського, І.Б.Яціва. Вип. 20. Львів, Львів нац.аграр.ун-т, 2020.

Зміст

Перелік умовних позначень	19
Анотація	20
Вступ	21
1. Кіберфізичні системи	22
1.1. Кіберфізичні система, як засіб моніторингу, контролю та управління технологічними процесами	27
1.2. Кіберфізичні системи як сучасний етап розвитку інформаційно-вимірjuвальних систем та систем регулювання технологічних процесів	31
1.2.1. Види кіберфізичних систем	33
1.2.2. Проміжне програмне забезпечення	35
1.2.3. Масштабування, переформатування та динаміка топології мереж	38
1.3. Смарт-сенсори та смарт-актуатори, як основа побудови кіберфізичних систем	40
1.3.1. Смарт-сенсори та їхні мережі	41
1.3.2. Температурні смарт-сенсори	42
1.3.3. Розподілена сенсорна мережа	44
1.3.4. Інтеграція даних та веб-сенсори	47
Висновки до розділу 1	50
2. Методи, засоби та приклади розроблення кіберфізичних систем для потреб сільського господарства	51
2.1. Системи регулювання технологічних процесів у сільському господарстві та переробній промисловості	52
2.1.1. Методи вимірювання і контролю температури та можливості їх залучення для формування температурних підсистем	60
2.2. Розроблення методики оптимізації регулювання об'єкту сільськогосподарської технології	70
2.2.1. Методика регулювання на прикладі тютюносушіння	71
2.2.2. Методологія застосування засобів температурного контролю для потреб сільського господарства	73

2.3.	Розроблення методики оптимізації роботи температурної підсистеми керування теплиці	77
2.3.1.	Контур моніторингу і регулювання параметрів повітря	78
2.3.2.	Контур моніторингу і регулювання параметрів ґрунту	79
2.3.3.	Контур моніторингу і регулювання параметрів води для зволоження	81
	Висновки до розділу 2	83
3.	Дослідження і розвиток різних видів кіберфізичних систем для сільськогосподарського виробництва	85
3.1.	Підсистема температурно-вологісного контролю параметрів теплиці	85
3.1.1.	Технічні засоби регулювання мікроклімату в теплиці	87
3.2.	Вивчення температурного розподілу та відносної вологості у теплиці	91
3.3.	Кіберфізична система для вирощування овочів з регулюванням температурно-вологісно-інсоляційного режиму	97
	Висновки до розділу 3	100
4	Аспекти Metrology 4.0 автоматизації виробництва сільськогосподарської продукції	102
4.1.	Аспекти автоматизації тепличного виробництва	104
4.1.1.	з використанням ПІД-регулятора	108
4.1.2.	на основі апаратно-програмної платформи Arduino	109
4.1.3.	на основі платформи та середовища LabVIEW	109
4.2.	Метрологічно-екологічно-економічні аспекти будівництва і експлуатації теплиць, як споруд пасивного типу	111
4.3.	Віддалене адміністрування роботою групи теплиць	114
4.3.1.	Вибір засобів реалізації мережі	115
4.3.2.	Реалізація мережі	117
4.3.3.	Розроблення головної станції Raspberry Pi	118
4.3.4.	Розроблення інтерфейсу користувача	119

Висновки до розділу 4	123
Висновки	124
Список використаної літератури	127

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПК – персональний комп'ютер;

КФС – кіберфізична система;

БСМ – бездротова сенсорна мережа;

МІ - метрологічний інструмент;

ПЗ – програмне забезпечення

АНОТАЦІЯ

У зв'язку з посиленням розвитком кібер-фізичних систем істотна увага у світі приділяється різним аспектам їх формування й експлуатації. Виклики стосовно КФС вже обговорювались світовим науковим товариством, починаючи від 2012 р. [1]. За їх результатами у 2014 р. створено у США Громадську робочу групу КФС для об'єднання широкого кола фахівців на відкритому громадському форумі, щоб допомогти визначити та сформувані основні характеристики КФС для керівництва розробкою та впровадженням «інтелектуальних» програм у різних сферах, включаючи розумні виробництво, транспортування, енергетику та охорону здоров'я. Важливим, при цьому, вважається питання програмного забезпечення, оскільки, по-перше, вказані системи складаються із значної, нерегламентованої кількості компонентів, рознесених у просторі й часі, а, по-друге, компоненти систем мають змогу самостійно, під власні потреби, додатково встановлювати необхідне проміжне програмне забезпечення.

Крім того, сформований у Львові у 2000 роках ІТ-кластер, що об'єднує низку великих підприємств інформаційно-технологічного сектору, приділяє значну увагу розвитку прикладної сфери, а наявність Львівського національного аграрного університету стимулює так необхідний Україні прогрес у сільськогосподарській сфері.

ВСТУП

Існуючий у світі розподіл ґрунтів і провідне положення України, як світового виробника сільськогосподарської продукції, зумовлюють щільну увагу до проблем сільського господарства. Одночасно позиціювання нашого ІТ сектора економіки, як провідного, не лише визначають, але призводять до симбіозу зазначених галузей, оскільки саме такий симбіоз може бути покладений у найближчі десятиліття розвитку України та світу.

Тому дану проблематику можна вважати актуальною та вирішуваною автором нижче у дисертаційній роботі.

РОЗДІЛ 1. КІБЕР-ФІЗИЧНІ СИСТЕМИ

Визначення. Кібер-фізичні системи - це системи співпрацюючих обчислювальних об'єктів, які знаходяться в інтенсивному зв'язку з навколишнім фізичним світом та його поточними процесами, надаючи та використовуючи одночасно послуги доступу до даних та їх опрацювання даних, доступні в Інтернеті. Це визначення подібне до визначення [2].

В даний час сфера КФС розширюється від академічних досліджень та лабораторних розробок до реальних проектів. Швидке сприйняття та розвиток КФС у розвинених країнах, де вони отримали державну підтримку, досить прості; КФС мають вирішальне значення для забезпечення національної безпеки і є невід'ємною частиною сучасної технологічної революції. Розвиток інформаційної індустрії не скоротив виробництво, а лише перемістив його до третіх країн. В результаті населення США та ЄС стало залежним від цих країн. Щоб відновити виробничу незалежність, особливо в період після COVID'19, процес був замінений на виникнення аутсорсингу, і КФС можуть вирішити цю проблему. Хоча, звичайно, сфера застосування КФС набагато ширша, оскільки ці системи допомагають створити якісно нову систему охорони здоров'я, транспорту, енергетики тощо. Кілька технічних передумов зумовили появу та швидкий розвиток КФС [2].

Перша передумова - збільшення кількості пристроїв із вбудованими мікропроцесорами та носіями даних: сенсорні мережі, що працюють у технічній інфраструктурі; медичне обладнання; розумні будинки тощо. Друга - це інтеграція, яка максимально збільшує вплив шляхом об'єднання окремих компонентів у більші системи: Інтернет речей, Світова мережа датчиків, розумні середовища проживання та системи оборони майбутнього. Третя - обмежити когнітивні здібності людини, які розвиваються повільніше, ніж машини. Настає момент, коли люди перестають справлятися з обсягом інформації, необхідною для прийняття рішень; таким чином, деякі частини дії повинні бути передані до КФС, вилучивши людину з контуру управління (люди вийшли з контуру). Тут ми можемо розглядати змагання спеціальних шахових програм та систем штучного інтелекту, в яких останні перемагають. У той же час, у деяких випадках, КФС можуть покращити аналітичні

можливості людини, тому виникає необхідність у створенні нових інтерактивних систем високого рівня, які залишать людей у контурі управління (людина в циклі). Ключовим фактором у роботі КФС є модель, яка використовується в системі управління: наскільки вона збігається з реальністю, залежить від ефективності. Розглядаючи в цьому контексті класичні вбудовані системи, слід визнати, що вони є продуктами техніки ХХ століття, що базується на спрощеній концепції та, відповідно, на спрощених моделях властивостей природи та навколишнього середовища. Сьогодні спрощені моделі призводять до техногенних катастроф, коли виникають умови, не передбачені моделлю. Однією з основних причин такого стану є недостатнє оснащення виробничих ланцюгів сенсорами, спричинене недостатніми обчислювальними можливостями підсистем управління. Тоді розумні сенсори та розумні виконавчі механізми як обов'язкові компоненти КФС з їх обчислювальними можливостями є надзвичайно важливими. Вищезгаданий підхід є аналогом платформи Industry 4.0. Останній приділяє значну увагу підвищенню якості та підвищенню рівня продуктивності впродовж усього часу, прискорюючи виробничі процеси та роблячи їх більш точними. Таким чином, мультисенсорних технологій стає недостатньо для забезпечення виробництва продукції; необхідно впроваджувати нові технології, що базуються на сучасній науковій практиці. Яскравим прикладом, здається, є технологія замкнутого циклу [3], яка являє собою процес у межах робочого циклу, який інтегрує як виробничі, так і вимірювальні операції після перевірки; це підносить рівень точності обробки на абсолютно новий рівень, забезпечуючи максимально можливий стандарт для конкретної виробничої лінії. Іншим прикладом постійного розвитку у цій галузі є впровадження нової техніки калібрування, використання Інтернету чи подібної мережі для забезпечення ефективного обслуговування та постійного зв'язку з клієнтом. Тут результати калібрування надсилаються безпосередньо до бази даних клієнта, застосовуючи Metrology 4.0 [4].

Наразі CPS поділяються на системи керування транспортними засобами нового покоління, розподілені обчислювальні та розумні виробничі системи,

розумні мережі, біометрію, системи охорони здоров'я, соціальні та екологічні системи, їх перевірку та валідацію тощо.

Розумне виробництво включає різні виробничі системи, які, однак, базуються на використанні розумних сенсорів та розумних приводів, які виконують певну технічну діяльність у межах певного циклу. Їх метрологічне забезпечення може включати кілька засобів вимірювання та контролю, які необхідно перепрограмувати, з віддаленим доступом та встановленим проміжним програмним забезпеченням. Не менш важливим є забезпечення безперервності виробництва, без перерв на метрологічні перевірки тощо, які є плановими та ще більше навантажують виробників необхідністю частково демонтувати виробничі потужності. Тому особливо відповідальні області розумного виробництва повинні включати заходи з кодовим управлінням [2] та вбудовані стандарти фізичних величин, наприклад електричного опору [5].

Розумні системи охорони здоров'я пред'являють певні вимоги до розробки медичних імплантатів. Класичний виклик метрології-вивчення індивідуальної, розумної системи лікування раку. Клітини людини вибірково опромінюються мікрохвильовими печами, так що внаслідок дії енергетичного поля хворі клітини руйнуються при певній температурі, а здорові клітини залишаються неушкодженими. Вибіркова потужність поглинання та опромінення реалізується через зворотний зв'язок, наприклад, на основі температурних наносенсорів [6].

КФС безперервно ускладнюються порівняно з традиційними об'єктами, змінюючи з часом їх структуру та склад, а компоненти та зв'язки між ними не є на 100% надійними. У створенні КФС є деякі проблеми: наприклад, такі поняття, як надійність, включаючи метрологічну надійність, визначення, період виходу з ладу тощо. Стає все більш важливим доступ до метрологічних ризиків їх компонентів, щоб уникнути переривань циклу або зупинок. Фактор часу, відсутній у традиційному програмуванні, але, безумовно, притаманний роботі КФС, тут набирає ваги. Як правило, КФС включає відстеження даних, обчислення та активацію. Вони поєднують традиційні інформаційні технології від передачі даних сенсорів до

опрацювання даних у обчисленні, а також операційні технології контролю та управління.

Істотною особливістю КФС є поєднання інформаційних та операційних технологій разом із обмеженнями у часі. Для забезпечення реалізації розумних програм необхідно створити прикладну модель системи, мати відповідну метрологію та програмне забезпечення, наприклад, на основі одноплатних мікроконтролерів та наборів мікроконтролерів. Крім того, потрібна сумісність між гетерогенними компонентами та системами, включаючи, насамперед, узгодження їх часу та алгоритмів сертифікації. У зв'язку з цим необхідні розробки в галузі метрології (калібрування, складна оцінка якості продукції, модельна діагностика), та у сфері програмного забезпечення та проміжного програмного забезпечення, а також у сфері їх метрологічної верифікації для метрологічних інструментів (Рис. 1.1).

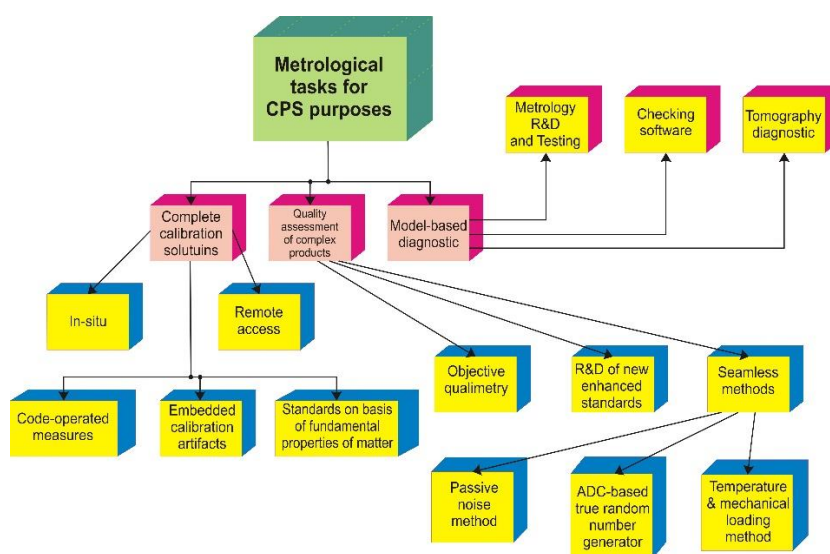


Рис.1.1. Метрологічні виклики для кібер-фізичних систем [2].

Вже сьогодні ми можемо констатувати існування багатьох суто метрологічних проблем КФС. Вони включають наступне:

- Існуючий набір стандартів у різних країнах можна вважати недостатнім для успішного опису засобів та інструментів сучасної наукової техніки [7].

- Провідні науково-дослідні центри з використанням сучасного виробничого обладнання не можуть бути випробувані в сертифікованих лабораторіях через їх складність та проблеми з доставкою.
- Унікальна технологія часто вимагає моніторингу, самоконтролю та передового специфічного метрологічного обладнання для забезпечення якості.
- Існуючі стандарти втрачають на кілька порядків свої ціннісні характеристики саме при передачі їх кінцевому споживачеві; це вважається нормальною метрологічною практикою, яку не можна вважати достатньою для подальшого розвитку КФС.

Їх вирішення можна досягти, розуміючи основні тенденції розвитку метрології на сучасному етапі. До них відносяться:

- Перехід на розумні сенсори, пристрої та системи;
- Заміна традиційних метрологічних інструментів на інструменти, робота яких базується на фундаментальних фізичних константах (внутрішні міри);
- Розвиток систем: самоперевірка, самоверифікація, самоградування, самокалібрування, самопереналаштування (з мінімізацією похибкою), тощо [8];
- Зміна МІ на подібні інструменти, робота яких базується на частотно-залежних властивостях.

Розумні вимірювальні прилади є обов'язковою умовою для проектування КФС, оскільки вони формують основні складові засобів інформаційно-вимірювальних підсистем. Існує набір розумних МІ, які поділяються на такі підмножини: розумні сенсори, розумні перетворювачі, їх мережі, тощо, які можна об'єднати разом у сучасних БСМ. Нові дешеві і легко встановлювані сенсори дають безпрецедентну можливість для широкого спектру різноманітних застосувань. У поєднанні вони пропонують численні переваги перед традиційними мережами. Вони включають масштабовану гнучку архітектуру, отримання даних з високою роздільною здатністю та механізми адаптації до застосування, а також ряд метрологічно специфічних функцій та продуктивності (самоперевірка, самоверифікація, самоградування, самокалібрування, самоадаптація, тощо).

Наприклад, особливу увагу, згідно з думкою вчених Університету Карнегі-Меллона, можна приділити верифікації БСМ у повній відповідності з відомою методологією. Перевірка термінів має гарантувати виконання доручених завдань у БСМ реального часу протягом запланованої тривалості. У цій сфері зусилля спрямовані на розробку методів планування можливостей для багатоядерних платформ, де мають бути розглянуті нові проблеми спільних ресурсів, такі як пам'ять, різні та змінні алгоритми обробки та зберігання сигналів, передачі та агрегації. Часто це потрібно для прийняття рішень у системах реального часу, особливо у сфері охорони здоров'я та безпеки життя.

1.1. Кібер-фізична система як інструмент моніторингу, контролю та управління

Сучасні передові технології в аграрному секторі базуються на використанні кіберфізичних систем для забезпечення можливості збору даних та моніторингу та контролю мережі [9]. Сільське господарство зіштовхується з викликами при формуванні позитивного майбутнього в різних регіонах земної кулі. Прикладами глобальних проблем є зростання населення, урбанізація, зміна клімату. Глобальні економічні проблеми необхідно вирішувати таким чином, щоб потенціал аграрних секторів не загрожував задоволенню світових потреб у продовольстві. З концепцією та потребами інновацій у сільському господарстві пов'язані різні фактори, серед яких доцільно виділити наступне: навколишнє середовище, біорізноманіття та охорона здоров'я. Зв'язок між сільським господарством та навколишнім середовищем є джерелом викликів та технологічної оптимізації.

Людство отримує вигоду від інтенсивного сільськогосподарського виробництва ціною втрати природного стану екосистем. Так, надмірне внесення добрив може призвести до загрози забруднення навколишнього середовища, тоді як недостатня кількість може призвести до деградації ґрунту та втрати родючості. За цих обставин системам сільськогосподарського виробництва необхідно більше зосереджуватись на ефективному збереженні та управлінні біорізноманіттям та екосистемними послугами для вирішення подвійної проблеми екологічної сталості та продовольчої

безпеки шляхом запровадження такого надійного засобу, як КФС сільськогосподарського призначення.

Розвиток автоматизації та керування транспортними засобами за допомогою GPS в аграрному секторі встановив концепцію точної агрономії та точного землеробства, а також автоматизації у виробничому ланцюжку. Однак таким системам властиві значні недоліки, пов'язані з гнучкістю, нормуванням, надійністю, поданням даних у режимі реального часу.

- **Точне землеробство як гарантія створення розумних технологій у сільському господарстві**

Досягнення останніх десятиліть у сфері автоматизації та дистанційного зондування запровадили концепції точної агрономії та точного землеробства, а також автоматизації у ланцюзі виробництва продуктів харчування. Точне землеробство та автоматизація вже встановили парадигми для підвищення продуктивності, якості та покращення умов праці за рахунок скорочення фізичної праці. Усі ці фактори відіграють важливу роль у забезпеченні сталого розвитку аграрного сектору. Багато сучасних фермерів для моніторингу та прогнозування вже використовують високотехнологічні рішення, такі як сільськогосподарська техніка з цифровим управлінням, апарати з КФС та безпілотні літальні апарати. Існують частково і повністю автоматичні пристрої для більшості аспектів сільського господарства: від щеплення до сівби та посадки, від збирання врожаю до сортування, пакування продукції та боксування для худоби. Хоча підходи до точного землеробства можуть бути ефективними та корисними для фермерів, але після належного навчання вони зазвичай калібруються лише для певного завдання, не забезпечуючи цілісного уявлення про сільськогосподарські процеси.

Варто зазначити, що сільське господарство можна розглядати, як динамічну систему, в якій для кожного набору вхідних даних існує набір кінцевих/проміжних продуктів: однак різні умови можуть змінювати отримувані результати (наприклад, кліматичні умови, якість ґрунту, шкідники). Зовнішні фактори, які позитивно чи негативно впливають на аграрну систему, важко передбачити або контролювати. З цієї причини прогнозні моделі не завжди можуть гарантувати очікувані результати.

Тому необхідно створити КФС з багатьма функціоналами. Фермери повинні знати стан своїх посівів, а збір даних моніторингу в режимі реального часу - це найкраще рішення для досягнення інновацій та стійкої продуктивності. Отже, поєднання сучасних інформаційно-вимірювальних технологій та приладів, включаючи віртуальні прилади, є основою концепцій та методологій розумного сільського господарства та вирощування якісної сільськогосподарської продукції [10 -11].

КФС можуть використовуватися практично у будь-якій галузі сільського господарства: у рослинництві, тваринництві, підчас переробки сировини, транспортування, зберігання, реалізації тощо. У зв'язку з цим класифікація КФС у сфері агропромисловості має теоретичне та прикладне значення (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Класифікація сільськогосподарських КФС.

Критерії класифікації	Класифікація КФС
за галузями	<ul style="list-style-type: none"> - у тваринництві; - у рослинництві; - у допоміжному виробництві
за видами виконуваних робіт	<ul style="list-style-type: none"> - посів сільськогосподарських культур; - обприскування рослин пестицидами та добрива; - видалення, прополка; - контроль лабораторної схожості посівів; - збирання кормових культур; - збір плодів; - догляд за виноградниками та садами дерева; - транспортування розсади в теплицях; - полив рослин в теплицях; - виконані роботи з механізованої підготовки ґрунту безпілотним (автономним) транспортом - моніторинг сільськогосподарських угідь; - сортування сільськогосподарської продукції; - пакування сільськогосподарської продукції
за характером руху	<ul style="list-style-type: none"> - стаціонарні КФС; - мобільні КФС; - автономні КФС; - автоматичні КФС із циклозміним характером роботи.
за типом управління	<ul style="list-style-type: none"> - стаціонарні КФС за участі людей для управління; - КФС без участі людей для управління.

Слід зазначити, що система управління сучасними промисловими КФС заснована на повторенні запрограмованих рухів у фіксованих умовах, тоді як сільськогосподарські КФС застосовують системи управління, які працюють у нестабільних природних та кліматичних умовах.

У цьому випадку це:

- забезпечує роботу з живими організмами, якими є рослини та тварини, з несортуваними та неупорядкованими об'єктами (різні сорти рослин, чагарники, плодіві дерева тощо);
- використовує інструменти та інше обладнання, призначене для роботи людини;
- забезпечує безпеку людей та тварин, які працюють поблизу.

З технічної точки зору, під час будівництва та експлуатації КФС можна виявити декілька ризиків, беручи до уваги, що важливо, зокрема, для аграрного сектору (рис. 1.2):

- 1) Різноманітність даних. Це - серйозна проблема, яка може негативно вплинути на ефективність взаємодії та розробку протоколів спілкування. Системи повинні підтримувати велику кількість різних додатків та пристроїв.
- 2) Надійність. Кібер-фізичні системи можна використовувати в критичних сферах, таких як охорона здоров'я, інфраструктура, транспорт, агробізнес та багато інших, основними вимогами яких є надійність та безпека, оскільки виконавчі механізми впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей. Крім того, КФС повинні мати можливість продовжувати працювати в непередбачуваних умовах та пристосовуватися до будь-яких впливів.
- 3) Управління даними. Потрібно зберігати та аналізувати значні обсяги даних з різних мережевих пристроїв, опрацьовувати їх та виводити результати в режимі реального часу. Даними можна керувати за допомогою відкладеної або операційної поточної обробки, залежно від призначення системи. При використанні потоків у режимі реального часу інформація може часто змінюватися, і опрацьовання повинно ґрунтуватися на адаптивних та постійних запитах.

1.2. Кібер-фізичні системи як сучасний етап розвитку інформаційно-вимірювальних систем та систем регулювання технологічних процесів

За працями видатного вітчизняного науковця В. Бабака [12], основи розвитку подібних систем, побудованих на імплементації смарт-сенсорів та смарт-актуаторів, умовно можна розділити на 2 напрямки: а) розроблення та створення інформаційно-вимірювальної підсистеми КФС, як виділеної технічної підсистеми; б) основи функціонування інформаційно-вимірювальної підсистеми, як апаратно-програмних засобів вимірювання, що відображають характерні специфіку й особливості здійснення процесів контролю КФС з їх допомогою.

КФС - це інтелектуальні системи, що включають інженерно взаємодіючі мережі фізичних та обчислювальних компонентів. Вони забезпечують нові функціональні можливості для покращення якості життя, дозволяють досягти технічного прогресу в різних областях і тому мають величезний вплив на світову економіку.

Суть "інтелектуальних" програм полягає в тому, що, використовуючи дані сенсорів, які якнайшвидше і якнайточніше сигналізують про зміну параметрів середовища, спеціальні алгоритми приводять в дію автоматику вищого рівня для виконання адекватних дій. КФС виходить за рамки звичайного продукту, системи та архітектури прикладних програм. Зазвичай КФС включає в себе всі відомі аспекти роботи інформаційно-вимірювальних систем, ускладнених унаслідок взаємодії їх окремих компонентів через мережі. Вони об'єднують традиційні інформаційні технології від поступлення даних від сенсорів з їх опрацюванням із використанням вбудованих потужностей або з використанням хмарних технологій, до традиційних операційних технологій контролю та управління. Інакше, особливістю КФС є поєднання інформаційних та операційних технологій, на що накладаються часо-просторові обмеження, оскільки КФС часто розпорошені у просторі та розділені у часі.

Питання впровадженням "інтелектуальних" програм у різних сферах настільки актуальне, що розроблено класифікацію КФС, яка включає розумне виробництво

(пряме та додаткове), розумні конструкції, розумний транспорт, розумну енергетику, розумну безпеку життя та розумну охорону здоров'я [2]. Щоб забезпечити впровадження "інтелектуальних" програм, необхідно створити прикладну модель системи, мати відповідне метрологічне та програмне забезпечення. Крім того, потрібна сумісність між різнорідними компонентами та системами. У зв'язку з цим потрібні розробки у сфері метрології (калібрування, оцінка якості комплексних продуктів, діагностика на базі моделі), у сфері розробки основного і проміжного програмного забезпечення. Засоби необхідні для контролю параметрів технологічних процесів та навколишнього середовища. Програмне забезпечення формує адекватну прогнозовану поведінку системи – відповідь системи на зміну згаданих параметрів. Тому у даній дисертаційній роботі актуальною задачею є аналіз існуючого метрологічного та програмного забезпечення КФС, як основи для розроблення КФС сільськогосподарського спрямування.

Особливої уваги заслуговує режим роботи КФС без участі фахівців (англ. – «man-out-loop» regime), який у поєднанні із гнучкістю системи, забезпечуваною автоматичним оновленням програмного забезпечення та впровадженням проміжного програмного забезпечення. Його створення, однак, може призвести до виникнення критичних ситуацій у працездатності й ефективності роботи системи. До прикладу, метрологічна відмова, зумовлена погіршенням параметрів підсистеми температурного контролю теплиці (автоматичне відкривання вентиляційних проїм), може призвести до незворотніх наслідків унаслідок перегріву.

Аналізуючи [13] відомі на сьогодні КФС, їх метрологічне та програмне забезпечення, бачимо, що невпинно зростає їх кількість, розширюються сфери застосування. Програмне та метрологічне забезпечення розвивається в напрямку підтримки роботи наявних КФС та їх придатності при конструюванні нових КФС. Основними вимогами, які ставляться при створенні КФС, є безпека, конфіденційність, надійність, стійкість, гарантії щодо поширених взаємопов'язаних пристроїв та інфраструктур, динамічність, сумісність (можливість розмістити різні обчислювальні моделі), підтримуваність різних режимів спілкування в мережі,

вирішувальність проблем складності (проблеми зондування та керування із зворотним зв'язком у будь-якій архітектурі КФС), синхронізація, взаємодія з середовищем експлуатації, можливість співпрацювати один з одним для створення ефектів, більших за суму частин окремих КФС, можливість поєднання декількох цілей.

КФС характеризуються чітко визначеними компонентами: з відомими характеристиками, описаними з використанням стандартизованої семантики та синтаксису. КФС повинні підтримувати гнучкість додатків та доменів. Для цього визначення компонентів має бути гнучким і відкритим. Архітектура повинна підтримувати точне опитування речей, щоб забезпечити гнучкість у створенні та адаптації віртуальних систем та сприяння інноваціям. КФС повинні підтримувати великий діапазон розміру, складності та навантаження на додаток. І у простій програмі, і у складній, розподіленій системі повинні використовуватися ті ж самі компоненти. Компоненти мають бути зібрані та масштабовані швидко, навіть під час роботи. КФС повинна складатися з незалежних компонентів для забезпечення гнучкості, надійності та стійкості до змінних ситуацій. Розв'язки повинні існувати між архітектурними шарами, що дає змогу змінювати кожен шар, не впливаючи на інші шари [3]. Для того, щоб система могла інтегрувати різні компоненти, інтерфейси до цих компонентів повинні базуватися на інтерпретованих та однозначних стандартах. Стандартизація інтерфейсів дозволить забезпечити різні компоненти існуючих систем і майбутніх систем. Адаптація досягається через гнучкість внутрішніх компонентів та зовнішню сумісність.

Інакше, до КФС висувуються різноманітні вимоги. Тому вважаємо за доцільне охарактеризувати кожен з видів КФС з урахуванням метрологічного та програмного забезпечення, яке використовується при їх конструюванні.

1.2.1. Види кібер-фізичних систем

КФС «Розумне виробництво» - багатофункціональні смарт-машини, вирізняються малими розмірами, адаптивністю до потреб користувачів (реалізується шляхом збору потрібної функціональності на одній машині). Отримавши інформацію про змінені вимоги, КФС сама вносить корективи в технологічний процес. Прикладом розумного виробництва є виробництво металу з

використанням точних ваг [14]. Їх нормальне функціонування забезпечує калібрування, виконуване на місці, без демонтажу конструкції КФС. Завдяки «man-in-loop» технології проводиться дистанційна атестація точних ваг, що призводить до їх продуктивності в деяких операційних діапазонах до значень робочих еталонів. Переважно для таких КФС застосовують програмну оболонку Linux, а віддалений доступ до вагопроцесорів компонентів КФС безпосередньо на робочих місцях забезпечують завдяки використанню промислового Ethernet, як стандартизованого варіанту мережевого протоколу Ethernet, адаптованого з метою застосування у промислових умовах для автоматизації та керування технологічними процесами.

КФС «Розумні будівлі» - інтелектуальні будівлі (з мінімальним чи нульовим споживанням ресурсів) - потребують постійного моніторингу, тому повинні бути підключені до мереж інтелектуальних датчиків і контролюватися засобами КФС. Основною вимогою є досягнення нульового споживання енергії [15]. Для цього вивчають теплові умови за допомогою інтелектуальних сенсорів температури локальної мережі [16] та забезпечують адекватну ізоляцію при безперервному багатоточковому контролі температури. Значна увага приділяється попередній оцінці теплових умов на етапі будівництва, усунення містків холоду тощо. Для цього використовують такі методи і засоби контролю тепла: методи інфрачервоної діагностики з допомогою тепловізору, метод дискретно точкового вивчення температурного режиму обмежувальних площин, моніторинг температур у часі за допомогою чіпів з вбудованими сенсорами температури, прикріплених до внутрішньої та зовнішньої поверхонь обмежувальних площин [17], тощо. Так виявляють та усувають містки холоду, досліджують енергетичні відбивні покриття з невідомим коефіцієнтом чорноти і керують роботою енергетичних підсистем для постачання, опалення та вентиляції. У переважній більшості таких КФС застосовують програмне забезпечення StructureWare Building Operation.

Щоб поведінка програмного забезпечення КФС відповідала його специфікації під час використання в певному середовищі, проводять функціональну перевірку. Орієнтуються на детерміністичні й на стохастичні системи. Специфікація виражає стан безпеки, яку треба задовольнити при всіх можливих виконаннях програмного

забезпечення (для детерміністичних систем) або з необхідною мінімальною вірогідністю (для стохастичних систем). КФС працюють у недетермінованих середовищах. Стосовно програмного забезпечення це означає, що деякі його входи - це випадкові величини. Тому обчислюють ймовірність того, що програмне забезпечення відповідає специфікаціям безпеки. Відомі два методи перевірки КФС: імовірнісна модель перевірки (система моделюється як ланцюжок Маркова, а ймовірність обчислюється шляхом побудови множини рівнянь та їх чисельного розв'язку), статистична перевірка моделі (кожне виконання системи розглядається як випробування Бернуллі, і вірогідність обчислюється за методом Монте-Карло).

1.2.2. Проміжне програмне забезпечення

Middleware є передумовою ефективної роботи КФС [18]. Middleware - це комп'ютерна програма, яка надає послуги програмних додатків, крім тих, що є безпосередньо в самій операційній системі. Вона може бути описана як склеююче програмне забезпечення. Middleware полегшує розробникам програмного забезпечення здійснення інтерфейсне комунікування і введення/виведення даних; такщо вони можуть зосередитися на конкретній цілі їх роботи по створенню сенсорної мережі. Middleware – додаткове програмне забезпечення, яке з'єднує компоненти чинного програмного забезпечення або корпоративних додатки. Middleware представляє собою рівень програмного забезпечення, що знаходиться між операційною системою і додатками (сенсорними вузлами) всюди на розподіленій комп'ютерній мережі. Як правило, Middleware підтримує прикладні програмно-підтримувані мережі, що стосуються складних розподілених бізнес-схем.

Middleware включає веб-сервери, сервери розділених мереж, системи управління контентом та аналогічні інструменти, які підтримують життєдіяльність, забезпечення та розвиток згаданих систем. Middleware успішно інтегрується в інформаційні технології на основі Extensible Markup Language (XML); простого протоколу доступу до об'єктів (SOAP); веб-служб; *SOA (service-oriented architecture)* — модульного підходу до розроблення програмного забезпечення; Web 2.0 - інформаційні технології, які дозволяють користувачам створювати та поширювати

власний контент у всесвітній павутині; інфраструктуру та полегшений протокол служби каталогів (LDAP) [19].

Middleware в розподілених сенсорних чи інших системах.

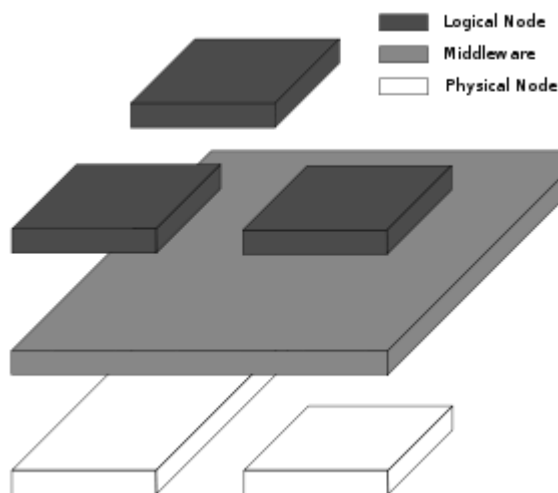


Рис.1.2. Структура проміжного програмного забезпечення [2]

Архітектура програмного забезпечення: Middleware (розподілені системи)

Термін зазвичай використовується для програмного забезпечення, яка забезпечує комунікування і керування даними в розподілених системах. У цьому більш вузькому сенсі Middleware може бути описана як тире між клієнтом і сервером.

ObjectWeb визначає Middleware як: "Шар програмного забезпечення, який знаходиться між операційною системою і додатками (сенсорними програмами) на кожній стороні розподіленої обчислювальної системи в мережі". Послуги, які можна розглядати, як Middleware, включають інтеграцію згаданих додатків, інтеграцію даних, комунікативно-орієнтоване Middleware (MOM), запит об'єкт брокери (ORBs - Middleware, що дозволяє основній програмі виконати запит з одного комп'ютера на інший через комп'ютерну мережу, забезпечуючи прозорість розташування через віддалені процедурні виклики), а сервісна шина повної системи (ESB).

Розподілені обчислювальні системи Middleware може вільно можна розділити на дві категорії - ті, які забезпечують обслуговування людини (наприклад, обслуговування веб-запит) і ті, що виконують подібне, працюючи в машинному часі, тобто самостійно, в межах попередньо закладеної програми. Останнє

вважається як таке, що стандартизоване службою Availability Forum і зазвичай використовується в комплексних, вбудованих системах зв'язку, оборони та аерокосмічної промисловості.

Інші приклади Middleware

Термін Middleware використовується в інших контекстах. Middleware іноді використовується в тому сенсі, як драйвер програмного забезпечення, абстрактний рівень, який приховує подробиці щодо апаратних пристроїв або щодо іншого ПЗ сенсорів.

У технології моделювання, Middleware зазвичай використовується в контексті архітектури високого рівня (HLA), яка застосовується до моделювання багатьох розподілених систем. Це шар ПЗ, яке лежить між кодом програми і інфраструктурою, що займає наступні цикли виконання програми у часі. Middleware як правило, складається з бібліотеки функцій, і дозволяє низці програм-симуляцій або програм-федератів в HLA-термінології (дружніх програм) скопіювати певні згадані функції з загальної бібліотеки, а не знову створювати їх для кожної програми [20].

Розробники бездротових мереж можуть використовувати Middleware, щоб успішно відповідати на завдання, пов'язані з роботою бездротової сенсорної мережі [21]. Реалізація додатків Middleware дає змогу розробникам мереж об'єднувати операційні системи і устаткування у широке розмаїття різних застосувань, доступних на даний момент.

Створювана сукупність крихітних, мережевих сенсорів дає змогу реалізувати безпрецедентно широкий спектр різних практичних застосувань. Ці крихітні сенсорні вузли відзначаються низькими собівартістю й енергоспоживанням, можливістю легкого встановлення на об'єктах. Їх різновидам, у поєднанні, вони притаманні чисельні переваги над традиційними сенсорними мережами [22]. Це наступні переваги: можливість формування великомасштабної гнучкої архітектури, з високою роздільною здатністю даних вимірювань та наявністю адаптивних механізмів застосувань. Тим не менш, завдяки їх тісній інтеграції з фізичним світом і унікальними характеристиками сенсорні мережі створюють суттєві проблеми при

їх реалізації, що робить розроблення прикладних систем нетривіальним завданням. Тому створення проміжного програмного рівня можна вважати новим підходом у проектуванні та впровадженні робіт по бездротового мережевих сенсорних технологіях.

Розглянемо проміжне ПЗ бездротової сенсорної мережі як проміжну програмну інфраструктуру, що злучає до купи мережеве обладнання, операційні системи, мережеві стеки і додатки. Повне вирішення middleware повинен містити середовище виконання, яка підтримує і координує декілька різних застосувань, і стандартизовані системні сервіси, такі як нагромадження даних, контроль і управління адаптацією щодо мети застосування, а також механізми для використання адаптивних та ефективних системних ресурсів з метою продовження ресурсу роботи сенсорної мережі.

При вивченні відповідних middleware проектів для бездротових сенсорних мереж, розроблено класифікацію, що базується на використовуваному програмному підході, а не на способі комунікування, як у традиційному ПЗ для розподілених систем. Це дає чіткіше уявлення щодо шляхів вирішення проблем розвитку бездротової сенсорної мережі при виконанні даної роботи.

У тих випадках, коли фізичного доступу для заміни або обслуговування сенсорів нема, бездротова мережа стає єдиним способом забезпечення віддаленого доступу. Отже, middleware повинні надати механізми для ефективного опрацювання даних і використання пам'яті при одночасному забезпеченні енергоощадного комунікування. Сенсорний вузол повинен виконувати свої три основні операції - вимірювання, опрацювання даних та їх передавання через інтерфейс, не вичерпуючи енергетичних ресурсів [23]. В енергетично-свідомих middleware, наприклад, більшість електронних компонентів апаратних засобів (у тому числі радіо) мають бути вимкненими більшу частину часу, залежно від виду застосувань.

1.2.3. Масштабованість, переформатування та динаміка топології мережі

Якщо розміри мережі зростають, то остання має бути достатньо гнучкою, щоб дозволити це зростання в будь-якому місці і в будь-який час, не впливаючи на власні характеристики. Ефективні послуги по встановленню проміжного ПЗ мають

підтримувати прийнятний рівень продуктивності при зміні розмірів мережі. Мережна топологія є предметом частих змін внаслідок таких факторів, як нечинності та відмови, наявність рухомих перешкод, мобільності, тощо. Проміжне ПЗ повинно підтримувати надійну роботу сенсорних мереж, незважаючи на їх динаміку, шляхом адаптування до змінних зовнішніх умов. Воно також має підтримувати відмовостійкість і самоконфігурування, самопідтримку характеристик сенсорів.

Проміжне ПЗ надає послуги програмним додаткам, окрім тих, що доступні в операційній системі, з'єднує компоненти програмного забезпечення та корпоративні програми. Middleware включає в себе веб-сервери, сервери додатків, системи управління контентом та аналогічні інструменти, що підтримують розроблення та доставлення додатків, і дає змогу здійснювати зв'язок та керування даними в розподілених додатках. Це особливо стосується інформаційних технологій, що базуються: на розширеній мові розмітки (XML); на протоколі обміну структурованими повідомленнями в розподілених обчислювальних системах при доступі до об'єктів (SOAP); на веб-сервісах; на модульному підході (SOA) до розроблення програмного забезпечення, що заснований на використанні розподілених, слабо пов'язаних замінних компонентів, оснащених стандартизованими інтерфейсами для взаємодії за стандартизованими протоколами; на інфраструктурі Web 2.0 та на протоколі легкого доступу до каталогів (LDAP).

Іншими прикладами проміжного програмного забезпечення є:

- програмне забезпечення Mer, що не має ядра Linux і якому бракує інтерфейсу. Mer більше стосується мобільно-орієнтованих операційних систем постачальників обладнання;
- операційна система Android, що використовує ядро Linux і забезпечує систему додатків, яку розробники включають у свої програми. Крім того, Android забезпечує рівень проміжного ПЗ, включаючи бібліотеки, які надають такі послуги, як зберігання даних, екранне відображення, мультимедіа та веб-переглядач. Оскільки бібліотеки складаються на машинній мові, команди виконуються швидко.

Бібліотеки Middleware також реалізують функції, специфічні для пристроїв, тому додатки не потребують залежності від варіантів між різними пристроями Android.

- У технології моделювання проміжне ПЗ використовується в контексті архітектури високого рівня, яка застосовується для багатьох розподілених моделювань. Це шар ПЗ, який лежить між кодом додатка та інфраструктурою під час виконання. Він складається з бібліотеки функцій та дає змогу виконувати низку програм-моделювань (федератів), тобто пересилати ці функції з загальної бібліотеки, а не створювати їх повторно для кожної програми.
- Розробники бездротових мереж використовують проміжне ПЗ для вирішення проблем, пов'язаних із БСМ. Так, проміжне ПЗ дає змогу розробникам цих мереж інтегрувати операційні системи та апаратні засоби з різними додатками, що і виконується нижче у розд.4.
- Набори ПЗ для ідентифікації радіочастот забезпечують нас проміжним ПЗ для фільтрування зашумлених вихідних даних. Набір ILAND - це проміжне ПЗ, призначене для використання в режимі реального часу, що пропонує детерміновану підтримку реконфігурації в обмежений час.

1.3. Смарт-сенсори та смарт-актуатори, як основа побудови кібер-фізичних систем

Формування метрологічних смарт-засобів стає передумовою розвитку кібер-фізичних систем. Існує множина метрологічних смарт-засобів, які підрозділяються на наступні підмножини: смарт-сенсорів, вимірювальних смарт-перетворювачів, їхніх мереж і т.д., які можуть бути об'єднані в межах однієї сучасної дротової чи бездротової мережі [24].

Пропонується безпрецедентна можливість реалізації широкого спектру різних прикладних застосувань з допомогою сучасної номенклатури мережевих сенсорів. Ці сенсори характеризуються низькими вартістю і споживаною потужністю, легко встановлюються та підключаються. Коли вони комбінуються в мережі, то дають змогу отримати низку переваг порівняно з традиційними мережами. Переваги

стосуються гнучкої архітектури при масштабуванні (значному збільшенні кількості сенсорів у мережі), отримання даних з високою роздільною здатністю, і наявністю адаптивних механізмів застосування [25]. Тим не менш, внаслідок їх тісної інтеграції з оточенням і унікальних характеристик, впровадження БСМ представляє певні проблеми, а розвиток практики застосувань набуває рис оригінальності.

Тому дослідження можливостей гнучких сенсорних мереж (у їх бездротовому виконанні), як визначальних структурних елементів кібер-фізичних систем, направлене на удосконалення останніх за рахунок оптимізації інформаційно-вимірювальних характеристик внаслідок перерозподілу функцій між різними рівнями мережі та системи в цілому.

1.3.1. Смарт-сенсори та їхні мережі

Смарт-сенсор, відповідно до прийнятого у промисловості визначення, поєднує в одному корпусі чутливий елемент, інтерфейсну аналогову мікросхему, АЦП і шину інтерфейсу [23]. Створювана класифікація новітнього покоління смарт-сенсорів передбачає включення опції додаткових функціональних можливостей, таких як самотестування, самоідентифікація, самовалідизація, що дає змогу системі самостійно віднести той чи інший МІ до певного наперед заданого класу засобів вимірювання з усіма наслідками [8]. До прикладу, якщо віднесли МІ до класу генеруючих, створених на основі термопар, то цей прилад є валідизованим як МІ генеруючого класу; всі наступні метрологічні операції з ним здійснюються належним чином. Може бути МІ віднесений внаслідок можливості самоадаптації (його самоприспособування до змінних умов оточуючого середовища) до МІ самоадаптивного класу.

Особливий інтерес і важливість для проєктувальників становлять такі можливості смарт-сенсора, як самокалібрування і самодіагностика, можливість здійснювати опрацювання сигналу, а також можливості комбінованого вимірювання шляхом використання багатьох чутливих елементів, так-звана функція *sensors' fusion* [26].

Мікропроцесор смарт-сенсора оптимізує сигнали перед передаванням до мережі управління. Він відфільтровує небажані шуми і компенсує похибки перед

відправленням даних. Деякі сенсори можуть бути спеціально запрограмовані для того, щоб виробляти повідомлення «Тривога» самостійно, коли досягаються попередньо критично встановлені межі зміни вимірюваних сигналів. Інакше, вони виступають в ролі МІ-сигналізаторів: до прикладу такими є пожежні сповіщувачі [27].

Проектувальники можуть розглядати смарт-сенсор, як мікросенсор, інтегрований в межах одного кристалу кремнію із мікроелектронними засобами опрацювання сигналів, такими як АЦП, з метою формування інтегрованої мікроелектромеханічної одиниці (МЕМС), спроможної опрацьовувати інформацію самостійно або взаємодіючи з вбудованим мікропроцесором.

1.3.2. Температурний смарт-сенсор

Це - аналоговий або цифровий первинний термочутливий перетворювач, поєднаний з блоком опрацювання та комунікаційним інтерфейсом і спроможний виконувати низку метрологічних смарт-функцій за рахунок встановленого метрологічного програмного забезпечення. Це – інтелектуальний сенсор температури з низкою спеціалізованих алгоритмів, передбачених на проектній чи інсталяційній стадії, тобто сенсор з такими вбудованими алгоритмами, які необхідні для здійснення наступних спеціалізованих метрологічних функцій. Конкретно, такі функції включають, до прикладу здатність реалізувати, залежно від значення вхідного сигналу, автоматичну зміну діапазону вимірювання; здійснення самовалідації, самоперевірки, самодіагностики і т.д.; введення поправок, коли відбувається дія чинника впливу; лінеаризацію метрологічних характеристик; компенсація температури холодного спаю для термопар і так далі.

Бездротовими сенсорними мережами вважаються сукупність просторово розподілених автономних сенсорів, призначених моніторити фізичні параметри, включаючи умови довкілля (*T*, *p*, *вологість*, тощо) і спільно направляти отримані вимірювальні дані до кінцевого споживача. Більш сучасні мережі виконуються двонаправленими, що дає змогу додатково контролювати активність сенсорів. Розвиток бездротових сенсорних мереж умотивований їх широким застосуванням у

виробництві та споживанні, моніторингу людей та режимів роботи обладнання, і так далі.

Бездротова сенсорна мережа побудована з «вузлів» - від декількох до декількох сотень або навіть тисяч, де кожен вузол з'єднаний з одним (іноді декількома) сенсорами. Кожний такий сенсорний мережевий вузол має, як правило, декілька типових конструктивних частин: радіопередавач-приймач з внутрішньою антеною або підключення до зовнішньої антени, мікроконтролер, електронну інтерфейсну схему для з'єднання з сенсорами і джерелом живлення (звичайно батарея або вбудована видозміна нагромаджувача енергії).

Вузол мережі може варіюватися за розміром від взуттєвої коробки до розміру пилінки. Вартість вузлів сенсорів є так само різноманітна, починаючи від кількох сотень доларів, залежно від складності. Розмір і вартість обмежень на сенсорні вузли призводять до виникнення відповідних обмежень на ресурси, такі як енергія, пам'ять, швидкість обчислень і частотний спектр пропускання комунікацій. Топологія бездротових сенсорних мереж може варіюватися від простого мережі типу «Зірка» до покращеної багатовузлової бездротової мережі типу «Сітка». Техніка поширення повідомлень вузлами мережі може бути маршрутизація або флудінг (простий алгоритм маршрутизації комп'ютерної мережі, в якій кожен наступний вхідний пакет відправляється по всіх вихідних каналах, за винятком одного, яким він прибув).

Крос-шар стає важливою областю вивчення бездротових комунікацій. У традиційному пошаровому наближенні наявні три проблеми. За традиційного підходу не можна обмінюватися різною інформацією між різними шарами, що призводить до того, що до кожного шару не можна довести вичерпну інформацію. Він не може гарантувати оптимізацію роботи всієї мережі і не має змоги адаптуватися до змін навколишнього середовища. Через завади, що існують між різними користувачами, конфлікти доступу, згасання сигналу на лініях і зміни умов навколишнього середовища в БСМ, до них не може бути застосований традиційний підхід дротових мереж [2].

Отже, крос-шар використовується, щоб досягнути оптимальної модуляції сигналу і тим самим покращити такі характеристики передавання інформації, як швидкість передачі даних, енергоефективність, якість сервісу і т.д. Сенсорні вузли можна представити у вигляді невеликих комп'ютерів, що є основоположним з точки зору інтерфейсів та їх компонентів. Вони зазвичай складаються з блоку опрацювання обмежених обчислювальної потужності та розмірів пам'яті, сенсорів або МЕМС (у тому числі конкретної схеми кондиціонування сигналів), пристроїв зв'язку (зазвичай прийомо-передавачів), і джерела живлення зазвичай у вигляді батареї. Інші можливі вузли – модулі енергозбереження, вторинні інтегральні схеми для спеціального застосування і, можливо, вторинний комунікаційний інтерфейс (до прикладу USB).

Базові станції є одним чи більше компонентами БСМ з набагато більшими обчислювальними, енергетично-ємними та комунікаційними ресурсами. Вони діють як шлюзи між сенсорними вузлами і кінцевим користувачем, оскільки, як правило, подають дані від бездротової мережі до сервера.

1.3.3. Розподілена сенсорна мережа

Відповідно до [2] ідеальний бездротовий сенсор є мережевим і здатним формувати масштабовану мережу, розумним і програмованим, придатним для швидкого збирання даних, надійним і точним в довгостроковій перспективі, і вимагає мінімального обслуговування. Вибір оптимальних сенсорів і їх бездротового зв'язку вимагає знань особливостей застосування. Термін служби батареї, швидкість заміни сенсорів, і їх розміри – це всі основні аспекти, що враховуються при проектуванні. Приклади сенсорів з низькою швидкістю передачі даних включають температурні й вологісні види. Приклади сенсорів з високою швидкістю передачі даних – сенсори механічних напружень, прискорень і вібрації. Сучасні приклади надшвидкісних сенсорів передачі даних є теплові та оптичні томографи, сенсори дистанційного управління, і т.д.

Поступ у сфері мікроелектроніки призвів до появи сенсорів, спроможних, на основі досягнень цифрової електроніки та комунікацій, формувати **сенсорні**

інтегровані вузли. Такі сенсори набувають здатності обмінюватись інформацією між собою за допомогою бездротових протоколів маршрутизації даних. БСМ переважно складається з базової станції ("шлюз"), що може спілкуватися з декількома бездротовими сенсорами за допомогою радіозв'язку. Дані нагромаджуються в сенсорних вузлах, стискаються і передаються до основної або проміжної базової станції [28-32].

Нижче розглядається архітектура БСМ, оскільки вона – традиційна (зірка, сітка, гібрид зірки - сітки). Аналогічним чином нема спеціальної потреби вивчати звичайні мережеві протоколи (IEEE802.11x, який використовується в локальних мережах при передачі даних з високою пропускнуою здатністю; IEEE802.15.1 і 2, які відомі як Bluetooth, які відзначаються меншою потужністю і застосовуються у персональних мережах.

Для БСМ у дисертаційній роботі активно використовується протокол передачі даних IEEE802.15.4 [33], спеціально створений для цього виду мереж (тут по всьому світу застосовується неліцензований частотний діапазон - 2 ... 4 ГГц; протокол ZigBee, який охоплюється протоколом IEEE802.15.4 і розширює специфікації мережі на міжсенсорний інтерфейс та інтерфейс прикладних застосувань), а також протокол IEEE1451.5, спроможний забезпечити роботу смарт-сенсорних робочих груп в умовах бездротової версії зв'язку.

ZigBee — специфікація мережевих протоколів верхнього рівня— рівня додатків APS (англ.– application support sublayer) і мережевого рівня NWK, що використовує сервіси нижніх рівнів— рівня управління доступом до середовища MAC і фізичного рівня PHY, регламентованих стандартом IEEE 802.15.4. ZigBee і IEEE 802.15.4 [33] описують бездротові персональні обчислювальні мережі. Специфікація ZigBee орієнтована на спеціалізовані мережі, що вимагають гарантованої безпечної передачі даних при відносно невеликих швидкостях і можливості тривалої роботи мережевих пристроїв від автономних джерел живлення. Основна особливість технології ZigBee полягає в тому, що вона при малому енергоспоживанні підтримує не тільки прості топології мережі («точка-точка», «дерево» і «зірка»), але й самоорганізовану і самовідновлювану коміркову топологію з ретрансляцією і

маршрутизацією повідомлень. Крім того, специфікація ZigBee передбачає можливість вибору алгоритму маршрутизації, залежно від вимог додатку та стану мережі, механізму стандартизації додаваних мереж - профілі додатків, бібліотека стандартних кластерів, кінцеві точки, прив'язки, гнучкий механізм безпеки, а також забезпечує простоту розгортання, обслуговування і модернізації [34-36].

Основними областями застосування технології ZigBee є БСМ, автоматизація житла («Розумний будинок» і «Інтелектуальна будівля»), медичне обладнання, системи промислового моніторингу та управління, а також побутова електроніка і «периферія» ПК. Здатність до самоорганізації та самовідновлення, коміркова топологія, захищеність, висока завадостійкість, низьке енергоспоживання і відсутність необхідності отримання частотної роздільної здатності роблять ZigBee-мережу належною базою для формування бездротової інфраструктури систем в режимі реального часу.

ZigBee – це стандарт для набору високорівневих протоколів зв'язку, що використовують невеликі, малопотужні цифрові трансівери, на основі стандарту IEEE 802.15.4-2006 для бездротових персональних мереж, таких як, наприклад, бездротові навушники, з'єднані з мобільними телефонами за допомогою радіохвиль короткохвильового діапазону. Технологія визначається специфікацією ZigBee, розробленою з наміром створити простіші й дешевші персональні мережі, до прикладу такі як Bluetooth. ZigBee призначений для радіочастотних пристроїв, де необхідна тривала робота від батарейок і безпека передачі даних по мережі. ZigBee працює в промислових, наукових і медичних (ISM-діапазон) радіодіапазонах: 868 МГц в Європі, 915 МГц в США і в Австралії, і 2.4 ГГц в більшості країн в світі. Як правило, у продажу є чіпи ZigBee, що є об'єднаними радіо- і мікроконтролерами з розміром Flash-пам'яті 60К - 128К таких різних виробників. Радіомодуль також можна використовувати окремо з будь-яким мікроконтролером. Часто виробники радіомодулів пропонують також стек програмного забезпечення ZigBee, хоча доступні й інші незалежні стеки.

Так як ZigBee може активуватися (тобто переходити від сплячого режиму до активного) за ≤ 15 мілісекунд, затримка відгуку пристрою є дуже низькою, особливо

порівняно з Bluetooth, для якого затримка зазвичай досягає трьох секунд. Оскільки ZigBee більшу частину часу перебуває в сплячому режимі, то рівень споживання енергії дуже низький, завдяки чому досягається тривала робота від батарей.

Якщо в сенсорній мережі використовується централізована архітектура, а центральний вузол виходить з ладу, то стається колапс у роботі цієї мережі; однак її надійність можна збільшити з допомогою розподіленої архітектури управління. Вона використовується в БСМ з наступних причин: сенсорні вузли схильні до відмов; забезпечує покращений збір даних, резервування вузлів у разі виходу з ладу центрального вузла; відсутній централізований пристрій для керування ресурсами, що повинні самоорганізовуватись.

1.3.4. Інтеграція даних та веб-сенсори.

Дані, зібрані від БСМ, як правило зберігаються у вигляді цифрових даних в центральній базовій станції. Крім того, відкритий гео-просторовий консорціум уточнює стандарти сумісності інтерфейсів та кодувань *метаданих* (це дані, які описують інші дані; мета - префікс, що в більшості інформаційних технологій зазвичай означає "основне визначення або опис"). Метадані резюмують основну інформацію про дані, які можуть зробити пошук і працювати з конкретними файлами даних значно легше. Наприклад, автор, дата створення, дата зміни і розмір файлу є прикладами дуже простих метаданих документу. Маючи змогу фільтрувати через ці метадані, спростуємо пошук конкретного документу; це дозволяє інтеграцію в режимі реального часу різнорідних мереж сенсорів через Інтернет, що дає змогу будь-кому контролювати або керувати бездротовими сенсорними мережами з допомогою веб-браузера.

Мережеве опрацювання даних.

Для зменшення вартості комунікування деякі алгоритми передбачають усунення або зменшення надлишкової інформаційності сенсорних вузлів, а також уникнення пересилання непотрібних даних. Якщо вузли можуть перевіряти дані, які вони подаються далі, то вони спроможні вимірювати середні значення або направленість їх зміни щодо показів, отримуваних від інших вузлів. Наприклад, для вимірювальних та моніторингових застосувань, як правило, буває так, що сусідні

сенсорні вузли, які моніторять певну екологічну функцію, часто реєструють ті самі значення. Цей вид надмірності даних, зумовлений просторовою кореляцією спостережень різних сенсорів, сприяє розвитку методів мережевого збирання та нагромадження даних.

Мережевий смарт-сенсор.

Мережевий смарт-сенсор є невеликий вузол незначної маси, який служить первинним вузлом сенсорної мережі. Він дає змогу здійснювати віддалений моніторинг обладнання, такого як вимірювальні перетворювачі й лінії живлення та на вимогу із-зовні керувати ресурсами енергетичної смарт-мережі. Остання – це електрична мережа, до складу якої входять різні оперативні та енергетичні засоби, такі як смарт-лічильники, поновлювані енергетичні ресурси, енергоефективні джерела.

Мережеві смарт-сенсори можуть використовуватись для моніторингу погодних умов і температури силової лінії живлення, які у подальшому використовуються для розрахунку пропускної здатності лінії. Цей процес називається оцінкою динамічного рейтингу силових ліній (DRL-technologies) і дозволяє енергетичним компаніям збільшити потік електричної енергії, передаваної по чинних високовольтних лініях електропередач. Дані сенсори також можна використовувати в будинках і підприємствах з метою підвищення енергоефективності. У нашому випадку, такі смарт-сенсори можуть виявитись ефективними для організації і формування КФС тепличного господарства у складі певної кількості просторово розділених теплиць [37-38].

До складу мережевого смарт-сенсора входять чотири компоненти: перетворювач, мікроконтролер, вузол обміну даними і джерело живлення. Перетворювач сенсора генерує електричні сигнали, що базуються на явищах, зв'язаних з напругою лінії електропередач. Мікроконтролер опрацьовує й зберігає вихідний сигнал сенсора. Вузол обміну даними, який може бути у провідному або бездротовому виконанні, приймає команди з центрального комп'ютера і передає дані вимірювань до зазначеного мікроконтролера. Вказані сенсори живляться від відповідної лінії живлення або від батареї.

Мережеві смарт-сенсори здатні поєднувати ці пристрої з смарт-метрами, забезпечуючи відстеження в реальному часі споживання електроенергії. Можна використовувати цю інформацію для розробки ціноутворення в режимі реального часу, щоб знизити своє власне енергоспоживання в години пік (див. розд.4).

Висновки до розділу 1.

1. Промислова революція 4.0 останнього десятиріччя призвела до появи кібер-фізичних систем, побудованих фізично на основі смарт-сенсорів та смарт-актуаторів і об'єднаних з допомогою програмно-технічних засобів. Дана кібер-фізична система, як така, призначена автоматизувати процес виконання операцій та контролювати певну фізичну властивість об'єкту.
2. Кібер-фізичні системи акумулювали у собі досягнення метрології, теорії автоматичного керування та інших галузей автоматизації, включаючи приладобудування, і тому проявили себе як ефективний засіб моніторингу, контролю і управління технологічними процесами.
3. У сільському господарстві, де є чимало складних за оснащенням і виконанням об'єктів керування, дослідження і впровадження кібер-фізичних систем є перспективним кроком, що визначає ефективність і конкурентоздатність сільського господарства і стимулює, при цьому, подальший розвиток інформаційно-вимірювальних технологій, включаючи віддалений доступ до об'єктів, он-лайн отримання інформації про неперервні процеси об'єктів життєдіяльності та вегетації рослин із врахуванням умов їх вирощування, зберігання готової продукції сільськогосподарського виробництва та її переробки.
4. Ефективність різних етапів вирощування та переробки сільськогосподарської продукції суттєво залежить від технологічних особливостей, а її якість непрямым чином визначається особливостями вимірювання технологічних параметрів, точністю їх дотримання та регулювання. Окрім того, впровадження засобів автоматизації призводить до зменшення вмісту ручної праці та реалізує можливості віддаленого регулювання параметрів технологічних процесів, що особливо цінне для енего- та працемісткового тепличного виробництва ранніх овочів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ, ЗАСОБИ ТА ПРИКЛАДИ РОЗРОБЛЕННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОТРЕБ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Принцип роботи системи управління мікрокліматом у теплиці передбачає управління електроенергією, наприклад вмикання та вимикання обладнання на основі опрацювання показів засобів вимірювання [39]. До прикладу, система повітряного опалення, яку необхідно ввімкнути, повинна запускатися, якщо температура повітря в теплиці нижча від встановленої раніше; система опалення ґрунту вмикається, якщо температура ґрунту в теплиці нижча від заданої; вентиляція включається шляхом відкриття вентиляційних фрамуг, якщо температура або вологість у теплиці вища від зазначеної; повітрообмін з навколишнім середовищем припиняється закриттям вентиляційних фрамуг; система зволоження запускається у випадку, якщо вологість повітря в теплиці нижче встановленої; штори відкриваються, щоб забезпечити ріст рослин, збільшуючи сонячне освітлення, якщо освітленість рослин у теплиці нижче зазначеної; штори закриваються, щоб зменшити сонячне випромінювання, якщо освітленість вища від встановленої; зрошення відбувається, коли вологість ґрунту в теплиці нижча зазначеної; система забезпечення повітря вуглекислим газом для прискорення фотосинтезу запускається, якщо концентрація вуглекислого газу в повітрі в теплиці нижча від зазначеної [40-41].

Тому для забезпечення роботи системи управління мікрокліматом у теплиці необхідно вибрати технічні засоби автоматичної системи клімат-контролю та оптимально розташувати їх у теплиці або поблизу неї [42-43]. Крім того, необхідно вимірювати та аналізувати характеристики зовнішніх погодних умов та вводити поправки на проектно-експлуатаційні параметри теплиці [44].

Важливим можна вважати дослідження і розвиток сукупності різноманітних технологічних процесів для потреб сільського господарства, спільним для яких є споживання різних видів енергії, зокрема в тепличних господарствах; контролювати технологічні параметри за допомогою вимірювань температури, вологості, інсоляції, тощо.

У роботі доцільно розглядати оптимізацію робочих характеристик, у тому числі за умов масштабування сенсорних мереж КФС, зокрема шляхом створення децентралізованого програмно-операційного середовища. Виконання цих мереж може бути відкритим, закритим, або виокремленим. Останнє пропонується для БСМ, які виконують ціле-орієнтовані завдання. Саме такий варіант виконання БСМ запропоновано у даній роботі.

Новий підхід у створенні КФС полягає у формуванні у них здатності швидкої адаптації до змін умов довкілля і навіть до несправностей. Це стосується розгляду БСМ, як невід'ємного компоненту КФС. "Самоадаптивна система - це система, здатна змінювати свою поведінку і структуру, з метою адаптації, без втручання людини, до змін в собі і у власному робочому середовищі" [8]. Слід розвивати не тільки загальні стратегії адаптації, включаючи прогнозування еволюції навколишнього середовища, а й конкретні запобіжні метрологічно адаптивні механізми, викликані зазначеними вище змінами. Якщо це стосується МІ, то зокрема можуть бути задіяні механізми, пов'язані зі зміною метрологічних характеристик, наслідок чого є дисфункція КФС. Завдяки моделюванню така адаптація може виконуватись заздалегідь, активно випереджаючи поточний дрейф або інші види змін характеристик. В результаті, це зекономить час, необхідний для впровадження адаптаційної стратегії, що повинна виконуватись [45].

2.1. Системи регулювання технологічних процесів у сільському господарстві та переробній промисловості

Однією з найпростіших і тому добре освоєною системою контролю якості і регулювання технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві стала автоматизація процесу сушіння сільськогосподарської продукції [46] в стрічкових сушарках. Нижче розглянемо її особливості з тим, щоби ще раз підтвердити необхідність відмови від аналогового регулювання та переходу до цифрового регулювання в даній галузі.

У сільськогосподарському виробництві зазвичай використовуються методи сушіння. Використовуються для сушіння зерна, готової сільськогосподарської та промислової продукції, добавок мінеральних добрив, полімерних матеріалів та ряду інших продуктів. Стрічкові сушарки набули великої популярності в сільському господарстві. В результаті стрічкові сушарки були використані при дослідженні систем автоматизації процесів сушіння сільськогосподарської продукції. Останні використовуються для сушіння як сипучих (зернистих, гранульованих, кускових, волокнистих), так і штучних матеріалів. Включення одного або кількох стрічкових конвеєрів всередині металевго корпусу поперечного перерізу сушарки є відмінною рисою автоматизації процесів сушіння сільськогосподарської продукції. Висушений матеріал наноситься шаром товщиною до 120 мм на конвеєрну стрічку і переноситься з одного торця сушарки на інший. Матеріал пересипається зі стрічки на стрічку, якщо в сушарці є численні смуги, які розташовуються по висоті сушарки в кілька ярусів, що сприяє більш рівномірному висиханню.

Стрічкові сушарки працюють у безперервному режимі. Вони використовують повітря або димові гази, що рухаються протитечією чи перехресно по відношенню до висушеного матеріалу як осушувач. Поширеним є використання рециркуляції газу та його проміжного нагріву. Сушильний агент часто продувається через шар висушеного дисперсного матеріалу на стрічці, щоб прискорити процес тепло- і масообміну. Для цього стрічка створюється у вигляді металевго плетеної сітки, пластинчастої стрічки з отворами або окремих прямокутних лотків із сітчастим дном.

Робоча камера в однострічкових сушарках часто являє собою серію з'єднаних між собою секцій, кожна з яких містить вбудований нагрівач і вентилятор для продування шару сушильного агента. Один стрічковий конвеєр проходить через усі секції. Конструкція сушарки дозволяє диференційовано задавати температуру, швидкість і вологість процесу по довжині стрічки [47].

Стрічкова сушарка являє собою тунель, що складається з проміжних секцій, кожна з яких має власний комплект циркуляційних вентиляторів з підшипниками з водяним охолодженням. Усі вентиляційні коридори обслуговуються шляхом подачі

осушувача, нанесеного на кожну проміжну частину. Заслінки можна використовувати для зміни обсягу подачі агента, якщо це необхідно.

Режим сушіння вибирається виходячи з особливостей і атрибутів продукту. Кожна секція сушарки має бути конструктивно забезпечена циркуляційним вентилятором з підшипниками для економного режиму сушіння. Для жорсткого режиму переважною є версія з потужним димососом і без секційних витяжних вентиляторів. Завдяки простому, але продуманому дизайну пристроїв можна сушити велику кількість матеріалів. Крім того, оскільки машини оснащені системою пожежогасіння та безпечні в експлуатації, вони відмінно підходять для таких робіт, як сушіння кусків і брикетованого вугілля.

Канал відведення відпрацьованого сушильного агента розташований у вентиляційному коридорі, а саме в його нижній частині. Заслонки також можуть контролювати кількість сушильного агента, який потрібно видалити.

Промислова сушка з використанням такого спеціалізованого обладнання здійснюється ефективно і швидко завдяки використанню стрічки для завантаження матеріалів у сушильні камери. Теплоізоляція, встановлена на окремих кріпленнях, забезпечує безпеку обладнання під час експлуатації.

Технологічна схема процесу сушіння в стрічковій сушарці наведена на рис. 2.1.

Сушильний агент - це повітря, яке подається до нагрівача і нагрівається там паром перед тим, як надходити в сушарку. Живильник подає матеріал, що повинен сушитися, в сушарку, забезпечуючи рівномірне розміщення на транспортерній стрічці. Швидкість транспортерної стрічки може змінюватися залежно від часу, протягом якого матеріал, що підлягає сушенню, повинен перебувати в сушарці. Для інтенсивнішого сушіння в сушарку встановлюється додатковий нагрівач, що дозволяє прискорити процес сушіння. Вентилятор використовується для видалення використаної сушильної речовини [48].

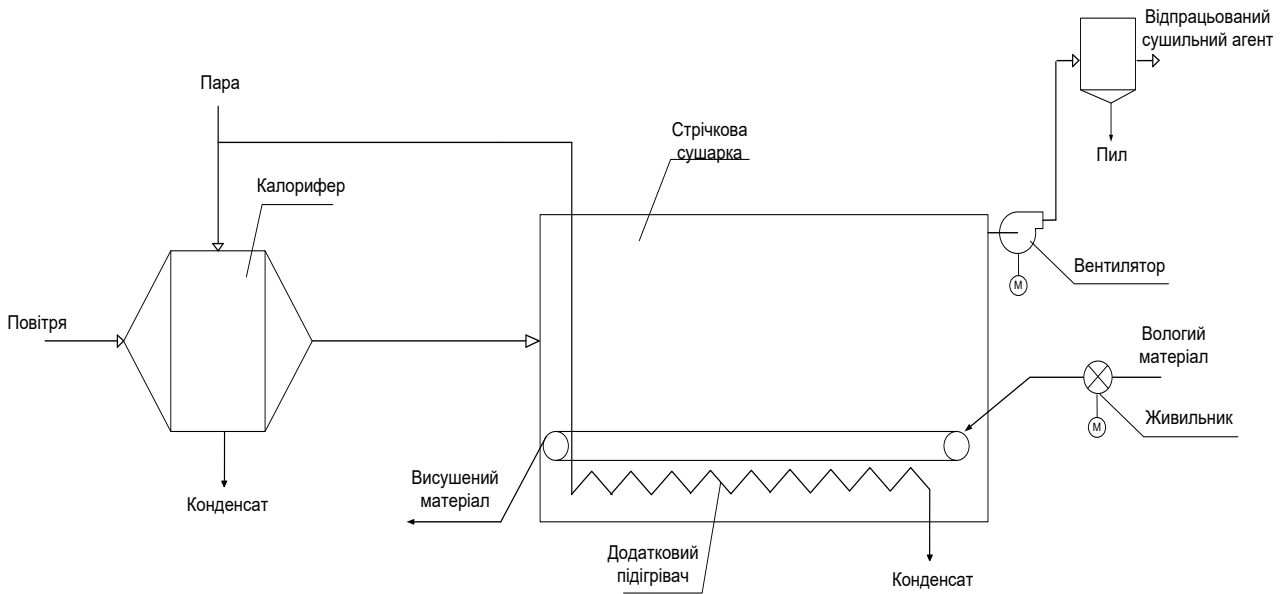


Рис.2.1. Технологічна схема процесу сушіння в стрічковій сушарці

Для видалення осушувача із сушарки використовується сепаратор, оскільки осушувач може містити пил або інші механічні частинки. Транспортна стрічка транспортує сухий матеріал назовні. Такі сушарки називають конвективними стрічковими сушарками. Безпосередня взаємодія матеріалу з сушительним агентом характеризує конвективне сушіння. Волога випаровується в результаті тепла нагрітого сушительного агента, який одночасно поглинає і видаляє водяну пару з сушарки. Сушарка зазвичай розділена на багато зон, кожна з яких має власний вентилятор для циркуляції повітря. У сушарках з безперервною стрічкою гаряче повітря рухається понад шаром матеріалу в напрямку, протилежному його руху. Повітря в сітчастих стрічкових сушарках проходить перпендикулярно до площини стрічки - вгору або вниз. При цій поперечній продувці шар матеріалу значно більше розпушується, що прискорює процес сушіння.

Шар матеріалу на стрічці в однострічкових сушарках висихає нерівномірно: ділянка матеріалу, звернена до стрічки (при русі сушительного агента вздовж шару матеріалу) залишається вологою. Як наслідок, часто використовуються багатострічкові сушарки, в яких матеріал пересипається з однієї стрічки на іншу.

У реальній сушарці трапляються додаткові втрати і підведення теплоти, до прикладу, нагрів повітря в проміжних калориферах, тепловиділення в хімічних реакціях, розморожування вологи, нагрів сушительного агента вентилятором, тощо.

Тому зазвичай для оцінювання впливу різних факторів складають рівняння енергетичного (теплового) та матеріального балансів, тобто до прикладу рівняння вмісту вологи у матеріалі, що підлягає сушінню.

Існує низка чинників, що впливають на процес сушіння. До них відносяться: температура сушильного агента, відносна вологість сушильного агента, тиск, швидкість потоку сушильного агента, ступінь подрібнення матеріалу, товщина шару вологого матеріалу. Проаналізуємо основні з цих чинників.

Температура сушильного агента. Підвищення температури сушильного агента на початку процесу сушіння прискорює процес сушіння. Однак це збільшує втрати тепла, що найбільш помітно в кінці процесу сушіння, коли матеріал має низьку вологість. Найвища температура, яку можна переносити, визначається типом матеріалу та процедурою сушіння.

Швидкість потоку сушильного агента тільки при постійній швидкості впливає на швидкість сушіння (при постійній температурі та відносній вологості). Швидкість сушіння пропорційна швидкості потоку. Цей вплив помітний до швидкості потоку осушувача 5 м/с. Те, що сушильний хімічний струмінь «зриває» з поверхні висихання дрібні фрагменти висушеного матеріалу, обмежує подальше збільшення швидкості. При сушінні в «киплячому шарі» зі швидкістю повітряного потоку 5-15 м/с ця особливість використовується. Швидкість повітряного потоку не впливає на швидкість сушіння в кінці процесу сушіння.

Відносна вологість сушильного агента. При постійній температурі і швидкості потоку сушильного агента зниження швидкості сушіння на першому етапі прямопропорційно збільшенню його відносної вологості. Потім ця залежність зменшується і знову зростає на кінцевому етапі сушіння. У цей момент залежність процесу сушіння від відносної вологості сушильного агента визначається значенням рівноважного вологовмісту, що відповідає залишковій вологості висушеного матеріалу.

Атмосферний тиск. Зниження тиску прискорює на першому етапі процес сушіння.

Ступінь подрібнення матеріалу має великий вплив на час висихання. Однак

цей фактор здебільшого використовується в розпилювальних сушарках, де тонко подрібнений матеріал (розмір частинок кілька мікрон або менше) висихає за лічені секунди.

Товщина шару вологого матеріалу (питоме навантаження). Швидкість висихання сповільнюється збільшенням товщини шару, особливо на першому етапі. У міру висихання товщина шару зменшується, а швидкість висихання збільшується. В результаті нижні стрічки можна регулювати на меншій швидкості (12 см / хв) на стрічкових сушарках, ніж верхні (20 см / хв). Навантаження матеріалу на стрічку має бути рівномірним для рівномірного висихання. Для цього стрічкові сушарки оснащують спеціальним обладнанням. На продуктивність сушильного обладнання також впливає питоме навантаження. Продуктивність зростає зі збільшенням товщини шару, але лише до тих пір, поки питоме навантаження матеріалу не досягне певної межі; після цього продуктивність сушильного обладнання падає. Крім того, зі збільшенням товщини шару збільшується кількість електроенергії, що споживається вентилятором, який розподіляє осушувач. В результаті, залежно від техніки сушіння, висота шару визначається незалежно для кожного висушеного предмета.

Як видно із вищеперерахованого, для контролю більшості вказаних параметрів достатньо сенсорів температури і вологості, на яких зупинимось нижче в розд.2-3.

Таблиця 2.1.

Технологічна карта процесу сушіння

№ п/п	Назва параметру	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
1	Вологість сухого матеріалу	%	10	± 1,0
2	Температура в сушильній камері	°C	87	± 3,0
3	Температура сушильного агента	°C	105	± 3,0
4	Розрідження в сушильній камері	кгс/см ²	0.2	± 0.05

Значення технологічних параметрів, визначених за результатами досліджень, приведені в технологічній карті таблиці 2.1. Конкретно, для отримання з допомогою згаданої стрічкової сушарки матеріалу кінцевою вологістю $10,0 \pm 1,0$ % розраховано

та встановлено експериментально значення температури у сушильній камері, рівне $87,0 \pm 3,0$ °С та ступінь розрідження у ній – $0,20 \pm 0,05$ кгс/см² при температурі сушильного агента $105,0 \pm 3,0$ °С.

Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами та чинниками, що впливають на роботу стрічкової сушарки, наведена на рис. 2.2.

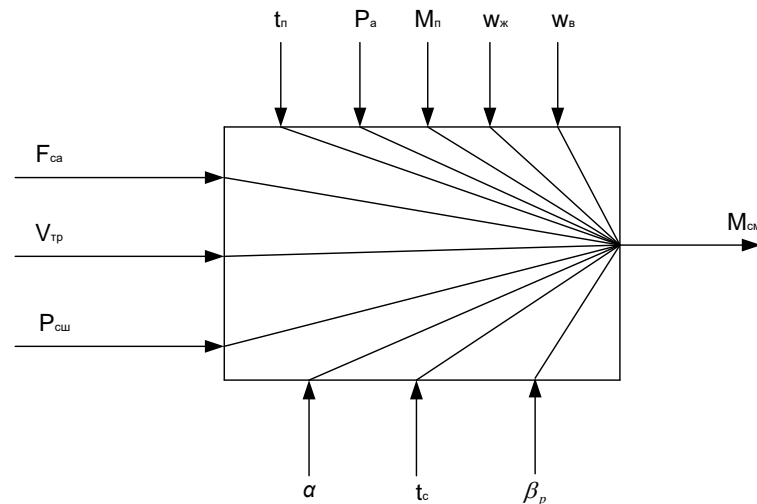


Рис.2.2. Структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами та факторами, що впливають на роботу стрічкової сушарки

Вищевказаний режим сушіння забезпечують функціональні ознаки систем автоматизації вказані у табл.2.2. За нечітко визначених умов сушіння, що переважно відповідає дійсності, та за наявності сировини з вихідним розкидом вологості, враховуючи значну кількість відносно дешевих сенсорів, що їх можна встановити у контрольованому об'єкті, набагато простіше оптимізувати керування режимами роботи сушарки, теплиці чи іншого подібного об'єкту сільськогосподарського виробництва, шляхом:

- Залучення значної кількості сенсорів у системі керування;
- Встановлення малоінерційних сенсорів, до числа яких можна віднести високоточні плівкові платинові термометри опору типу R-100;
- Використання спеціалізованих регуляторів технологічних процесів, до числа яких відносяться ПІД-регулятори [49], в тому числі продукції НВО «Термоприлад»;

- Розроблення спеціалізованого ПЗ для контролю та керування технологічними процесами конкретного виробництва;
- Розроблення віртуального засобу вимірювання для потреб керування режимом роботи теплиці [50];
- Санкціонованого запозичення для певних операцій проміжного ПЗ, спроможного автоматизувати вибірки даних, їх опрацювання, спільне та повторюване використання ПЗ і т.д. [51];
- Залучення, за потреби, хмарних обчислень, зокрема, при обслуговуванні тепличних комплексів [41], [52].

Таблиця.2.2.

Функціональні ознаки системи автоматизації

№ п/п	Обсяг автоматизації	Назва параметра	Показ	Реєстрація	Підсумовування	Усереднення	Визначення відхилення	Розрахунок техніко-економічних показників	Оптимізація	Сигналізація	Дистанційне керування	Захист	Блокування	Автоматичне регулювання
1	Температура сушильного агента		+	+							+			+
2	Температура в сушарці		+	+							+			+
3	Розрідження в сушарці		+	+							+			+
4	Вологість висушеного матеріалу		+	+							+			+

Зазначені напрямки розвитку та вдосконалення стосуються кібер-фізичних систем у цілому. Нижче у роботі вони опрацьовуються далі за текстом. Проте,

основний ухил та увага приділена їх температурним підсистемам, оскільки температура вважається поки-що єдиною фізичною величиною системи одиниць СІ, значення якої ще не забезпечуються на дискретному квантовому рівні [53], хоча наукові дослідження у цьому напрямку проводяться достатньо інтенсивно [54].

2.1.1. Методи вимірювання температури та можливості їх залучення для формування температурних підсистем

Якщо контактні методи ефективні для вимірювання і регулювання температури повітря у теплиці, то для вимірювання і регулювання температури ґрунту, причому одночасно по поверхні теплиці, доцільно залучення безконтактних засобів вимірювання. Проте, дотепер такі засоби не застосовувались, позаяк:

- 1) Ґрунт являє собою неоднорідну, нерівну поверхню з невідомим априорі коефіцієнтом чорноти [55];
- 2) Засоби вимірювання типу інфрачервоних пірометрів характеризуються саме тому низькою точністю [56];
- 3) Опрацювання отриманої інформації такого пірометра (тепловізори) достатньо складне і вимагає участі досвідченого пірометриста.

Насамперед, розглянемо конструкцію пірометра, як відносно простого засобу безконтактного вимірювання температури, що поряд з тепловізором може бути залученим у технологічному циклі сільськогосподарського виробництва у процесі переробки сільгосппродукції.

У більшості виконань пірометрів функцію перетворення (як для стаціонарних, так і переносних пірометрів) можна описати формулою:

$$U = U_0 + (1 - \varepsilon) k T_{\text{ф}}^n + \varepsilon k_{\text{в}} T^n, \quad (2.1)$$

де U_0 – постійна складова від впливу зміщення нуля операційного підсилювача, а також від впливу температури навколишнього середовища на пірометр; ε – значення коефіцієнта випромінювання об'єкта, температура якого вимірюється (граничне значення має вимірюваний об'єкт з характеристикою “чорного тіла”, у якого $\varepsilon = 0,95 - 0,99$; у нашому випадку такий коефіцієнт випромінювання

притаманний розпушеному і вологому чорноземові); k_v – коефіцієнт перетворення випромінювання в електричний сигнал опто-електронного тракту, що залежить від ширини робочого спектрального діапазону, приймача випромінювання і температурного діапазону; T_ϕ – температура фонового випромінювання, яку необхідно враховувати при малих значеннях випромінювальної здатності об'єкта; T – температура об'єкта, що моніториться.

Як приймачі, що перетворюють потужність електромагнітного випромінювання в фіксованому тілесному куті, використовують як фотонні, так і теплові приймачі випромінювання. Найбільше застосування серед фотонних приймачів випромінювання набули германієві, кремнієві, InGeAs фотодіоди та фоторезистори структури PbS та PbSe [17]. До приймачів, які реагують на теплову енергію, слід віднести термобатареї (фольгові або напилені напівпровідникові) і піроелектричні приймачі. Піроелектричні приймачі, хоч і потребують модуляції випромінювання, мають перевагу перед термобатарейними як в чутливості, так і в часі встановлення показів, що дозволяє їх використовувати для діагностики стану теплотрас, трубопроводів, тощо. Саме останні переважно використовуються у тепловізорах.

Пірометр умовно можна розділити на два основні вузли: первинний пірометричний перетворювач, який забезпечує перетворення випромінювальної енергії об'єкта в електричний сигнал, та вимірювальний перетворювач, який забезпечує перетворення сигналу, що поступає від первинного перетворювача, у форму, зручну для відліку чи реєстрації.

Структурна схема вимірювального перетворювача пірометра представлена на рис.2.3.

Основними вузлами такого перетворювача є: вхідний комутатор аналогових сигналів (КС), вхідний підсилювач сигналу з програмованим коефіцієнтом передачі (ППС), АЦП, цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), джерело опорної напруги (ДОН), вихідний нормуючий перетворювач (НП), мікропроцесор (МП), постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП), блок оперативної пам'яті (ОП), електричний перепрограмувальний запам'ятовуючий пристрій (ЕПЗП), алфавітно-цифровий

індикатор (АЦІ) і послідовний інтерфейс типу RS232 або RS485 для зв'язку з комп'ютером.

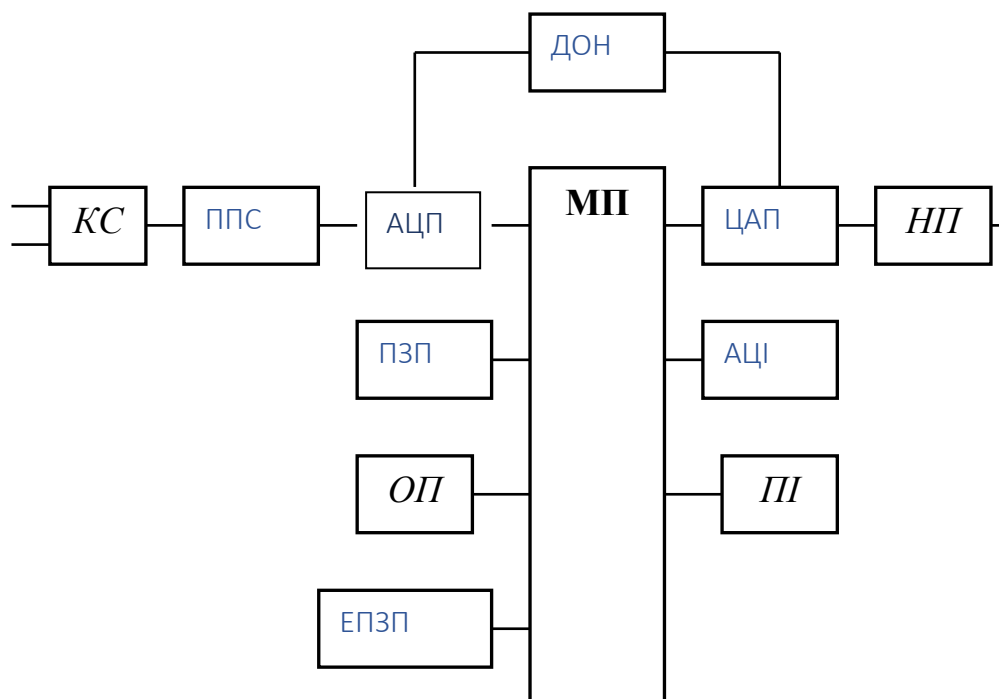


Рис.2.3. Структурна схема вимірювального перетворювача пірометра

Комутатор аналогових сигналів КС забезпечує підключення до вимірювального тракту сигналу від первинного пірометричного перетворювача або компенсуючого сигналу від сенсора температури середовища. Вхідний програмований підсилювач сигналу ППС забезпечує розширення динамічного діапазону вимірювального перетворювача по входу.

Найчастіше використовуються програмовані підсилювачі зі значеннями коефіцієнта передачі, які мінються по двійковому закону 1, 2, 4 ...1024, або по десятковому закону 1, 10, 100, 1000. ЦАП разом з нормуючим перетворювачем НП забезпечують формування вихідного аналогового сигналу [56]. Найчастіше використовуються стандартизовані вихідні сигнали по струму (4 – 20) мА, (0 – 5) мА або по напрузі - 1 мВ/°С. Джерело опорної напруги ДОН задає опорну напругу для АЦП і ЦАП. Мікропроцесор МП забезпечує керування основними аналоговими вузлами: КС, ППС, АЦП, ЦАП, а також виконує арифметичні операції з лінеаризації характеристики первинного інфрачервоного перетворювача, обчислення результату

вимірювання, формування коду для алфавітно-цифрового індикатора АЦП, реалізує алгоритми цифрової фільтрації сигналу, формує протокол для послідовного інтерфейсу, забезпечує виконання сервісних функцій. Для реалізації структури використовуються електронні елементи як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва сучасного виготовлення, до прикладу, АЦП AD7705/06, ЦАП AD 421, мікроконтролер AT89S8252 адаптер інтерфейсу RS-232, тощо. Використання вказаних компонентів з високою ступенем інтеграції, а також реалізація пірометрів за сучасними технологіями поверхневого монтажу дозволяють отримати високі характеристики точності, швидкодії та надійності.

Існуючі тепловізори, до прикладу відомої фірми Fluke Ti55, як і інші типи тепловізорів даної фірми, характеризуються класом точності $\pm 2\%$ або ж похибкою $\pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на межі вимірювання $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [57]. Тобто, при термометруванні поверхні з температурою $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ похибка становить $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, що достатньо багато для визначення температури ґрунту теплиці. При цьому, апріорі невідомий коефіцієнт випромінювання контрольованої поверхні раніше змусив розробників [58] ввести можливість його довільного встановлення регулятором на шкалі приладу: за рахунок цього створювалась змога максимально зменшити зазначену похибку.

Для убезпечитися від необхідності попередньої оцінки стану і властивостей, у тому числі коефіцієнта випромінювання, контрольованої поверхні, у процесі виконання дисертаційної роботи постала потреба у доопрацюванні методу безконтактного вимірювання температури. Особливо це стосується поверхні ґрунту, як об'єкту термометрування. Адже останній буває – чорнозем з високим, притаманним йому коефіцієнтом випромінювання, близьким до 0,9. Може бути сірий лісовий ґрунт із суттєво нижчим коефіцієнтом випромінювання. Підкреслимо, що значна непевність у встановленні згаданого коефіцієнта автоматично формує таку саму непевність і, відповідно, методичну складову похибки вимірювання температури безконтактним методом, причому незалежно від виду і типу засобу вимірювання: пірометр, чи тепловізор.

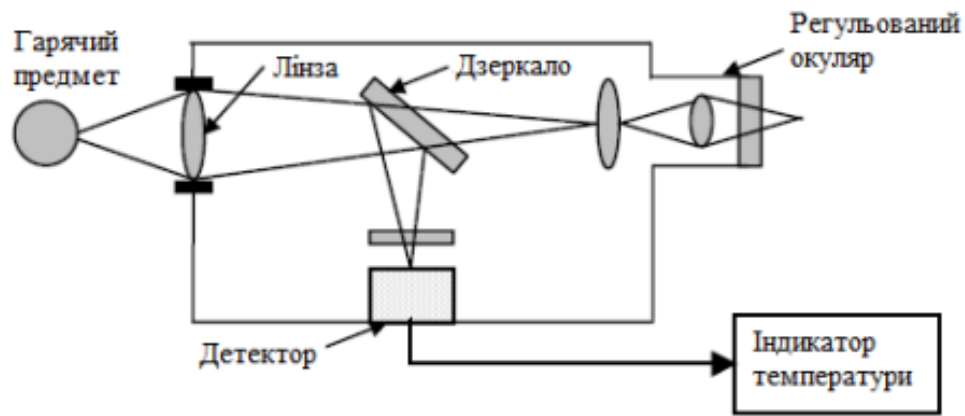
Тому нижче у роботі приділено увагу дослідження способу визначення коефіцієнта випромінювальної здатності матеріалу, що зрештою дає змогу

розробити інфрачервоний пірометр для високоточного вимірювання температури. Останній є придатним для потреб сільського господарства, а також будівництва, що в свою чергу сприяє характеризуванню з високою достовірністю теплоізоляційних і будівельних матеріалів і виробів. Тим самим, створюються вагомі підстави для встановлення придатності тих чи інших будівельних конструкцій та споруд на відповідність державним і міжнародним стандартам [59].

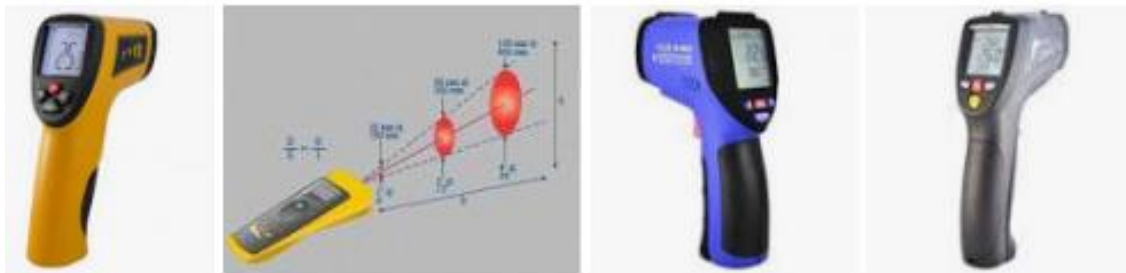
Крім того, отримання достовірної інформації щодо коефіцієнту випромінювання вважається [60] вкрай необхідним для градування технічних пірометрів, тобто в області засобів розроблення та використання технічних пірометрів повного випромінювання, а також при високоточних вимірювань температури у лабораторних умовах.

Головною засадою впровадження такого специфічного та високоточного методу і засобу безконтактного вимірювання температури поверхні з наперед невідомим коефіцієнтом випромінювання вважається [2] надання засобу вимірювання температури можливості визначення коефіцієнта випромінювання у момент, що безпосередньо передує вимірюванню. Таке рішення [61], сприяє суттєвому підвищенню точності вимірюванню температури. Воно досягається за рахунок визначення згаданого коефіцієнта речовини з допомогою повторних вимірювань тієї самої поверхні тіла шляхом цільової зміни температури чутливого елемента засобу вимірювання, використовуючи незалежне джерело тепла.

При цьому, слід методологічно довести можливість реалізації зазначеного підходу. Тоді наступним кроком можна вважати оцінку можливості подальшого вдосконалення конструкції типового технічного пірометра чи тепловізора. Насамперед, розглянемо низку відомих способів визначення інтегрального значення випромінювальних властивостей матеріалів, зокрема спосіб, що базується на залежності: $\varepsilon = \left(\frac{T_p}{T}\right)^4$, де T_p – радіаційна температура поверхні досліджуваного зразка; T – термодинамічна температура [62] (рис.2.4).



а)



б)

Рис.2.4. Пірметри, в т.ч. радіаційні (структурна схема радіаційного пірметра - а) або повного випромінювання (б) [55]

Тут слід вимірювати термодинамічну температуру дослідного зразка з термометрованою поверхнею. Для цього використовується додаткова термопара. Як наслідок, у результат вимірювання вноситься істотна похибка, зумовлена відведенням тепла по електродах термопари, причому значення похибки вимірювання коефіцієнту випромінювання зростає з підвищенням температури.

При вивченні можливостей методу розглянуто також дещо інший спосіб визначення інтегрального значення випромінювальних властивостей поверхні матеріалу, що полягає у вимірюванні інтенсивності променистого теплообміну, вираженого у радіаційній температурі, що приписується позначкам шкали засобу вимірювання (пірметра) під час градування, між поверхнею об'єкту та чутливим елементом засобу при відомій температурі останнього [62]. Однак, даний метод характеризується істотною методичною похибкою: градування радіаційного пірметра в ньому здійснюється за моделлю «абсолютно чорного тіла», для якої приймають, що коефіцієнт випромінювальної здатності термометрованого об'єкту є

близьким до 1. Оскільки реальні зразки контрольованих матеріалів характеризуються певними значеннями коефіцієнтів випромінювання, відмінним від 1, то виникає значна похибка у показах пірометрів, що становить до 10-40 %, залежно від того, наскільки цей коефіцієнт є відмінним від значення 1.

Як наслідок, існуючі підприємства по виробництву засобів безконтактного вимірювання температури повинні апріорі задаватись якимись усередненими значеннями коефіцієнту випромінювання, орієнтуючись на наперед передбачувані види контрольованих поверхонь об'єктів. Так, для однієї групи радіаційних пірометрів заздалегідь приймають, що вони експлуатуються при одному значенні (0,95) коефіцієнта випромінювання контрольованого матеріалу (точніше приведенного коефіцієнта системи «пірометр – поверхня контрольованого об'єкту» (він вводиться нижче). Для іншої групи складніших типів радіаційних пірометрів цей коефіцієнт може налаштовуватись метрологом-експлуататором, змінюючи значення уставки вручну на панелі приладу в межах 0,1 (0,3) ... 1,0. Зрозуміло, що як для першої, так і для другої груп внаслідок незнання реального значення коефіцієнта випромінювання контрольованого об'єкту виникає суттєва методична похибка. Вона тим більша, чим істотніше відрізняється реальне значення коефіцієнта від встановленого на приладі. Дана складова похибки може досягати і 50 %. Проте, навіть, при зівпадинні цих значень існує реальна похибка (5-10 %), зумовлена низкою інших факторів: неоднорідність температурного поля у межах площі зони контролю [63], недосконалість об'єктива, тощо.

Ще у більшій мірі вищеприведене стосується тепловізорів [64], які, в результаті, дають змогу отримувати лише якісну картину теплових втрат споруди. Щоб не допустити виникнення значної похибки, часто користаються спеціальними таблицями, в яких наведено значення коефіцієнта випромінювальної здатності різноманітних матеріалів та ступеню обробки поверхні [65]. До прикладу, наявність оксидної плівки на поверхні суттєво впливає на коефіцієнт випромінювальної здатності. Так, коефіцієнт окисленої сталі 0,85, а полірованої поверхні – 0,075 [66].

Тому завдання розробки методу визначення коефіцієнта випромінювання поверхні матеріалу в момент, що безпосередньо передує етапу вимірювання

температури було поставлено в основу методичної частини (розд.2) дисертаційної роботи [67]. Позитивне вирішення поставленої проблеми можна вважати передумовою здійснення коректних безконтактних вимірювань температури об'єкту, поза-як визначення коефіцієнту випромінювання дає змогу за виміряною радіаційною температурою обчислити термодинамічну температуру зразка.

Для цього запропоновано використати попередньо викладений метод визначення інтегрального значення випромінювальних властивостей поверхні матеріалу, що ґрунтується на законі Стефана-Больцмана. Він полягає у вимірюванні інтенсивності променистого теплообміну засобом вимірювання, вираженого у радіаційній температурі, що приписується позначкам шкали засобу при градуванні, між поверхнею об'єкту та чутливим елементом засобу при відомій температурі останнього.

У роботі запропоновано вимірювання інтенсивності здійснюють двічі. Перший раз при певній температурі об'єкту термометрування та певній контрольованій додатково температурі приймача випромінювання пірометричної головки.

Другий раз при тій самій температурі об'єкту термометрування та іншій, виміряній додатково температурі приймача випромінювання пірометричної головки. Зрозуміло, отримані результати вимірювань тої самої температури об'єкта відрізняються. Проте, їх різниця (покази у 2-х випадках віднімають один від одного), як показано нижче є пропорційною зміні інтенсивності випромінювання, вираженій у одиницях радіаційної температури.

Для того, щоб виразити останню паралельно вимірюванню інтенсивності здійснюють вимірювання 2-х почергових значень температури приймача випромінювання та визначають за їх різницею приріст температури приймача. За значенням приросту, як і за значенням зміни температури, обчислюють коефіцієнт випромінювальної здатності матеріалу поверхні.

Для обґрунтування вищеописаного, насамперед, розглянемо потік енергії E_0 , що передається від поверхні матеріалу променистим шляхом до пірометра, точніше до його зачорненої пластини, на якій розміщено приймач енергії (термопарна батарея, болометр тощо). Згідно закону Стефана-Больцмана він становить: $E_0 =$

$\sigma T^4; E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$, де $C_0 = 10^8 \cdot \sigma = 5,7$ [Вт/м²К⁴] – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла. Коли тіло не є чорним, а, до прикладу, «сірим», то вводиться шуканий коефіцієнт чорноти або ж коефіцієнт випромінювання $\varepsilon \leq 1$, який описує наскільки випромінювання цього тіла є менш інтенсивним від випромінювання абсолютно чорного тіла. Променистий теплообмін між 2-ма тілами (контрольованою поверхнею площі S з її $\varepsilon_{нов}$ та чутливим елементом пірометра з його $\varepsilon_{пр}$) визначається різницею 2-х потоків ефективного випромінювання [55]:

$$q = \varepsilon_{пр} C_0 S \left[\left(\frac{T_{нов}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{че}}{100}\right)^4 \right], \quad (2.2)$$

$$\text{де } \varepsilon_{пр} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{нов}} + \frac{1}{\varepsilon_{че}} - 1 \right)^{-1},$$

приведений для системи 2-х тіл і залежний від співвідношення площ об'єктів випромінювання. Кожному значенню q при градуюванні пірометра приписують певне значення яскравісної температури, оскільки кожна конструкція пірометра має притаманний їй коефіцієнт A перетворення потоку енергії у нагрів приймача, а також подальшого опрацювання сигналу, отриманого від нього, аж до конкретного значення радіаційної температури. Зазначимо, що коефіцієнт A повинен також враховувати величину $C_0 S$. При цьому, градуювання здійснюють за моделлю абсолютно чорного тіла, намагаючись досягнути умови $\varepsilon_{пр} \rightarrow 1$. В результаті, можна отримати рівняння функції перетворення пірометра, виражене через променистий теплообмін між його приймачем та контрольованою поверхнею: $T_p = T_p(T_{нов}; T_{че}; \varepsilon_{пр})$. У ньому існують 2 невідомі – $T_{нов}$ та $\varepsilon_{пр}$. Тому рівняння може бути розв'язане, лише приймаючи, що $\varepsilon_{пр} \rightarrow 1$. Проте, такий шлях призводить до виникнення значної методичної похибки.

При створенні умов для попереднього визначення приведенного коефіцієнту випромінювання з тим, щоби далі отримати однозначну функцію перетворення пірометра у вигляді $T_p = T_p(T_{нов}) \Big|_{T_{че}=Const; \varepsilon_{пр}=Const}$ при відомих температурі приймача випромінювання та коефіцієнті випромінювання. Для цього нижче приведемо систему з 2-х рівнянь з 2-ма згаданими невідомими, причому друге рівняння описує

стан теплообміну між поверхнею контрольованого матеріалу та вже підігрітим на декілька градусів (ΔT) приймачем ($чe$) засобу вимірювання:

$$T_{P1} = \varepsilon_{np} A \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{чe}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.3)$$

$$T_{P2} = \varepsilon_{np} A \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{чe} + \Delta T}{100} \right)^4 \right], \quad (2.4)$$

Віднімаючи від (2.3) рівняння (2.4), отримаємо:

$$\Delta T_p = \varepsilon_{np} A \left[\left(\frac{T_{чe} + \Delta T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{чe}}{100} \right)^4 \right] \quad (2.5)$$

З урахуванням, що гарячі спаї термопарної батареї пірометра переважно розташовують на платиновій пелюстці, покритій платиновою черню, реалізуючи умови досягнення $\varepsilon_{чe} \rightarrow 1$, із рівняння (2.2) видно, що $\varepsilon_{np} \approx \varepsilon_{нов}$. Тоді рівняння (2.5) приведемо до наступного рівняння:

$$10^8 \Delta T_p = \varepsilon_{нов} A \left[4T_{чe}^3 \Delta T + 6T_{чe}^2 (\Delta T)^2 + 4T_{чe} (\Delta T)^3 + (\Delta T)^4 \right] \quad (2.6)$$

З похибкою $\left(\frac{\Delta T}{T_{чe}} \right)^2 \approx 10^{-4}$, коли 1 % від $T_{чe}$, для практичних обчислень достатньо

скористатись першими двома членами многочлена:

$$10^8 \Delta T_p = \varepsilon_{нов} C_0 S \left[4T_{чe}^3 \Delta T + 6T_{чe}^2 (\Delta T)^2 \right] \quad (2.7)$$

Звідси отримуємо вираз для обчислення коефіцієнту випромінювання поверхні:

$$\varepsilon_{нов} = \frac{10^8 \Delta T_p}{A \left[4T_{чe}^3 \Delta T + 6T_{чe}^2 (\Delta T)^2 \right]} \quad (2.8)$$

Насамперед приймемо, що для забезпечення ефективності способу та простоти подальших обчислень встановлюється приріст температури приймача (чутливого елемента), рівний 1 % від $T_{чe}$. Тоді вираз (2.8) спроститься до:

$$\varepsilon_{нов} = \frac{10^8 \Delta T_p}{0,0406 \cdot A \cdot T_{чe}^4} = \frac{\Delta T_p}{0,0406 A \left(\frac{T_{чe}}{100} \right)^4} \quad (2.9)$$

Коли засіб вимірювання разом з приймачем знаходиться при температурі 293 К, то для обчислень можна отримати достатньо простий вираз [67]:

$$\varepsilon_{нов} = \frac{2,9924 \Delta T_p}{K^4 A}, \quad (2.10)$$

де A [1/К] – коефіцієнт перетворення потоку променистої енергії у показ пірометра при умовах, приведених в ТУ на прилад.

Таким чином, можна попередньо проградувати пірометра або тепловізор з відомим значенням коефіцієнта A . Засіб вимірювання слід оснастити блоком підігріву чутливого елемента та передбачити можливість його живлення. Окрім того, приймач засобу вимірювання необхідно забезпечити додатково встановленим давачем температури, наприклад термоопором, включеним у плече мостової схеми. Це дає змогу встановити на приймачі контрольований приріст температури (див. вираз (2.10)).

У цілому, описаний метод визначення коефіцієнту випромінювання матеріалів дає змогу підвищити точність вимірювання температури та променистих потоків. Останнє можна вважати вагомим для встановлення стану енергоощадності промислових та житлових споруд шляхом проведення енергоаудиту новостворюваних і реконструйованих споруд, тим паче у зв'язку з впровадженням [68].

2.2. Розроблення методики оптимізації регулювання об'єкту сільськогосподарської технології

Знаючи точні значення температури та інших параметрів технологічних процесів сільськогосподарського виробництва, зосередимо увагу на аспектах оптимізації технологічних режимів виготовлення цієї продукції, зокрема на показниках її якості, а також на метрологічних ризиках її виготовлення.

Послідовно, по мірі ускладнення зазначених процесів, вивчимо методики регулювання основних параметрів низки технологічних процесів переробного виробництва сільського господарства. До прикладу, вивчимо технологічні особливості різних етапів виготовлення тютюну.

2.2.1. Методика регулювання на прикладі тютюносушіння

Структурна схема системи показана на рис.2.5. Система цікава тим, що передбачає програмне управління режимом сушіння тютюну за часом. Задавач часу служить для забезпечення послідовного включення за часом елементів системи автоматичного програмного регулювання заданої температури та відносної вологості повітря всередині камери. Вимірник температури порівнює значення температури всередині камери із заданим та формує сигнал для управління джерелом тепла. Вимірник відносної вологості вимірює біжуче значення відносної вологості всередині камері і, при необхідності, подає сигнал на управління повітряними засувками.



Рис.2.5. Структурна схема технологічних засобів сушіння тютюну

Технологічний процес та режим роботи сушильної установки були відпрацьовані на основі дворічної її експлуатації. В сушарку завантажують однорідний тютюн, зламаний і нанизаний в один час. Фазу в'ялення починають при температурі оточуючого повітря, потім температуру поступово підвищують до 35⁰С. Швидкість підвищення температури до 1 град/год (рис.2.6). Тривалість підвищення температури складає 12-20 год. в залежності від стиглості тютюну.

При цьому, відносну вологість повітря підтримують на рівні 80 %. Таке поєднання температури і вологості повітря в сушарці забезпечує появу жовтого забарвлення біля вершини листка. При пожовтінні листка вологість повітря знижується до 70 %, зберігаючи температуру 35⁰С. У відпрацьованих

технологічних схемах похибка підтримання температури повітря становила $\pm 1^\circ\text{C}$, а відносної вологості повітря $\pm 7,5\%$ [76]. При цьому, вентиляційна система сушарки працювала в режимі рециркуляції: шибер для забору зовнішнього повітря та шибер для видалення відпрацьованого повітря - повністю закриті. При підвищенні відносної вологості повітря поза допустиме значення шибер рециркуляції закривають, привідкривають шибер зовнішнього повітря і здійснюють часткове видалення повітря із сушарки.

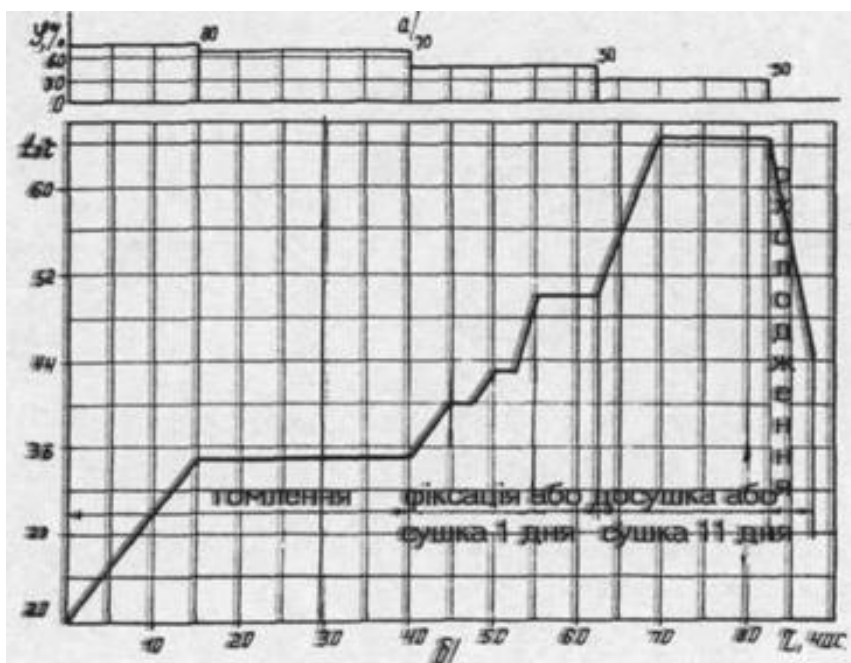


Рис.2.6. Фази сушіння тютюнової сировини за прийнятною технологією

Як сенсор температури використовували мідні термометри опору тину ТСМ-41 Ом (градуювання 23) з сталою теплової інерції порядку 10 сек. Основна похибка засобу вимірювання температури не перевищує $\pm 0,5\%$ від верхньої межі вимірювання - $0 + 100^\circ\text{C}$. Контрольні вимірювання температури проводили психометричними термометрами ТМ-4С з похибкою $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Вимірювання відносної вологості повітря в камері сушарки здійснювали за допомогою електронного психрометра типу ПЗ-28 (межі вимірювання приладу $20 + 100\%$). Психрометр застосовували з сенсорами ДВП-04 та ДВП-03 для температур $40-70^\circ\text{C}$ та $15-45^\circ\text{C}$ відповідно. Основна похибка вимірювання показників відносної вологості повітря не перевищувала $\pm 5\%$ вимірюваної величини. Контрольні виміри відносної вологості повітря проводили психрометром Асмана.

Швидкість повітряного потоку (розхід) на вході в сушильну камеру визначали по витратоміром механічної дії. Вимірювання параметрів зовнішнього повітря здійснювали метеорологічними приладами: тиск - барографом М-2г, вологість - гігрографом М-32. Для вимірювання температури тютюну використовували -6-ти точковий електронний автоматичний потенціометр ПСР 1-19, з записом температури на діаграмній стрічці. Основна похибка вимірювання температури не перевищувала $\pm 0,5$ %.

2.2.2. Методологія застосування засобів температурного контролю для потреб сільського господарства

Вищеприведені засоби здатні забезпечити похибку вимірювання підтримання температури повітря до ± 1 °С. Зазначена похибка є достатньо високою і може бути зменшена при використанні високоточних та малоінерційних засобів вимірювання та регулювання технологічних параметрів. Зазначимо, що похибка регулювання температури є суттєво вищою, якщо не залучити сучасні засоби регулювання.

Так, для вимірювання температури із низки наявних термометрів опору вибрано малоінерційний ($\tau = 0,1$ сек.) платиновий плівковий термометр опору номіналом 100 Ом. Незначна інерційність термометра дає змогу практично усунути вплив засобу вимірювання на регулювання температури, оскільки інерційність самого об'єкту регулювання, яким є сушарка, теплиця, тощо, набагато перевищує дане значення, становлячи сотні-тисячі секунд.

Таблиця 2.3.

Характеристики термометра опору типу Pt100 [77].

Характеристика	Сенсор Pt100
Діапазон вимірювання	Межі вимірювання: $-200 < T < 600$ °С
Стабільність	Відмінна. Річний дрейф показів < 0.01 °С
Вимірювання місця	По всій довжині Pt-дроту
Старіння	Незначне
Стала теплової інерції	Менша ніж 0,1 с.
Потужність живлення	Значний < 1 mW

Регулятор температури. Як регулятор температури вибрано РТ-0102, який призначений для безпосередньої роботи з термоперетворювачами опору, в тому числі платиновими 100 Ом (Pt100) та перетворювачами термоелектричними. Він розроблений і виготовлений ПАТ НВО «Термоприлад», м.Львів та призначений для автоматичного регулювання, індикації, сигналізації, архівування значень температури (в комплекті з термоперетворювачами опору та перетворювачами термоелектричними), розрахований на експлуатацію при температурі навколишнього повітря від 5 до 50 °С, відносній вологості до 95 % при температурі 25 °С, атмосферному тиску від 84 до 106,7 кПа.

Реалізуються такі режими: РТ-0102 - режим стабілізації регульованої величини; РТ-0102П - програмований режим (уставки регулювання змінюються в часі за заданою програмою); РТ-0102ПК - додатково до вищевказаних режимів забезпечується зв'язок з ПК. Кількість вхідних каналів: один або два.

Забезпечується регулювання двопозиційне, трипозиційне або пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД); регулювання в режимі таймера; ПІД-регулювання засувками; програмне регулювання технологічного процесу, який можна апроксимувати кусково-лінійною залежністю (до 100 кусків для однієї програми або до 50 кусків для кожної програми чотирипрограмного варіанту) для РТ-0102П; зв'язок з ПК через інтерфейс RS232 або RS485 і архівування в енергонезалежній пам'яті до 10000 вимірних значень з заданим періодом від 1 до 180 хв. Кількість вихідних сигналів - два (для двопозиційного та ПІД закону регулювання; другий вихід може використовуватися для сигналізації). Вихідні сигнали реалізуються з двох однакових або різних варіантів виходів: контактами електромагнітного реле потужністю 220 Вт при напрузі комутації 220 В частотою 50 Гц (даний вихід вважається ефективним для систем електричного живлення конструкцій теплиць – засувок, обігріву, тощо); транзисторним ключем з максимальним значенням комутованих напруг 30 В і струму 50 мА. При цьому, ПІД-закон регулювання в регуляторі з комутованим виходом реалізується імпульсним вихідним сигналом, в якому змінною є шпаруватість імпульсів (широтно-імпульсна модуляція).

Розумні вимірювальні засоби є важливою передумовою для створення КФС, оскільки вони представляють собою основні компоненти інформаційно-вимірювальних підсистем [78]. Створення класу розумних сенсорів нового покоління передбачає необхідність у додаткових функціональних можливостях: самотестування, самоідентифікації, самовалідизації або самоадаптації. Конструктивно розумний сенсор температури виконується як первинний аналоговий або цифровий термочутливий перетворювач, оснащений блоком опрацювання сигналу та інтерфейсом, який у змозі виконати низку розумних метрологічних функцій завдяки спеціальному метрологічному програмному забезпеченню (рис.2.7). Практично це може бути інтелектуальний сенсор температури з низкою спеціалізованих алгоритмів, передбачених на етапі проектування й виготовлення або установлених пізніше, тобто сенсор з такими вбудованими алгоритмами, які необхідні для забезпечення виконання спеціалізованих метрологічних функцій.



Рис.2.7. Особливості виконання смарт-сенсора температури

Виходячи з прикладних аспектів роботи КФС з їх підсистемами температурного контролю слід розробляти і використовувати бездротові сенсорні мережі для регулювання технологічних процесів у сукупності порядку 10-20 теплиць різного застосування. На наш погляд, доцільно засоби вимірювань об'єднувати у такі підсистеми, як ad-hoc підсистеми або ж підсистеми «на вимогу». Мережа «на вимогу» є перескоковою, оскільки вона не стосується наперед усталеної структури, зокрема відсутні маршрутизатори у дротових мережах чи точки доступу в організованій структурі БСМ [79]. Кожен існуючий вузол мережі

приймає участь у маршрутизації, перекидаючи дані на сусідні вузли, оскільки визначення того, на які вузли здійснюється перекидання, виконується динамічно на основі мапи з'єднань мереж. У додаток до класичної маршрутизації мережі «на вимогу» можуть використовувати флудінг для перекидання даних. Таким є простий роутинговий алгоритм, за яким кожний вхідний пакет висилається на всі можливі адреси, за винятком того пункту, звідки він поступив. Флудінг поширений у мостах та в системах, таких як UseNet і файлообмінних мережах (peer-to-peer file sharing), а також як частина деяких роутингових протоколів, зокрема OSPF, DVMRP, а вони вже застосовуються у бездротових мережах «на вимогу».

Децентралізований тип БСМ – це багатоланкові мережі, складаються з бездротових автономних хостів, де кожен хост може служити, як маршрутизатор для передачі трафіку від інших вузлів. Бездротові однорангові мережі «на вимогу» [80] охоплюються широким спектром мережевих видозмін, що містять сенсори, мобільний механізм перескоків, персональну специфіку чи інші мережі. Для нормальної роботи мережева топологія передбачає розгляд не тільки сенсорних вузлів, а й базових станцій і крос-шарів (рис.2.8). Структура крос-шарів є важливою для БСМ, оскільки вони можуть бути використані для оптимальної модуляції з метою підвищення параметрів передавання, таких як швидкість передачі даних, ефективність використання енергії тощо.

Отже, для ефективної роботи технологічного обладнання тепличного господарства необхідно і достатньо формування ad-hoc БСМ з відповідними протоколами та перелаштовуваною структурою. Ці сенсорні мережі служать основою формування інформаційно-вимірювальних даних, необхідних для забезпечення регулювання технологічних режимів роботи теплиць відповідно до завдання отримання якісної продукції того чи іншого виду овочів [81-82].

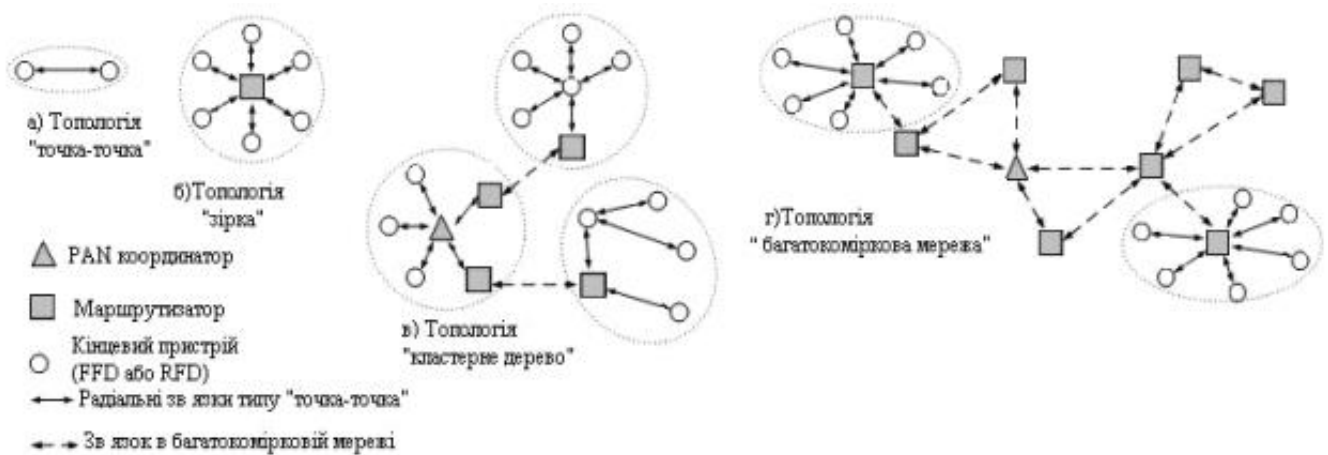


Рис.2.8. Топологія ad-hoc БСМ для забезпечення технологічних режимів роботи теплиць

2.3. Розроблення методики оптимізації роботи температурної підсистеми керування теплиці

Незалежно від виду КФС, потреба у керуванні тими чи іншими параметрами визначається направленістю конкретної кібер-фізичної системи. У нашому випадку такою КФС є система управління режимом роботи сільськогосподарського об'єкта, якою є теплиця конкретного господарства [83]. При цьому, ставиться завдання не лише стосовно одинарного об'єкту, але стосовно низки таких об'єктів, розміщених на території району області.

Виходячи з аналізу особливостей експлуатації теплиць, можна дійти до необхідності виділити декілька підсистем керування роботою теплиці. По-перше, найважливішим параметром вважається температура: температурно-часовий режим – найістотніший для вегетації рослин. Саме він визначає згідно [84] початок пророщування зерна, формування пагону, тощо. Отже, температурні підсистеми КФС можна вважати головними для поставленої мети – досягнення максимальної ефективності і якості вирощування продукції сільськогосподарства та її переробки.

Наступним важливим параметром, контрольованим в умовах тепличного господарства, вважається вологість конкретного продукту (насіння, тощо) чи вологість ґрунту, в який цей продукт висаджено, чи вологість повітря теплиці, який

забезпечує нормальний режим вегетації. Стосовно регулювання вологості зауважу, що існуючі сенсори температури, завдяки фізичним особливостям їх побудови [85], спроможні одночасно контролювати температуру і вологість.

Тому використовуючи такі сенсори, як DHT22 [86], що є сенсорами подвійного спрямування, спроможними одночасно вимірювати температуру і вологість, можна спростити схеми моніторингу та управління КФС сільськогосподарського виробництва. Надалі дані підсистеми не розглядаються.

Третім параметром є інтенсивність освітлення або інсоляції. У роботі передбачено моніторинг даного параметра з допомогою люкметра. Проте, формування спеціальної підсистеми КФС надалі не розглядається.

Отже, зосередимось на температурній підсистемі КФС тепличного господарства [87]. Можна виділити у їх складі декілька видів підсистем або ж контурів даної температурної підсистеми КФС, які приведені нижче і розглянуті детальніше. Такий підхід відповідає реальним викликам, оскільки важливим є не тільки поступлення теплової енергії, необхідне для вегетації рослин на різних стадіях, але й вид цієї енергії, тобто поступає вона через ґрунт до кореневої системи або насіння на стадії проростання, чи через повітря на стадії вегетації, чи конвективним чином – через опромінення. Відповідно, проведені дослідження і описані отримані результати у даному розділі.

2.3.1. Контур моніторингу і регулювання параметрів повітря

Дана температурна підсистема керування роботою КФС, що стосується встановлення і регулювання контуру температури повітря, складена відповідно до рекомендацій [88], приведена на рис.2.9.

На стінках теплиці 3 встановлено наступне технологічне обладнання та засоби вимірювання і регулювання: смарт-сенсори 1 у кількості 12 шт., підключені до ПД-регулятора 2 через комутатор та інтегратор вимірюваного значення температури. ПД-регулятор, що має потужні вихідні контакти, комутує силове електричне коло (тут не показане) для підключення виконавчих механізмів (смарт-актуаторів 4).

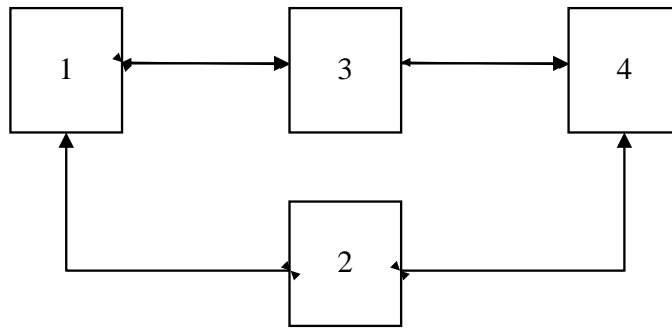


Рис.2.9. Контур моніторингу температури повітря теплиці: 1 – смарт-сенсори; 2 – ПІД-регулятор з підключенням до ПК; 4- смарт-актуатори; 3 – об’єкт, параметри якого підлягають регулюванню

Останні призначені відкривати та закривати скляне накриття теплиці, регулюючи природній нагрів – по контурі 1 та вмикати електротепловий конвектор – дуйку для швидкого обігріву рослин у теплиці. Від ПІД-регулятора отримана інформація виводиться на ПК, який по окремих каналах обслуговує інші контури регулювання, а також зберігає інформацію для наступного опрацювання та аналізу, зокрема у звязку з якістю вирощеної сільськогосподарської продукції.

2.3.2. Контур моніторингу і регулювання параметрів ґрунту

Температурна підсистема моніторингу та керування роботою контуру ґрунту КФС, що стосується встановлення і регулювання температури повітря, складена відповідно до рекомендацій [88], приведена на рис.2.10.

На стінках теплиці 3 встановлено наступне технологічне обладнання та засоби моніторингу і регулювання: тепловізійна камера 1 у кількості 12 шт., підключені до ПІД-регулятора 2 через комутатор та інтегратор вимірюваного значення температури. Виконавчі механізми (смарт-актуатори 3) призначені відкривати та закривати скляне накриття теплиці, а ПК, який по окремих каналах обслуговує інші контури регулювання, а також зберігає інформацію для наступного опрацювання та аналізу, зокрема у звязку з якістю вирощеної сільськогосподарської продукції.

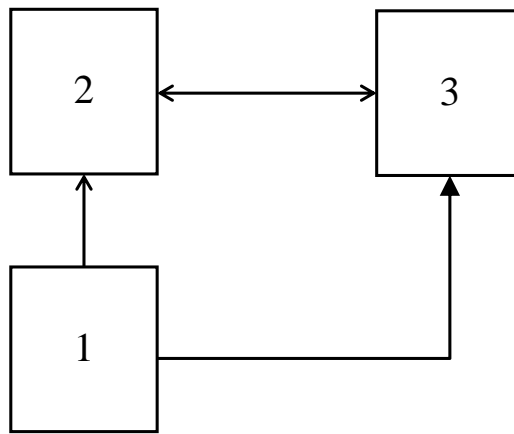


Рис.2.10. Контур моніторингу і регулювання температури ґрунту теплиці: 1 – тепловізійна камера ; 2 – ґрунт теплиці, параметри якого підлягають регулюванню; 3- смарт-актуатори.

Тепловізор - пристрій для спостереження за розподілом температури досліджуваної поверхні. Розподіл температури відображається на дисплеї (або в пам'яті) тепловізора як колірне поле, де певній температурі відповідає певний колір.

Інфрачервоне випромінювання концентрується системою спеціальних лінз і потрапляє на фотоприймач, який чутливий до певної довжини хвилі інфрачервоного спектру. Випромінювання, що потрапляє на фотоприймач призводить до зміни електричних властивостей фотоприймача, що реєструється і посилюється електронною схемою. Отриманий сигнал підлягає цифровій обробці, отримане значення передається на блок для відображення інформації, що має колірну палітру, в якій кожному значенню сигналу присвоюється певний колір. Після цього на моніторі з'являється точка, колір якої відповідає чисельному значенню інфрачервоного випромінювання, яке потрапило на фотоприймач. Скануюча система (дзеркало або напівпровідникова матриця) проводить послідовний обхід всіх точок в межах поля зору приладу, і в результаті виходиться видима картина інфрачервоного випромінювання об'єкта. Таким чином, на моніторі тепловізора відображається значення потужності інфрачервоного випромінювання в кожній точці поля зору, згідно заданої колірній палітрі (чорно-білого або кольорового). Використовуються типові схеми тепловізійних систем 0-го, 1-го і 2-го поколінь. Скануючі системи тепловачення використовують різні типи сканування:

одноелементні, паралельне та послідовне. Сканування може проводитися як в просторі предметів (об'єктів), так і їх зображень. Розрізняються типи сканування по траєкторіях сканування, закону сканування і ряду інших ознак (рис.2.11).

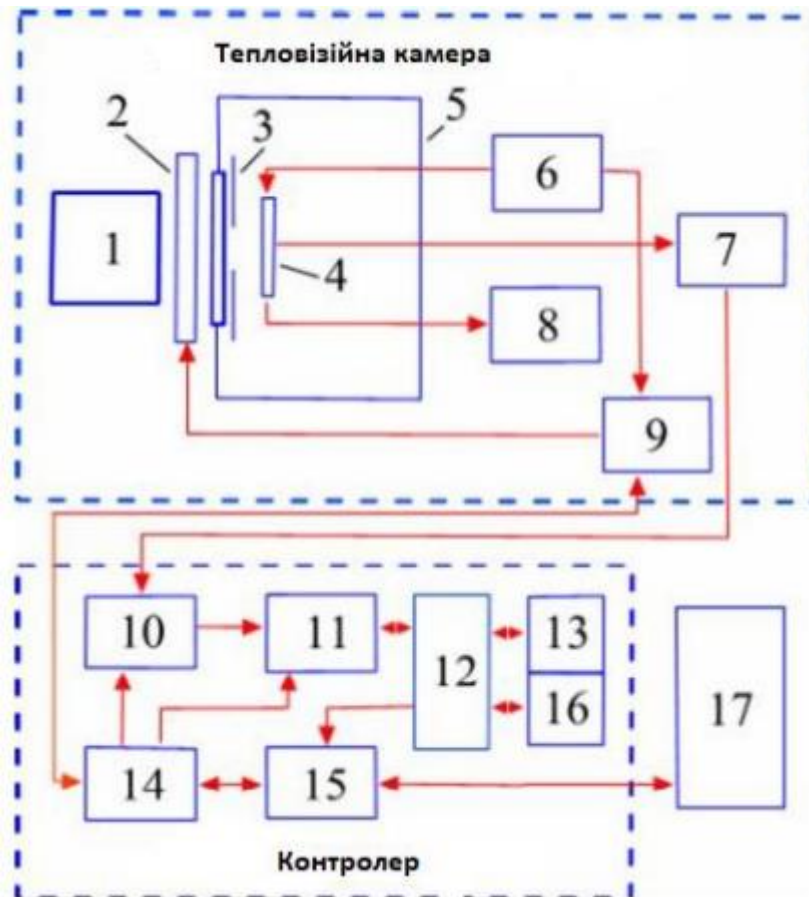


Рис.2.11. Блок-схема тепловізійної камери:

1 - об'єктив; 2 - пристрій калібрування; 3 - холодна діафрагма; 4 - матричний ФПУ; 5 - вакуумний кріостат з просвітленим вікном; 6 - генератор керуючих імпульсних і постійних напруг; 7 - підсилювач з диференціальним виходом; 8 - вимірювач температури ФПУ і автомат включення напруги зсуву підкладки з InAs; 9,14 – блоки управління і синхронізації; 10 - АЦП; 11 - суматор; 12 – диспетчер пам'яті; 13,16 - банки пам'яті; 15 - блок зв'язку з персональним комп'ютером; 17 – ПК

2.3.3. Контур моніторингу і регулювання параметрів води для зволоження

Більшість видів діяльності, пов'язаних з благополучним станом сільськогосподарських культур і отримання хороших урожаїв, залежать від своєчасного надання даних про стан погоди і ґрунту [89]. Таким чином, бездротові

метеостанції грають важливу роль в профілактиці захворювань і розмірному зрошенні. Ці метеостанції передають на базову станцію інформацію про важливі параметри, необхідних для прийняття рішень: про температуру і відносну вологості повітря, дані щодо сонячної радіації, швидкості вітру (для розрахунку випаровування) і для зволоженості ґрунту [90], за допомогою чого оцінюється коефіцієнт проникання води в ґрунт до коріння рослин, що необхідно для прийняття рішень про зрошення.

Оскільки місцевий мікроклімат може істотно відрізнятись від усередненого по району, таку інформацію необхідно отримувати напряму від конкретних теплиць. Зазвичай станції моніторингу передають усереднені по району дані, використовуючи наземне радіо, хоча час від часу використовуються і супутникові системи.

Контур температурної підсистеми моніторингу і регулювання температури води для зволоження виконано відповідно до рекомендацій [88], приведено на рис.2.12.

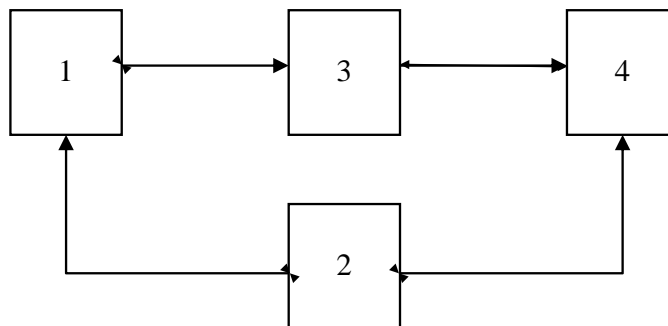


Рис.2.12. Контур моніторингу і регулювання температури води для зволоження: 1 – смарт-сенсори; 2 – ПД-регулятор з підключенням до ПК; 4- смарт-актуатори; 3 – об’єкт, параметри якого підлягають регулюванню

На стінках теплиці 3 встановлено наступне технологічне обладнання та засоби. Від ПД-регулятора отримана інформація виводиться на ПК, який по окремих каналах обслуговує інші контури регулювання, а також зберігає інформацію для наступного опрацювання та аналізу, зокрема у звязку з якістю вирощеної сільськогосподарської продукції.

Висновки до розділу 2.

1. Безперебійна та надійна робота кібер-фізичних систем базується на коректній організації вхідних потоків інформації, завдяки достовірній роботі підсистем, у тому числі, температурного контролю, а також надійного програмного забезпечення. Наявність різних видів сенсорів для кібер-фізичних систем вимагає не стільки уніфікованих вихідних сигналів різних типів сенсорів (для цього здійснюється кондиціювання їх сигналів [91]), скільки опрацювання значної, переважно надлишкової, кількості даних. Для цього слід застосовувати спеціальні алгоритми.
2. Кібер-фізичні системи для потреб сільського господарства, що характеризуються відносно простими алгоритмами роботи, передбачають моніторинг та регулювання діяльності технологічних процесів, зв'язаних із вирощуванням та переробкою (сушіння, переробка, консервування, тощо) сільськогосподарської сировини. До них тому постаавлені вимоги забезпечення, переважно, енергетичної ефективності систем та якості отримуваної продукції.
3. Важливою структурною компонентою таких кібер-фізичних систем є температурна підсистема, оскільки енергетична ефективність визначається температурними режимами на кожній стадії виробництва та переробки сільськогосподарської продукції. Для кожного виду такої продукції передбачено дослідження, проектування та розвиток різноманітних температурних підсистем. Зокрема, для тепличного господарства з його значного енергозатратністю притаманне залучення сукупності згаданих підсистем для моніторингу та регулювання параметрів повітря, ґрунту, води, тощо
4. Вимоги до температурних підсистем кібер-фізичних систем тепличного виробництва визначаються фізичною структурою використовуваних засобів (смарт-сенсори та смарт-актуатори), а також їх програмно-технічним забезпеченням, що зрештою, призводить до потреби у різноплановому обладнанні. Останнє може призвести до залучення ПІД-регуляторів (для дотримання жорстких температурно-часових обмежень у режимах роботи) або ж до залучення апаратно-обчислювальної

платформи LabVIEW (для формування віртуальних засобів вимірювання) або інших платформ.

5. У результаті дослідження розглянуто і запропоновано виконати температурну підсистему кібер-фізичної системи теплиці для вирощування овочів у складі 3-х контурів моніторингу і регулювання – повітря, ґрунту та води для зволоження. Дані контури пов'язані між собою, по-перше, через програмно-технічні засоби і, по-друге, через взаємозв'язані внаслідок теплообміну вимірювані температури повітря, ґрунту та води, а також рівень інсоляції, вентиляції, тощо. Для регулювання останніх долучають підібрані смарт-актуатори, а для моніторингу та регулювання: повітря і води – контактні смарт-сенсори, ґрунту, який є значно інерційнішим, дисперсним і тому характеризується значним розкидом характеристик при значній площі поверхні - засіб безконтактної термометрії, тобто тепловізор.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗВИТОК РІЗНИХ ВИДІВ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПІДСИСТЕМ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблення КФС для потреб сільськогосподарського виробництва передбачає їх формування, включаючи оснащення температурними підсистемами, вивчення особливостей їх експлуатації, включаючи низку параметрів регулювання та точність забезпечення і відтворення заданих температурно-енергетичних режимів обробки сільськогосподарської продукції. Відзначимо, що зазначені режими можуть забезпечуватись вільно (з використанням сонячної енергії, енергії рециркуляції тощо) або ж вимушено – споживанням електроенергії.

3.1. Підсистема температурно-вологісного контролю параметрів теплиці

Обґрунтовано основні інформаційні параметри мікроклімату тепличних приміщень, зокрема: температура повітря, відносна вологість, освітленість тепличних приміщень, температура ґрунту, вологість ґрунту, концентрація вуглекислого газу. КФС вирощування овочів з регулюванням режиму «температура-вологість-інсоляція» містить три підсистеми, а саме підсистему моніторингу і регулювання температури повітря, підсистему моніторингу і регулювання температури ґрунту (з допомогою тепловізора), а також підсистему моніторингу і регулювання води [92].

Для кожної з них передбачено наявність смарт-сенсора та смарт-актуатора, з'єднаних між собою. В результаті розглядається вибір розумних сенсорів [93] та їх розташування в теплиці, виконується та випробовується модель КФС. Для оцінки рівномірності температури в теплиці та точок розташування датчиків попередньо вимірювали температуру та вологість. Визначений набір їх значень зберігався під час роботи КФС. У результаті дослідження обґрунтовано вибір смарт-сенсорів та їх розміщення у теплиці. Виготовлено робочий макет та здійснено його апробацію. Для оцінки рівномірності температури у теплиці та виборі місця встановлення

сенсорів приладів проведено вимірювання температури та вологості повітря при стабілізованому режимі. Досліджено метрологічні характеристики вимірювання температури та вологості повітря.

Теплиці є важливою одиницею циклу сільськогосподарського виробництва, незалежно від погоди. Для того, щоб ефективно вирощувати кожен сорт рослин у теплиці, потрібно підтримувати особливий мікроклімат. Кожній рослині потрібен власний оптимум температури, вологості та інсоляції, який дає високий урожай. Поза такого оптимуму ріст рослин сповільнюється, і при подвійному відхиленні від оптимального він зовсім припиняється. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є розробка автоматизованої системи моніторингу і регулювання температури, вологості та інсоляції теплиці за допомогою сучасних технологій, наприклад, розумних сенсорів та приводів.

Важливу роль у вирощуванні рослин в теплиці відіграє моніторинг та регулювання параметрів мікроклімату. Наприклад, необхідна похибка підтримування заданої температури не повинна перевищувати ± 1 °C. Крім того, відповідно до фізіологічних особливостей життя рослин, підтримувана температура повинна відповідати рівню освітленості. Температурно-вологісний режим підтримується автоматичним опаленням, вентиляцією, зрошенням, зміною освітлення тощо. Він визначається потужністю джерел тепла, а також конструктивно-технологічними особливостями теплиці. Тому важливо підбирати конструктивні елементи теплиці, особливо під час їх сумісної експлуатації. Активні дослідження з метою вдосконалення останніх проводяться у напрямку збільшення кількості аналізованих параметрів мікрокліматичних умов теплиць [94], розвитку та вдосконалення елементної бази, включаючи сенсори, що формують первинну інформацію про мікроклімат [95], виконавчі механізми, мікроконтролери [96] та розробленого чи залучене ПЗ [97]. Тому нагальним завданням є аналіз мікрокліматичних умов у теплицях, визначення вимог до сенсорів для проектування теплиць з оптимальною статистичною похибкою регулювання температури Δt_c та відносної вологості $\Delta \varphi_s$, яка не перевищує ± 1 °C та $\pm 3,5\%$ відповідно.

3.1.1. Технічні засоби регулювання мікроклімату в теплиці

Принцип роботи системи управління мікрокліматом в теплиці - регулювання потужності, тобто вмикання та вимикання електрообладнання на основі опрацювання набору різних показів засобів вимірювання. До прикладу, система повітряного опалення повинна бути запущена, якщо температура повітря в теплиці нижче встановленої раніше; система опалення ґрунту вмикається, якщо температура ґрунту в теплиці нижче встановленої; вентиляція активується шляхом відкриття вентиляційних фрамуг, якщо температура або вологість у теплиці вище зазначеної; повітрообмін з навколишнім середовищем припиняється закриттям вентиляційних фрамуг; система зволоження запускається у випадку, якщо вологість у теплиці нижче встановленої; штори відкриваються, щоб забезпечити ріст рослин, збільшуючи сонячне освітлення, якщо освітленість рослин у теплиці нижче зазначеної; штори закриваються, щоб зменшити сонячне випромінювання, якщо освітленість вище зазначеної; зрошення відбувається, коли вологість ґрунту в теплиці нижче зазначеної; система забезпечення повітря вуглекислим газом для прискорення фотосинтезу запускається, якщо концентрація вуглекислого газу в повітрі в теплиці нижче зазначеної.

Тому для ефективною роботи системи контролю мікроклімату в теплиці необхідно вибрати технічні засоби автоматичної системи клімат-контролю та оптимально розташувати їх у теплиці або поблизу неї. Крім того, необхідно виміряти та проаналізувати характеристики зовнішніх погодних умов та проектні параметри теплиці [98].

Для розробки КФС для вирощування овочів застосовується плата Arduino Uno [99]. Можна плавно регулювати температуру та вологість, зберігаючи при цьому достатню точність підтримуваних параметрів. Для потреб КФС були обрані і досліджені наступні сенсори: зокрема, сенсори температури та вологості (DHT21/AM2301 та DHT22, кожен з яких є цифровим сенсором високої точності, оснащеним ємнісним давачем вологості та термістором NTC), сенсор освітленості BH1750, сенсор температури ґрунту DS18B20 і ємнісний сенсор вологості ґрунту (не схильний до корозії і тому його покази не залежать від засолення ґрунту), сенсор

забруднення парнику газами MG-811 або MH-Z19B. Система, заснована на платі Arduino UNO, дозволяє впроваджувати підсистеми з мікропроцесорним управлінням з виходом на електропривід смарт-актуаторів - двигунів. Нижче показана функціональна схема контролю мікроклімату в теплицях (рис. 3.1).

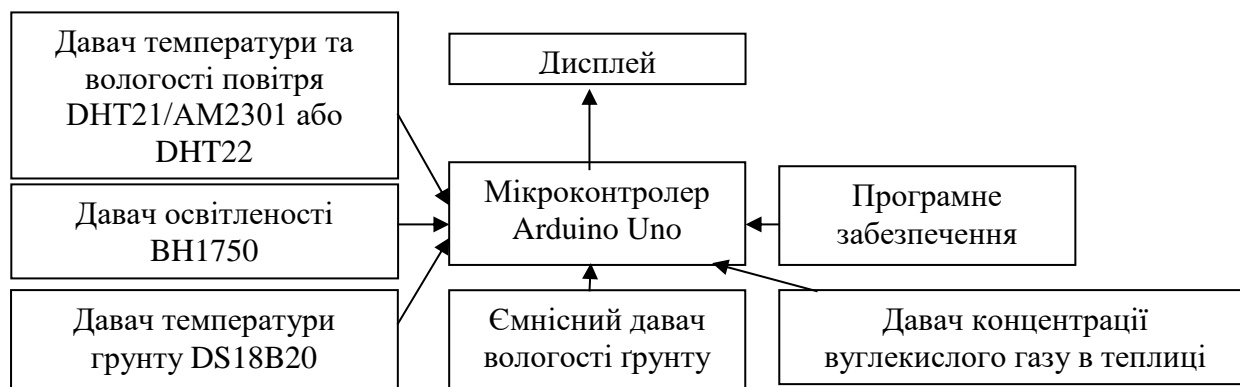


Рис. 3.1. Функціональна схема клімат-контролю в теплицях.

Конкретно опишемо зазначені смарт-сенсори. Сенсори температури і вологості, які можна підключати до плати Arduino, є типів DHT11, DHT21, DHT22 та HTU21 [101] (Табл.3.1.).

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики сенсорів температури та вологості

Характеристики	DHT11	DHT21/AM2301	DHT22/AM2302	HTU21
Визначення вологості	20-90% ± 5% RH	0-100% ±3% RH	0 – 100% ±2% RH	0 - 80% ± 3% RH
Визначення температури	0-50 °C ± 2% (макс.)	-40 ~ 80 °C ±0.5%	-40 -.+80 °C ±0.5 °C	-10 - 85°C ± 0,4°C (макс)
Тип підключення	4 виводи 1. VCC (3 – 5 В живлення) 2. Data Out - Вивід даних 3. NC - не використовується 4. Загальний	4 виводи 1.VCC - "+" живлення 2.OUT - цифровий вихід 3. NC - не використовується 4. GND - "Земля"	4 виводи 1. VDD (3,3 – 5,3 В живлення) 2. SDA - Serial data, bidirectional port (Серійні дані, двонаправлений порт) 3. NC - не використовується 4. GND - "Земля"	4 виводи з відстанню між контактами 0.1" 1. VCC (3,3 В живлення) 2. Земля- Земля 3. SDA – A4 4. SCL – A5 Одночасно на шині I2C можна розміщувати

				тільки один давач
Живлення	3.5-5.5 В	3.3-5.2 В	3.5...5.0 В	5 - 6В
Розміри	15.5 x 12 x 5.5 мм	59 x 26 x 14 мм	15.1 мм x 25.1 мм x 7.7 мм	3x3 мм DFN корпус

Вони підключаються до однопровідного інтерфейсу. Цифровий сенсор температури та вологості DHT22 / AM2302 вигідно відрізняється від сенсора DHT11 більш високою точністю. У сенсорі вологості та температури HTU21 застосовано інтерфейсом I2C, що забезпечує похибку вимірювань температури $\pm 0,05$ °C. Тут на кристалі розміщено аналого-цифровий модуль опрацювання сигналу, блок зберігання даних калібрування, засоби підтримки I2C інтерфейсу, сенсорний давач у вигляді монолітного CMOS чуутливого елемента. Модуль має систему управління з низьким дрейфом і наднизьке споживання енергії [102].

Для вимірювання освітленості обрано цифровий сенсор GY-302 на мікросхемі BH1750, який може працювати з мікроконтролером згідно протоколу I2C [103]. Як світлочутливий елемент використано фотодіод. Діапазон вимірювань становить від 0 до 65535 лк (16 біт); вимірювана довжина хвилі - 560 нм; точність у режимі високої роздільної здатності становить 1 лк; точність у режимі низької роздільної здатності становить 4 лк; період вимірювання у режимі високої роздільної здатності становить 120 мс; період вимірювання в режимі низької роздільної здатності становить 16 мс. Низьке споживання струму та функція сну; фільтрація світлового шуму 50/60 Гц; можливість вибору двох адрес чіпів для інтерфейсу I2C (можна підключити два сенсори до однієї шини одночасно, що дає змогу розподіляти їх в приміщенні для вимірювання).

Для контролю температури ґрунту, паралельно із тепловізором, доцільно використовувати контактний засіб вимірювання температури. У конкретній, наперед встановленій точці теплиці розміщується цифровий інтегрований сенсор типу DS18B20 [104] з унікальним прошитим на виробництві 64-розрядним кодом, який використовується мікроконтролером для зв'язку з конкретним давачем по загальній шині. Технічні характеристики DS18B20: інтерфейс - однодротовий; діапазон температур - від -55 °C до +125 °C; робоча температура - від 0 до + 60 °C; похибка

вимірювання - 0,5 °C; крок показів - 0,0625 °C. У пам'яті DS18B20 можна зберегти граничні температури, вище яких сенсор змінює режим роботи і переводиться у стан тривоги. Технічні характеристики DS18B20: інтерфейс – One-Wire; робоча напруга – 3-5 В; робочий струм – 1 мА; діапазон температур – від -55 °C до +125 °C; робоча температура – від 0 до +60°C; точність вимірювання – 0,5 °C; крок показів – 0,0625°C. У постійній пам'яті DS18B20 можна зберегти граничні значення температури, при перевищенні яких він переходить у режим тривоги.

Вологість ґрунту вимірюється сенсором YL-69 із вбудованим резистором зі змінним опором. Ємнісний сенсор вологості ґрунту, на відміну від резистивних датчиків вологості, не схильний до корозії. Вихідна напруга обернено пропорційна вологості ґрунту. Сенсор ідеально підходить для моніторингу змін вологості ґрунту, для створення автоматичних систем поливу рослин. Отже, мпін його застосуємо у конструкції.

Для вимірювання концентрації CO₂ у теплиці використовується eSense [105], який дозволяє вимірювати вміст у навколишньому повітрі в діапазоні до 10000 ppm та передавати дані через аналоговий вихід. Також можна використовувати сенсор інфрачервоного вимірювача концентрації CO₂ типу MH-Z19B, який призначено для кількісного визначення питомого вмісту вуглекислого газу в повітрі [106]. Він здатний працювати з 2-ма інтерфейсами і характеризується температурною компенсацією показів, високою лінійністю та низьким енергоспоживанням.

Центром КФС є мікроконтролерний пристрій. Він зчитує дані смарт-сенсорів і керує смарт-актуаторами. Від вибору мікроконтролера у значній мірі залежить робота всієї системи. Для побудови необхідної КФС необхідний мікроконтролер, який може забезпечити плавне регулювання таких параметрів, як температура і вологість зі збереженням достатньої точності підтримуваних параметрів, тощо. Нами використано порівняно простий та дешевий і енергоефективний програмований мікроконтролер типу ATmega328 [107]. Його встановлюють платі Arduino. Крім того, тут знаходиться все необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів / виходів (з них 6 виводів можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий

резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішнього схемного програмування і кнопка скидання (рис.3.2).

Мікропроцесорна система на основі плати Arduino UNO дозволяє реалізувати вимірювальні прилади з мікропроцесорним управлінням, які можуть включати до свого складу електродвигуни та цифрові і аналогові сенсори.



Рис.3.2. Плата Arduino UNO з мікроконтролером ATmega328

3.2. Вивчення температурного розподілу та відносної вологості у теплиці

Для оцінки рівномірності температури у теплиці та виборі місця встановлення датчиків приладів, які використовувались для вивчення характеристик процесу, проводили вимірювання температури та вологості повітря при стабілізованому режимі; вимірювання здійснювали сенсорами вологості й температури DHT11, DHT21/AM2301, DHT22/AM2302 в діагональному напрямку теплиці через кожні 4 м на висоті 1, 2 та 3 м. Інтервал між вимірюваннями – одна хвилина [98]. Отримані результати наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Результати багаторазових вимірювань температури повітря по висоті і довжині теплиці за допомогою сенсора температури і вологості типу DHT21/AM2301.

Довжина, м\ Висота, м	Температура повітря у теплиці, t °C		
	1	2	3
0	18,56	19,62	20,66
0	18,55	19,61	20,68
0	18,52	19,61	20,69
0	18,49	19,57	20,69
0	18,55	19,56	20,61
0	18,51	19,61	20,66
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, t °C	18,53	19,59667	20,665
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, °C	0,01125463	0,010219806	0,01231530 2
4	19,08	19,83	21,73
4	19,07	19,89	21,71
4	19,05	19,86	21,73
4	19,03	19,88	21,74
4	19,1	19,86	21,7
4	19,07	19,85	21,77
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, t °C	19,06667	19,86167	21,73
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, °C	0,009986042	0,008800279	0,0101
8	19,88	20,94	23,05
8	19,87	20,93	23,09
8	19,86	20,91	23,07
8	19,83	20,93	23,09
8	19,85	20,94	23,06
8	19,86	20,94	23,05
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, t °C	19,85833	20,93167	23,06833
Стандартна невизначеність типу А або	0,007031674	0,004772607	0,00749073

статистична оцінка стандартного відхилення, °С			5
12	18,51	20,16	21,24
12	18,52	20,15	21,22
12	18,55	20,14	21,19
12	18,57	20,13	21,18
12	18,5	20,1	21,2
12	18,52	20,11	21,2
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, t °С	18,52833	20,13167	21,205
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, °С	0,01077549	0,00945751	0,00885061
16	18,3	19,04	20,17
16	18,7	19,04	20,12
16	17,2	19,07	20,1
16	17,9	19,09	20,19
16	18,4	19,09	20,1
16	17,7	19,09	20,11
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, t °С	18,03333	19,07	20,13167
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, °С	0,22161027	0,01	0,0157938

Середнє арифметичне або середнє значення із n спостережень визначено за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad , \quad (3.1)$$

де n - кількість спостережень; x_k - значення k -того спостереження.

Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення визначена за формулою:

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

Виходячи з даних табл.3.2, встановлено, що при використанні сенсора DHT11 отримано результати меншої точності, ніж при використанні сенсора

DHT21/AM2301. Тому графіки рис.3.3 побудовані на підставі вимірювань, виконаних з допомогою сенсора DHT21/AM2301.

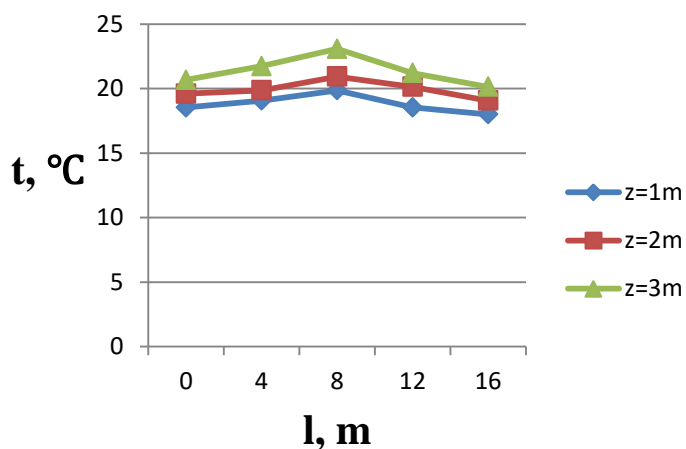


Рис. 3.3. Зміна температури t повітря по висоті (z) і довжині (l) теплиці

Аналогічні вимірювання проведені і для відносної вологості повітря по висоті і довжині теплиці сенсорами вологості й температури DHT21/AM2301 та DHT11. Узагальнені результати вимірювань подані у таблиці 3.3 і на рис.3.4.

Таблиця 3.3

Узагальнені результати багаторазових вимірювань відносної вологості повітря по висоті і довжині теплиці сенсором DHT21/AM2301

Довжина, м \ Висота, м	Відносна вологість повітря у теплиці, %		
	1	2	3
0			
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, φ %	76.65114	83.3241	88.62311
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, %	0.011254629	0.010219806	0.012315302
4			
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, φ %	75.32428	81.97186	85.96393
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, %	0.009986042	0.008800279	0.0101

8			
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, φ %	70.11632	79.31843	85.96289
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, %	0.007031674	0.004772607	0.007490735
12			
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, φ %	77.98395	81.97106	87.29184
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, %	0.010775487	0.009457507	0.008850612
16			
Середнє арифметичне значення результату прямих багаторазових вимірювань, φ %	80.64429	84.63285	88.62147
Стандартна невизначеність типу А або статистична оцінка стандартного відхилення, %	0.221610269	0.01	0.01579381

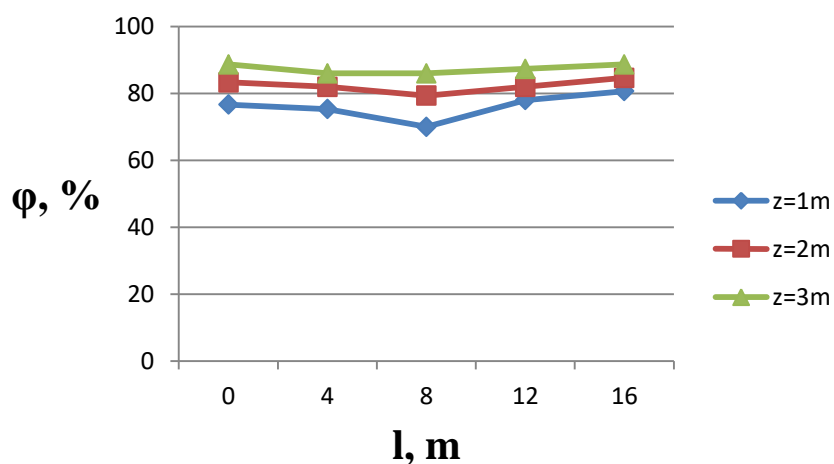


Рис. 3.4. Зміна відносної вологості φ повітря по висоті (z) і довжині (l) теплиці

Побудовані на основі результатів вимірювань графіки розподілу температури та відносної вологості повітря (рис. 3.3-3.4) демонструють, що параметри повітря змінюються в тепличному просторі. Ближче до центру теплиці температура повітря незначно підвищується, а вологість повітря знижується. Зниження температури

супроводжується збільшенням відносної вологості повітря біля стін за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем. Значне падіння температури, зумовлене витоком тепла, зафіксовано біля дверей. Максимальна температура та мінімальна вологість зафіксовані в центрі теплиці на висоті 3 м. Тому у подальшому зазначену точку А обрано для встановлення смарт-сенсорів на висоті $Z = 2$ м.

Отримані дані попередніх вимірювань дають підстави віднести теплицю до математичних об'єктів з зосередженими параметрами.

КФС теплиці для вирощування овочів має підтримувати встановлені режими під час роботи незалежно від впливу на неї. Останнє може бути досягнуто в системах управління, стійких до збурень. Це означає, що невеликі зміни вхідного сигналу або будь-які збурення, початкові умови або параметри не призведуть до значних відхилень вихідного сигналу.

Розглянута КФС з контролем температури-вологості-інсоляції сформована у вигляді 3-х сполучених контурів підсистеми. Кожен з них оснащений одним або кількома смарт-сенсорами та смарт-актуаторами певних фізичних величин.

Таким чином, в результаті дослідження обґрунтовано вибір вказаних елементів та місць їх кріплення в теплиці. Функцію управління у необхідних випадках можуть забезпечувати ПД-регулятори, основним завданням яких є контроль температури, вологості та інсоляції з мінімальною похибкою щодо встановленого режиму.

ПД-регулятор формує вихідний сигнал управління, який подається на приводи. В результаті нагрівальний елемент починає нагріватися або вентилятор - охолоджуватися, шейдер змінює режим інсоляції, і починає працювати система крапельного зволоження. Проте, режим регулювання може задаватись і без них з використанням можливостей апаратно-програмного забезпечення плати Arduino Uno.

Для обґрунтування параметрів системи автоматичного управління розглянуто моделювання динаміки теплових процесів за допомогою рівнянь теплового балансу. Статистична похибка регулювання температури повітря не перевищує ± 1 °C при

похибці вимірювань середніх показників не вище $\pm 0,50\text{C}$, відносної вологості повітря - 3,5 %.

3.3 Кібер-фізична система вирощування овочів з регулюванням температурно-вологісно-інсоляційного режиму

На основі проведених досліджень обґрунтовано актуальність розвитку КФС вирощування овочів з регулюванням режиму тепло-волого-інсоляції. Встановлено, що основними інформаційними параметрами мікроклімату теплиць є: температура повітря, відносна вологість, освітленість теплиці, температура ґрунту, вологість ґрунту, концентрація вуглекислого газу в теплиці. На основі аналізу технічних характеристик сенсорів та досліджень з ними були обрані наступні сенсори кіберфізичної системи вирощування овочів: сенсор температури та вологості (DHT21 / AM2301 та DHT22 - цифрові сенсори з високою точністю з ємнісним сенсором вологості та термістором NTC), сенсор парникового світла (BH1750), сенсор температури ґрунту (DS18B20) та ємнісний сенсор вологості ґрунту (не схильний до корозії, а отже, не залежить від засолення ґрунту), сенсор концентрації парникових газів (MH-Z19B). Плата Arduino Uno, яка є пристроєм на базі мікроконтролера ATmega328 і може плавно регулювати температуру і вологість, зберігаючи достатню точність підтримуваних параметрів, була використана для розробки кіберфізичної системи вирощування овочів. Була виготовлена та випробувана робоча модель. Для оцінки рівномірності температури в теплиці та вибору місця розташування сенсорів пристрою температуру та вологість вимірювали у стабілізованому режимі. Вивчаються метрологічні характеристики вимірювань температури та вологості. Центр теплиці обрали для установки вимірювальних сенсорів. Висота розміщення визначається положенням точки А ($Z = 2$ м), у якій було зафіксовано середнє значення щодо граничних відхилень пристроїв. Для обґрунтування параметрів системи автоматичного управління вирощуванням овочів використовуємо математичне та комп'ютерне моделювання динаміки теплових процесів за допомогою рівнянь теплового балансу. Функцію управління забезпечує ПІД-регулятор, основним завданням якого є регулювання

температури, вологості, інсоляції з мінімальною похибкою щодо встановленого режиму. ПД-регулятор формує вихідні сигнали управління.

На підставі проведеного дослідження обґрунтовано актуальність розвитку вирощування рослин з регулюванням режиму температурно-волого-інсоляційного режиму. Зазвичай вирощування овочів КФС вимагає 2 підсистем управління, які є системами контролю температури повітря та регулювання відносної вологості повітря у обмеженому просторі теплиці. Ці підсистеми визначають вологість ґрунту в ній. Найефективнішим видається впровадження додаткової третьої підсистеми контролю вологості ґрунту як коригувальної. Як показали наші дослідження, точність підтримки температури не перевищує $\pm 1^\circ \text{C}$, а вологості - $\pm 3,5\%$.

Основне завдання – підвищення ефективності виробництва у теплиці шляхом розроблення системи керування мікрокліматом в теплиці із використанням сучасних мікропроцесорних контролерів та контрольно-вимірювальних приладів.

Для здорового харчування люди повинні вирощувати значну кількість свіжих овочів, незалежно від погоди, у будь-який час року. Для цього теплиці використовують у всьому світі, в тому числі і в Україні. Важливо ефективно керувати мікрокліматом у теплицях, щоб отримувати високі врожаї рослинницької продукції при мінімізації витрат на обслуговування та експлуатацію теплиці. Проте у багатьох теплицях використовуються морально застарілі системи управління технологічними процесами. Це знижує ефективність та енергоємність теплиць, оскільки, по-перше, рослини досить вимогливі до кліматичних умов, і за межами температурного оптимуму їх ріст сповільнюється, а при подвійному відхиленні від оптимуму взагалі припиняється; а по-друге, перевищення температури в теплиці на 1°C вище необхідної призводить до додаткових витрат 100 тон умовного палива в рік на 1 га площі [41]. Тобто для ефективної роботи в теплиці потрібно забезпечити оптимальний мікроклімат для вирощування різних сортів рослин з мінімальними енергозатратами.

Активні дослідження для покращення роботи теплиць ведуться в напрямках аналізу мікрокліматичних умов теплиць, розробки та вдосконалення елементної бази, зокрема давачів, за допомогою яких формується первинна інформація про стан

мікроклімату у теплиці, виконавчих механізмів, мікроконтролерів, спрощення процесу розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів, за допомогою якого керують виконавчими механізмами, що досягається також впровадженням технологій IoT [108-109]. Як видно, сучасні датчики розвиваються в напрямку зменшення похибок вимірювань, збільшення діапазону вимірювань, зменшення розмірів, маси та енергозатрат, спрощення підключення у системи керування та підвищення надійності, функціональності та інтелектуалізації засобів. Тобто є напрацьована елементна база для створення інтелектуальних систем управління, які зможуть підвищити ефективність управління мікрокліматом у теплиці.

Висновки до розділу 3.

1. Сільськогосподарському виробництву притаманна специфіка, зумовлена, по-перше, особливостями вегетації рослин, а, по-друге, потребою у значних енергетичних ресурсах, особливо, у зимово-весняний період. Дана специфіка повинна враховуватись при проектуванні і експлуатації кібер-фізичної системи. Зокрема, для ефективної роботи в теплиці потрібно забезпечити оптимальний мікроклімат для вирощування різних сортів рослин з мінімальними енергозатратами.

2. Основними інформаційними параметрами моніторингу та регулювання технологічних процесів тепличного господарства при залучення кібер-фізичних систем можна вважати: температуру і вологість повітря, освітленість тепличного приміщення, температуру і вологість ґрунту, концентрацію вуглекислого газу в теплиці. Також необхідно аналізувати зовнішні метеоумови та конструктивні параметри теплиці.

3. Оскільки для розвитку рослинного світу життєво необхідною є отримувана підчас вегетації енергія (Сонячна та інша - обігріву), то сучасні кібер-фізичні системи для сільськогосподарського виробництва повинні базуватись на температурних вимірюваннях і регулюваннях. У роботі встановлено, що поряд з низкою інших чинників, до числа найважливіших відносяться чинники температури: повітря у теплиці, тепличного ґрунту та води для зволоження. Кожному з них відведено один контур регулювання, що у сумі визначає наявність 3-х контурів температурної підсистеми кібер-фізичної системи теплиці.

4. На підставі аналізу технічних характеристик засобів автоматизації та вимірювання здійснено вибір елементної бази і розроблено кібер-фізичну систему вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму. Показано, що оптимальним за технічними та ціновими характеристиками є апаратно-програмне забезпечення типу Arduino Uno, який завдяки використанню смарт-сенсорів та смарт-актуаторів може здійснювати плавне регулювання

температури і вологості зі збереженням достатньої точності підтримуваних параметрів.

5. Досліджено низку параметрів об'єктів регулювання. Відзначено важливість забезпечення рівномірності розподілу температури по просторових координатах, чіткого дотримання заданого температурного профілю у часі. Крім основних контрольованих параметрів важливим є встановлення оптимального освітлення всередині теплиці чи іншого об'єкту, адже ця характеристика безпосередньо впливає на значення температури і повинна враховуватись через зниження споживаної електричної потужності.

РОЗДІЛ 4. АСПЕКТИ METROLOGY 4.0 АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

Зростаючі ціни на енергоносії стимулюють економно їх використовувати. Доцільність такого підходу показують європейські країни. Сільськогосподарські об'єкти та споруди вже від початку повинні бути спроектовані таким чином, щоб зробити дешевшим їх обслуговування, не втрачаючи ефективності виробничого циклу та не погіршуючи якості готової продукції.

Будівництво будинків і споруд технологічного призначення з низьким споживанням енергії, включаючи теплиці, набирає обертів у Європі. Після 2012 року в масовому порядку зводяться пасивні будинки: з 2015-2020 років в ЄС будують споруди з нульовим споживанням енергії [15].

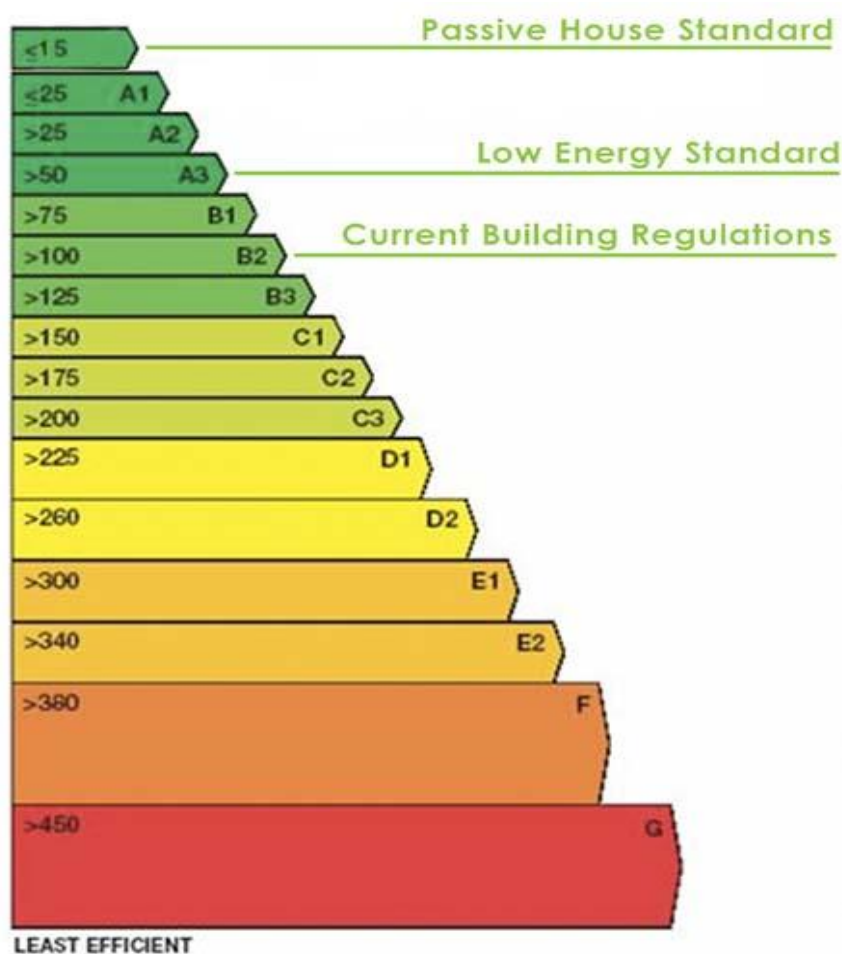


Рис.4.1. Відносні значення приведених енергетичних витрат сконструйованих споруд [15]

Будівля, таким чином, буде представляти собою енергонезалежний об'єкт. Для досягнення цих цілей слід максимально використовувати енергію альтернативних джерел енергії. Тим більше, що за базовим сценарієм, який був наданий Міжнародним енергетичним агентством, світовий попит на енергію до 2030 року зросте приблизно в два рази. З цього випливає висновок: необхідно використовувати весь досвід в енергозберігаючих технологіях вже зараз, і продовжувати освоювати нові енергоефективні технології.

Виробництво сільськогосподарської продукції опирається на засади доцільності та економічної обґрунтованості. Зокрема, це стосується тепличного господарства. Вартість виробництва одиниці ваги продукції повинна бути співмірною з її вартістю виробництва на відкритому ґрунті з вартістю доставки включно. В Україні стартують новітні підходи до тепличного виробництва, до прикладу, встановлені старт-ап підходами [110]. За ним пропонується побудова автоматизованих теплиць. Основний блок – апаратно програмне забезпечення, реалізоване у вигляді окремих модулів (контролера та сенсорів), які клієнт може підбирати під параметри теплиці. Купуючи модуль, клієнт отримує обладнання та доступ до веб-інтерфейсу системи контролю клімату теплиці та контролю вирощування рослин. Після встановлення та запуску обраної програми вирощування система постійно контролюватиме клімат у теплиці, управлятиме технологічним процесом вирощування рослин, повідомлятиме про будь-які позаштатні ситуації та зберегти історію спостереження за вирощуванням. Клієнт завжди має доступ до даних своєї теплиці та можливість віддалено змінювати параметри.

Подібне рішення розроблено та викладено нижче у розділі, проте описано з викладенням деталей і особливостей, включаючи реалізацію концепції множинних теплиць, розпорешених по території району, причому на підставі розгляду можливостей ІТ технологій із Метрологією 4.0 включно.

4.1. Аспекти автоматизації тепличного виробництва

В Україні інтенсивне виробництво овочів із захищеного ґрунту розпочалося у 2003 році і продовжувало розвиватися в наступні роки. Для оцінки потреб виробництва та споживання овочевої продукції на цьому рівні розвитку враховано підходи, що склалися відповідно до національних традицій та медицини. У світі вирощують понад 600 видів овочів, але виробництво залежить від країни: у США виробляється 60 видів, а в Україні — лише до 20 видів. В Україні найпоширенішими овочевими рослинами є білокачанна капуста, помідор, огірок, морква, буряк, цибуля, ріпа, а серед захищених ґрунтових рослин — томати, огірок, солодкий перець. На успіх технологій вирощування овочів впливає багато факторів.

Технологія вирощування огірків сильно залежить від сучасних умов вирощування. Огірок, як і інші гарбузові, процвітає в теплу погоду. Насіння починає проростати при температурі 12-13° С, тоді як ідеальна температура проростання 25-30° С.

Найсприятливіша температура для росту і розвитку до плодоносіння: вдень сонячний 24-28°С, вдень похмурий 18-22°С; вночі - не менше 12°С. При плодоносінні: вдень - 24-30°С, вночі вище 16°С. Розвитку плодів шкодять тривалі високі денні температури, що перевищують 30 °С. Найкращий ріст і розвиток культури досягається, а також прискорюється початок періоду плодоношення при підтриманні нічної температури вище 18 °С.

Денна температура нижче 10 °С завдає шкоди генеративним органам залежно від тривалості (викривлення плодів, їх опадання). Загибель рослин викликає температура 3°С протягом 3-4 днів.

Огірок потребує багато вологи та відносної вологості в ґрунті і повітрі. Ідеальний рівень відносної вологості повітря становить від 80 до 90 %. У період росту листя підтримувати вологість ґрунту на рівні 70-80 % НВ, а в період цвітіння — на рівні 55-60 % НВ (за таких умов процес запліднення проходить успішніше). Ріст рослин сповільнюється через нестачу вологи, що викликає гіркоту в плодах.

Кукурбітацини, які утворюються при високих температурах і нестачі вологи, а також при тривалих низьких температурах, викликають у плодах гіркоту.

Перезволоження ґрунту негативно позначається на культурі, в результаті чого коренева система відмирає. Рослини огірків досить вразливі до затоплення, навіть якщо це лише на короткий період часу.

Ідеальна температура для проростання насіння – 27-28°C в повітрі та ґрунті. Протягом наступних 4-5 днів після появи сходів температуру повітря знижують до 15-18°C вдень і 12-14°C вночі. Цією процедурою сіянці не витягуються. Підгодівля розсади проводять по мірі її вирощування. У фазі 3-4 справжніх листків розсада готова до висадки.

За 10-15 днів до посадки теплицю накривають плівкою і заздалегідь прогрівають, щоб встановити потрібну температуру повітря і ґрунту. Розсаду гібридів короткоплідних огірків висаджують у весняні теплиці, коли ґрунт прогріється до 14 °C на глибину 10 см. Висаджують рослини огірків у теплиці в березні-квітні за такою схемою: 90 + 60 x 45-60 см, або 2-2,7 рослини на 1 м². Чим раніше висівають розсаду, тим менше висаджують рослин на квадратний метр.

У горизонті ґрунту глибиною до 40 см рекомендована величина передполивної вологості на етапі вегетативного розвитку становить 80 %, а в момент утворення плодів - 90 % НВ.

Поливати огірки потрібно невеликими порціями щодня. Для досягнення такої форми поливу можна використовувати крапельне зрошення. Перед цвітінням рослини поливають помірно – 2-3 л/м², теплою водою (24-26 °C). Частота поливу огірків в приміщенні визначається умовами освітлення, тобто чим більше сонячної енергії проникає в рослину, тим інтенсивніше транспірація і фотосинтез, і чим більше води потребує рослина, і частота поливу збільшується.

Швидкість поливу поступово збільшують у міру збільшення вегетативної маси до початку плодоношення. Під час цвітіння і плодоношення норму поливу збільшують, досягаючи в період плодоношення 6-7 л/м² (з урахуванням швидкості випаровування). Зрошувати рослини огірків потрібно розчиненими мінеральними добривами, які містять мікроелементи в хелатному вигляді, а не чистою водою,

оскільки поживні речовини (зокрема азот) швидко вимиваються в нижні горизонти, і рослинам не вистачає.

Таблиця 4.1.

Показники мікроклімату в теплицях при вирощуванні огірка [124-125]

Умови/період	До сходів	Після сходів	До висадки розсади	У період плодоношення
Температура повітря вдень, °С	27-28	15-18	18-25 16-18 похм.	24-26 22-24 похм.
Температура повітря вночі, °С	27-28	12-14	14-16	18-20
Температура ґрунту, °С	27-28	17-18	18-20	не менше 21
Відносна вологість, % НВ	80-85	80-85	80-85	75-85

Взимку рослини не можна охолоджувати, а навесні і влітку перегрівати. Цей метод дозволяє отримати рівномірно високий ранній урожай, а також дозволяє зберігати рослини до початку липня. Дотримання такого підходу дозволить отримати якісний ранній урожай із загальною врожайністю 40-45 кг/м².

Помідори вирощують у закритих ґрунтових структурах: у зимових ґрунтових і гідропонних теплицях у зимово-весняний період та у розширеній культурі на ґрунтових та мінеральних субстратах, у весняних плівкових теплицях та парниках – на ґрунтових субстратах чи добре удобрених та підготовлених природних ґрунтах, а також у весняні плівкові теплиці і парники - на ґрунтових субстратах.

Опалення, зрошення та вентиляція контролюють температуру та вологість повітря. У таблиці 4.2 наведено ідеальну температуру, вологість ґрунту та вологість повітря.

Урожай плодів збирають через кожних 2—3 дні. Урожайність їх залежить від виду теплиць і способів вирощування: в зимових теплицях у продовженій культурі в передових господарствах вона досягає 50—55 кг/м², у тому числі раннього — 30—35 кг/м², у весняних із калориферним обігрівом — 20—25 кг/м², з сонячним — 12—18 кг/м², у парниках — 16—20 кг з рами.

Таблиця 4.2.

Оптимальні температура, вологість ґрунту та повітря в теплицях [126].

Фактори росту	Фаза розвитку рослин		
	до цвітіння	цвітіння	плодоношення
Температура повітря, °С:			
вдень у ясну погоду	20—22	20—25	20—26
вдень у хмарну погоду	18—20	20—22	20—22
вночі	15—16	15—16	17—18
Температура ґрунту, °С	20—22	20—22	22—24
Вологість ґрунту, % НВ	70—80	70—75	75—80
Відносна вологість повітря, %	65—70	65	60—65

Найбільш поширені в Україні плівкові теплиці, хоча оцінити їх продуктивність і ефективність використання можна лише в приватних і фермерських господарствах.

Пасивну теплицю побудувати складніше, ніж традиційну теплицю, оскільки етап проектування вимагає більшої уваги до всіх деталей. Щоб зменшити втрати тепла, наприклад, недостатньо покрити зовнішню поверхню конструкції якомога більшим утеплювачем. Також важливо усунути так звані теплові містки, які є ділянками, де теплопередача збільшується через порушення безперервності теплоізоляційної оболонки. Конденсація, вологість, розвиток грибка і, зрештою, втрата тепла можуть бути викликані тепловими містками.

Орієнтація теплиці, наявність вікон з кожної сторони і їх розміри, освітлення приміщень, системи кондиціонування, вентиляції та опалення, тобто загальний стан приміщення, у якому планують розпочати черговий цикл сільськогосподарського виробництва, має бути, як не атестований, то принаймні перевірений. Саме це легко здійснити, використовуючи встановлене обладнання, в тому числі, тепловізор, передбачений для моніторингу та регулювання температури ґрунту.

Більш високий рівень теплоізоляції не тільки скорочує потреби пасивної споруди в енергії, але і сприяє підтримці підвищеної температури внутрішніх поверхонь у приміщенні взимку, і низької температури - влітку. За рахунок цього підвищується тепловий комфорт (інтенсивність випромінювання нагрітих поверхонь), встановлюється приємний рівномірний клімат всередині приміщення, що виключає появу "холодних кутів" (кутів з цвіллю) [111], що є важливо для вирощування якісної сільськогосподарської продукції.

Окрім того, зауважу, що з 2005 р. у ЄС діє єдиний стандарт HACCP (Аналіз Ризиків і Критичні Контрольні Точки), [112]. Даним стандартом передбачено поступове впровадження норм даного документу на території ЄС із Українною включно. Воно реалізується і в роботах Національного університету «Львівська політехніка» [113]. Це – невідкладне питання науковців та технологів, що прагнуть міжнародного визнання своєї продукції. Імплементация даної концепції ґрунтується на 7-и засадах: а) аналіз ризиків; б) визначення критичних точок; в) встановлення граничних значень; г) безперервний моніторинг; д) контрольні вимірювання; е) документування; є) регулярна верифікація. Підкреслю, що всі перелічені етапи успішно реалізовані даною дисертаційною роботою стосовно вирощування і обробка продукції сільського господарства. Зокрема, перші два етапи стосуються аналізу відомих даних і залежностей щодо продукції сільського господарства; етапи в-д – розділів 2-3; а документування та верифікацію можна віднести до матеріалів, описаних нижче у даному розділі, оскільки остаточному етапові сільськогосподарського виробництва, в тому числі, на основі тепличного господарства обов'язково притаманні облік, контроль та верифікація обладнання. Особливу увагу тут приділяють безперервному моніторингу температури продукції та умов довкілля на всьому ланцюжку від виробника до кінцевого споживача [114].

4.1.1. з використанням ПД-регулятора

При моніторингу температури особливо важливими вважаються стабільність і точність вимірювання. Так у [114] відзначено, що перевищення температури у теплиці на 1 °С над необхідним значенням призводить до додаткової витрати паливно-енергетичних ресурсів у розмірі 100 тон умовного палива на протязі року,

віднесеного на 1 га площі теплиці. Тому особливо важливе значення набуває така технічна характеристика застосованого обладнання, як точність регулювання температури у теплиці. Остання повинна коливатися у теплиці відповідно до пори доби, стану довкілля, тощо. Якщо виходити з параметрів ПД-регулятора, що вважається унікально високоточним засобом регулювання температури чи інших заданих показників, то можна вважати, що заявлена виробником ВАТ НВО «Термоприлад» похибка регулювання на рівні $\pm 0,1$ К у випадку використання засобу для технологічної підтримки призводить до 10-кратної економії палива.

- **4.1.2. на основі апаратно-програмної платформи Arduino**

Подібне стосується результатів залучення апаратно-програмної платформи Arduino [115] для моніторингу контурів КФС у даній дисертаційній роботі. Позаяк досягнення ПЗ, установленого тут і базованого на математичному апараті MatLab, дають змогу досягнути практично таких самих результатів за точністю регулювання. Проте, як перевага тут існує змога одночасно підключення значно більшої кількості смарт-сенсорів – 8+, причому без використання комутаторів.

- **4.1.3. на основі платформи та середовища LabVIEW**

ПЗ LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) - це програмна підтримка автоматизованих систем для наукових досліджень і автоматизованих систем управління, тобто заявлена компанією-розробником саме для вирішення завдань, поставлених для вирішення у дисертаційному дослідженні. Операційне середовище LabVIEW – багатофункціональне; воно забезпечує:

- а) обмін інформацією із вимірювальними сенсорами та пристроями керування (смарт-актуаторами);
- б) аналіз і опрацювання вимірювальної інформації; нагромадження і передачу інформації;
- в) підтримку математичного експерименту шляхом формування віртуальних МІ;
- г) забезпечення користувацького інтерфейсу засобами керування технологічних процесів.

Поєднання двох і більше функцій LabVIEW дозволяє створити ефективну систему моніторингу та регулювання технологічними процесами, причому на основі графічної мови програмування. Це дає змогу спростити створення програм і засобів управління зовнішнім об'єктом (у даному випадку тепличного господарства).

У середовищі LabVIEW створюють віртуальні прилади, що моделюють окремі функції вимірювально-регулювального обладнання. Для створення віртуального приладу регулювання температури у теплиці в середовищі LabVIEW використано закуплений кафедрою ІВТ Національного університету «Львівська політехніка» блоку апаратної підтримки типу NI USB 6009 [116]. Останній під'єднано приєднується до ПК за допомогою інтерфейсу full-speed USB (8 каналів введення аналогових сигналів, 2 канали генерації аналогових сигналів, 12 каналів цифрового введення/виведення та 32-розрядний лічильник, а також аналогові входи та виходи для генерування та збирання вимірюваних даних. Платформа LabVIEW керує NI USB 6009 за допомогою **NI-DAQ (data acquisition)** підсистеми. Для того щоб імітувати пристрій NI USB 6009 в дереві конфігурації **NI MAX** вибираємо пункт **Devices and Interfaces** і натискаємо **Create New**. Далі вибираємо доступні прилади, а саме NI-DAQmx Simulated Device. Натискаємо на кнопку Finish (рис.4.2).

Пристрої вимірювання фірми National Instruments є запаковані із NI-DAQ драйверами ПЗ, як екстенсивна бібліотека функцій та віртуальних інструментів, які можна викликати з LabVIEW до програми пристроїв вимірювання NI. Останні включають NI-DAQ пристрої, такі як M-серії багатофункціональні I/O (вхід/вихід) пристрої, модулі опрацювання сигналів, та модулі перемикання. Драйвери ПЗ мають апікації програмуючого інтерфейсу, які є у бібліотеці віртуальних інструментів, функцій, класів, атрибутів, та властивостей задля створення апікацій конкретного пристрою.

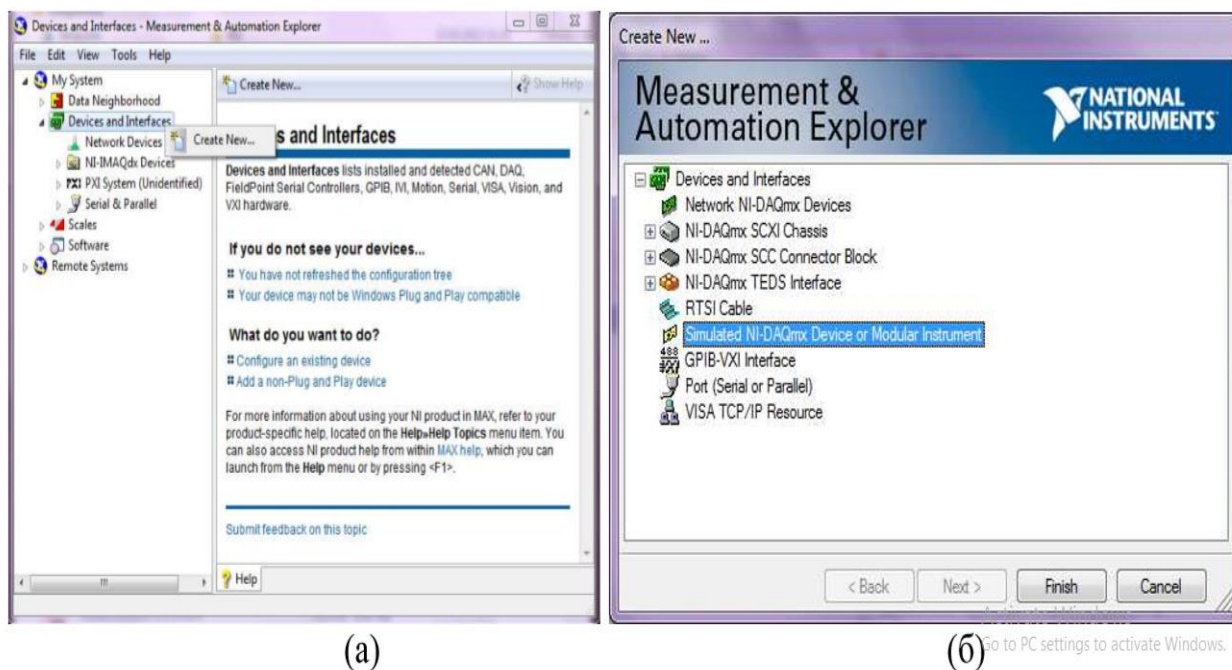


Рис.4.2. Головне вікно Measurement & Automation Explorer:

- а) дерево конфігурації приладів та інтерфейсів;
 б) вікно вибору доступних для користувача приладів та інтерфейсів.

Повний перелік контурів регулювання температурної підсистеми КФС теплиці, а також контурів регулювання вологості та інсоляції – достатньо обширний. Він вимагав тривалої розробки, хоча забезпечував оптимальні характеристики. Тому підхід, пов'язаний із формуванням віртуального пристрою регулювання на основі платформи LabVIEW, у дисертаційній роботі не розвивався на відміну від традиційного підходу з використанням ПІД-регулятора та підходу з використанням апаратно-програмної платформи типу Arduino Uno, до якої доволі просто під'єднуються смарт-сенсори і яка так само просто програмується на спрощеному варіанті C++.

4.2. Метрологічно-екологічно-економічні аспекти будівництва і експлуатації теплиць, як споруд пасивного типу

Екологічно доцільне проектування теплиць передбачає створення загальної екологічної концепції проектування, будівництва та експлуатації споруди (в т.ч. і

теплиці), для чого слід детальніше визначитись, у першу чергу, з особливостями сучасного стану енергозбереження як у виробництві й експлуатації самих будівельних матеріалів, так і споруд у цілому. А це означає:

- використання меншої кількості енергії для виробництва будівельних матеріалів та конструкцій; на опалення, охолодження та провітрювання будівель;
- використання енергій, що мають здатність до самовідновлення;
- утилізацію та вторинне використання відходів виробництва, уникаючи шкідливого впливу на навколишнє середовище;
- використання природних та екологічно-чистих матеріалів;
- забезпечення природного перебігу процесів у навколишньому середовищі.

Ефективність енергозбереження та екологічність споруди визначається сукупністю багатьох факторів:

- вибору місця для будівництва та вибору екологічних матеріалів і конструкцій;
- пасивним і активним використанням енергоносіїв, що мають здатність до відновлення;
- енергетично вигідним інженерним обладнанням, на що власне направлена дана дисертаційна робота тощо.

При виборі місця для будівлі мають бути враховані: кліматичні умови; топографія; орієнтація будівлі за сторонами світу; освітленість або затінення місця; сила та напрямок вітрів; захищеність будівлі зеленими насадженнями.

Архітектурний проект самої будівлі, як невід'ємний компонент, включає заходи з економії енергії:

- компактність форми будівлі - найкомпактнішою формою споруди є напівкуля: її частка об'єму стосовно об'єму напівкубу становить 81 %, потім іде циліндр — 92 %, піраміда — 98 %;
- орієнтацію будівлі: розташування вікон (більшість вікон і прозорих частин стін або даху мають бути повернені до сонця; при цьому не слід забувати про літній захист від сонця);
- зонування споруди (поділ на тепліші виробничі й холодніші допоміжні зони);

- створення масивних об'ємів (стін чи підземель), що нагромаджують, а згодом віддають тепло всередину будівлі тощо.

Поряд з активним використанням сонячної енергії можливе і пасивне її використання засобами відповідного архітектурно-планувального вирішення будівлі. Так, за допомогою так званих "буферних зон" стає можливим підігрів свіжого повітря (до прикладу в зимовому садочку) та забезпечення свіжим підігрітим повітрям усіх інших функціональних зон.

Окрім теплоізоляції будівель, істотного значення для створення затишку набуває здатність частин будівлі до акумулювання тепла, тобто: здатність конструктивних елементів із різних матеріалів сприймати, зберігати і віддавати теплову енергію. Матеріали, що характеризуються здатністю сприймати тепло і віддавати його з часовим відставанням, врівноважують температуру внутрішнього середовища.

Як простий і недорогий сонцезахист може виступати широкий дах. Виступ даху захищає внутрішні приміщення від перегріву від високого літнього сонця, але дозволяє низькому зимовому сонцю заглядати углиб приміщень. Не слід нехтувати і заощадженням дощової води, оскільки запаси прісної води у світі обмежені. Дощова вода з дахів може збиратися та використовуватися в господарстві (для поливання).

Переходячи до енергетично-екологічних аспектів, зазначимо наступне. Потреба в охороні довкілля та висока вартість енергії стимулюють енергозберігаюче будівництво у світі. Найбільша частка енергії у традиційному будівництві використовується на опалення. Теоретично кожен споруду можна утеплити так, щоб вона стала пасивною, тобто мала дуже малу потребу в енергії. У пасивних спорудах річні витрати на опалення є незначними (15 кВт·год/м² рік, але не нульовими [15]). Джерелом тепла у пасивних будівлях можуть бути спарені системи, що використовують конденсаційні котли, теплову помпу, сонячні колектори і слугують одночасно для підігріву й постачання теплої води для підливання рослин, а також рекуператор повітря.

Вікна у пасивному будівництві відіграють істотну роль, оскільки діють як сонячні колектори: пасивно отримана сонячна енергія має значну вагу у

вирівнюванні втрат тепла. Кінцевою однак метою не є засвоєння якнайбільшої кількості сонячної енергії за будь-яку ціну; значно важливішою метою є утримання теплової енергії. У пасивному будинку середній тепловий потік U для стін рівний $0,1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, тоді як для найкращого вікна $U = 0,6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [117]. Збільшення поверхні вікон для пасивного використання сонячної енергії, веде до збільшення втрат тепла. Це особливо стосується тепличного господарства.

Потрібно в цьому випадку звернути увагу на факт, що справжня пасивна користь сонячної енергії отримується після використання теплозахисних склопакетів високої якості (двокамерні вікна, заповнені аргоном або криптоном), повернутих на південь, а також незатінених. Тобто, важливим є перегляд конструкцій самих споруд.

Холодна, тепла вода для користування. Холодна вода, впливаючи до будівлі, має зазвичай не вищу температуру ніж 10°C , після чого обігривається в трубах і інших контейнерах, що знаходяться на місці. Пасивне будівництво пов'язується не тільки з ощадливістю обігривальної енергії. Важливу позицію в енергетичному балансі займає енергія, зв'язана з приготуванням теплої води для користування [118]. Для перевірки якості теплоізоляції у всіх випадках може бути використано тепловізор, причому відкалібрований відповідно до [119].

Проте, це окремо виділене питання, яку не охоплює цілей та завдань дисертаційної роботи, але зв'язане з нею, дотичне до переліку проблем тепличного господарства та питання, що неявним чином впливає на вирішення питань у даній роботі.

4.3. Віддалене адміністрування роботою групи теплиць

Для покращення інтелектуального обслуговування КФС переважно застосовують віддалене адміністрування, що дає змогу зекономити на ресурсах і підвищити якість обслуговування, а значить і якість кінцевого продукту.

4.3.1. Вибір засобів реалізації мережі

Проект топології мережної системи розумної теплиці базується на бездротовій технології типу ZigBee підключення пристроїв. Протокол обрано позаяк він - малопотужний: бездротова мережа M2M, неліцензійна, недорога і може обмінюватися даними в топології іншого типу, включаючи топологію сітки. Він складається з двох основних частин, першою з яких є мікропроцесор Raspberry Pi [120-123], що використовується як основна частина станції і об'єднує вузол шлюзу, сервер бази даних і веб-сервер (останній є на ньому замість використання будь-якого типу ПК-сервера). Другу частину формують бездротові тепличні вузли, які складаються з трьох різних підвузлів – відповідно для кожного з трьох контурів регулювання лише стосовно температурної підсистеми розроблюваної КФС: Air1 і Ground2 використовуються для моніторингу та регулювання температури повітря та ґрунту, а третій підвузол - для моніторингу та регулювання температури води для підживлення.

Підвузли Room1 і Room2 складаються з Arduino, Arduino XBee Shield, модуль XBee і набору сенсорів. Підвузол Water3 складається з модуля XBee і температурного сенсора. Місцевий і віддалений користувач може отримати доступ до цієї системи за допомогою будь-якого веб-браузера. Віддалений користувач може отримати доступ до системи шляхом призначення публічної IP-адреси Raspberry Pi.

На рисунку 4.3 показана схема архітектури. Тут вона відповідає саме такому спрощеному виду. Насправді, включає більше контурів управління: контур освітлення, контур вентиляції, контур параметрів зовнішнього середовища, тощо.

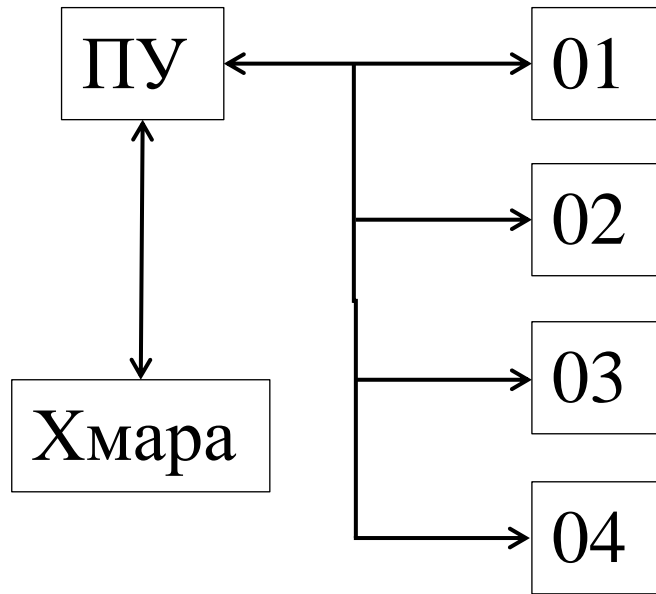


Рис.4.3. Архітектура мережі КФС для теплиць

Детальніше розглянемо контури управління, які у КФС відповідають підсистемам моніторингу та управління параметрами температурного режиму, освітлення, вентиляції, вологості, тощо, а також враховувати параметри зовнішнього середовища та , навіть, стан рослин (рис. 4.4).

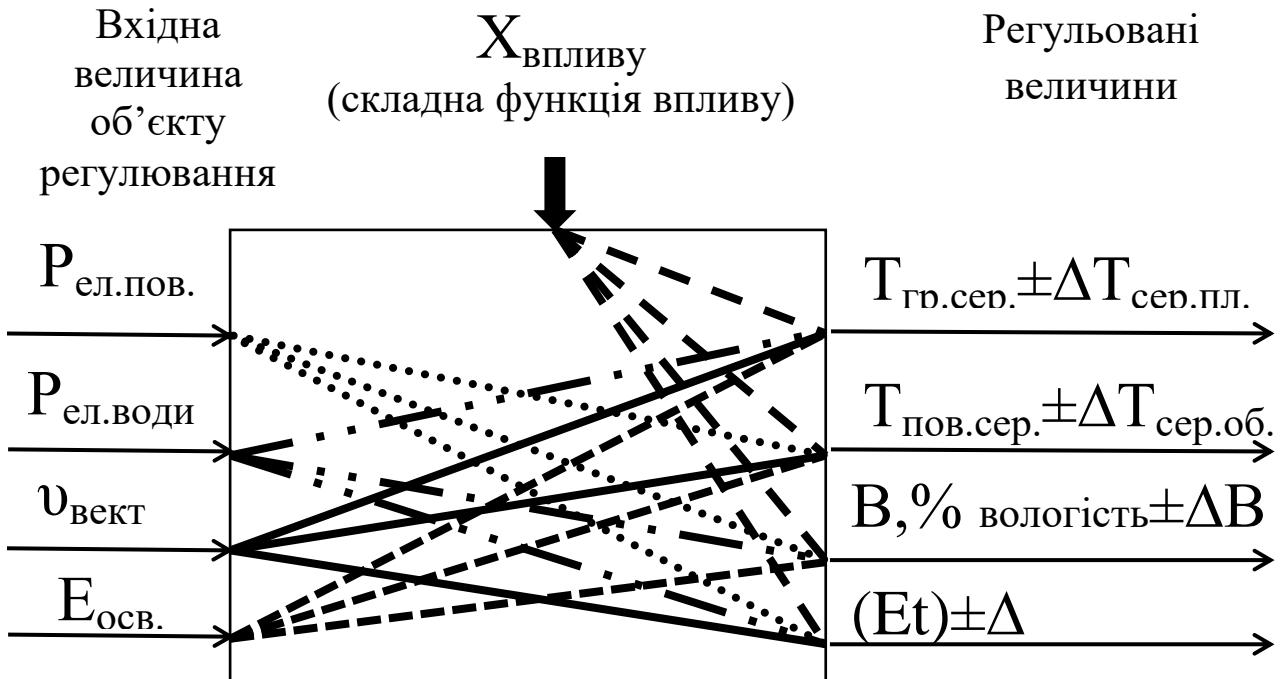


Рис.4.4. Підсистеми моніторингу та управління параметрами температурного режиму, освітлення, вентиляції, вологості

Тут показано схеми передачі впливів у теплиці з 4-ма регульованими величинами (кожен з 4-х каналів регулювання вносить своє збурення в роботу інших каналів, що відображають $4 \cdot 3 = 12$ негоризонтальних ліній на рисунку).

У програмно-технічному плані виконання кожного каналу регулювання згідно стандарту ZigBee передбачає використання 3-х різних типів бездротових пристроїв: а) пристрій-координатор; б) пристрій-маршрутизатор; в) кінцевий пристрій. Пристрій-координатор дає можливість управляти персональною мережею і встановлювати підключення мережі. Пристрій-маршрутизатор має змогу передавати і приймати повідомлення, а також маршрутизувати повідомлення при необхідності для розширення зони покриття. Нарешті, кінцевий пристрій має найменшу кількість функцій і може підключатися або на пристрій-координатор, або на пристрій-маршрутизатор. У кожній мережі ZigBee повинен бути тільки один пристрій-координатор і необмежена кількість маршрутизаторів і кінцевих пристроїв. Існують різні типи модулів XBee і в МСРБ використовується модуль XBee Pro S2, який працює в двох типах операцій: прозора операція - режим (режим роботи AT) і режим роботи інтерфейсу прикладного програмування (режим роботи API). Режим AT є режимом роботи за замовчуванням в модулі XBee, і він робить заміну послідовної лінії між модулями, всі вхідні дані UART з контакту DI очікують негайної відправки RF.

Режим API - режим переваги і режим на основі кадрів. Коли модуль XBee працює в цьому режимі, всі вхідні і вихідні дані складаються з кадрів. Ці кадри надають адресу, дані корисного навантаження, AT-команду і інші поля конфігурації. Цей режим має можливість багатоадресної і ширококомовної передачі і може отримати статусний кадр про кожного, хто відправляє кадри, також він містить контрольну суму для даних інтеграції. ZigBee надає найнижчу швидкість передачі даних і забезпечує низьке енергоспоживання при збільшенні життя акумулятора порівняно з Bluetooth та Wi-Fi.

4.3.2. Реалізація мережі

При розробленні вузлів мережі КФС теплиці Air1, Ground 2, Water3, вони вибираються як прототипи для кожної наступної теплиці. Зазначені вузли

використовуються для моніторингу температури, вологості середовища, виявлення газу та диму (за необхідності) та дистанційного управління будь-якими засобами вимірювання в них через Інтернет за допомогою встановленої кількості сенсорів, актуаторів та реле. Кожен з вузлів Air1, Ground 2, Water3 складається з мікроконтролера Arduino Uno з апаратним та програмним забезпеченням з відкритим кодом та з цифровими пінами введення / виведення та аналогових входів [121]. XBee Pro Series2 підключається до кожного вузла і реалізовує бездротові комунікації, засновані на стандартах IEEE 802.15.4 та ZigBee, пропонує від Digi [120]. Їхніми перевагами є низькі вартість, споживана потужність та швидкість передачі даних при роботі на частоті 2,4 ГГц.

XBee Pro S2 оснащено 20-контактними функціями та налаштований як лінія АЦП або введення / виведення [120]. Arduino Shield XBee - це додаткова плата, яка використовується для того, щоб плата Arduino підключилася до іншої плати за допомогою XBee модуля. Він з'єднується вертикально над Arduino, а потім XBee з'єднується над ним [121]. Сенсор вологості та температури DHT22 та сенсор детектування газу та диму MQ-2 є сенсорами, що використовуються у вузлах контурів регулювання; також є реле електричного вимикача, що використовується в цих вузлах. Інші компоненти можуть бути легко додані до системи.

4.3.3. Розроблення головної станції Raspberry Pi

Дана станція вважається одним з апаратних компонентів, який можна використовувати як сервер в технології IoT. Це недорогий мікрокомп'ютер, з розширеним портом GPIO і може використовуватися для різних цілей [123]. Він реалізує основну станцію мережі КФС теплиці і включає в себе шлюз, базу даних, сервер, веб-сервер, а також призначені для користувача інтерфейси, як показано на рис.4.5.

Модуль XBee, підключений до Raspberry Pi налаштований, як координатор і працює в режимі API. Вузол шлюзу реалізує зв'язок між вузлами і головною станцією. Він має змогу запису і читання з бази даних і відповідає за вибір режиму роботи, а також визначає вузли, які використовуються для відправки і отримання

даних між модулями XBee в динамічній конфігурації. Вузол шлюзу програмують мовою Python з багатьма пакетами, включаючи пакет MySQL-python, XBee 2.1.0 пакет і PySerial 2.7. База даних MySQL використовується для зберігання таблиці конфігурації, керуючої таблиці і таблиці даних системи. Веб-сервер Apache з мовою програмування PHP використовується на стороні сервера КФС. Кінцевий користувач може отримати доступ до системних інтерфейсів через будь-який ПК або планшет або будь-який пристрій, який має доступ в Інтернет.



Рис.4.5. Структура головної станції мережі теплиці на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi

4.3.4. Розроблення інтерфейсу користувача

Метою проектування є надання доступу для локального та віддаленого кінцевого користувача до мережі КФС теплиці і можливості вибрати необхідну конфігурацію для контролю за її середовищем та управління приладами. Розроблено 4-и основні веб-сторінки, що можуть реалізувати необхідні цілі:

- Сторінка налаштування створена для керування конфігурацією вибору роботи вузлів будинку.
- Сторінка відображення створена для відображення в режимі реального часу стану вибраного підвузла теплиці. Діаграма моніторингу температури повітря,

вологості, тощо у підвузлах Air1, Ground2, Water3 та інша інформація може відображатися на сторінці.

- Сторінка аналізу даних побудована для доступу до всіх збережених даних за визначену тривалість або за весь час. Більше того, ця сторінка дає змогу видаляти дані при досягненні спеціального рахунку.
- Сторінка контролю створена для управління станом кожного пристрою, підключеного до кожного підвузла теплиці.
 - Проектування користувацького інтерфейсу здійснюється за допомогою HTML, CSS, PHP та JavaScript для графіків даних.
 - Реалізація підвузлів. Програмна реалізація підвузлів здійснюється за допомогою відкритого програмного забезпечення Arduino IDE. Програмна реалізація відповідає за процеси отримування даних від модуля XBee через послідовний порт та аналізу їх, а також за отримування даних від сенсора DHT22 за допомогою своєї бібліотеки і від сенсорів MQ-2; потім ці дані передаються модулю XBee через послідовний порт, який передає ці дані через ZigBee до координатора XBee, підключеного до головної станції.

Останній підвузол бездротової теплиці - це підвузол Water3, який має можливість динамічного переміщення для оцінювання температури води на вході, а також на вході у рекуператор води і на виході із нього для підвищення енергетичної ефективності КФС в цілому. Реалізація цього вузла здійснюється за допомогою встановлення першого піна вводу / виводу модуля XBee на $ADC = 1$. Це дозволяє підключити сенсор температури LM35 до цього піна; виміряну температуру тіла води в реальному часі періодично надсилати кожні 15-30 хвилин, а потім XBee переходить у режим сну. Останній триває 15 хвилин, а час роботи у 5 хвилин на добу збільшує термін служби акумулятора на роки. Зчитування та опрацювання даних вибірки виконуються в процесі приймання на головній станції з використанням мови програмування Python.

Згідно з останніми дослідженнями [119], нормальна температура підливання сходів рослин, а згодом і самих рослин коливається у межах 10-18 °C. Відповідно до отриманих експериментованих результатів, зчитування цього вузла повинно бути

відкалібровано з додаванням значення зміщення, щоб отримати приблизно рівний результат до стандартного значення температури.

Апаратна реалізація головної станції складається з Raspberry Pi, модуля XBee як координатора, який підключений до Raspberry Pi через адаптер XBee. Raspberry Pi підключений до Інтернету через порт Ethernet або бездротово через Wi-Fi.

Програмна реалізація вузла станції здійснюється за допомогою декількох мов програмування. Процеси та алгоритми кадрів передачі та приймання реалізуються за допомогою мови програмування Python (Python - об'єктно-орієнтована, з відкритим кодом, портативна, високого рівня з бібліотеками ritch).

Дані, отримані від цих операцій, зберігаються в базі даних MySQL. MySQL - безкоштовні БД з високою продуктивністю та багатьма іншими функціями. Для доступу до даних потрібна сторінка сервера і мови 33 сценаріїв. Для доступу та модифікації використовуються веб-сервер Apache та мова PHP. Розробка інтерфейсу користувача здійснюється за допомогою HTML, CSS, PHP та JavaScript для графіків даних.

На рисунку 4.6 показана діаграма температури води, виміряної на підвзулі Water3 розробленої КФС.

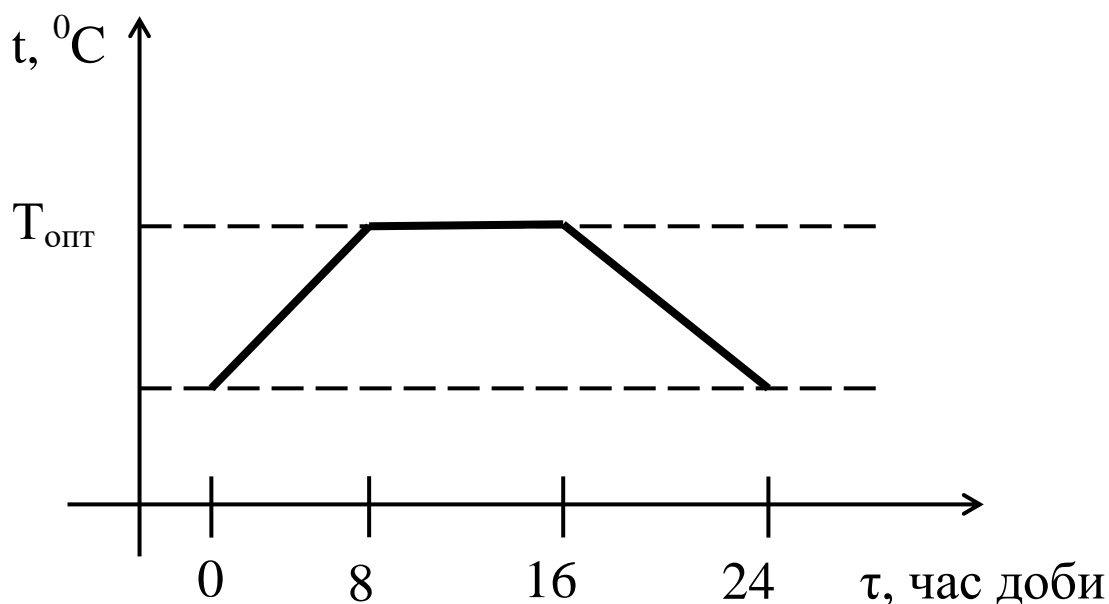


Рис 4.6. Діаграма температури води, виміряної на підвзулі КФС

Авторизований користувач може отримати доступ до МКФС для контролю та моніторингу температури одного із контурів (відповідного підвузла КФС) та вибору необхідної конфігурації з будь-якого веб-браузера.

Висновки до розділу 4.

1. Досягнення Metrology 4.0, як бази інформаційно-вимірювальних підсистем для розроблення і проектування сучасних кібер-фізичних систем, в повній мірі розвинуті для потреб сільськогосподарського виробництва, а саме для тепличних господарств з багаточисельними контурами регулювання параметрів. Основний ухил здійснено на розроблення мережі розумних теплиць на основі кібер-фізичних систем з низкою контурів моніторингу та регулювання технолологічних параметрів, основним з яких є температура з допомогою смарт-сенсорів та актуаторів.

2. Вивчено та обґрунтовано можливість виконання теплиці, як енергетично пасивної споруди, тобто споруди рівень споживання штучних додаткових джерел енергії якої є на порядок нижчий порівняно з традиційними спорудами. Саме з цією метою передбачено належні заходи при її проектуванні, зведенні та експлуатації. Аспекти останньої передбачають використання рекуператора енергії.

3. Для забезпечення роботи мережі, як апаратно-програмне забезпечення, використовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi з технологією ZigBee та доступом в Інтернет. Збереження та отримання зображень реалізоване за допомогою використання MySQL БД.

4. Обґрунтовано вибір технології для створення цієї мережі, зокрема передбачено топологічно наявність принаймні 3-х вузлів для керування 3-ма контурами температурної підсистеми кібер-фізичної системи. Вибрано апаратне забезпечення, сумісне з раніше апробованими смарт-сенсорами.

5. Передбачено віддалене адміністрування низкою теплиць у районі. Для цього розроблено програмне забезпечення та передбачено користувацький інтерфейс. Дана система має такі технічні характеристики:

- Комунікація між вузлами мережі з технологією ZigBee.
- Використання веб-серверу на головній станції мережі.
- Використання MySQL БД.
- Використання мережі Інтернет для доступу користувача до мережі.

Висновки

1. Досягнення Metrology 4.0, як основи формування інформаційно-вимірювальних підсистем сучасних КФС, у результаті виконання дисертаційної роботи в повній мірі розвинуті для потреб сільськогосподарського виробництва, а саме для тепличних господарств з багаточисельними контурами регулювання параметрів. Основний ухил здійснено на розроблення мережі розумних теплиць на основі кібер-фізичних систем з низкою контурів моніторингу та регулювання технологічних параметрів, основним з яких є температура з допомогою смарт-сенсорів та актуаторів.
2. У сільському господарстві, де є чимало складних за оснащенням і виконанням об'єктів керування, дослідження і впровадження КФС є перспективним кроком, що визначає ефективність різних етапів вирощування та переробки сільськогосподарської продукції та її якість, що непрямым чином залежить від особливостей вимірювання та регулювання технологічних параметрів.
3. Безперебійна та надійна робота КФС базується на коректній організації інформаційних потоків, достовірній роботі її підсистем, у тому числі, підсистем температурного контролю та їх програмного забезпечення. КФС для потреб сільського господарства передбачають моніторинг та регулювання діяльності технологічних процесів, зв'язаних із вирощуванням та переробкою (сушіння, переробка, консервування, тощо) сировини.
4. Важливою складовою частиною КФС є температурна підсистема, оскільки енергетична ефективність визначається температурними режимами на кожній стадії виробництва та переробки сільськогосподарської продукції, залежно від її виду. Зокрема, для тепличного господарства з його значного енергозатратністю рекомендовано формування температурних підсистем КФС для моніторингу та регулювання параметрів повітря, ґрунту, води, тощо.
5. Оскільки для розвитку рослинного світу життєво необхідною є отримувана підчас вегетації енергія (Сонячна та інша - обігріву), то сучасні КФС для сільськогосподарського виробництва повинні базуватись на вимірюванні й регулюванні температури. Встановлено, що поряд з низкою інших чинників, до

числа найважливіших відносяться чинники температури: повітря у теплиці, тепличного ґрунту та води для зволоження.

6. Вимоги до температурних підсистем КФС тепличного виробництва визначаються фізичною структурою засобів (смарт-сенсори та актуатори), та їх ПЗ. Дотримання жорстких температурно-часових обмежень режимів роботи вимагає залучення ПДД-регуляторів або віртуальних засобів, сформованих на платформі LabVIEW. У результаті досліджень запропоновано виконати температурні підсистеми КФС теплиці для вирощування овочів у складі 3-х контурів моніторингу і регулювання – повітря, ґрунту та води (для зволоження) із підібраними контактними смарт-сенсорами для моніторингу і регулювання температури повітря і води, а також тепловізором – для ґрунту, як значно інерційнішого та неоднорідного по площі об'єкту.
7. Для зменшення систематичної складової похибки вимірювання температури безконтактним методом проведено дослідження методу, на основі чого запропоновано конструкцію приладу (тепловізора), що дає змогу визначити насамперед коефіцієнт чорноти термометрованої поверхні, у даному випадку ґрунту. Зменшуючи на порядок систематичну складову похибки вимірювання, внаслідок чого перевести даний метод з категорії якісних до категорії кількісних методів вимірювання.
8. На підставі аналізу технічних характеристик засобів автоматизації та вимірювання здійснено вибір елементної бази і розроблено КФС вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму. Показано, що оптимальним за технічними та ціновими характеристиками є апаратно-програмне забезпечення на платі Arduino Uno, що завдяки використанню смарт-сенсорів та смарт-актуаторів може здійснювати плавне регулювання температури і вологості зі збереженням достатньої точності підтримуваних параметрів.
9. Розроблено віртуальний прилад на основі платформи LabVIEW з додатковим програмним забезпеченням для реалізації температурної підсистеми керування кібер-фізичною системою тепличного виробництва. Підібрані блок-схеми, засоби та створена програма віддаленого адміністрування роботою групи теплиць,

розпорошених по території району, що дає змогу враховувати неодноразовість виникнення територіально-природних аномалій та відмінності у циклах розвитку тих самих сільськогосподарських культур у різних теплицях.

10. Досліджено низку параметрів об'єктів регулювання. Відзначено важливість забезпечення рівномірності розподілу температури по просторових координатах, чіткого дотримання заданого температурного профілю у часі. Крім основних контрольованих параметрів важливим є встановлення оптимального освітлення всередині теплиці чи іншого об'єкту, адже ця характеристика безпосередньо впливає на значення температури і повинна враховуватись через зниження споживаної електричної потужності. Це дає змогу на 20-30 % підвищити енергетичну ефективність вирощуваної сільськогосподарської продукції та приблизно так само підвищити її якість.
11. Вивчено та обґрунтовано можливість виконання теплиці, як енергетично пасивної споруди, тобто споруди рівень споживання штучних додаткових джерел енергії якої є на порядок нижчий порівняно з традиційними спорудами. Саме з цією метою передбачено належні заходи при її проектуванні, зведенні та експлуатації.
12. Як засоби апаратно-програмне забезпечення, запропоновано використання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi з бездротовим стандартом передачі даних типу ZigBee. Збереження та отримання зображень реалізоване за допомогою використання MySQL БД. Обґрунтовано топологію цієї мережі, зокрема передбачено наявність принаймні 3-х вузлів для керування 3-ма контурами температурної підсистеми КФС. Вибрано апаратне забезпечення, сумісне з раніше апробованими смарт-сенсорами.
13. Віддалене керування параметрами технологічних процесів є особливо цінне для енерго- та працемісткового тепличного виробництва ранніх овочів. У роботі передбачено віддалене адміністрування роботою низки теплиць у районі. Для цього розроблено ПЗ та передбачено користувацький інтерфейс.

Список використаної літератури

- [1] S. Teodora, L. Miclea, Cyber-Physical Systems–Concept, Challenges and Research Areas, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, Vol. 14.2, 2012, 28–33
- [2] Yu.Bobalo, B.Stadnyk, Ya.Lutsyk, I.Муkyтын, et al, Cyber-Physical Systems. Metrological Issues, IFSA Publishing, Barcelona, 2016.
- [3] A. Melnyk, Cyber-physical Systems: Problems of creation and direction of development, Journal of Lviv Polytechnic National University: Computing Systems and Networks, Vol. 806, 2014, pp. 154–161.
- [4] V. Majstorovic, N. Durakbasa, Y. Takaya, S. Stojadinovic, Advanced Manufacturing Metrology in Context of Industry 4.0 Model, IMEKO TC14 2019 : [Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue](#), pp 1–11, May 2019.
- [5] Yu. Bobalo, S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, A. Riznyk, et al, Standards of Physical Quantities and Other Measuring Instruments, in Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0, 2021, IFSA Publishing, Barcelona, pp. 53-103.
- [6] B. Stadnyk, R. Samchenko, S. Yatsyshyn, CNT nanosensors in the tumours treatment, International Journal of Biosensors & Bioelectronics, Volume 2, Issue 6, 2017; pp.188–189. DOI: 10.15406/ijbsbe.2017.02.00046
- [7] U. Blumröder, R. Füßl, T. Fröhlich, E. Manske, R. Mastylo, Frequency comb-coupled metrology lasers for nanopositioning and nano measuring machines, Measuring Equipment and Metrology, Vol.82, Iss. 4, pp.36-42, 2021, DOI: 10.23939/istcm2021.04.036
- [8] R. Taymanov, K. Sapozhnikova, “Metrological self-check of sensors”, ResearchGate, Feb. 2011 <https://www.researchgate.net/publication/258517088>.
- [9] С. Яцишин, Т. Бубела, А.-В. Мидык, О. Лыса и др., Устойчивое развитие кибер-физических систем для сельского хозяйства, „Устойчивое развитие“, Республика Болгария: том.2, 2021, сс.97-102.
- [10] С. Яцишин, А.-В. Мидик, В. Снітинський, Я. Янишин, Кібер-фізична система для переробки сільськогосподарських продуктів. Системи-2018: матеріали

Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ДП НДІ «Система», 22-23 листопада 2018 року. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. – с. 43-44.

[11] С. Яцишин, А.-В. Мідик, О. Лиса, Кіберфізична система для парників та теплиць Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019: Тези доповідей XXIII Міжнародного семінару метрологів (МСМ'2019) до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 року / Відп. За випуск М. М. Микийчук. – Львів, 2019. – С. 186.

[12] В. Бабак, С. Бабак, В. Єременко, Ю. Куц, Л. Щербак, Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем, Київ : Університет новітніх технологій; НАУ, 2017.

[13] Ван Чунжі, С. Яцишин, О. Лиса, А.-В. Мідик, Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення, Вимірювальна техніка та метрологія, Том.79, вип.1, 2018, сс.34-38, <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.034>

[14] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Th. Fröhlich, M. Mykyuchuk, I. Klos, I. Kalinovska, Mass Measures with coded remote access for Cyber-Physical Systems, Advances in Cyber-Physical Systems, Vol.2, № 2, 2017, с.77-80.

[15] М. Саницький, О. Позняк, У. Марущак, Енергозберігаючі технології у будівництві, Львів : Вид-во Львівської політехіки, 2013. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books /2020/Sanitskij_2013_236.pdf.

[16] W. H. Ko, C. D. Fung, VLSI and intelligent transducers, Sensors and Actuators, Vol. 2, 1982, pp. 239-250.

[17] Н. Гоц, С. Яцишин, Приймачі випромінювання з термісторними чутливими елементами, Методи та прилади контролю якості, Том 28, вип. 1, с.137-141, 2012.

[18] ["What is Middleware?"](#). Middleware.org. Defining Technology, 2008. Retrieved 2013-08-11.

[19] J. Lee, B. Bagheri, H. Kao, A Cyber-physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing asystems, Manufacturing Letters, Vol. 3, 2015, pp. 18–23.

[20] Hoang, Dat Dac, Hye-Young Paik, Chae-Kyu Kim, Service-oriented middleware architectures for cyber-physical systems, International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 12.1, 2012, pp. 79–87.

- [21] Wu, Fang-Jing, Yu-Fen Kao, Yu-Chee Tseng, From wireless sensor networks towards cyber physical systems, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 7.4, 2011, pp. 397–413.
- [22] I. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam, Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, Vol. 38, 2002, pp. 393–422.
- [23] М. Микийчук, Б. Стадник, С. Яцишин, Я. Луцик. Розумні вимірювальні засоби для кібер-фізичних систем, *Вимірювальна техніка та метрологія*, Том 77, сс.3-17, 2017.
- [24] Chih-Yu Lin, S. Zeadally, Tzung-Shi Chen, Enabling Cyber Physical Systems with Wireless Sensor Networking Technologies, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, May 2012 (5), 21 p. DOI: [10.1155/2012/489794](https://doi.org/10.1155/2012/489794)
- [25] Ad-hoc Sensor Networks. Brunel Univ. London. [On-line]. Available: <https://www.brunel.ac.uk/electronic-and-electrical-engineering/research-and-phd-programmes/Research-areas/Ad-hoc-Sensor-Networks>
- [26] W. Li, Z. Wang, G. Wei, L. Ma, J. Hu, D. Ding, A Survey on Multisensor Fusion and Consensus Filtering for Sensor Networks, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Volume 2015, Art. ID 683701, <https://doi.org/10.1155/2015/683701>.
- [27] С. Яцишин, І. Микитин, І. Кравець, Пожежні сповіщувачі. Засади оптимізації роботи та алгоритми прийняття рішень, *Пожежна безпека*, вип. 17, сс.14-19, 2010.
- [28] S. Lindsey, C. Raghavendra, Power-efficient gathering in sensor information systems, in *Proceeding of the IEEE Aerospace Conference (AERO '2002)*, Big. Sky, USA, 9–16 March 2002, pp. 924–935.
- [29] ISO/IEC 30101:2014 Information technology – Sensor networks: Sensor network and its interfaces for smart grid system.
- [30]. ISO/IEC 20005:2013 Information technology – Sensor networks – Services and interfaces supporting collaborative information processing in intelligent sensor networks.
- [31]. ISO/IEC 29182–1:2013 Information technology – Sensor networks: Sensor Network Reference Architecture (SNRA) – Part 1: General overview and requirements.
- [32]. ISO/IEC 30128:2014 Information technology – Sensor networks – Generic Sensor Network Application Interface.

- [33] J. Muñoz, T. Chang, X. Vilajosana, T. Watteyne, Evaluation of IEEE802.15.4g for Environmental Observations, *Sensors (Basel)*. 2018 Oct; 18(10): 3468. Published online 2018 Oct 15. doi: 10.3390/s18103468.
- [34] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, First Edition, Elsevier Ltd 2008.
- [35] Digi International, "ZigBee RF Modules", User Guide, 2016.
- [36] O. G. Aju, A Survey of ZigBee Wireless Sensor Network Technology: Topology, Applications and Challenges, *International Journal of Computer Applications* Vol. 130, Issue 9, Nov. 2015.
- [37] О. Лиса, А.-В. Мідик, Особливості кіберфізичних систем для сільського господарства. Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграцій: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 27-28 травня 2019 року. – Львів: ЛНАУ, 2019. –с. 53-54.
- [38] О. Лиса, А.-В. Мідик, Розвиток технічних засобів для підвищення конкурентоспроможності підприємств. Обліково-аналітичне забезпечення інноваційного розвитку економіки: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 14-15 березня 2018 р. – Львів: ЛНАУ, 2018. – с. 390-393.
- [39] D. Melnychuk, Scientific support of sustainable development of agriculture, D. Melnychuk, *Forest-steppe*, 2004.
- [40] R. Geiger, *The climate near the ground*, Harvard University Press, 1957.
- [41] <https://startup.ua/projects/eko-teplitsy-novogo-pokoleniya-ekologiya-ekonomiya-do-70-energii-14025.html>
- [42] О. Лиса, А.-В. Мідик. Економічні аспекти стартап-проекту «розумна теплиця». Проблеми обліково-аналітичного забезпечення управління підприємницькою діяльністю: II Міжнародна науково-практична конференція присвячена 100-річчю Полтавської державної аграрної академії, 23 квітня 2020 р. Полтава: ПДАА, 2020, сс. 125-126.
- [43] О.Лиса, А.-В. Мідик. Автоматизація роботи теплиць як ефективний засіб покращення діяльності суб'єктів господарювання, Трансформаційні зміни

національної економіки в умовах євроінтеграції: Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 травня 2020. – Дубляни, 2020, сс.123-125.

[44] <https://startup.ua/projects/eko-teplitsy-novogo-pokoleniya-ekologiya-ekonomiya-do-70-energii-14025.html>

[45] В. Яцук, П. Малахівський, Методи підвищення точності вимірювань. Львів: Вид-во «Бескид-біт», 2008.

[46] В. Опалко, М. Гузь, Р. Шатров, В. Марченко, Способи та технологія сушіння зерна різних культур, Агроексперт (Україна), 13.04.2020 <https://agroexpert.ua/sposoby-ta-tekhnohiiia-sushinnia-zerna-riznykh-kultur/>

[47] С. Сабадаш, М. Савченко-Перерва, Аналіз сучасних способів сушіння рослинної сировини та існуючі конструкції сушильного устаткування, <http://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6436/1/27.pdf>

[48] Патент на корисну модель № 86027 UA, МПК F268 3/06 (2006.01) Конвеєрна стрічкова сушарка / Іващенко Н. В., Буляндра О. Ф., Шутюк В. В., Вербицький Б. І., Бессараб О. С. ; заявник Національний університет харчових технологій, № 201307343 ; заявл. 10.06.2013 ; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23, 2013 р.

[49] В. Гарасимів, Т. Гарасимів, Удосконалення показників якості функції передачі системи автоматичного регулювання потужності ..., Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, вип. 3(76), 2020, сс. 46-52.

[50] A.-V. Midyk, O. Lysa, Analysis of the characteristics of the cyberphysical system for growing vegetables, Proceedings of the 23rd International Conference on Information Technology for Practice «IT for Practice 2020», December 3, 2020, Ostrava, Czech Republic / Edited by J. Ministr, M. Tvrdikova. – Ostrava: HSB-TU,2020, pp. 95-102.

[51] O. Palagin, V. Romanov, I. Galelyuka, Data acquisition systems for precision farming, Information Technologies & Knowledg, Vol. 5, Issue 2, 2011, pp.103–109.

[52] A. Dovhan, The Accelerator Reporter, OnApp, file:///I:/clouds/the_accelerator.pdf

[53] Y. Yamada, A. Todd, Special Section on TEMPMEKO 2019: a feature on the XIV International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science & IV International Temperature Conference, Beijing (TEMPMEKO & TEMPBEIJING 2019) and Metrology for Meteorology and Climate (MMC 2019),

Measurement Science and Technology, IOP Science, <https://iopscience.iop.org/journal/0957-0233>.

[54] В. Stadnyk, S. Yatsyshyn, Further development of Kelvin Approach to creating an absolute temperature scale, Journal of Thermoelectricity, Iss.3, 2017, pp.75-88.

[55] S. Yatsyshyn, В. Stadnyk, Ya. Lutsyk, L. Bunyak, Handbook of Thermometry and Nanothermometry, IFSA Publishing, Barcelona, 2015.

[56] О. Гук, С. Кубишин, Б. Голюка, Б. Бохонко. Застосування сучасних пірометрів в технічній діагностиці промислового обладнання, Методи та прилади контролю якості, Львів, № 9, 2002, с.15-18.

[57] Тепловізори. Проспект фірми Fluke, <https://ukr-m.com/ua/p592740484-infrakrasnaya-kamera-teplovizor.html>

[58] Mikron Instrument Company, Inc., Table of Emissivity of Various Surfaces for Infrared Thermometry, 10 p. http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf

[59] Energy performance of buildings directive, EU, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

[60] S. Yatsyshyn, Temperature and Temperature Measurement, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley online library, 2019.

[61] Б. Стадник, М. Яцишин, О. Сегеда, І. Микитин, П. Скоропад, Спосіб визначення коефіцієнта випромінювальної здатності матеріалу, Патент України № 116684 від 25.04.2018. Бюл.№ 8, 2018.

[62] Сучасні інфрачервоні пірометри – вимірювання температури без дотику, <http://simvolt.ua/suchasn-nfrachervon-prometri-vimryuvannya-temperaturi-bez-dotiku.html>

[63] Н. Гоц, Науково-технічні засади метрологічного забезпечення термометрії за інфрачервоним випроміненням, Дисертація на здоб. наук. ступ. д.т.н., Львів, Нац. Ун-т Львівська політехніка, 2014.

- [64] Hui Liu, Rail Transit Channel Robot Systems, In Robot Systems for Rail Transit Applications, Science Direct, 2020 <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-imager>.
- [65] Обладнання для проведення енергоаудиту. U-lead with Europe. http://misto-em.org.ua/wp-content/uploads/2019/03/2019_03_05_Equipment_UA.pdf.
- [66] Б. Стадник, П. Скоропад, П. Гамула, Особливості визначення чинника випромінювальної здатності матеріалів за низьких температур. Вимірювальна техніка та метрологія, Том 68, сс.165-168, 2008.
- [67] С. Яцишин, П. Гамула, А.-В. Мідик, Ван Чунжі, Про похибку безконтактного вимірювання температури, зумовлену невідомим значенням коефіцієнта чорноти, Вимірювальна техніка та метрологія, 2018. Том.79, вип.4, сс.30-33, 2018. doi.org/10.23939/istcmtm2018.04.030
- [68] Законопроект про енергоефективність імплементує кращі європейські норми та практики для зменшення енергозалежності країни, Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, опубл. 12 лютого 2018 р. <https://www.kmu.gov.ua/news/zakonoproekt-pro-energoefektivnist-implementuye-krashi-yevropejski-normi-ta-praktiki-dlya-zmenschennya-energozalezhnosti-krayini>
- [69] A. Zaporozhets, Z. Burova, O. Dekusha, S. Kovtun, L. Dekusha, L. Vorobiov, S. Ivanov, Information measurement system for thermal conductivity studying, Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 395, Advanced Energy Technologies and Systems, 2022, pp.1–19.
- [70] S. Kovtun, O. Dekusha, L. Dekusha, L. Vorobiov, Simulation of system for reproduction of high intensity heat flux, Ukrainian Metrological Journal, № 3A, 2020, pp 145-152.
- [71] K. Maciuk, Y. Rudyk, Usage of the global navigation satellite systems in safety and protection issues, Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, Vol. 109, 2020, pp.93-102.
- [72] Г. Бірта, Ю. Бургу, Л. Флока. Технологія збирання, післязбиральна обробка та зберігання хмелю і тютюну, Київ, 2019.

- [73] И. Г. Мохначев, М. Г Загоруйко., А. И. Петрий, Технология сушки и ферментации табака, Москва: Колос, 1993.
- [74] Y. Rudyk, V. Kuts, A. Gavryliuk , R. Naumchuk, Required safety component of automotive cyber-physical systems, Problems of infocommunications. Science and technology : Conference proceedings 2020 IEEE International scientific-practical conference, 6–9 october 2020, Kharkiv, Ukraine, 2020, сс.338–342.
- [75] ДСТУ ISO 10185:2013 Тютюн і тютюнові вироби. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=92046
- [76] Тютюн. Вирощування. Переробка / Ковтуник І.М., Гончарук В.Я., Стельмашук А.М. та ін. / заг. ред. І.М. Ковтуника. – Кам'янець-Подільський: Абетка, 2001
- [77] The Pt100 Sensors. SCRIBD. <https://www.scribd.com/document/479986064/Pt-100-Sensors>
- [78] Вимірювальні перетворювачі (сенсори). Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, В. М. Ванько, Ю. В. Яцук, Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015.
- [79] V. Romanov, O. Palagin, I. Haleluka, O. Voronenko, Wireless sensor network for precision farming and environmental, Computer tools, networks and systems, Vol. 13, 2014, pp. 53–62.
- [80] C. Perkin, E. Belding-Royer, S. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing, in Proceeding of the Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99), New Orleans, USA, 25–26 February 1999, pp. 90–100.
- [81] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, Geography-informed energy conservation for ad hoc routing, in Proceeding of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), New York, USA, 16–21 July, 2001, pp. 70–84.
- [82] L. Subramanian, R. Katz, An architecture for building self-configurable systems, in Proceeding of Mobile Ad Hoc Network Comput. Workshop, Boston, USA, 11 August 2000, pp. 63–73.
- [83] С. Яцишин, А.-В. Мідик, О. Лиса, Кібер-фізична система для вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму, Метрологія та прилади, Том 81, Вип.5, 2020, сс. 23-27.

- [84] S. Kurpaska, Energy Effects During Using the Glass with Different Properties in a Heated Greenhouse, Techn. Sc., Vol. 17, Issue 4, 2014, pp.351-360.
- [85] Сенсори температурки та вологості <http://www.gikfun.com/sensors-c-8/dht21am2301-digital-temperature-and-humidity-sensor-p-218.html>
- [86] Сенсор DHT22. [online] available: <https://www.adafruit.com/product/385>.
- [87] О. Лиса, А.-В. Мідик, Кібер-фізична система теплиці з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму, Вчені Львівського національного аграрного університету виробництва: каталог інноваційних розробок, За заг. ред. В. Снітинського, І. Яціва. Вип. 20. 2020, Львів, ЛНАУ.
- [88] Accuracy and Precision in Measurements. [online] available: https://www.webassign.net/userimages/fgdennis@waynecc/lab_app_accuracy.pdf
- [89] T. Stuhlfauth, H. Fock, "Effect of whole season CO₂ enrichment on the cultivation of a medicinal plant, Digitalis lanata", Journ. Agronomy & Crop Science, Vol.164, Issue 3, 1990, pp.168–173. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1990.tb00803.x>
- [90] Агротехнічні вимоги до автоматизації технологічних процесів у закритому ґрунті. URL: <http://kyrator.com.ua/index.php?option=>
- [91] М.Дорожовець, «Кондиціонування сигналів сенсорів», у кн. «Сенсори», Бескид Біт, Львів, Україна, 2014с.124-152.
- [92] А.-В. Мідик, О. Лиса. Дослідження точності визначення температурно-вологісних характеристик системи температурно-вологісного контролю теплиці, Вимірювальна техніка та метрологія, Том.81, № 2, 2020, сс.7-12. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2020.02.007>
- [93] A. Broring, et al. New generation sensor web enablement. Sensors, Vol. 11, 2011, pp. 26522699. doi:10.3390/s110302652
- [94] О. Лиса, А.-В. Мідик, Оцінка якості сільськогосподарської продукції та вибір оптимального варіанту, Вісник ЛНАУ: Агроінженерні дослідження, Львів.: Львівський нац. агроруніверситет, №17, 2013, сс.103-110.
- [95] National Semiconductor, "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors", User Manual, November 2000.

- [96] T. Beckwith, N. L. Buck, and R. D. Marangoni, Mechanical Measurements, Reading, MA: Addison-Wesley, 1982.
- [97] М. Микийчук, С. Яцишин, А.-В. Мідик, О. Лиса, Кібер-фізична система для тепличного вирощування овочів, Тези доповідей VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології «Technical Using of Measurement-2020», 4–7 лютого 2020 р., Львів: ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2020, с.104.
- [98] С. Яцишин, А.-В. Мідик, Метрологічні аспекти системи контролю температурно-вологісного режиму теплиці. Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, 20–21 травня 2021 р., відп. за випуск М. Микийчук, Львів: ЛА «Піраміда», 2021, сс.203-204.
- [99] Arduino Uno, [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [100] Ємнісний сенсор вологості ґрунту <https://arduinka.biz.ua/uk/mnisniy-datchik-vologosti-gruntu-p851c74.html>
- [101] S. Yatsyshyn, A.-V. Midyk, O. Lysa, Development of software for instrumental method of rehabilitation of patients with obliterating vase atherosclerosis. Актуальні проблеми сучасного бізнесу: обліково-фінансовий та управлінський аспекти: матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 18-20 березня 2020 р. Львів: ЛНАУ, 2020, сс. 420-422.
- [102] В. Баран, Г. Власюк, Ю. Оникієнко, О. Смоленська, Основи мікропроцесорної техніки, Лабораторний практикум, URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27992/1/OMPT_laboratorni.pdf.
- [103] Microchip, ТВ 3181, What is TWI? How to Configure the TWI for I2C Communication, [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/90003181A.pdf>
- [104] Датчик температури DS18B20 цифровий. <https://arduino.ua/prod190-datchik-temperatyri-ds18b20-cifrovoi>
- [105] Обладнання для тестування ґрунтів - професійні системи фірми Shybas. Каталог продукції https://www.stepsystems.de/media/katalog_ua_web.pdf

- [106] Датчик CO₂ MH-Z19B для Arduino. <https://arduino.ua/prod1532-datchik-co2-mh-z19>
- [107] Мікроконтролер типу ATmega328. <https://greenchip.com.ua/0-0-597-1.html>
- [108] K. Ashton, That 'Internet of Things' Thing. In the real world, things matter more than ideas. RFID Journal, 22 June 2009. [Online]. Available: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>
- [109] О. Лиса, А.-В. Мідик, Розробка системи автоматичного поливу рослин, Трансформаційні зміни національної економіки в умовах євроінтеграції: збірник тез V Міжнародної науково-практичної конференції, 27 – 28 травня 2021, Дубляни, 2021, –с.106-108.
- [110] Проспект фірми Cyber Grow Systems <https://startup.ua/projects/cybergrow-11923.html>
- [111] М. Вуйцікевич, М. Саницький, Р. Секрет, Аналіз енергетичних показників індивідуальних будинків, ЕКОінформ, № 3 (263), 2011, сс.50-51.
- [112] ISO 22000: 2005 Система управління безпекою харчової продукції. <https://ukrstandart.net/posluhy/iso-systemy-upravlinnia-iakistiu/khassp-iso-22000-ua>
- [113] С. Остап'юк, Дисертація на здобуття вченого ступеню к.т.н. на тему «Вдосконалення методології впровадження системи HACCP, як системи управління якістю на молокопереробних підприємствах», Львів, 2017.
- [114] Прилади testo для дотримання норм HACCP, моніторингу процесів в агросекторі та харчові й промисловості, https://www.testo.kiev.ua/docs/docs_new/Testo_Solution_haccp_FOOD_Lifot.pdf.
- [115] Т. Карвінен, К. Карвінен, В. Валтокари. Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi. Пер. с англ., Москва: ООО "И. Д. Вильямс", 2015.
- [116] User Guide and Specifications NI USB-6008/6009, <http://www.csun.edu/~rd436460/Labview/USB%206008%20Users%20Guide.pdf>
- [117] Г. Фаренюк. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій, Київ: Гама-Принт, 2009.

- [118] J. Kurnitski, A. Saari, T. Kalamees et al. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implantation, *Energy and building*, № 43, 2011, pp. 3279-3288.
- [119] О. Лыса, А.-В. Мидук. On accuracy of contactless temperature measurement limited by unknown emissivity factor. Актуальні проблеми сучасного бізнесу: обліково-фінансовий та управлінський аспекти: матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 19-21 березня 2019 р. Ч. 2. – Львів: ЛНАУ, 2019, сс. 179-181.
- [120] DIGI. International, "XBee and XBee-Pro RF Module", Product Manual, 2009. [online] available: <https://www.digi.com/>. [Accessed 12 1 2018].
- [121] Arduino XBee Shield. [online] available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoXbeeShield>.
- [122] Relay Board. [online] available: <https://www.sainsmart.com/8-channel-dc5v-relay-module-for-arduino-pic-armdsp-avr-msp430-ttl-logic.html>
- [123] Raspberry Pi 3 Model B. [online] available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- [124] Фартушний Д.М., Вдовенко С.А. Вирощування огірка в захищеному ґрунті в умовах ТОВ «УКРФЛОРА ВІННИЦЯ»
<http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/avp/metod/%D0%A2%D0>
- [125] Tekhnologiya-viroshchuvannya-ogirka-v-umovakh-zakhishchenogo-gruntu
<https://internet-kaplya.com.ua/news/tekhnologiya-viroshchuvannya-ogirka-v-umovakh-zakhishchenogo-gruntu>
- [126] Барабаш О.Ю., Тараненко Л.К. Помідор – технологія вирощування
<https://agromage.com/stat>