

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

БОЛБОТ ІГОР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 681.516.75:631.234

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ
ТЕПЛИЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ З МОНІТОРИНГОМ
ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ**

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є кваліфікаційна праця на правах рукопису
Робота виконана в Національному університеті біоресурсів і природо-
користування України Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Лисенко Віталій Пилипович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
завідувач кафедри автоматики
та робототехнічних систем
імені академіка І. І. Мартиненка

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Жученко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри технічних
та програмних засобів автоматизації

доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
завідувач кафедри автоматизації
виробничих процесів

доктор технічних наук, професор
Волков Віктор Едуардович,
Одеський національний університет
імені І. І. Мечнікова,
завідувач кафедри теоретичної механіки

Захист відбудеться «03» листопада 2020 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «02» жовтня 2020 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тепличні комплекси – це сучасні складні організаційно-технічні об'єкти з біологічною складовою, основним елементом котрих є промислові теплиці, де реалізуються технології виробництва рослинної продукції в спорудах закритого ґрунту. Впродовж календарного року вони постачають значну частку рослинної продукції на ринок продовольства України. Конкуrentоздатність цієї продукції пов'язана з необхідністю пошуку балансу між витратами ресурсів на виробництво та її якістю.

Аналіз літературних джерел дав змогу зробити висновки, що ключовим елементом досягнення компромісу між витратами ресурсів та якістю продукції є система керування мікрокліматом у теплиці, а основні обмеження ефективності вирощування рослинної продукції в тепличних комплексах виникають внаслідок: по-перше, невизначеності, що є наслідком впливу природних збурень, які мають випадковий характер (температура і вологість зовнішнього середовища, сонячна радіація), неповноти інформації про стани рослин, параметрів середовища навколо них та якості рослинної продукції; по-друге, обмеженої інформації про взаємозв'язки між споживанням енергетичних ресурсів та станами рослин у просторово-розподілених фітокліматичних умовах їх розвитку та якості рослинної продукції; по-третє, відсутності загальних технічних принципів побудови систем автоматизації керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, із моніторингом якості цієї продукції. Зважаючи на зазначене, можна стверджувати, що нині вимоги до систем енергоефективного керування енергетичними потоками просторово-розподілених біотехнічних об'єктів – тепличних комплексів, постійно зростають, а наукові основи їх побудови відсутні.

Таким чином, необхідність забезпечення конкурентоздатності вітчизняного виробництва рослинної продукції у спорудах закритого ґрунту зумовлює актуальність вирішення складної науково-прикладної проблеми, а саме розроблення наукових основ створення енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, що функціонують в умовах невизначеності з моніторингом стану рослин та якості рослинної продукції. Вищезазначене зумовило вибір теми дисертації, встановлення її мети та завдань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилися у Національному університеті біоресурсів і природокористування України відповідно до наукових тематик: «Математичне моделювання в агротехнологіях» (номер державної реєстрації 0101U000664); «Розробка робототехнічних систем для біотехнічних об'єктів» (номер державної реєстрації 0112U007168, 2012–2016 рр.); «Розробка інтелектуального роботизованого електротехнічного комплексу для моніторингу фітостану та повітря в спорудах закритого ґрунту» (номер державної реєстрації 0116U001589, 2016–2017 рр.); «Розроблення технології діагностики якості

функціонування сільськогосподарських споживачів електричної енергії на основі використання ІР-технологій» (номер державної реєстрації 00493706; 0119U100829, 2019–2020 рр.).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертації – розроблення наукових основ створення системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, що функціонують в умовах невизначеності, для підвищення енергоефективності виробництва рослинної продукції, забезпечуючи при цьому її задану якість.

Для досягнення мети вирішувалися такі основні завдання:

- проаналізувати сучасні системи автоматизації, що супроводжують технологію виробництва рослинної продукції в тепличних комплексах;
- дослідити особливості біотехнічного об'єкта – промислової теплиці, для вдосконалення математичної моделі впливу основних факторів життєзабезпечення рослин на їх стани;
- дослідити режими функціонування систем автоматизації процесів керування енергетичними потоками в промисловій теплиці та розробити нові критерії, враховуючи при цьому просторове розподілення фітокліматичних умов виробництва та якість рослинної продукції;
- обґрунтувати концепцію побудови системи автоматизації процесів енергоефективного керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях;
- розробити мобільний робот для моніторингу та оцінки станів рослин, якості рослинної продукції та параметрів атмосфери в просторі промислової теплиці;
- розробити моделі та методи побудови енергоефективних систем автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому об'єкті – промисловій теплиці, що забезпечує задану якість рослинної продукції;
- реалізувати і провести дослідно-промислові випробування енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому об'єкті – промисловій теплиці, що забезпечує задану якість рослинної продукції.

Об'єкт дослідження – процеси керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових комплексах, що функціонують в умовах невизначеності.

Предмет дослідження – закономірності, моделі та методи побудови систем автоматизації з метою енергоефективного керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, що функціонують в умовах невизначеності, для забезпечення виробництва рослинної продукції заданої якості.

Методи дослідження. Для вирішення поставленої проблеми використано методи системного аналізу (для аналізу технологічного процесу вирощування томатів у теплиці), імітаційного і математичного моделювання (у тому числі

станів біологічної складової та руху мобільного робота фітомоніторингу з урахуванням просторово-розподілених параметрів об'єкта), нейронні мережі (для розроблення стратегії керування енергетичними потоками тепличних комплексів), положення теорії автоматичного керування, експериментальний метод дослідження. Експериментальна перевірка теоретичних положень проводилася у виробничих умовах і показала високу збіжність результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше розроблено інтелектуальний метод формування енергоефективних стратегій керування енергетичними потоками в біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, котрий відрізняється використанням нового критерію енергоефективності та нейромережевого аналізу, що мінімізує енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах дії зовнішніх природних збурень, неповної інформації про стани рослин та просторової розподіленості кліматичних умов.

Вперше запропоновано новий критерій ефективного використання енергетичних ресурсів, суть якого полягає у мінімізації різниці між відносними показниками фітокліматичного життєзабезпечення та фіторозвитку рослин, що зменшить енергетичні витрати, забезпечуючи задану якість рослин та продукції.

Вперше запропоновано поєднання нових критеріїв оцінки станів розвитку рослин та рослинної продукції, а саме фітометричного та фітотемпературного критеріїв, використання яких в системі автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції забезпечує задану якість рослин та продукції з урахуванням фаз розвитку рослин.

Вперше на основі використання рівняння Нав'є-Стокса розроблено просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, що дає можливість оцінювати значення температури як основного технологічного параметра в просторі теплиці та використовувати ці результати для формування оптимального маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу.

Вперше на основі математичного апарату вейвлет-перетворень розроблено метод безконтактного визначення фітометричних параметрів рослин, що дало змогу оперативно оцінювати якість розвитку рослини.

Вперше на основі методу варіаційного числення розроблено математичну модель переміщення мобільного робота, використання якої дало можливість мінімізувати енерговитрати його акумуляторної батареї.

Вперше на основі теорії ймовірнісних автоматів та стимулюючого навчання розроблено метод просторового орієнтування мобільного робота, що створює умови для його оптимального переміщення та оминання перешкод.

Вперше за результатами параметричного синтезу та методології оптимального проєктування і використання мобільних роботів розроблено раціональний варіант структури мобільного робота, який здійснює моніторинг фітостану та стану атмосфери, аналізує фітокліматичні дані й формує на цій основі рішення щодо оптимізації маршруту переміщення, планування послідовності дій, розпізнавання образів та перешкод, що забезпечує виконання поставлених завдань за мінімальних вартісних і часових витрат.

Вперше для виробництва продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, запропоновано нову концепцію побудови системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками, що функціонує на основі використання результатів фітомоніторингу, які надходять від мобільного робота, та нейромережевого аналізу.

Вперше на основі використання генетичного алгоритму встановлено оптимальну кількість основних факторів життєзабезпечення рослин, на підтримку яких витрачається 70 % енергетичних ресурсів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено і впроваджено систему керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» та Асоціації «Теплиці України». Оригінальність системи захищено патентами України. Її переваги над існуючими системами, що функціонують за принципом стабілізації технологічних параметрів вирощування, полягають у підвищенні виробництва якісної продукції в межах максимального свого значення за умов мінімізації енергетичних витрат як складової собівартості продукції.

Підготовлено рекомендації щодо розроблення та використання мобільного робота в спорудах закритого ґрунту (*розглянуто та затверджено технічною радою Міністерства аграрної політики та продовольства України*).

Результати дисертаційного дослідження використовуються під час підготовки фахівців зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» у Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

Особистий внесок здобувача. До дисертації увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить постановка завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення теоретичних і експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи здобувача. У докторській дисертації матеріали і висновки кандидатської дисертації здобувача відсутні.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і матеріали дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження в агропромисловій та природоохоронній сферах» (м. Київ, 2010 р.); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2012» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (м. Євпаторія, 2012 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК» (м. Київ, 2012 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи»

(м. Тернопіль, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергетики і прикладної біофізики в АПК» (м. Мелітополь, 2013 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні» (м. Київ, 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2014 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні» (м. Київ, 2015 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції пам'яті І. І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України» (м. Мелітополь, 2015 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (м. Київ, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2016 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2017 р.); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2017» (м. Київ, 2017 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2018 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2019 р.).

Публікації. Основні теоретичні та експериментальні результати наукових досліджень висвітлено у 57 наукових працях, з яких монографія, 14 статей у наукових фахових виданнях України, 12 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 8 статей у наукових виданнях інших держав, 9 патентів на корисні моделі, 13 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 403 сторінки. Робота містить 141 рисунок та 15 таблиць. Список використаних джерел налічує 295 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано наукову проблему, мету та завдання досліджень, висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, подано інформацію щодо апробації результатів досліджень та наукових публікацій за темою дисертації.

У першому розділі **«Сучасні технології виробництва рослинної продукції та системи автоматизації технологічних процесів у промислових теплицях»** проаналізовано особливості технологічних процесів виробництва продукції рослинництва тепличними комплексами. Наведено перелік і приведено характеристики систем, що забезпечують технологічні параметри виробництва (температура і вологість повітря, концентрація вуглецю в повітрі, температура рослин, інтенсивність світлового опромінення, забезпечення рослин поживними речовинами). До складу таких систем входять: котли опалення з електричними засобами; вентилятори з електричними приводами; мотор-редуктори; лампи досвічування; електричні насоси; електроклапани; пускозахисна апаратура, регулятори, програмні пристрої. Зазначені системи забезпечують формування стратегій керування складним біотехнічним об'єктом, яким є промислова теплиця.

У промислових теплицях – біотехнічних об'єктах, що вміщують біологічну складову – рослини, технологічні параметри мікроклімату, які створюють умови для вирощування рослин, формуються відповідними системами, функціонування котрих супроводжується споживанням значних обсягів енергетичних ресурсів, а це, у свою чергу, суттєво впливає на собівартість виробленої продукції. Так, під час вирощування томатів частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості продукції при її виробництві за голландськими технологіями іноді сягає 70 % (природного газу – 56 % та електричної енергії – 14 %). Формування стратегій керування відбувається шляхом стабілізації заданих технологічних параметрів. Однак у таких стратегіях не враховується просторове розподілення фітокліматичних умов виробництва рослинної продукції, її якість та власна реакція на такі природні збурення, як сонячна радіація, температура, концентрація CO₂ в повітрі, вологість навколишнього середовища.

Сьогодні проведено певні дослідження щодо оцінки впливу факторів навколишнього середовища на врожайність рослин. Проте не вистачає результатів досліджень щодо оцінки якості розвитку рослин та овочів протягом усього циклу вирощування. Водночас, для отримання якісної продукції потрібно контролювати і оцінювати значну кількість показників розвитку рослини на всіх фазах її росту (рис. 1).

Тривале дослідження атмосфери промислової теплиці дало можливість зробити висновки, що параметри мікроклімату в різних місцях її об'єму суттєво відрізняються від вимог технології. Це пояснюється великою кількістю поверхонь теплообміну, що сприяє тепловтратам, а значить і нерівномірному розвитку рослин (рис. 2).

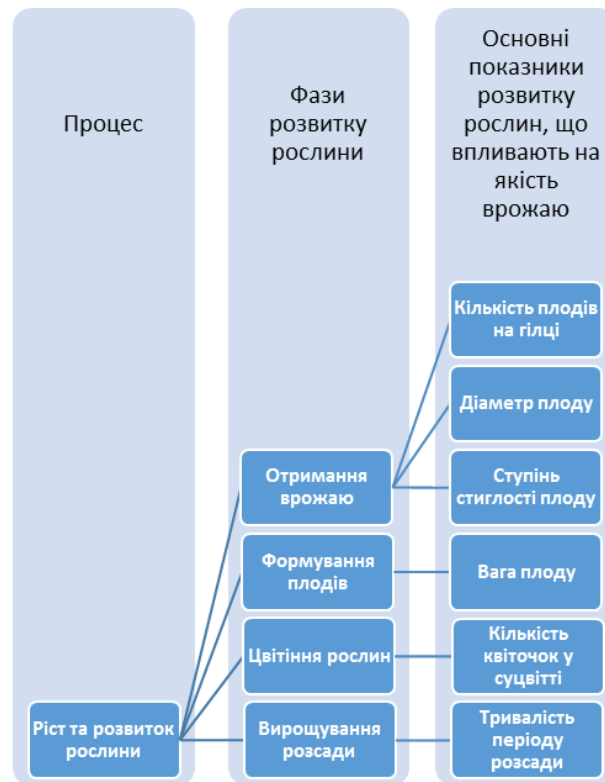


Рис. 1. Класифікація основних показників розвитку рослин

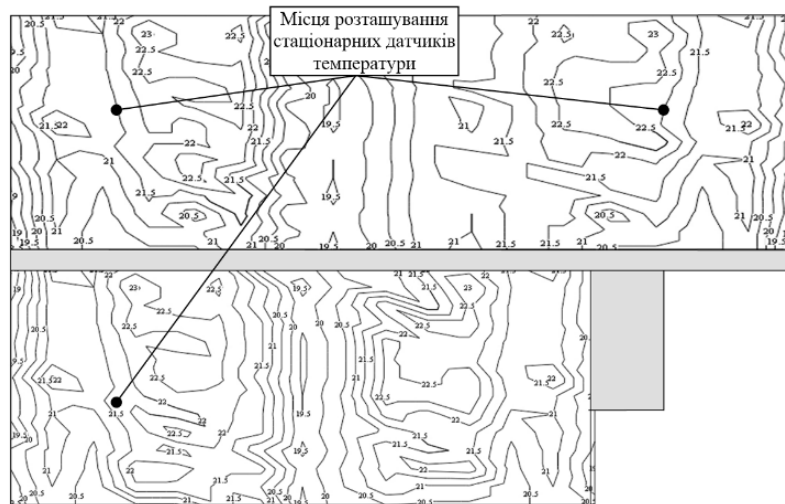


Рис. 2. Температурне поле у теплиці

Температура повітря, як основний технологічний фактор впливу на енергетичну характеристику виробництва, в атмосфері теплиці коливається від 18,4 до 23,1 °С, а температура рослин суттєво відрізняється від температури повітря (інколи на 7 °С), що знижує якість виробленої рослинної продукції та ефективність виробництва.

Сучасні системи керування, що використовуються в теплицях, реалізують алгоритми стабілізації, орієнтовані на максимальну продуктивність рослини, не враховуючи при цьому якість розвитку в просторі теплиці біологічної складової (рослини), на яку негативно впливає нерівномірне розподілення мікроклімату.

Такі системи мають ряд недоліків: відсутність можливості відстежувати реакцію рослин на дію керуючих та збурюючих впливів; нерівномірність розподілу температури повітря в просторі промислової теплиці; недостатня швидкодія системи керування та відсутність можливості компенсації збурення в окремих ділянках атмосфери теплиці; відсутність можливості оцінювати якість рослинної продукції та використовувати цю інформацію як зворотній зв'язок у системах автоматизації; значні витрати енергетичних ресурсів для забезпечення вимог технології вирощування рослинної продукції.

Аналіз сучасних технологій виробництва рослинної продукції та систем їх автоматизації в промислових теплицях дав змогу зробити такий висновок: виконання завдань щодо реалізації енергоефективного керування енергетичними потоками тепличних комплексів вимагає застосування принципово нових підходів в автоматизації, що зумовлено як самими об'єктами, так і більш жорсткими вимогами до ефективності керування ними. Автоматизація процесів керування на основі використання результатів моніторингу стану рослин і якості продукції забезпечить реалізацію заданої технології виробництва рослинної продукції в умовах тепличного комплексу з мінімальними витратами енергії.

У другому розділі **«Математичні моделі біотехнічних об'єктів з просторово-розподіленими параметрами»** побудовано математичні моделі, котрі відображають вплив основних факторів життєзабезпечення (температура і вологість повітря, концентрація CO₂ в повітрі, температура рослин, інтенсивність світлового опромінення, забезпечення рослин поживними речовинами) на основні показники розвитку рослин в біотехнічному об'єкті та призначені для якісного й кількісного опису росту і розвитку рослин, що перебувають у найтіснішій взаємодії з динамікою параметрів навколишнього середовища в промисловій теплиці. Одночасне поєднання факторів, що впливають на якісні та кількісні показники рослинної продукції, зумовлює формування врожаю. Зменшення впливу одного з факторів спричинює зменшення врожайності, що пояснюється принципом дії закону про мінімум, який стверджує, що всі фактори врожайності однаково потрібні рослинам і не можуть замінити один одного. За відсутності або нестачі одного з них врожайність та її якість різко знижується.

Використовуючи експериментальні дані, отримані протягом сезону вирощування рослин, проведено опис впливу факторів життєзабезпечення на основні показники якості розвитку рослин із застосуванням стандартної методики, в основу якої покладено метод найменших квадратів. Таким чином було отримано такі рівняння регресії впливу температури повітря та інтенсивності світла (рис. 3) на:

– формування рослиною кількості квіточок у суцвітті (1):

$$K1(L \cdot \Theta) = 11,875 - 0,125 \cdot \Theta - 5,2643 \cdot L - 0,01234 \cdot L \cdot \Theta^2 + 0,48125 \cdot L \cdot \Theta + 0,786184 \cdot L^2 - 0,07 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,001711 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

– кількість плодів на гілці (1):

$$K2(L \cdot \Theta) = 5,94375 - 0,08125 \cdot \Theta + 0,258117 \cdot L - 0,00057 \cdot L \cdot \Theta^2 + 0,035313 \cdot L \cdot \Theta + 0,040352 \cdot L^2 - 0,00388 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,000362 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

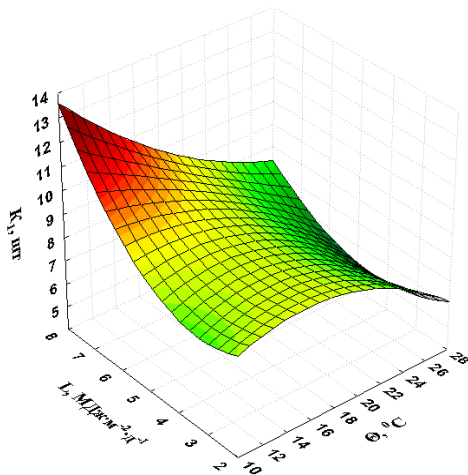
– середню вагу плоду (3):

$$K3(L \cdot \Theta) = 136,667 - 5 \cdot \Theta - 62,058 \cdot L - 0,06743 \cdot L \cdot \Theta^2 + 4,7375 \cdot L \cdot \Theta + 5,72281 \cdot L^2 - 0,35 \cdot \Theta \cdot L^2 + 0,003684 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

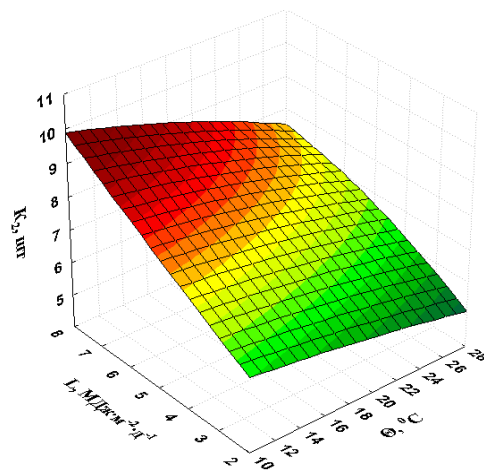
– приріст ваги плоду (4):

$$K5(L \cdot \Theta) = 17,5 + 2,5 \cdot \Theta - 45,821 \cdot L - 0,06456 \cdot L \cdot \Theta^2 + 2,76562 \cdot L \cdot \Theta + 2,88207 \cdot L^2 + 0,00625 L^2 \cdot \Theta + 0,000493 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

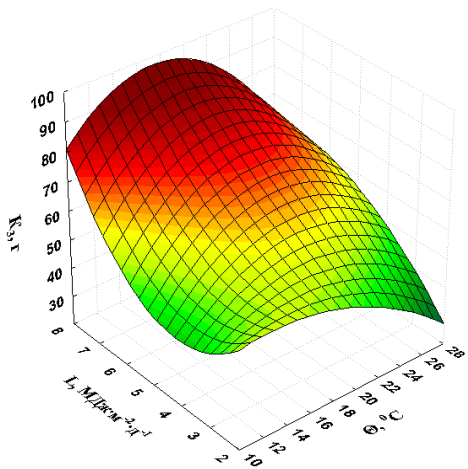
де Θ – середньодобова температура повітря в теплиці, °C; L – інтенсивність сонячної радіації, МДж/м² за добу.



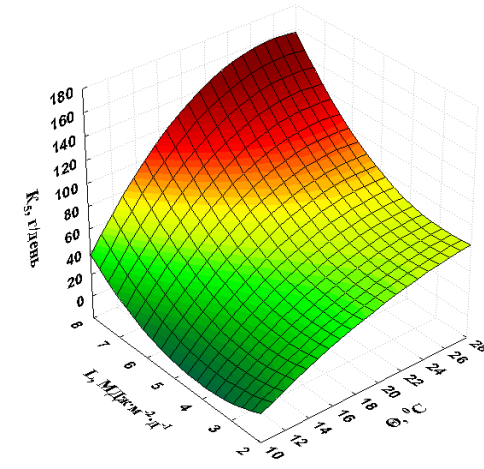
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на: а) формування рослиною кількості квіточок у суцвітті; б) кількість плодів на гілці; в) середня вагу плоду; г) приріст ваги плоду

Отримані рівняння регресії дають змогу прогнозувати врожайність та якість розвитку рослини, враховуючи рівень впливу факторів навколишнього середовища. При цьому коефіцієнти моделі постійно треба корегувати під час кожної зміни характеристик біологічного об'єкта (для томатів це сорт).

На основі генетичного алгоритму в промисловій теплиці визначено основні фактори впливу на розвиток рослини та якість рослинної продукції. Ці фактори слід передбачати для використання системами керування виробництвом, оскільки для компенсації їх впливу витрачається природний газ, електроенергія, вода, розчини живлення тощо.

Для вибору найкращого варіанта набору вхідних даних (максимізують виробництво продукції заданої якості за умов мінімізації енергетичних ресурсів) слід провести аналіз всіх можливих варіантів. Задача оптимізації формулюється на основі використання критерію:

$$Q^* = Q(\bar{x}^*) = \max_{x \in D} (\min) Q(\bar{x})^*, \quad (5)$$

де Q – критерій оптимальності; \bar{x}^* – оптимальний розв’язок; $Q^* = Q(\bar{x}^*)$ – найменше значення критерію оптимальності (контрольної похибки) серед усіх його значень в області D .

Опрацювання експериментальних даних проводили в Genetic Algorithm Input Selection пакету ST Neural Networks, що реалізує автоматизований підхід до вибору вагомих вхідних даних за аналогією, встановивши вісім входів та один вихід (рис. 4).

	Исчерпывающее оценивание (Оптим.простору.sta)								
	Ошибка	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8
1.230	0,229693	Да	Да	Да	-	-	Да	-	Да
1.231	0,230258	Да	Да	Да	-	-	Да	Да	-
1.232	0,229404	Да	Да	Да	-	-	Да	Да	Да
1.233	0,230449	Да	Да	Да	-	Да	-	-	-
1.234	0,229581	Да	Да	Да	-	Да	-	-	Да
1.235	0,230161	Да	Да	Да	-	Да	-	Да	-
1.236	0,229322	Да	Да	Да	-	Да	-	Да	Да
1.237	0,230256	Да	Да	Да	-	Да	Да	-	-
1.238	0,229402	Да	Да	Да	-	Да	Да	-	Да
1.239	0,229972	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да	-
1.240	0,229147	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да	Да
1.241	0,230472	Да	Да	Да	Да	-	-	-	-
1.242	0,229587	Да	Да	Да	Да	-	-	-	Да
1.243	0,230166	Да	Да	Да	Да	-	-	Да	-
1.244	0,229310	Да	Да	Да	Да	-	-	Да	Да
1.245	0,230277	Да	Да	Да	Да	-	Да	-	-
1.246	0,229405	Да	Да	Да	Да	-	Да	-	Да
1.247	0,229975	Да	Да	Да	Да	-	Да	Да	-
1.248	0,229132	Да	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да
1.249	0,230164	Да	Да	Да	Да	Да	-	-	-
1.250	0,229308	Да	Да	Да	Да	Да	-	-	Да
1.251	0,229892	Да	Да	Да	Да	Да	-	Да	-
1.252	0,229065	Да	Да	Да	Да	Да	-	Да	Да
1.253	0,229973	Да	Да	Да	Да	Да	Да	-	-
1.254	0,229130	Да	Да	Да	Да	Да	Да	-	Да
1.255	0,229706	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	-
1.256	0,228890	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Конечный	0,228765	-	-	-	Да	Да	Да	Да	Да

Рис. 4. Результат оптимізації простору входів (Statistica Neural Networks): Var1 – швидкість руху повітря; Var2 – температура ґрунту; Var3 – вологість ґрунту; Var4 – світлове опромінення; Var5 – концентрація CO₂ в повітрі; Var6 – вологість повітря; Var7 – поживні речовини; Var8 – температура повітря

За результатами аналізу матеріалів, поданих на рис. 4, можна зробити висновок, що не всі вхідні параметри, вибрані для оцінки рівня якості розвитку рослин, значимі щодо оптимізації простору входів.

Отже, для побудови нейронної мережі доцільно використовувати лише дослідні дані Var4–Var8 із рангом чутливості споживання енергетичних ресурсів від вхідних параметрів 1–5. З аналізу поверхонь відгуків між вхідними

параметрами та вихідним (рис. 5) впливає очевидний нелінійний взаємозв'язок між ними. Встановлено, що основні фактори, які впливають на якісні та кількісні показники рослинної продукції, можна звести до інтенсивності світлового опромінення, вологості повітря, температури повітря, забезпечення рослини поживними речовинами, концентрації CO_2 в повітрі.

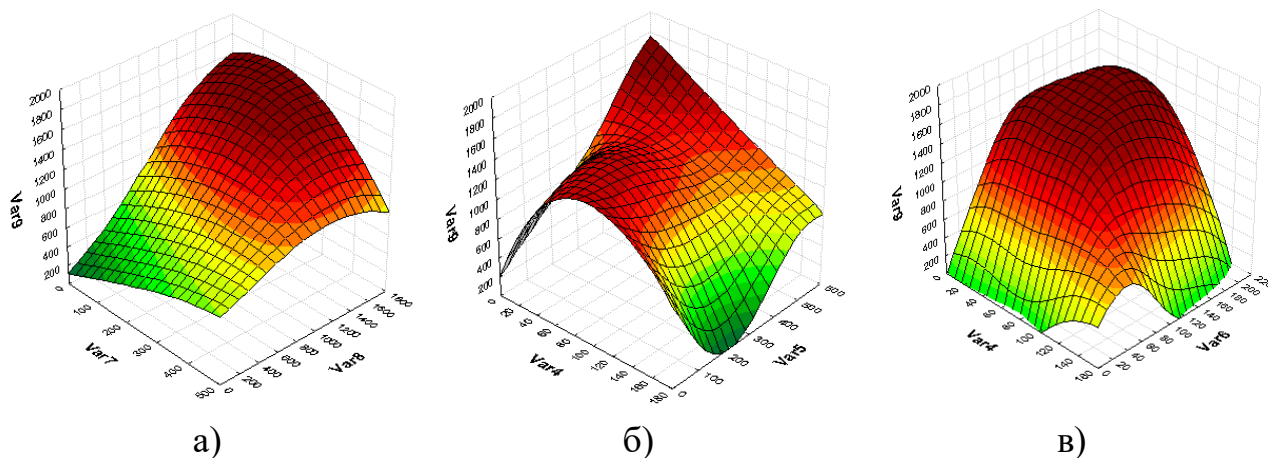


Рис. 5. Поверхні відгуку загального споживання енергетичних ресурсів на забезпечення технології виробництва рослинної продукції і споживанням енергетичних ресурсів відповідними системами керування: а) поживними речовинами і температурою повітря; б) світлом і вуглекислим газом; в) світлом і вологістю повітря

Результати проведених досліджень виявили, що в денний період часу температура рослини збільшується за рахунок впливу сонячної радіації, попри те, що температура повітря в теплиці залишається незмінною. Оскільки перегрівання рослин (інколи на 7°C) може негативно вплинути на їх розвиток, для формування керуючих дій необхідно відстежувати і враховувати не лише температуру середовища, а й температуру рослин.

Для оцінки показників розвитку рослини та якості рослинної продукції на всіх фазах її розвитку використали вейвлет-перетворення. При цьому визначалися кількість квіточок в суцвітті – формування майбутнього врожаю, розмір плода томата і його колірність – стиглість. Вейвлет-перетворення реалізовувалося у програмному середовищі LabVIEW за таким алгоритмом: вхідне зображення передавалося у базу даних, потім пересилалося до програмного забезпечення для його розпізнавання за технологією вейвлет-аналізу.

Зображення плодів та суцвіття рослин розпізнаються, а потім за результатами порівняльного аналізу формуються висновки щодо їхньої стиглості та майбутньої кількості томатів: за зображеннями плодів та квіточок $f(x, y)$, отриманих із використанням встановлених на мобільному роботі технічних засобів зору, виконують вейвлет-перетворення для знаходження вейвлет-коефіцієнтів:

$$f(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{r=0}^r \lambda_{r,i,j}^{HH} \varphi_{r,i}(x) \varphi_{r,j}(y) + \sum_{y=r}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} (\lambda_{y,i,j}^{HV} \varphi_{y,i}(x) \psi_{y,j}(y) + \lambda_{y,i,j}^{VH} \psi_{y,i}(y) \varphi_{y,j}(x) + \lambda_{y,i,j}^{VV} \psi_{y,i}(y) \psi_{y,j}(x)), \quad (6)$$

Де $\varphi_{y,i}(x) = 2^{\frac{y}{2}} \varphi(2^y x - i)$, $\psi_{y,j}(x) = 2^{\frac{y}{2}} \varphi(2^y x - j)$, $\varphi_{y,j}(x) = 2^{\frac{y}{2}} \varphi(2^y x - j)$, $\psi_{y,i}(y) = 2^{\frac{y}{2}} \varphi(2^y y - i)$, $i = \overline{1, w}$, $j = \overline{1, h}$, $w \times h$ – розмірність розпізнаного зображення; r – глибина вейвлет-розкладу функції; $\lambda_{r,i,j}^{VV}$, $\lambda_{y,i,j}^{HV}$, $\lambda_{y,i,j}^{VH}$, $\lambda_{y,i,j}^{HH}$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення.

Знайдені вейвлет-коефіцієнти розкладаються у просторі власних векторів. Таким чином знаходиться вектор ознак для вхідного зображення. Потім знаходяться відстані між отриманим вектором ознак і кожним із векторів навчальної вибірки. Об'єкт, що відповідає умові мінімальної різниці відстані між отриманим вектором ознак і кожним із векторів навчальної вибірки, і є розпізнаним об'єктом. Проведено дослідження розпізнавання плоду та суцвіття за зображеннями (рис. 6).

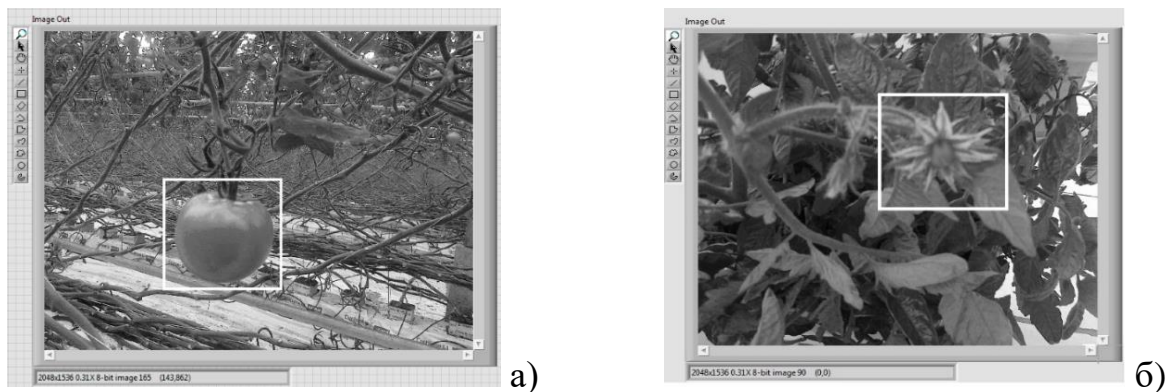


Рис. 6. Розпізнаний плід та суцвіття помідора: а) плід помідора; б) суцвіття помідора

Після розпізнавання плоду рослини виділяються такі основні ознаки: колір плоду та суцвіття, структура і контури. Відповідні дані використовуються для подальшої оцінки якості томатів за створеною шкалою якості. Розроблений метод безконтактного визначення у промисловій теплиці фітотричних параметрів рослин дає змогу оцінювати якість розвитку рослин в загальному алгоритмі формування стратегій керування.

Розроблено на основі використання рівняння Нав'є-Стокса просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, що дає можливість оцінювати значення температури в її просторі та використовувати ці результати для формування маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу.

Для побудови просторової моделі розподілення температур в теплиці визначено фактори, що мають найбільшу вагу під час формування температурного поля. Температура повітря в теплиці є результатом тепло-і масообміну між внутрішнім повітрям, певними технологічними складовими в теплиці (система опалення, вентиляції, рослини) та зовнішніми чинниками (повітря за межами теплиці, сонячна радіація) (рис. 7).

Із використанням чисельного моделювання досліджено процеси теплообміну в теплиці, які включають такі фактори: сонячна радіація, конвекція, природна вентиляція і система опалення. Переміщення потоків повітря в теплиці з природною вентиляцією подано на основі рівнянь Нав'є-Стокса для ламінарного режиму течії:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де ρ – густина середовища, кг/м^3 ; μ – динамічна в'язкість середовища, $\text{Па}\cdot\text{с}$; p – тиск, Па ; u, v, w – векторне поле швидкостей; t – час, с .

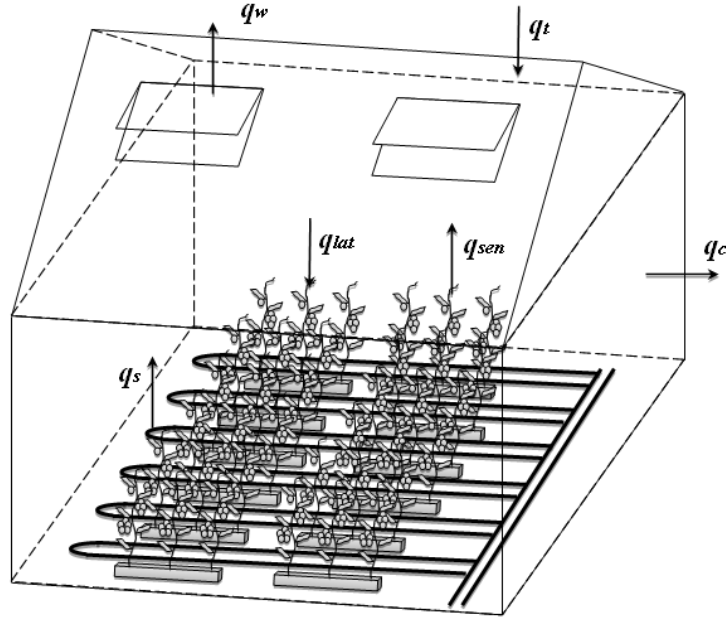


Рис. 7. Теплообмін в середовищі теплиці: q_t – тепловий потік в результаті дії сонячної радіації; q_s – тепловий потік системи опалення; q_w – тепловий потік через систему вентиляції; q_{lat}, q_{sen} – теплообмін між поверхнею листа рослин та навколишнім середовищем; q_c – тепловтрати через зовнішні огорожі

Рівняння збереження енергії має вигляд:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(\tau, x, y, z), \quad (8)$$

де T – температура в деякій точці, K^0 ; λ – коефіцієнт теплопровідності середовища, $\text{Вт/м}\cdot\text{K}^0$; C_p – питома теплоємність середовища, $\text{Дж/кг}\cdot\text{K}^0$. Теплові джерела $Q(\tau, x, y, z)$ враховують теплообмін між рослиною і зовнішнім повітрям в теплиці.

Для моделювання надходження потоку сонячної радіації до простору теплиці використовується модель дискретних ординат, що ґрунтується на передачі тепла через прозорі поверхні купола теплиці. Рівняння передачі випромінювання для поглинаючого, випромінюючого та розсіюючого середовища в положенні \vec{r} для напрямку \vec{s} є:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega', \quad (9)$$

де \vec{r} – вектор положення; \vec{s} – вектор напрямку; \vec{s}' – вектор напрямку розсіювання; s – довжина шляху; α – коефіцієнт поглинання; n – показник заломлення; σ_s – коефіцієнт розсіювання; σ – константа Стефана-Больцмана ($5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴); I – інтенсивність випромінювання, що залежить від положення (\vec{r}) і напрямку (\vec{s}); T – місцева температура; Φ – фазова функція; Ω' – суцільний кут; $(\alpha + \sigma_s)s$ – оптична товщина або непрозорість середовища. Показник заломлення n важливий під час розгляду випромінювання в напівпрозорих середовищах.

Модель теплогенерації під час транспірації в рослині ґрунтується на рівнянні Пенмана-Монтейта:

$$q_{lat} = \frac{R_n \Delta + 2L_{ai} \left(\frac{\rho c_a}{r_a} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_a)}, \quad (10)$$

де e_s – тиск насиченої водяної пари; e_a – реальний тиск водяної пари у повітрі; γ – психометрична постійна; Δ – змінна розподілення водяної пари у повітрі.

Безпосередньо чисельне моделювання проводилося у середовищі Ansys Fluent 14. Отримано просторову модель одного блока теплиці згідно з її геометричними розмірами та просторово-розподілену модель температурного поля. Величина похибки при цьому не перевищує 5 %. На рис. 8 показано результати чисельного моделювання розподілу температур при відчинених фрамугах.

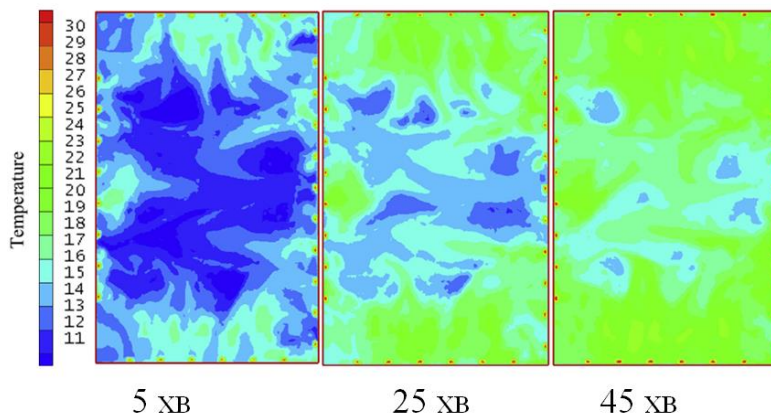


Рис. 8. Зміна температурного поля при відчинених фрамугах

Отримані моделі використано для формування і реалізації відповідних стратегій керування в системі автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах.

У третьому розділі **«Концепція побудови системи енергоефективного керування енергетичними потоками тепличних комплексів»** приведено структуру системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, фітотемпературний та фітотемпературний критерії, їх поєднаний зв'язок з енергоефективністю, що створило основу для розроблення концепції енергоефективної системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів.

Для тепличних комплексів під час виробництва овочевої продукції найважливішим завданням є отримання максимально можливого прибутку,

величина якого визначається обсягами продукції, її якістю та витратами, що супроводжують виробництво. Зазначене досягається шляхом створення систем, що формують стратегії керування технологією виробництва рослинної продукції, які, із врахуванням біологічних особливостей рослин, природних збурень та якості рослинної продукції, забезпечують вирішення такого завдання. Концептуальну структуру такої системи показано на рис. 9.

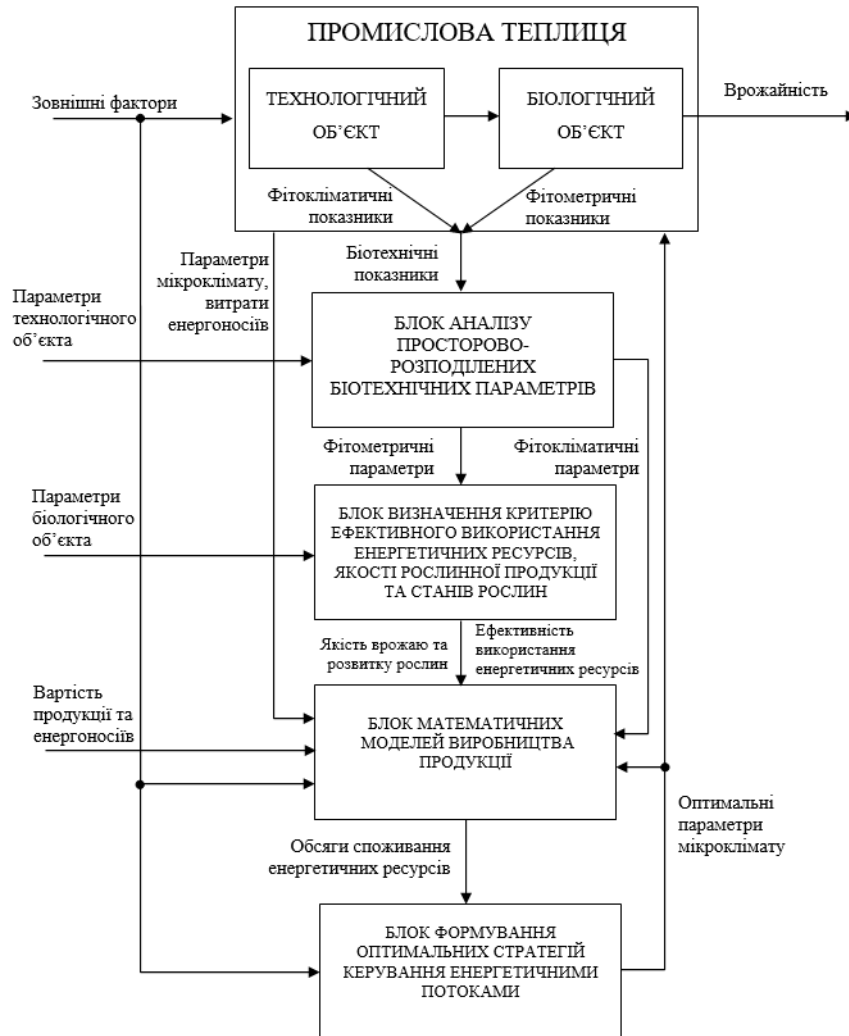


Рис. 9. Концептуальна структура системи керування енергетичними потоками

Проведено оцінку рівня якості розвитку рослин з використанням методу, що базується на основі використання фітометричного критерію. Оцінка якості розвитку рослин зазначеним методом полягає в такому: 1) показники якості об'єднують в групи, для кожної визначають груповий комплексний показник, найбільш значимі одиничні показники не включають в групи, а розглядають окремо; для якісної оцінки показники групують за характерними властивостями; 2) знайдені величини згрупованих комплексних і окремо виділених найбільш важливих одиничних показників порівнюють з відповідними значеннями базових показників, тобто застосовують принцип диференціального методу; 3) всі обрані показники і групи зводять в комплексний визначальний показник, на підставі якого здійснюють остаточну оцінку рівня якості томатів.

Фітометричний критерій K характеризується значною кількістю показників розвитку рослини в різних її фазах, а саме: цвітіння, формування плоду та отримання врожаю, які мають різні вимірювальні шкали. Для приведення їх до однієї шкали оцінювання якості розвитку рослин була використана залежність:

$$\Phi_M = f(K_1, K_2, \dots K_n), \quad (11)$$

де $K_1, K_2, \dots K_n$ – окремі показники якості розвитку рослини в різних фазах.

У загальному вигляді на основі комплексного середньозваженого арифметичного і геометричного визначення показників якості розвитку рослини вираз для оцінки якості томатів представимо як:

$$K = \sum_{j=1}^T \left(A_j \cdot \sum_{i=1}^{H_j} (a_i \cdot k_i) \right) = \sum_{j=1}^T (A_j \cdot G_{jg}), \quad (12)$$

де T – кількість груп показників якості томатів; H – число показників якості в j -й групі; a_i – коефіцієнт вагомості i -ї властивості; k_i – відносний i -й показник якості; G_{jg} – рівень якості j -ї групи показників ($0 \leq G_{jg} \leq 1$); A_j – параметр вагомості j -ї групи показників якості томатів.

З використанням принципів кваліметрії було отримано комплексні показники оцінки якості розвитку рослини (K_1 – K_n):

– формування рослиною кількості квіточок у суцвітті (13):

$$K_1 = -0,05417 + 0,0375 \cdot \Theta - 0,55843 \cdot L - 0,00225 \cdot L \cdot \Theta^2 + \\ + 0,066563 \cdot L \cdot \Theta + 0,11419 \cdot L^2 - 0,01188 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,000339 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

– формування рослиною кількості плодів на гілці (13):

$$K_2 = 0,24375 - 0,03125 \cdot \Theta - 0,00203 \cdot L - 0,00013 \cdot L \cdot \Theta^2 + \\ + 0,014219 \cdot L \cdot \Theta + 0,020176 \cdot L^2 - 0,00194 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,0000181 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

– середня вага плоду (15):

$$K_3 = 1,79762 - 0,08929 \cdot \Theta - 1,1082 \cdot L - 0,0012 \cdot L \cdot \Theta^2 + \\ + 0,084598 \cdot L \cdot \Theta + 0,102193 \cdot L^2 - 0,00625 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,0000658 \cdot L^2 \cdot \Theta^2;$$

– приріст ваги плоду (16):

$$K_4 = 0,211504 + 0,01404 \cdot \Theta - 0,39973 \cdot L - 0,00051 \cdot L \cdot \Theta^2 + \\ + 0,023981 \cdot L \cdot \Theta + 0,027996 \cdot L^2 - 0,00039 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,00000930 \cdot L^2 \cdot \Theta^2.$$

Оцінка якості розвитку рослини за інтегральною залежністю показників з однаковим ваговим коефіцієнтом 0,25 дала змогу отримати залежність фітометричного критерію якості розвитку рослини від впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла (рис. 10).

Для забезпечення технологічних вимог вирощування якісної рослинної продукції в теплиці запропоновано оцінку температур рослин (Θ_p) і атмосфери теплиці (Θ) проводити на основі використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин (рис. 11):

$$\Phi_M(\Theta_p, \Theta) = -4,96 + 0,059 \cdot \Theta_p - 0,243 \cdot \Theta + 0,027 \cdot \Theta_p \cdot \Theta + \\ + 0,0031 \cdot \Theta_p - 0,0091 \cdot \Theta - 0,0175 \cdot \Theta_p^2 - 0,0175 \cdot \Theta^2. \quad (17)$$

Для визначення показника життєзабезпечення рослини (Φ_K) на всій площі теплиці застосовуємо такий алгоритм. Нехай $\tilde{v}_{ij}(\tilde{t}_{jk})$ – значення показника життєзабезпечення рослини, визначеного в i -му ряду j -го місця за відповідної сумарної інтенсивності сонячної радіації (\tilde{t}_{jk}), де $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, n}$; n – кількість

рядів; k – номер вимірювання в ряду ($k = \overline{1, K_j}$); K_j – кількість вимірюваних факторів життєзабезпечення рослини в j -му місці; ($j = \overline{1, m}$); m – кількість вимірів.

Ці значення описують Φ_k для усіх рядів та місць за однакової сумарної інтенсивності сонячної радіації.

Визначимо усереднене значення $\tilde{v}_{ij}(\tilde{t}_{jk})$ в рядах:

$$\bar{v}(t_k) = \sum_{i=1}^n w_j v_{ij}(t_k) \quad (j = \overline{1, m}); \quad (k = \overline{1, N}), \quad (18)$$

де w_j – вагомих коефіцієнтів зваженого усереднення.

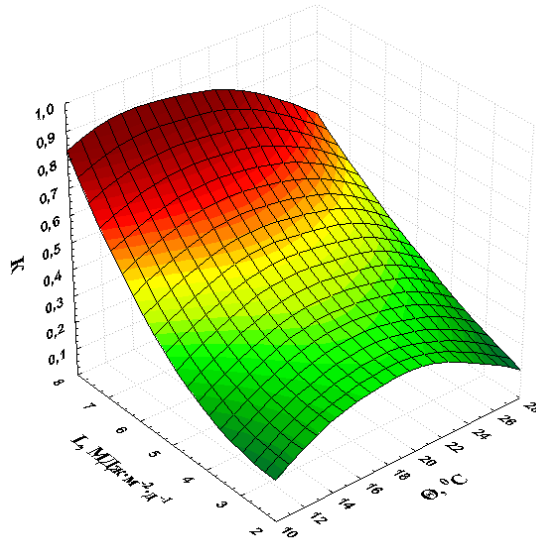


Рис. 10. Залежність фітометричного критерію від середньодобової температури повітря та інтенсивності світла

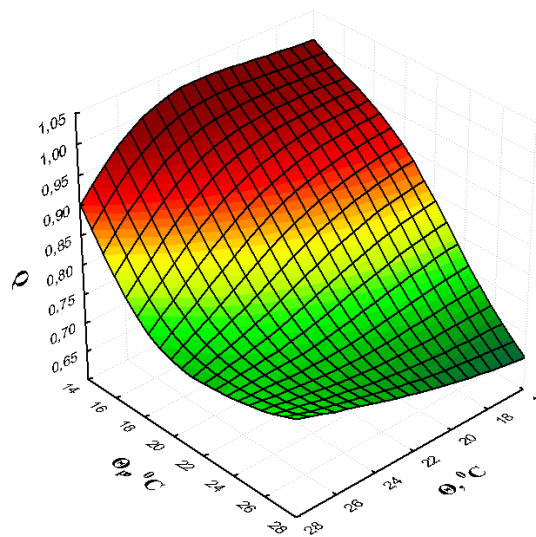


Рис. 11. Залежність фітотемпературного критерію від температур повітря та рослини

Середнє значення показника життєзабезпечення рослини на всій площі теплиці визначено як:

$$\bar{v}(t_k) = n^{-1} \sum_{i=1}^n \bar{v}(t_k) \quad (k = \overline{1, N}). \quad (19)$$

За розглянутим алгоритмом визначено середні значення фітометричного критерію, фітотемпературного критерію та їх середнє значення в рядах (рис. 12) і на всій площі теплиці, що дасть змогу встановити рівень розвитку рослин та якості врожаю.

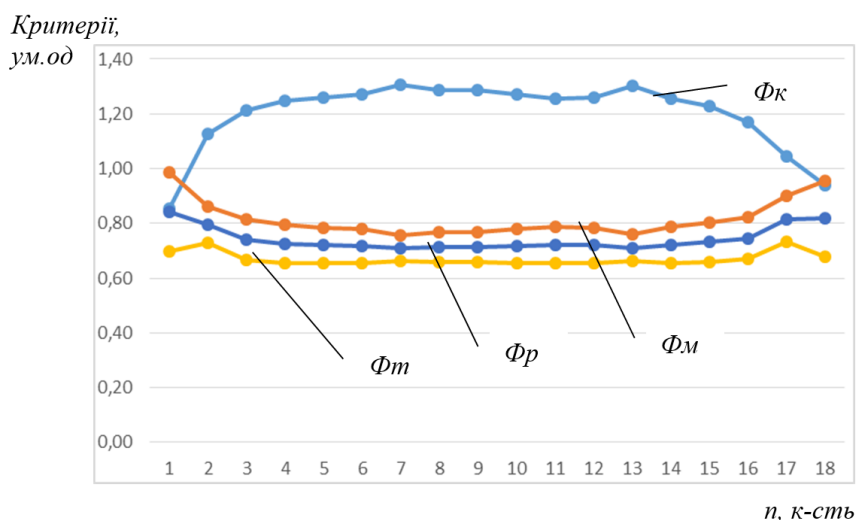


Рис. 12. Залежність зміни середнього значення показника життєзабезпечення рослини (Φ_k), фітометричного (Φ_m) та фітотемпературного (Φ_t) критеріїв на всій площі в рядах

Встановлено, що середнє значення фітокліматичного показника $\Phi_k=1,2$, фітометричного критерію $\Phi_m=0,82$, фітотемпературного критерію $\Phi_t=0,67$ та їх усередненого значення показника фіторозвитку $\Phi_r=0,74$ на всій площі теплиці.

Перевищення значення показника $\Phi_k > 1$ говорить про надмірний рівень встановлених агротехнологією параметрів життєзабезпечення рослини, відповідно і про перевитрати енергетичних носіїв на їх забезпечення. Значення показника $\Phi_r < 1$ свідчить про недостатній рівень розвитку рослин та якісної рослинної продукції в теплиці. Отримання якісної продукції при мінімальному споживанні енергетичних ресурсів можливе за умови мінімізації критерію ефективного використання енергетичних ресурсів під час виробництва рослинної продукції заданої якості:

$$R = \Phi_k - \Phi_r \rightarrow \min. \quad (20)$$

Стратегія ефективного керування полягає у зменшенні середньоквадратичного відхилення між фітокліматичним показником життєзабезпечення рослин та значенням показника фіторозвитку, коли його зростання говорить про неефективне споживання енергоносіїв існуючою системою керування технологією виробництва рослинної продукції заданої якості.

За результатами кореляційного аналізу показників виробництва отримано оцінку щільності зв'язку (за значенням лінійного коефіцієнта кореляції між збурюючими факторами – температурою повітря та рівнем освітленості), якості розвитку рослини, якості продукції та енергоефективності. Отримані результати свідчать про відсутність лінійного зв'язку між цими важливими показниками виробничих процесів, оскільки всі коефіцієнти кореляції менші 0,3.

Отже, встановлено нелінійність та нестаціонарність процесів, відсутність можливості формалізувати зв'язки між виробничими параметрами з використанням класичних підходів (кореляційного аналізу), зокрема між якістю розвитку рослини, якістю продукції та енергоефективністю, враховуючи наявність збурень. Тому для розроблення концепції функціонування системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками та моделювання використано математичний апарат нейронних мереж, що рекомендується для використання в умовах стохастичності, нелінійності, розмитості інформаційної складової.

Для визначення впливу технологічних параметрів, якості та кількості рослинної продукції на споживання енергетичних носіїв у спорудах закритого ґрунту було проведено дослідження з використанням нейронної мережі:

– за результатами використання пасивного експерименту синтезується нейромережева модель (НМ1) впливу природних збурень (температури і сонячної радіації), показників фітокліматичного та фіторозвитку рослини на виробничі показники (прибуток, обсяги виробництва якісної продукції, витрати природного газу та електроенергії) та кількості виробленої продукції заданої якості;

– за результатами використання пасивного експерименту синтезується нейромережева модель (НМ2) впливу природних збурень (температури і сонячної радіації), мінімальних витрат електроенергії на забезпечення потреби в енергетичних ресурсах кожного з факторів життєзабезпечення рослин;

– із використанням попередньо створеної нейромережі (НМ1) формується енергоефективна вибірка: вибираються такі комбінації вхідних змінних, коли виробництво продукції максимально можливе; отримані при цьому значення витрат природного газу на забезпечення технології виробництва рослинної продукції та електроенергії будуть мінімальними для вирощування якісної рослинної продукції, а прибуток максимальним; такий набір даних зберігається у базі знань для подальшого синтезу відповідної нейромережі.

Стратегії системи керування виробництвом рослинної продукції, що супроводжують виробництво томатів, розраховувалися із використанням двох послідовно з'єднаних нейронних мереж (рис. 13).



Рис. 13. Нейронні мережі для оцінки виробництва продукції та витрати енергоносіїв

Для формування енергоефективної стратегії керування системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками з використанням інформації про стан біологічної складової було використано, як уже зазначалося, штучні нейронні мережі, оскільки вирішення означеного завдання здійснювалося в умовах невизначеності, що формуються природними збуреннями та особливостями біологічної складової. Для синтезу та дослідження відповідних нейронних мереж використано демоверсію програмного пакету Statistica Neural Networks. Критерій навчання – мінімізація помилки нейронної мережі. У контексті завдання перевага такого пакета над аналогічними розробками полягає у реалізації функціонального блока оптимізації архітектури нейромоделей, що використовує лінійні підходи та метод «відпалювання» на основі розподілу ймовірностей Гіббса:

$$P(\bar{x}^* \rightarrow \bar{x}_{i+1} | \bar{x}_i) = \begin{cases} 1, F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) < 0 \\ \exp(-\frac{F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i)}{Q_i}), F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) \geq 0 \end{cases}, \quad (21)$$

де $Q_i > 0$ – елементи довільно спадаючої до нуля послідовності.

Найвищу точність при цьому показали нейронні мережі зі структурою «багатошаровий перцептрон» (рис. 14). Для зменшення величини похибки шляхом використання «Конструктора мереж» у програмному пакеті Statistica Neural Networks проведено додаткове навчання, за рахунок чого нейронна мережа забезпечила похибку навчання 2,9 %, а контрольну – 2,3 %.

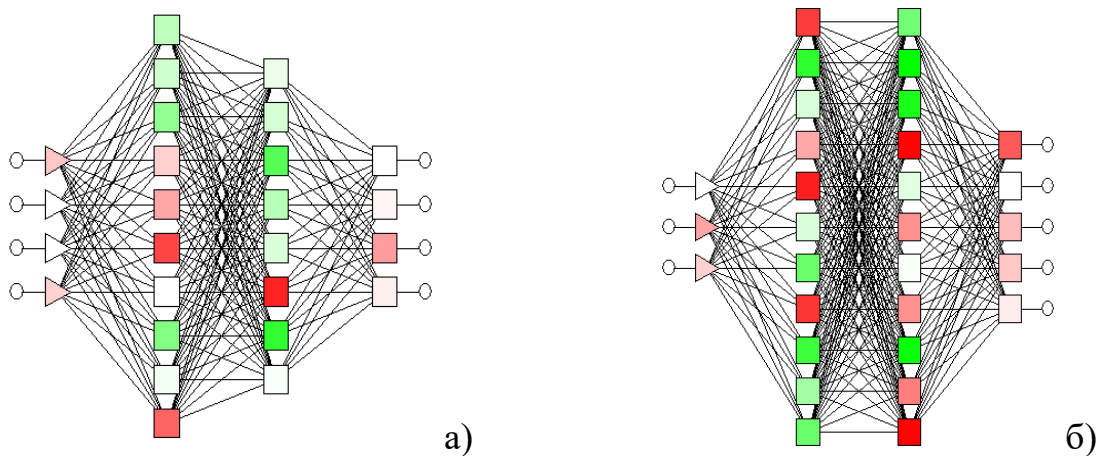


Рис. 14. Архітектури нейронних мереж: а) НМ1 (для оцінки споживання енергетичних носіїв технологічними процесами); б) НМ2 (для оцінки кількості виробленої продукції, витрати природного газу та електроенергії)

Для забезпечення виробництва рослинної продукції заданої якості при ефективному споживанні енергоносіїв існуючими системами керування реалізацією технології виробництва рослинної продукції за результатами використання нейронних мереж отримано залежності споживання природного газу системою керування (а) та електроенергії (б) для забезпечення технологічних вимог вирощування якісної рослинної продукції в теплиці, враховуючи природні збурення (рис. 15). Отримано залежності прибутку від кількості продукції та її якості (рис. 16).

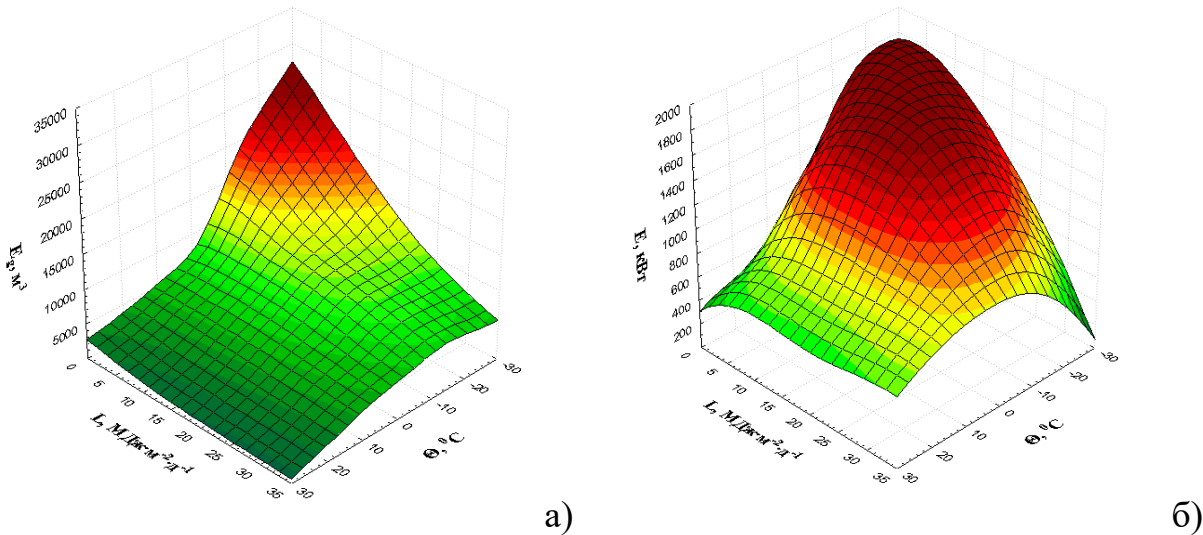


Рис. 15. а) витрати природного газу системою керування; б) електроенергії на забезпечення технологічних вимог вирощування якісної рослинної продукції в теплиці

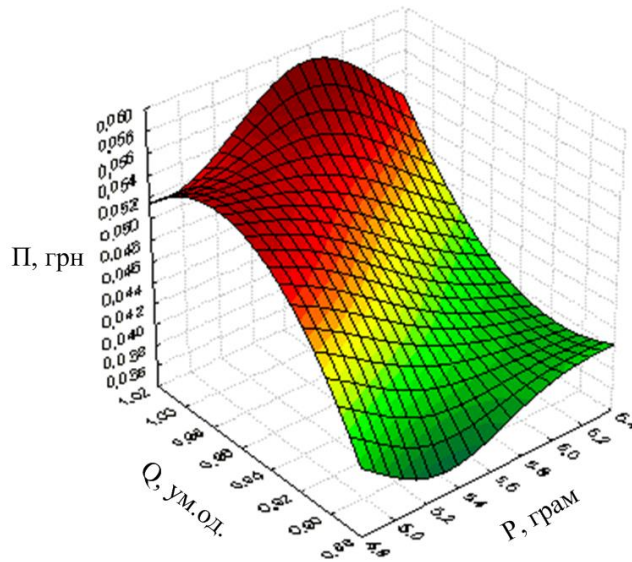


Рис. 16. Результати роботи нейронних мереж: а) залежність якості продукції від температур повітря та рослини; б) залежність прибутку від кількості та якості продукції

Використання фітотемперичного та фітотемпературного критеріїв під час регулювання параметрів мікроклімату в теплиці дає можливість отримувати до 180 г приросту урожаю з одного куща за добу. Показник фіторозвитку рослини перебуває в межах від 0,01 до 1, а відповідним діапазонам показника якості присвоюється індекс від 1 до 5, що буде використано для побудови математичних моделей та розрахунків за цими моделями. Під час виробництва томатів у спорудах закритого ґрунту в якості критерію ефективності виробництва використовуємо прибуток:

$$П = \sum_{j=1}^5 C_j \cdot N_j - (C_g \cdot E_g + C_e \cdot E_e) \rightarrow \max, \quad (22)$$

де $Y=1..5$ – індекс якості врожаю; C_y, C_g, C_e – вартості одиниці продукції відповідної якості, природного газу та електроенергії, грн; N_y – кількість виробленої продукції відповідної якості, кг; E_g – величина витраченого природного газу, м³; E_e – величина витраченої електричної енергії, кВт.

За результатами досліджень розроблено структуру системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в промисловій теплиці, до складу якої, окрім традиційних складових, входить інтелектуальний мобільний робот, який, переміщуючись площею теплиці технологічними направляючими, відстежує параметри атмосфери та фітостан рослин із прив'язкою до місця дислокації, передає отриману інформацію системі для формування стратегій керування (рис. 18).

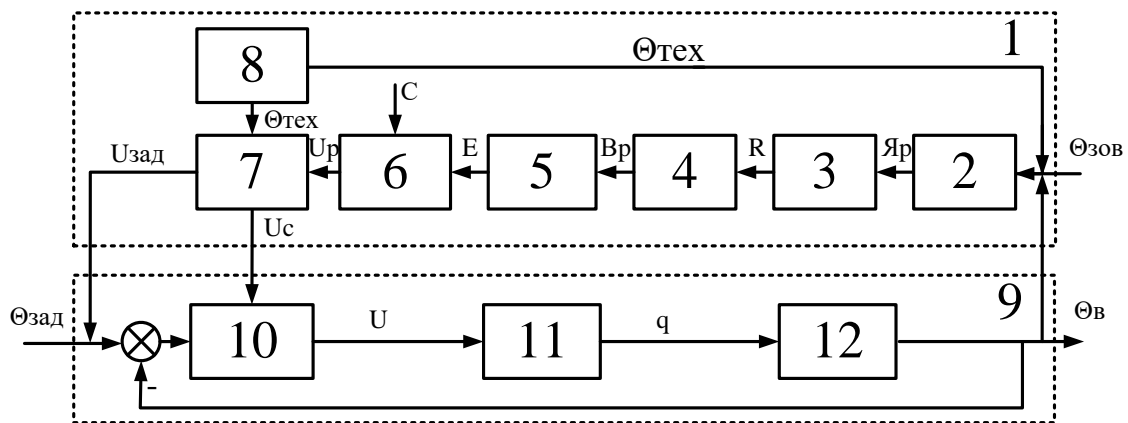


Рис. 18. Архітектура системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками тепличних комплексів із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу: $\Theta_{тех}$ – технологічні параметри стану біотехнічного об'єкта; $\Theta_{зов}$ – сигнал із сприймаючих елементів (природні збурення); Y_p – інформація про якість розвитку рослини, враховуючи просторове розподілення параметрів мікроклімату; R – критерій ефективного використання енергетичних ресурсів під час виробництва рослинної продукції заданої якості; E – споживання енергії; V_p – виробничі параметри; C – вартості виробничих параметрів; U_p – вибір стратегії керування; $U_{зад}$ – задана керуюча дія; U_c – створена стратегія керування; U – стратегія керування; q – керуюча дія; $\Theta_{зад}$ – задане значення сигналу; Θ_v – вихідний сигнал; підсистеми прийняття рішень 1, блок фільтрації вхідного сигналу 2, блок аналізу просторово-розподілених біотехнічних параметрів 3, нейромережевий блок визначення впливу зовнішніх природних збурень, критеріїв якості розвитку рослин та продукції на енергетичні складові 4, нейромережевий блок визначення впливу енергетичних характеристик на виробничі параметри 5, блок прийняття рішень 6, блок керування 7, мобільний робототехнічний комплекс моніторингу фітостану 8; локальна система керування 9, локальний автоматичний керуючий пристрій 10, виконавчі елементи 11, об'єкт керування 12

Важливою особливістю такої системи є те, що вона, як зворотній зв'язок, використовує інформацію про якість розвитку рослини, враховуючи просторове розподілення параметрів мікроклімату.

У четвертому розділі «Розроблення мобільного робота моніторингу фітостану та стану атмосфери в просторі промислової теплиці» представлено матеріали щодо структури мобільного робота, його технічної реалізації, призначення, енергоефективних алгоритмів його переміщення.

За результатами параметричного синтезу та методології оптимального проектування і використання мобільних роботів розроблено раціональний варіант структури мобільного робота, що забезпечує мінімальну вартість (f_1) системи автоматизації та виконання поставлених завдань (P) у повному обсязі (P_n) за мінімальних часових витрат (f_2):

$$P \geq P_n; y_1 \rightarrow \min; y_2 \rightarrow \min. \quad (23)$$

Для проектування мобільного робота встановлено обмежену кількість його основних технічних характеристик (параметрів). При цьому виділено показники мобільного робота, що характеризують повноту та якість виконання операцій, пов'язаних з навігацією та його застосуванням (y_1), а також повноту та якість реалізації інтелектуальних функцій (y_2). Показник y_1 розраховується як:

$$y_1 = \sum_{i=1}^s \alpha_i \cdot k_i \cdot \frac{m_i}{M_i}, \quad (24)$$

де α_i – коефіцієнт, що характеризує значимість операцій i -го типу (у більшості випадків це очікувана частота появи операцій i -го типу); $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$;

k_i – коефіцієнт, що характеризує якість виконання операцій i -го типу; m_i – число реалізованих мобільним роботом операцій i -го типу досліджуваного мобільного робота за період виконання поставленого завдання; M_i – число операцій i -го типу, що реалізується мобільним роботом у процесі виконання поставленого завдання; s – кількість типів операцій, необхідних для виконання поставлених завдань.

Показник повноти і якості виконання інтелектуальних функцій мобільним роботом (реагування на ситуаційні зміни, обробка та розпізнавання зорових образів, визначення оптимальних траєкторій руху та мінімізації споживання енергії, розпізнавання) розраховується як:

$$y_2 = \sum_{i=1}^r q_i l_i \frac{n_i}{N_i}, \quad (25)$$

де r – кількість типів інтелектуальних функцій, які повинен використовувати мобільний робот; q_i – коефіцієнт, що характеризує ступінь відповідностей функцій i -го типу необхідним; l_i – коефіцієнт, що характеризує вагу функції i -го типу (у більшості випадків це очікувана частота використання i -ої функції), $\sum_{i=1}^n l_i = 1$; n_i – число реалізованих інтелектуальних функцій i -го типу за певний час; N_i – загальна кількість реалізацій функцій i -го типу, що необхідна для виконання поставлених завдань.

Інтелектуальний мобільний робот оснащений давачами температури, вологості, концентрації вуглекислого газу в атмосфері теплиці, температури рослини; технічними пристроями зору, що здатні оцінювати розміри плода

і його стиглість за кольором; GPS-навігацією для встановлення координат вимірювання. Переміщуючись площею теплиці, робот формує маршрути руху за ключовими точками, оптимізуючи маршрут і споживання енергії акумуляторної батареї; керує швидкістю обертання електроприводів; відстежує рівень заряду акумуляторних батарей, за потреби здійснює їх підзарядку; передає отриману інформацію до центральної системи керування.

Розроблено структурну схему архітектури керування, що містить стратегічний, тактичний та виконавчий рівні, взаємозв'язок яких представлено на рис. 19. Архітектура, що пропонується, є модульною, і за потреби можливе її розширення.

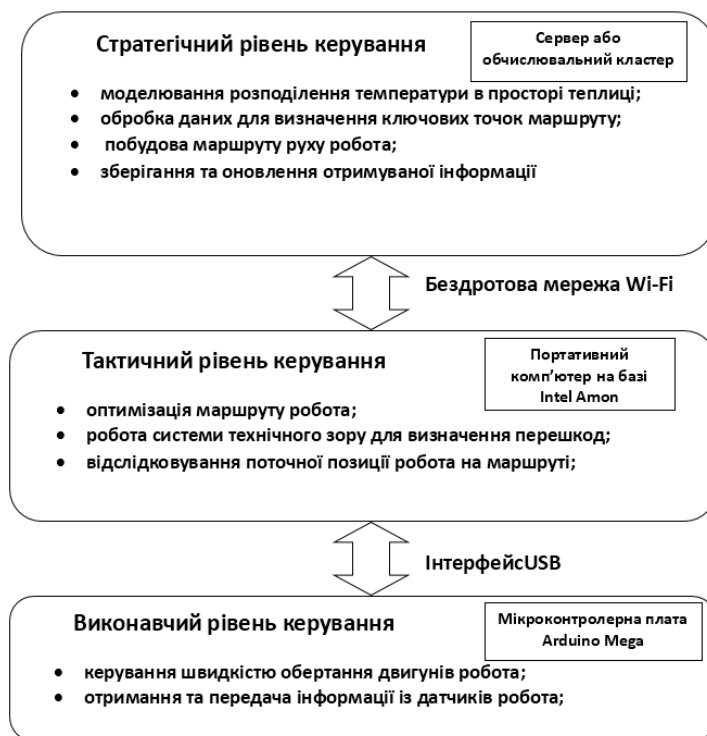


Рис. 19. Структурна схема архітектури керування системи мобільного робота

Запропоновано багаторівневу ієрархічну структуру системи керування мобільного робота фітомоніторингу в теплиці. При цьому робот побудований за модульним принципом із використанням сучасних мікропроцесорної елементної бази Raspberry pi3, Arduino та програмних середовищ LabVIEW, ROS, Node-RED, Arduino IDE, що дає суттєві переваги для його налагоджування. У роботі представлено взаємодію апаратно-програмного комплексу мобільного робота у вигляді блок-схеми (рис. 20).

Для вибору контрольних точок фітомоніторингу рослин у теплиці в автоматичному режимі мобільним роботом враховувався значний обсяг інформації: початкове положення робота, розподіл температури в просторі теплиці, можливість обстеження тієї чи іншої точки простору теплиці. Для подальшої обробки інформація була структурована, для чого використано метод кластерного аналізу.

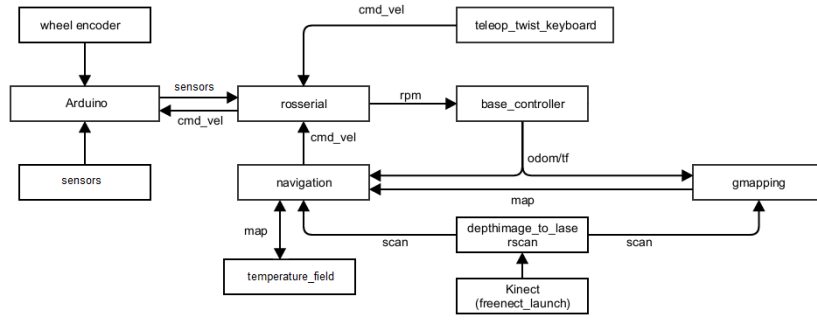


Рис. 20. Загальна блок-схема метавузлів інформаційної системи робота і взаємозв'язків між ними

Кількість кластерів для аналізу ділянок простору теплиці невизначена. Зважаючи на означене, для проведення кластерного аналізу було обрано ієрархічний агломеративний метод Ворда. На відміну від інших методів, для оцінки відстаней між кластерами тут використовується метод дисперсійного аналізу. На кожному кроці алгоритму об'єднуються такі два кластери, що ведуть до мінімального збільшення цільової функції, тобто внутрішньогрупової суми квадратів.

Емпіричним шляхом виявлено, що поява надмірної кількості параметрів кластеризації (понад п'ять) дає некоректні результати (не враховуються повною мірою всі характеристики ділянок).

Маршрут переміщення $c_i^k(t)$ визначаємо як множину контрольних точок, де мобільному роботу необхідно перебувати у визначені моменти часу, розпочинаючи свій рух із початкової позиції $p_i^{\text{поч}}$

$$c_i^k(t) = \{(p_i^{\text{поч}}, t_i^{\text{поч}}), (p_{i1}^k, t_{i1}^k), \dots, (p_{iN_k^k}^k, t_{iN_k^k}^k), (p_i^{\text{поч}}, t_i^{\text{поч}})\}, \quad (26)$$

де $p_i^{\text{поч}}$ – початкова точка маршруту; $p_{ij}^k \in P^k$, $j = 1, N_k^k$ – контрольні точки маршруту проходження; t_{ij}^k – визначений час відвідування роботом контрольних точок; $t_i^{\text{поч}}$ – визначений час повернення в початкову точку маршруту; N_k^k – кількість контрольних точок маршруту.

Для узгодження даних, отриманих моделюванням температурного поля, і мапи, отриманої за результатами візуального обстеження теплиці роботом, використовуємо нейронну мережу Ворда, здатну проводити якісний аналіз вхідних даних, що досягається особливим видом архітектури нейронної мережі, (має прихований шар, розбитий на декілька блоків). Кожен блок має свою власну передатну функцію, що дає можливість здійснювати паралельну обробку сигналів, отриманих із зовнішнього шару. Архітектуру нейронної мережі Ворда показано на рис. 21.

Вхідний шар нейронної мережі складається із таких параметрів: $(p_i^{\text{поч}})$ – початкова та кінцева позиція робота; (P^k) – масив точок, в яких може перебувати робот під час переміщення теплицею; (S^R) – масив точок температурного поля із відповідними значеннями моделювання; $(p(s_i, s'_i))$ – функція відстані між точками моделювання; (t_{ij}^k) – визначений час відвідування роботом контрольних точок; $(t_i^{\text{поч}})$ – визначений час повернення в початкову точку маршруту.

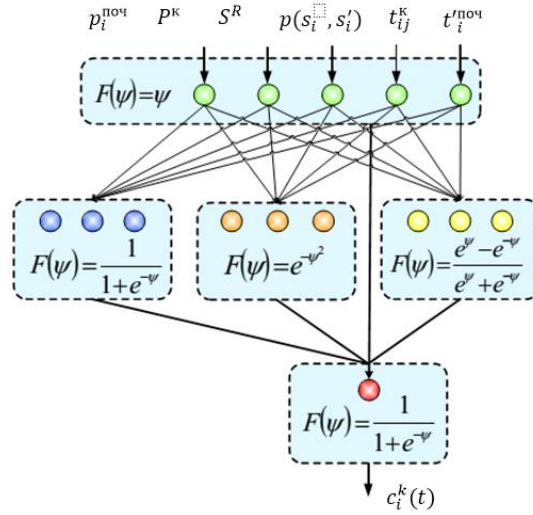


Рис. 21. Архітектура нейронної мережі Ворда

За результатами аналізу отриманих даних було прийнято рішення про використання нейронної мережі топології Ворда розміром 2 шари по 6 нейронів у кожному шарі. За результатами навчання нейронної мережі ustalenu середньо-квадратичну похибку отримано на 485 ітерації (використано пакет моделювання Matlab Neural Networks).

Для навігації мобільного робота в просторі теплиці поза технологічними направляючими враховується вплив на кутову швидкість різних збурень (властивості покриття підлоги, перешкоди), що вимагає постійного налаштування регулятора кутової швидкості. Ураховуючи зазначене, доцільним є створення моделі руху робота, здатної враховувати лінійну і кутову швидкості, а також моменти опору обертання коліс під час маневрування.

Рівняння руху робота колісного типу з різницево-моментним принципом повороту, зважаючи на його динамічні властивості, що містять фазовий вектор (v, ω) , враховують неголономний зв'язок та додатковий момент опору повороту, мають вигляд:

$$\begin{cases} m \cdot \dot{v} - m \cdot \alpha \cdot \omega^2 = F_{\text{дв}} - F_{\text{ск}}, \\ J \cdot \dot{\omega} + m \cdot \alpha \cdot v \cdot \omega = M_{\text{дв}} - M_c \end{cases}, \quad (27)$$

де m – маса робота; α – координата центра маси робота, що лежить на осі симетрії робота відносно початку рухомої системи координат; $F_{\text{дв}}$ – рушійна сила; $F_{\text{ск}}$ – сила протидії коченню; $M_{\text{дв}}$ – обертовий момент; M_c – момент опору повороту; J – момент інерції робота.

Модель реалізовано в середовищі Matlab Simulink, отримано перехідні характеристики для каналів лінійної та кутової швидкостей за різних керуючих впливів. Виявлено нелінійний характер впливу моменту опору повороту на перехідні процеси. Значення, отримані за результатами використання моделі, порівнюються з реальними, які виміряні на прототипі робота інкрементальними енкодерами. Порівняння цих даних дає можливість говорити про адекватність отриманої моделі.

Приводні колеса мобільного робота мають різну частоту обертання навіть за ідентичності використовуваних двигунів, що ускладнює забезпечення руху

робота навіть по прямій траєкторії і локалізацію його в просторі. Ця особливість не дає можливості здійснити одноразове налаштування обладнання на постійний оптимальний режим. Тому для забезпечення стабілізації швидкості обертання коліс необхідно визначити всі фактори, що впливають на рух робота, і провести моделювання змін швидкості з урахуванням цих факторів.

Проаналізовано фактори, що впливають на переміщення робота в теплиці, складено імітаційну математичну модель динаміки робота і проведено перевірку її на адекватність шляхом порівняння отриманих даних з даними реального прототипу.

Побудовано математичну модель динаміки руху платформи робота і проведено її імітаційне моделювання в середовищі Matlab Simulink (рис. 22).

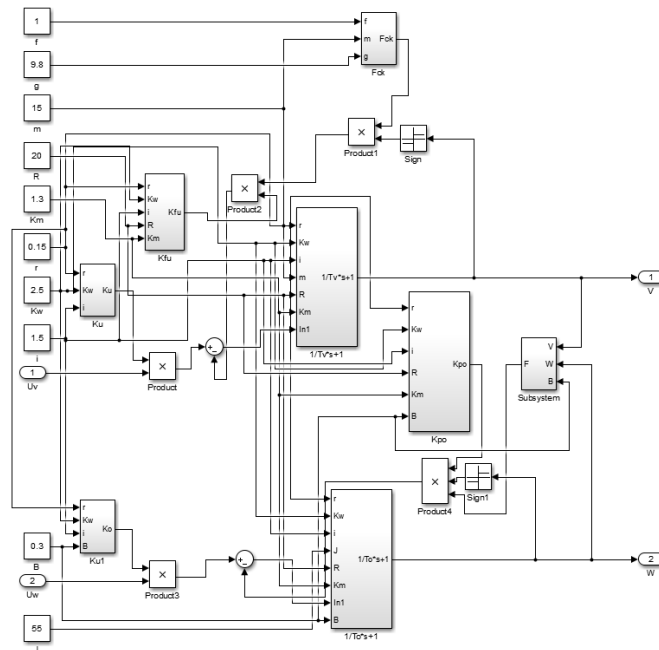


Рис. 22. Імітаційна модель динаміки руху робота

Модель динаміки руху є двоканальною лінійною (канал лінійної швидкості та канал кутової швидкості) з нелінійною залежністю збурення (моменту опору повороту), що діє для каналу кутової швидкості. Коефіцієнти моделі відповідають реальним виміряним показникам робота.

На рис. 23 представлено графіки перехідного процесу для каналу керування кутовою швидкістю під час зміни керуючої дії.

Математичну модель перевірено на адекватність за критерієм Фішера, похибка моделі не перевищує 5% від показника кутової швидкості робота.

Для моделювання та синтезу складних систем використано метод імовірнісних автоматів і стимулюючого навчання, що має стохастичну природу. За результатами аналізу сучасних систем орієнтації роботів у просторі та засобів машинного навчання проведено порівняння різних алгоритмів пошуку оптимального шляху з урахуванням слабкої формалізації умов під час постановки завдання. Завдання полягає в пошуку оптимальної стратегії вибору кожної наступної дії щодо поточного стану. Для оцінки оптимальності знайдених стратегій використано модель нескінченного горизонту. Відповідно

до цієї моделі оптимальною називається стратегія, що максимізує ранг отриманих стимулів роботом згідно з виразом:

$$V^\pi(S_t) \equiv r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots \equiv \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i r_{t+i}, \quad (28)$$

де $0 \leq \gamma \leq 1$ – деяка константа, яка дає змогу більшою мірою враховувати нагороду, отриману від навколишнього середовища; це справедливо для більшості реальних завдань, оскільки чим раніше робот отримає нагороду, тим краще.

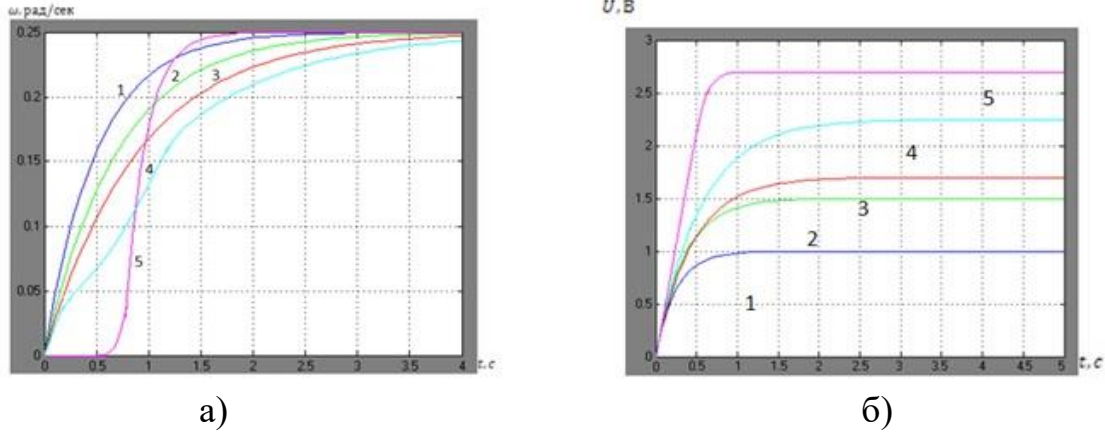


Рис. 23. Перехідний процес (а) та керуюча дія (б) для каналу керування кутовою швидкістю повороту за різних лінійних швидкостей руху центра мас робота (1. $v=0,5$ м/с (радіус повороту – 1,3 м), 2. $v=0,25$ м/с (радіус повороту – 0,8 м), 3. $v=0,1$ м/с (радіус повороту – 0,4 м), 4. $v=0,05$ м/с (радіус повороту – 0,2 м), 5. $v=0$ м/с (розворот))

Для успішного проходження маршруту алгоритм має пройти період навчання з накопичення досвіду спроб та помилок. Із накопиченням досвіду кількість невдалих спроб і час проходження маршруту зменшується, а кількість отриманих стимулів, навпаки, зростає.

Запропоновано спосіб економії енергії мобільним роботом, якщо робот переміщується з оптимальною швидкістю (швидкість з постійним прискоренням, нечасті зміни швидкості за умов руху робота прямою лінією). Будемо вважати, що початкові і кінцеві швидкості робота дорівнюють нулю, а його рух розпочинається із початкової позиції. Тоді завдання мінімізації енергії має вигляд:

$$\min E_w = \int_{t_0}^{t_f} (k_1 \cdot u^T \cdot u - k_2 \cdot z^T \cdot T_q^{-T} \cdot u) dt, \quad (29)$$

$$\dot{z} = -\bar{A}z + \bar{B}u, \quad (30)$$

$$z(0) = z(t_f) = [0 \ 0]^T, \quad (31)$$

$$P_f = \int_0^{t_f} T_p \cdot z \cdot dt = [x_f \ 0 \ 0]^T, \quad (32)$$

$$-\begin{pmatrix} u^{max} \\ u^{max} \end{pmatrix} \leq u = \begin{pmatrix} u^R \\ u^L \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} u^{max} \\ u^{max} \end{pmatrix}, \quad (33)$$

де $k_1 = \frac{V_s^2}{R_a}$, $k_2 = \frac{K_b \cdot n \cdot V_s}{R_a}$, $z = [v \ w]^T$, $u = [u^R \ u^L]^T$, опір якоря – R_a , проти-ЕРС – K_b , крутний момент – K_t та передатне число – n , напруга акумуляторної батареї – V_s , $i = [i^R \ i^L]^T$ – вектор струму якоря, $w = [w^R \ w^L]^T$ – вектор кутової

швидкості коліс і $u = [u^R u^L]^T$ – вхідний нормалізований вектор керування, F_v – коефіцієнт тертя, J – матриця моментів інерції двигунів.

Пошук оптимальної швидкості з урахуванням витрат енергії, що зводить до мінімуму рівняння (29), задовольняючи обмеження (31) – (33) для системи рівнянь (30), було здійснено з використанням методу варіаційного числення. Для побудови залежностей оптимальної швидкості від відносного часу (від початку руху до його завершення) (рис. 24).

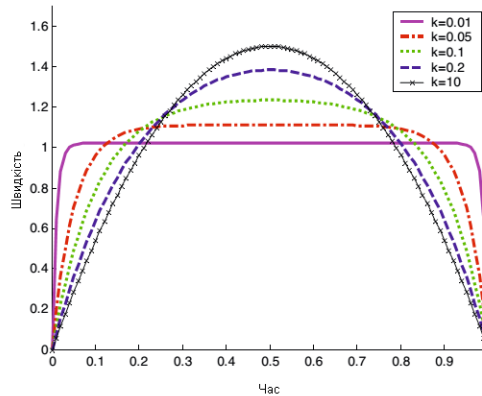


Рис. 24. Графіки швидкостей за різних значень k (механічна постійна часу до часу переміщення $k = \tau_v/t_f$)

Для параболічної залежності швидкості витрати енергії деякою мірою компенсуються за рахунок часткової роботи двигуна в режимі генератора. Для порівняння представлено графіки імітаційного експерименту (рис. 25) для таких даних: $t_f = 10$ с, $x_f = 5$ м.

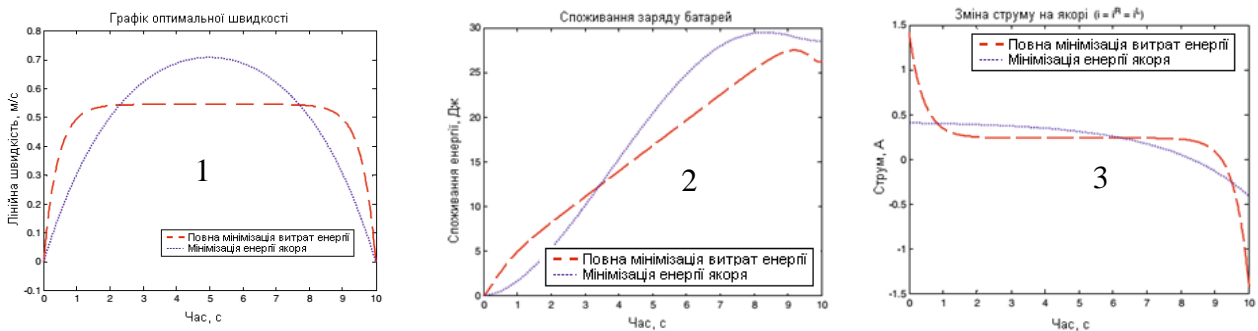


Рис. 25. Графіки порівняння двох режимів економії енергії: 1 – оптимальної швидкості; 2 – споживання заряду батарей; 3 – струму якоря

Порівнюючи два шляхи оптимізації витрат енергії, робимо висновок, що мінімізація витрат енергії якоря доцільна в разі переміщення робота на відстань до 5 м (тертя на це переміщення істотно не впливає).

Розроблено систему і алгоритм керування інтелектуальним мобільним роботом для моніторингу фітостану та стану атмосфери в спорудах закритого ґрунту, до складу якої увійшли: підсистема переміщення мобільного робота; підсистема вимірювання параметрів фітостану та повітря; підсистема передачі даних.

У п'ятому розділі «Реалізація та промислове випробування системи автоматичного керування енергетичними потоками промислової теплиці» приведено структуру автоматичної системи керування енергоефективними потоками, основний алгоритм її функціонування, зручний відповідно до вимог ергономіки інтерфейс користувача SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition) та економічне обґрунтування її використання. Зазначено роль системного аналізу та ієрархічного підходу для отримання оптимального рішення. Структуру системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів та зв'язки між ними представлено на рис. 26.

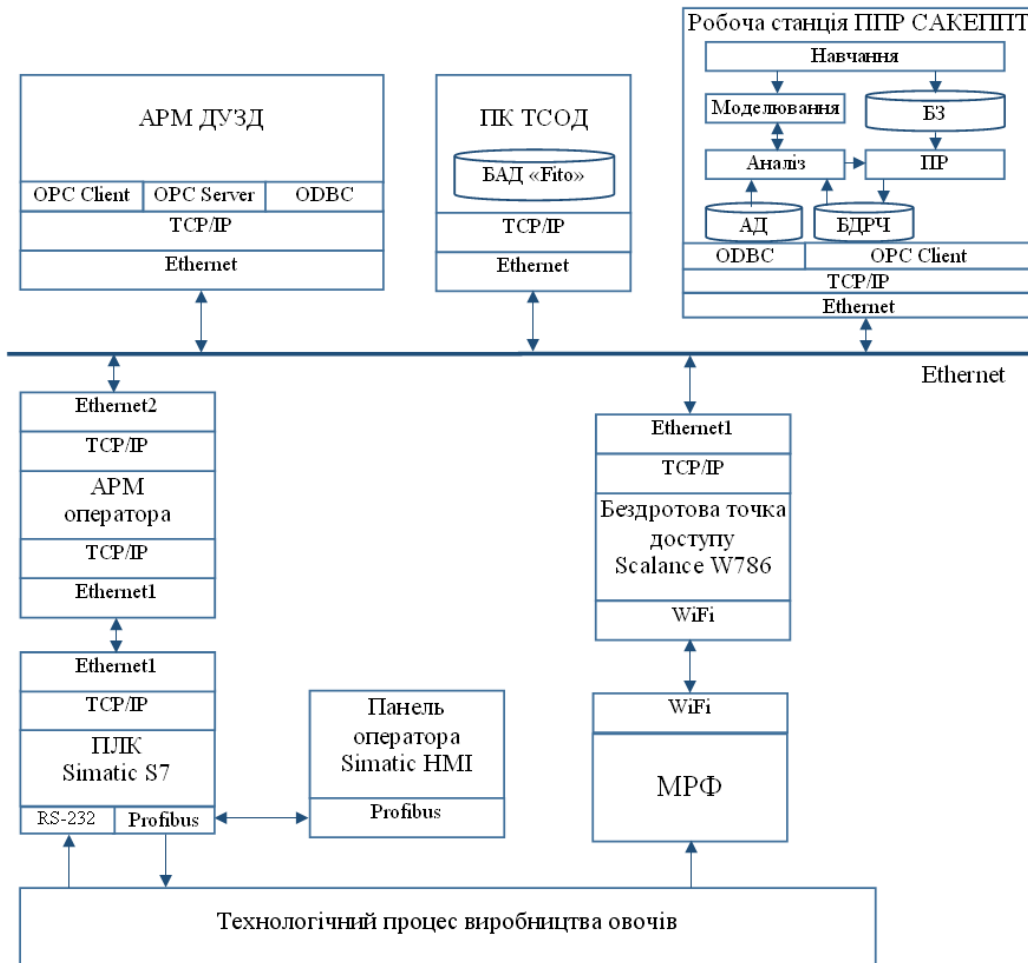


Рис. 26. Структура системи автоматичного керування енергетичними потоками промислової теплиці та зв'язки між її складовими: МРФ – мобільний робот фітомоніторингу; АРМ ДКЗД – автоматизоване робоче місце диспетчерського керування і збору даних; ТСОД – технологічний сервер обробки даних; ППР САКЕПІТ – підсистема підтримки прийняття рішень системи автоматичного керування енергетичними потоками промислової теплиці; БДРЧ – база даних реального часу SCADA; БД – база архівних даних; БЗ – база знань.

Меню фітомоніторингу, меню системи керування енергетичними потоками тепличного комплексу, меню розрахунку критеріїв керування подано відповідно на рис. 27, 28, 29.

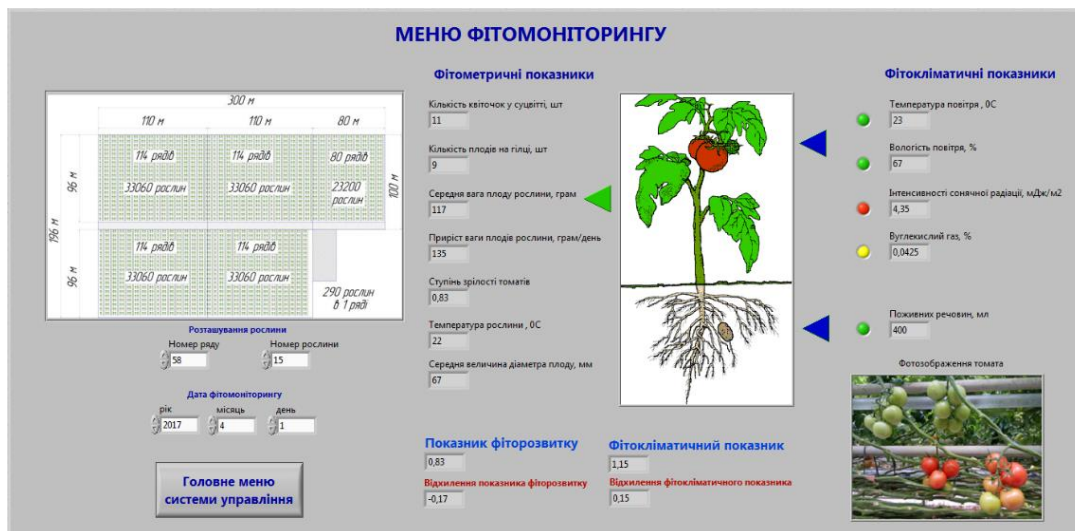


Рис. 27. Меню фітомоніторингу

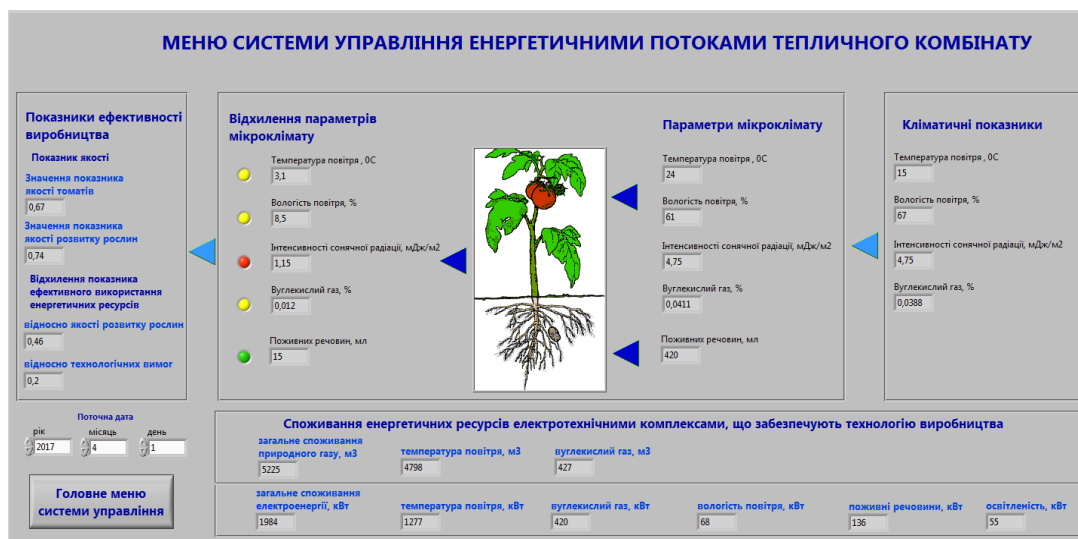


Рис. 28. Меню системи керування енергетичними потоками тепличного комплексу

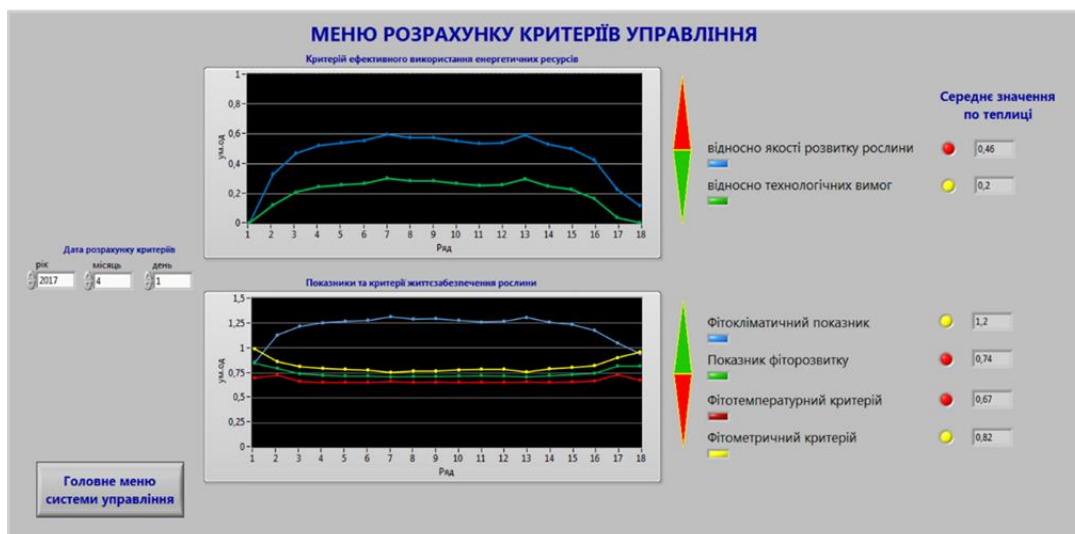


Рис. 29. Меню розрахунку критеріїв керування

На рис. 30 подано алгоритм функціонування системи керування виробництвом рослинної продукції.

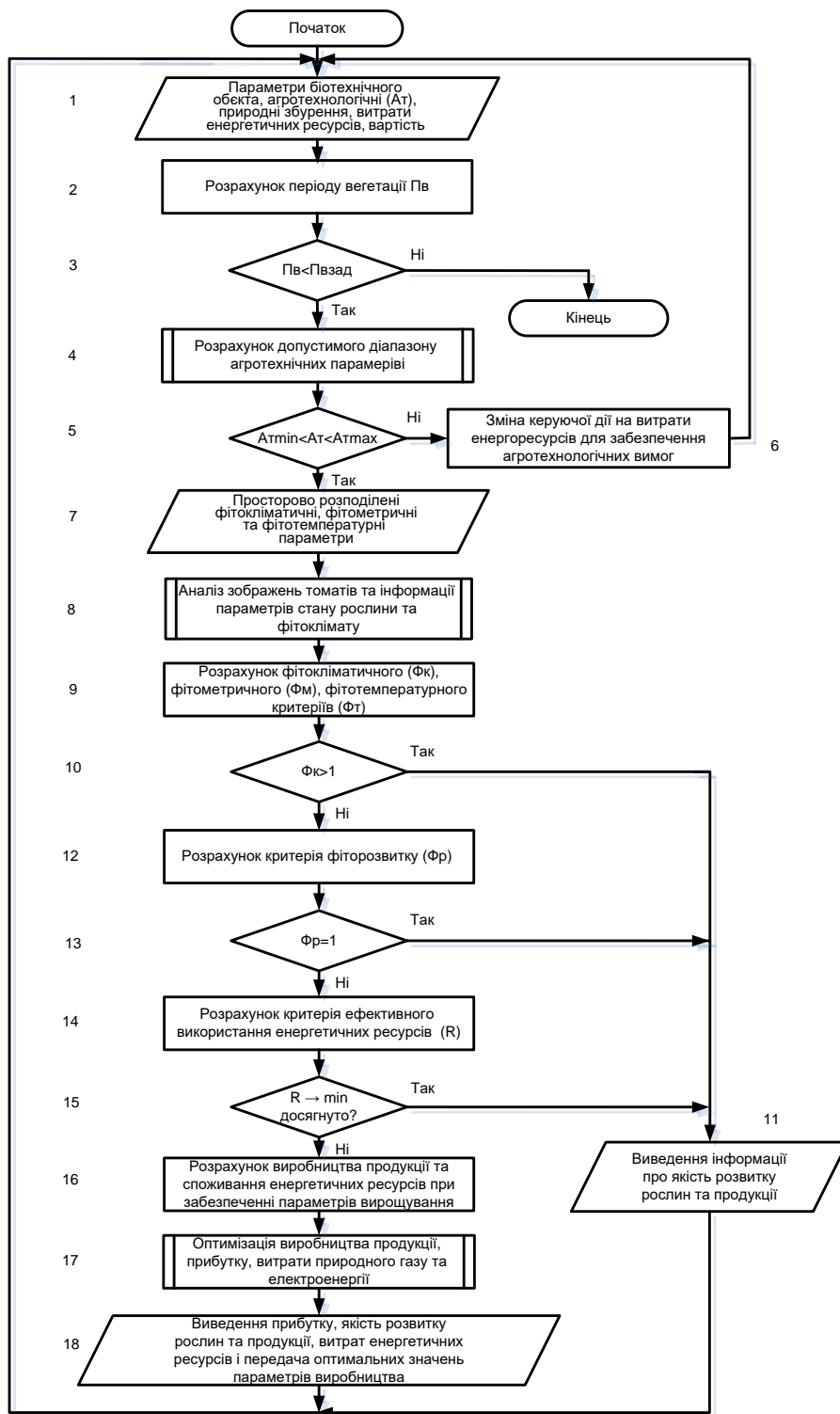


Рис. 30. Алгоритм функціонування системи керування виробництвом рослинної продукції

У розділі викладено основні положення методу ексергоекономічної оптимізації структури енергетичної системи керування енергетичними потоками. Проведено розрахунок двох варіантів впровадження системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів –

тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості за допомогою ексергоекономічного фактора (I – впровадження системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості, до складу якої входить мобільний робот; II – впровадження зазначеної системи з додатковою модернізацією існуючої системи опалення теплиці) (рис. 31). Оптимізація технічної системи передбачає аналіз варіантів структури і параметрів з метою мінімізації інвестиційних та експлуатаційних витрат під час забезпечення функціональних характеристик системи з урахуванням відповідних технічних і ресурсних обмежень.

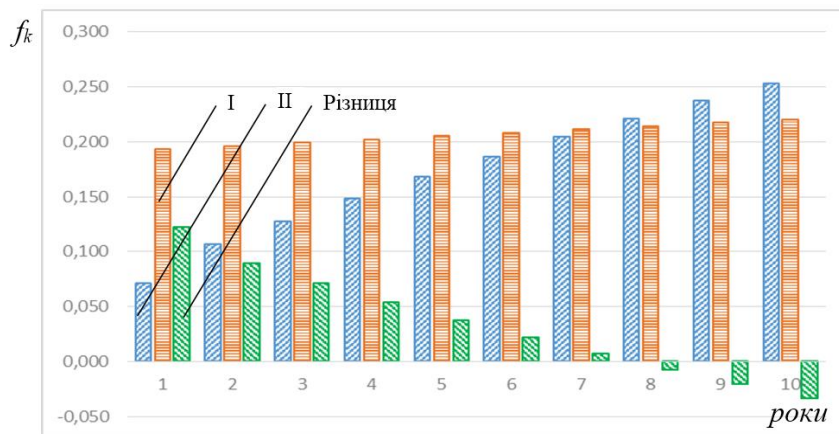


Рис. 31. Значення коефіцієнта ефективності модернізації системи керування: I-варіант, II-варіант, різниця коефіцієнтів

Запропоновано алгоритми оцінки енергетичних та економічних показників ефективності впровадження системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості.

Проведено розрахунок чистої дисконтної вартості, яка становить 1531233 грн з урахуванням капітальних вкладень і ліквідної вартості наприкінці 10-річного строку експлуатації установки за незмінних за часом розмірів річного приросту прибутку та експлуатаційних витрат. Позитивне значення критерію чистої дисконтованої вартості свідчить про вигідність проєкту, таким чином запропонована система є економічно вигідною.

З використанням методу лінійного програмування визначено мінімальну площу теплиці, для якої економічно доцільно використовувати мобільного робота фітомоніторингу, – від 1666,67 м².

Промислові випробування системи керування енергетичними потоками промислової теплиці та мобільного роботизованого комплексу проводилися в теплиці № 9 ПрАТ «Комбінат «Тепличний» (Київська область, Броварський район, смт Калинівка).

Застосування системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в тепличних комплексах дало змогу отримати економію енергоресурсів у розмірі 310127 грн і за рахунок підвищення врожайності та якості томатів збільшити прибуток до 106323 грн, що дає можливість

отримати додатковий прибуток у розмірі 104,11 грн/м² і тим самим зменшити собівартість продукції на 5,7 %. У процесі роботи система інтелектуального керування енергетичними ресурсами продемонструвала високий рівень надійності.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу науково-прикладну проблему розроблення наукових основ створення систем енергоефективного керування енергетичними потоками в просторово-розподілених багатозв'язних біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, що функціонують в умовах невизначеності, для виробництва рослинної продукції заданої якості. Основні наукові та практичні результати полягають в такому.

1. За результатами аналізу функціонування систем автоматизації, що супроводжують технологію виробництва рослинної продукції в промислових теплицях в Україні, встановлено, що частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості продукції сягає 70–80 %. При цьому температура повітря, як основний технологічний фактор впливу на енергетичну характеристику виробництва, в атмосфері теплиці коливається від 18,4 до 23,1 °С, а температура рослин суттєво відрізняється від температури повітря (інколи на 7 °С), що знижує якість виробленої рослинної продукції та ефективність виробництва в цілому.

2. На основі використання генетичного алгоритму визначено п'ять основних факторів впливу на розвиток рослини та якість рослинної продукції в промисловій теплиці, на забезпечення відповідного рівня яких витрачається 70 % енергетичних ресурсів, – це світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами та газозабезпечення.

3. Запропоновані нові критерії: оцінки станів розвитку рослин і рослинної продукції, а саме фітометричний (оцінка якості розвитку рослини інтегральною залежністю показників з ваговим коефіцієнтом 0,25 всіх показників) та фіто-температурний, використання яких системою автоматизації процесів керування технологіями виробництва рослинної продукції забезпечує задану якість рослин та продукції з урахуванням всіх фаз розвитку рослин; ефективного використання енергетичних ресурсів, суть якого полягає у мінімізації різниці між відносними показниками фітокліматичного життєзабезпечення та фіторозвитку рослин, що забезпечує мінімізацію енергетичних витрат і задану якість рослин та продукції, його зростання в середньому по всій теплиці до 46 % свідчить про неефективне споживання енергоносіїв.

4. Розроблено на основі розв'язання рівняння Нав'є-Стокса просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, що дає можливість оцінювати значення температури в її просторі та використовувати ці результати для формування маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу. При цьому величина похибки не перевищує 5 %.

5. Обґрунтовано архітектуру та концепцію побудови системи автоматизації процесів енергоефективного керування енергетичними потоками

під час виробництва рослинної продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, яка функціонує на основі використання мобільного робота для фітомоніторингу, а також обґрунтовано застосування результатів нейромережевого аналізу для формування стратегій керування.

6. Розроблено на основі математичного апарату вейвлет-перетворень новий метод безконтактного визначення у промисловій теплиці фітометричних параметрів рослин, що дало змогу оцінювати якість розвитку рослин та використовувати зазначене в трьох основних фазах розвитку рослин (цвітіння, формування плоду, отримання врожаю) в загальному алгоритмі формування стратегій керування.

7. Розроблено за результатами параметричного синтезу та методології оптимального проектування мобільний робот для моніторингу станів рослин, якості рослинної продукції та параметрів атмосфери в просторі промислової теплиці, просторове орієнтування якого реалізується на основі теорії імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання, що спільно із системою його технічного зору створює умови для самостійного переміщення, оминаючи перешкоди. Алгоритм функціонування робота реалізовано на основі програмних середовищ Processing/Wiring, Node-RED та LabVIEW. Доведено економічну доцільність використання робота на площі теплиці не менше 0,2 га.

8. Розроблено на основі методу варіаційного числення математичну модель переміщення мобільного робота, що дало можливість мінімізувати енерговитрати його акумуляторної батареї за рахунок вибору швидкості переміщення на різні відстані. Адекватність моделі підтверджена критерієм Фішера та практичним використанням робота в промисловій теплиці (похибка не перевищувала 5 %).

9. Розроблено енергоефективну систему автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподіленому біотехнічному об'єкті – промисловій теплиці, для виробництва рослинної продукції, функціонування якої забезпечується інтелектуальним методом формування стратегій керування на основі неповної інформації про стани рослин, якість рослинної продукції, параметри атмосфери теплиці, що надходять від мобільного робота, та використання нейромережевого аналізу для формування стратегій керування, що мінімізують енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах невизначеності. Енергетичний аналіз такої системи дає підстави стверджувати про її перспективність: на восьмий рік експлуатації системи значення коефіцієнта ефективності сягне 0,221 з подальшим його зростанням.

10. Реалізовано та проведено в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» дослідно-промислові випробування розробленої системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками для виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому біотехнічному об'єкті – промисловій теплиці, з такими результатами: за рахунок підвищення енергоефективності частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості виробленої продукції, порівняно з діючою системою, зменшилася на 4,2 %; собівартість виробленої продукції, порівняно з діючою системою, зменшилася на 5,7 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Мобільні роботи фітомоніторингу в теплиці. К., 2017. 255 с. *(Здобувачем досліджено особливості сучасних тепличних комбінатів та запропоновано новий спосіб здійснення фітомоніторингу із використанням робототехнічних комплексів, здатних самостійно переміщуватись площею теплиці).*

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Опришко О. О., **Болбот І. М.**, Андріїшина М. В., Пасічник Н. А. Методичні підходи для керування вибіркоким внесенням добрив. Аграрна наука і освіта. Механізація, електрифікація, автоматизація. 2008. Т. 9. № 3–4. С. 100–104. *(Здобувачем розроблено методичні підходи внесення мінеральних добрив системою керування).*

3. Лисенко В. П., **Болбот І. М.** Роботи та робототехнічні системи в агропромисловому комплексі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. Вип. 153. С. 105–111. *(Здобувачем обґрунтовано необхідність розроблення та впровадження мобільних роботів та робототехнічних систем фітомоніторингу в промислових теплицях).*

4. Болбот І. М. Нестационарна нелінійна теплопередача через зовнішні захисні конструкції теплиць. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 161. С. 175–179.

5. Лисенко В. П., Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Болбот О. М., Чернов І. І., Батанов Ю. О. Робототехнічна система фітомоніторингу в тепличному господарстві. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 3. С. 93–98. *(Здобувачем запропоновано розроблення робототехнічної системи фітомоніторингу рослин для отримання інформації про фітокліматичні та фотометричні показники розвитку рослини в просторі теплиці).*

6. Болбот І. М. Екзергоекономічна оптимізація енергетичних систем. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 4. С. 126–133.

7. Болбот І. М. Ергономічний аналіз систем диспетчерського управління і збору даних. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. № 11 (4). С. 103–108.

8. Шворов С. А., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Заєць Н. А., Дудник А. О.. Багато-критеріальний синтез маршрутів пересування мобільних роботів з розпізнаванням перешкод. Енергетика і автоматика. 2012. № 1. URL: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2012_1/12ssadod.pdf. *(Здобувачем запропоновано розв'язання задачі синтезу компромісно-оптимальних*

маршрутів руху мобільних роботів з розпізнаванням перешкод в конфліктному середовищі).

9. Шворов С. А., **Болбот І. М.**, Штепа В. М. Обґрунтування раціонального варіанту побудови інтелектуальної роботизованої системи спеціального призначення. Енергетика і автоматика. 2012. № 2. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/4994>. *(Здобувачем запропоновано підхід та методичний апарат параметричного синтезу, за допомогою яких визначається раціональний варіант побудови інтелектуальної роботизованої системи спеціального призначення).*

10. Шворов С. А., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Заєць Н. А., Дудник А. О. Методичні засади розпізнавання образів із використанням багатошарового перцептрона. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2012. Вип. 35. С. 66–72. *(Здобувачем розроблено методичні засади розпізнавання образів із використанням багатошарового перцептрона для системи розпізнавання образів).*

11. Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Мартинюк Л. В. Метод визначення сумарного термічного опору огорожуючої конструкції сонячного колектора. Енергетика і автоматика. 2012. № 2. С. 5–7. *(Здобувачем запропоновано метод визначення сумарного термічного опору огорожуючої конструкції сонячного колектора).*

12. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличні господарства. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. Вип. 174. Ч. 2. С. 53–59. *(Здобувачем запропоновано економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличному господарстві).*

13. Ленков С. В., Шворов С. А., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Чирченко Д. В. Дискретна векторна оптимізація траєкторій руху мобільних роботів. Сучасна спеціальна техніка. Системи та методи обробки інформації. 2012. № 1 (28). С. 13–19. *(Здобувачем вирішено задачу оптимізації траєкторій руху мобільних роботів у конфліктному середовищі з розпізнаванням образів).*

14. Болбот І. М. Математична модель теплозабезпечення рослини в системі рослина – ґрунт – повітря. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. № 13 (5). С. 21–27.

15. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Фітотемпературний критерій оцінки розвитку рослини. Енергетика і автоматика. 2013. № 3. С. 122–128. *(Здобувачем запропоновано спосіб оцінки температури рослин та температурного середовища за допомогою фітотемпературного критерія оцінки розвитку рослин).*

Статті у наукових фахових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних

16. Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Батанов Ю. О. Адаптивна математична модель «Температура повітря – врожайність томатів». Науковий

вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. Вип. 184. Ч. 2. С. 110–114. *(Здобувачем запропоновано адаптивний алгоритм уточнення параметрів математичної моделі).*

17. Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Батанов Ю. О. Математична модель оцінювання впливу світлозабезпечення на ріст і розвиток рослин у спорудах закритого ґрунту. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 194. Ч. 1. С. 36–43. *(Здобувачем розроблено математичну модель впливу сонячної радіації на ріст та розвиток рослини в системі рослина – ґрунт – повітря).*

18. Болбот І. М. Моделювання факторів життєзабезпечення рослини в системі рослина – ґрунт – повітря. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 194. Ч. 2. С. 50–57.

19. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Орієнтація мобільного робота в просторі теплиці за допомогою імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 194. Ч. 3. С. 166–172. *(Здобувачем розроблено метод вирішення задачі орієнтування мобільного роботу за допомогою ймовірнісних автоматів та стимулюючого навчання).*

20. Bolbot I. Exergoeconomic optimization of power systems. Energy and Automation. 2015. № 3. P. 45–53.

21. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Моделювання температурних полів у теплиці. Індуктивне моделювання складних систем. 2015. Вип. 7. С. 154–164. *(Здобувачем розроблено математичну модель, яка відображає зміну температурних полів із урахування зон подібності атмосфери в промисловій теплиці).*

22. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Мірошник В. О., Лендел Т. І. Температура рослин як параметр для регулювання. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 209. Ч. 1. С. 64–72. *(Здобувачем запропоновано спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин).*

23. Козирський В. В., **Болбот І. М.** Архітектура енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 209. Ч. 2. С. 75–80. *(Здобувачем запропоновано архітектуру енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу).*

24. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Система керування електротехнічного роботизованого комплексу фітомоніторингу рослин в теплиці. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природо-

користування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 252. С. 25–33. *(Здобувачем запропоновано багаторівневу ієрархічну структуру системи керування мобільним роботом фітомоніторингу в теплиці).*

25. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 154. С. 42–45. *(Здобувачем розроблено програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці).*

26. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Інтелектуальний мобільний робот для теплиць. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 187. С. 58–60. *(Здобувачем розроблено алгоритми управління мобільним роботом моніторингу стану атмосфери та фітостану в спорудах закритого ґрунту для формування стратегій керування, що максимізують прибуток виробництва).*

27. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Енергоефективна система керування електротехнологічним комплексом промислових теплиць. Технічна електродинаміка. 2019. № 2. С. 78–81. *(Здобувачем запропоновано структуру енергоефективної системи керування в промислових теплицях).*

Статті в наукових виданнях інших держав

28. ShvoroV S., Reshetyuk V., **Bolbot I.**, Shtepa V., Chirchenko D. Theoretical issues construction and operation of agricultural mission robotic system. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agricultural and Forest Engineering. 2012. No 60. P. 97–102. *(Здобувачем запропоновано вирішення проблеми оптимального проектування і використання інтелектуальних мобільних роботів).*

29. Болбот И. М. Математическая модель влияния теплового режима на развитие и урожайность томатов в системе растение-почва-воздух. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2013. Vol. 15. № 4. P. 153–158.

30. Болбот И. М. Критерий обеспечения урожайности растений основа эффективного потребления энергетических ресурсов тепличными комплексами. Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2014. Т. 2. С. 157–162.

31. Лысенко В. Ф., **Болбот И. М.**, Лендел Т. І. Вейвлет-анализ в фитометрии растений. Актуальные вопросы современной науки. 2014. С. 163–173. *(Здобувачем розроблено безконтактний спосіб визначення стиглості плоду томата з використанням математичного апарату вейвлет перетворень).*

32. Лысенко В. Ф., **Болбот И. М.**, Чернов И. И. Математическая модель динамики движения электротехнического роботизированого комплекса фитомониторинга в теплице. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2015. Vol. 17. № 4. P. 19–24. *(Здобувачем розроблено математичну модель руху мобільного робота фітомоніторингу в теплиці та обґрунтовано його використання при створенні системи управління).*

33. Chochowski A., **Bolbot I.**, Lysenko V., Reshetiuk V. The optimization of energy efficiency of mobile robots. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agricultural and Forest Engineering. 2017. No 70. P. 79–88. *(Здобувачем запропоновано метод оптимізації енергоспоживання мобільного робота фітомоніторингу при переміщенні у просторі теплиці за критерієм енергоефективного використання ресурсів акумуляторної батареї).*

34. Lysenko V. P., **Bolbot I. M.**, Romasevych Yu. O., Loveykin V. S., Voytiuk V. D., Algorithms of robotic electrotechnical complex management in agricultural production. River Publishers Series in Automation, Control and Robotics. Control systems: Theory and Applications. 2018. P. 271–289. *(Здобувачем запропоновано алгоритми керування мобільними роботами в аграрному виробництві).*

35. Lysenko V. P., Zhyltsov A. V., **Bolbot I. M.**, Lendiel T. I., Nalyvaiko V. A. Phytomonitoring in the phytometrics of the plants. E3S Web of Conferences 154. 2020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015407012>. *(Здобувачем запропоновано алгоритм визначення фітометричних параметрів, стану та фази розвитку рослин під час проведення фітомоніторингу рослин).*

Патенти України на корисні моделі

36. Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., **Болбот І. М.**, Дудник А. О. Патент 76175 UA, МПК G05B 13/00. Система управління процесом утримання біологічних об'єктів. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201207133; заявлено 12.06.2012; опубліковано 25.12.2012. Бюл. № 24. *(Здобувачем розроблено блок оптимізації нейронної мережі).*

37. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 95283 UA, МПК A01B 51/00, A01G 3/00, A01D 45/00, A01G 25/00. Мобільний самохідний електротехнічний комплекс фітомоніторингу в теплиці. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № a201305341; заявлено 25.04.2013; опубліковано 25.12.2014. Бюл. № 24. *(Здобувачем запропоновано архітектуру та структуру управління мобільного робота).*

38. Лисенко В. П., Мірошник В. О., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Дудник А. О. Патент 88809 UA, МПК A01G 9/24 (2006.01). Пристрій штучного клімату. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № a201210803; заявлено 14.09.12; опубліковано 10.04.14. Бюл. № 7. *(Здобувачем запропоновано підсистему прийняття рішень, що містить блок фітомоніторингу).*

39. Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., **Болбот І. М.**, Дудник А. О., Лендел Т. І. Патент 92971 UA, МПК G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201404129; заявлено 17.04.2014; опубліковано 25.12.2014. Бюл. № 24. *(Здобувачем запропоновано підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі).*

40. Лисенко В. П., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 95612 UA, МПК G05B 13/0. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201408491; заявлено 25.07.2014; опубліковано 25.12.2014. Бюл. № 24. *(Здобувачем запропоновано підсистему прийняття рішень, що містить додатково мобільний роботизований блок фітомоніторингу).*

41. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 103274 UA, МПК G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201505549; заявлено 05.06.2015; опубліковано 10.12.2015. Бюл. № 23. *(Здобувачем розроблено підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі).*

42. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Патент 115830 UA, МПК A01G 9/24 (2006.01). Спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201612202; заявлено 01.12.2016; опубліковано 25.04.2017. Бюл. № 8. *(Здобувачем запропоновано спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин).*

43. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 114191 UA, МПК G05B 19/24 (2006.01), B25J 9/18 (2006.01), B25J 9/16 (2006.01). Спосіб керування переміщенням мобільного робота в теплиці. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201611119; заявлено 04.11.2016; опубліковано 27.02.2017. Бюл. № 4. *(Здобувачем запропоновано спосіб керування переміщенням мобільного робота в теплиці).*

44. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Патент 124088 UA, МПК B25J 11/00, B25J 1/02 (2006.01). Маніпулятор для вимірювання стану атмосфери в біотехнічних об'єктах. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201708123; заявлено 04.08.2017; опубліковано 26.03.2018. Бюл. № 6. *(Здобувачем запропоновано використання маніпулятора для вимірювання стану атмосфери в біотехнічних об'єктах).*

Тези наукових доповідей

45. Лисенко В. П., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Заєць Н. А., Ряба О. І. Підсистема прийняття рішень як функціональний елемент системи управління біотехнічними об'єктами. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Міжнародна наукова конференція, м. Херсон, 27–30 травня 2012 року: тези доповіді. Херсон, 2012. С. 276–278. *(Здобувачем розроблено підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі).*

46. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Заєць Н. А., Ряба О. І. Нейромережеве розпізнавання образів стану агротехнічних культур.

Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: IV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 24–26 квітня 2012 року: тези доповіді. Тернопіль, 2012. С. 109–111. *(Здобувачем проаналізовано перспективність використання для оцінки стиглості агротехнічних культур нейромережових структур, синтезовано відповідний багатомісний перцептор).*

47. Лисенко В. П., Штепа В. М., Голуб Б. Л., **Болбот І. М.**, Щербатюк В. Л. Система управління біотехнічними об'єктами із нейромережовими блоками. Автоматика 2012: XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 26–28 вересня 2012 року: тези доповіді. К., 2012. С. 223–224. *(Здобувачем запропоновано метод керування виконанням технології виробництва рослинної продукції складного біотехнологічного об'єкта).*

48. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин в системі автоматичного регулювання. Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 115-річчя заснування Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 5–6 листопада 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 12–13. *(Здобувачем запропоновано використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин в системі автоматичного керування).*

49. Болбот І. М. Архітектура енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережового аналізу та робототехнічного комплексу. Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 26–27 червня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 108–110.

50. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Лендел Т. І. Підсистема фітомоніторингу в теплиці. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 15–16 жовтня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 73–74. *(Здобувачем запропоновано використання підсистеми фітомоніторингу як складової системи керування технологічним процесом промислової теплиці).*

51. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Структура та архітектура електротехнічного роботизованого комплексу фітомоніторингу рослин в теплиці. Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 25–26 червня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 117–118. *(Здобувачем запропоновано структуру та архітектуру багаторівневої навігаційної системи мобільного робота фітомоніторингу в теплиці).*

52. Болбот І. М. Комплексна оцінка рівня якості томатів. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: III Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 17–18 грудня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 49–50.

53. Болбот І. М. Особливості застосування інтелектуальних систем при керуванні електротехнічними комплексами в промисловій теплиці. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій

та автоматики в АПК: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 21–22 лютого 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 51–53.

54. Лисенко В. П., **Болбот І. М.** Алгоритм керування інтелектуальним роботизованим електротехнічним комплексом в промисловій теплиці. Автоматика 2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, м. Київ, 13–15 вересня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 176. *(Здобувачем запропоновано алгоритм керування інтелектуальним мобільним роботом фітомоніторингу в промисловій теплиці).*

55. Болбот І. М. Підсистема комплексної оцінки рівня якості томатів системи керування електротехнічними комплексами в промисловій теплиці. Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики: Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 120-річчя заснування Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 32–33.

56. Болбот І. М. Енергоефективна нейромережева підсистема керування електротехнічним комплексом в промисловій теплиці. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: V Міжнародної науково-практичної конференція, м. Київ, 19–20 грудня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 126–127.

57. **Болбот І. М.**, Болбот А. І. Концептуальна модель системи управління енергетичними потоками тепличних комбінатів. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): IX Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 19–22 травня 2020 року: тези доповіді. К., 2020. URL: <http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2020/paper/view/2340>. *(Здобувачем запропоновано нову концепцію функціонування системи керування виконанням технології виробництва рослинної продукції в промисловій теплиці).*

АНОТАЦІЯ

Болбот І. М. Автоматизація процесів керування тепличними комплексами з моніторингом якості продукції. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої і актуальної науково-прикладної проблеми, а саме розробленню наукових основ створення енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комбінатах, що функціонують в умовах невизначеності з моніторингом якості рослинної продукції. Суть проблеми полягає у тому, щоб за рахунок автоматизації процесів керування на основі використання результатів моніторингу стану рослин і якості продукції забезпечити виконання заданої технології виробництва рослинної продукції в умовах тепличного комбінату з мінімальними витратами енергії.

Ключовим елементом досягнення компромісу між витратами ресурсів та якістю продукції є система керування мікрокліматом у теплиці, а основні обмеження ефективності вирощування рослинної продукції в тепличних комплексах виникають внаслідок: по-перше, невизначеності, що є наслідком впливу природних збурень, які мають випадковий характер (температура і вологість зовнішнього середовища, сонячна радіація), неповноти інформації про стани рослин, параметрів середовища навколо них та якості рослинної продукції; по-друге, обмеженої інформації про взаємозв'язки між споживанням енергетичних ресурсів та станами рослин у просторово-розподілених фітокліматичних умовах їх розвитку та якості рослинної продукції; по-третє, відсутності загальних технічних принципів побудови систем автоматизації керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, із моніторингом якості цієї продукції. Зважаючи на зазначене, можна стверджувати, що нині вимоги до систем енергоефективного керування енергетичними потоками просторово-розподілених біотехнічних об'єктів – тепличних комплексів, постійно зростають, а наукові основи їх побудови відсутні. Зазначене вище зумовило вибір теми дисертації, встановлення її мети та завдань.

Розроблено інтелектуальний метод формування енергоефективних стратегій керування енергетичними потоками в біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, який відрізняється використанням нового критерію енергоефективності та нейромережевого аналізу, що мінімізує енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах дії зовнішніх природних збурень, неповної інформації про стани рослин та просторової розподіленості кліматичних умов. На основі генетичного алгоритму встановлено оптимальну кількість основних факторів життєзабезпечення рослин, на підтримку яких витрачається 70 % енергетичних ресурсів.

На основі математичного апарату вейвлет-перетворень розроблено новий метод безконтактного визначення фітометричних параметрів рослин, що дає змогу оцінювати якість розвитку рослини; на основі методу варіаційного числення створено математичну модель переміщення мобільного робота, що дає можливість мінімізувати енерговитрати його акумуляторної батареї. На застосуванні теорії імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання заснований метод просторового орієнтування мобільного робота для фітомоніторингу в просторі промислової теплиці, що створює умови для самостійного переміщення робота в просторі теплиці, оминаючи перешкоди.

За результатами параметричного синтезу та методології оптимального проектування і використання мобільних роботів винайдено раціональний варіант структури мобільного робота фітомоніторингу, який здійснює моніторинг фітостану і стану атмосфери, аналізує фітокліматичні дані та формує на цій основі рішення щодо оптимізації маршруту переміщення, планування послідовності дій, розпізнавання образів і перешкод, що забезпечує виконання поставлених завдань за мінімальних вартісних і часових витрат.

Розроблено просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, засновану на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса, що дає можливість

оцінювати значення температури як основного технологічного параметра в просторі теплиці та використовувати ці результати для формування маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу.

Запропоновано критерії: ефективного використання енергетичних ресурсів, суть якого полягає у мінімізації різниці між відносними показниками фітокліматичного життєзабезпечення та фіторозвитку рослин, що мінімізує енергетичні витрати, забезпечуючи задану якість рослин та продукції; оцінки станів розвитку рослин і рослинної продукції, а саме фітометричний та фітотемпературний критерії, використання яких системою автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції забезпечує задану якість рослин та продукції з урахуванням фаз розвитку рослин.

Для виробництва продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, розроблено нову концепцію системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками, що функціонує на основі використання результатів фітомоніторингу, які надходять від мобільного робота, і нейромережевого аналізу.

Ключові слова: енергоефективна система керування, мобільний робот, генетичні алгоритми, нейронні мережі, фітомоніторинг, математичне моделювання, вейвлет-перетворення, невизначеність, просторова розподіленість, тепличні комплекси, моніторинг якості продукції, моніторинг фітостану та стану атмосфери, стратегії керування.

АННОТАЦИЯ

Болбот И. М. Автоматизация процессов управления тепличными комплексами с мониторингом качества продукции. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению важной и актуальной научно-прикладной проблемы, а именно разработке научных основ создания энергоэффективной системы автоматизации процессов управления энергетическими потоками в пространственно-распределенных биотехнических объектах – тепличных комбинатах, функционирующих в условиях неопределенности с мониторингом качества растительной продукции. Суть проблемы заключается в том, чтобы за счет автоматизации процессов управления на основе использования результатов мониторинга состояния растений и качества продукции обеспечить выполнение заданной технологии производства растительной продукции в условиях тепличного комбината с минимальными затратами энергии.

Ключевым элементом достижения компромисса между затратами ресурсов и качеством продукции является система управления микроклиматом в теплице, а основные ограничения эффективности выращивания растительной

продукции в тепличных комплексах возникают вследствие: во-первых, неопределенности, являющейся следствием влияния природных возмущений, которые носят случайный характер (температура и влажность внешней среды, солнечная радиация), неполноты информации о состоянии растений, параметров среды вокруг них и качества растительной продукции; во-вторых, ограниченной информации о взаимосвязи между потреблением энергетических ресурсов и состояниями растений в пространственно-распределенных фитоклиматических условиях их развития и качеством растительной продукции; в-третьих, отсутствия общих технических принципов построения систем автоматизации управления энергетическими потоками в пространственно-распределенных биотехнических объектах – тепличных комплексах, с мониторингом качества этой продукции. Учитывая указанное, можно утверждать, что в настоящее время требования к системам энергоэффективного управления энергетическими потоками пространственно-распределенных биотехнических объектов – тепличных комплексов, постоянно растут, а научные основы их построения отсутствуют. Вышесказанное обусловило выбор темы диссертации, постановку ее целей и задач.

Разработан интеллектуальный метод формирования энергоэффективных стратегий управления энергетическими потоками в биотехнических объектах – промышленных теплицах, который отличается использованием нового критерия энергоэффективности и нейросетевого анализа, что минимизирует энергетические затраты на обеспечение технологии выращивания в условиях действия внешних природных возмущений, неполной информации о состоянии растений и пространственной распределенности климатических условий. На основе генетического алгоритма установлено оптимальное количество основных факторов жизнеобеспечения растений, на поддержание которых тратится 70 % энергетических ресурсов.

На основе математического аппарата вейвлет-преобразований разработан новый метод бесконтактного определения фитометрических параметров растений, позволяющий оценивать качество развития растения; на основе метода вариационного исчисления создана математическая модель перемещения мобильного робота, позволяющая минимизировать энергозатраты его аккумуляторной батареи. На применении теории вероятностных автоматов и стимулирующего обучения основан метод пространственной ориентации мобильного робота для фитомониторинга в пространстве промышленной теплицы, создающий условия для самостоятельного перемещения робота в пространстве теплицы, минуя препятствия.

По результатам параметрического синтеза и методологии оптимального проектирования и использования мобильных роботов изобретен рациональный вариант структуры мобильного робота фитомониторинга, который обеспечивает мониторинг фитосостояния и состояния атмосферы, анализирует фитоклиматические данные и формирует на этой основе решения по оптимизации маршрута перемещения, планированию последовательности действий, распознаванию образов и препятствий, что обеспечивает выполнение поставленных задач при минимальных затратах средств и времени.

Разработана пространственно-распределенная математическая модель промышленной теплицы, основанная на решении уравнений Навье-Стокса, которая дает возможность оценивать значение температуры как основного технологического параметра в пространстве теплицы и использовать эти результаты для формирования маршрута перемещения мобильного робота фитомониторинга.

Предложены критерии: эффективного использования энергетических ресурсов, суть которого заключается в минимизации разницы между относительными показателями фитоклиматического жизнеобеспечения и фиторазвития растений, что минимизирует энергетические затраты, обеспечивая заданное высокое качество растений и продукции; оценки состояний развития растений и растительной продукции, а именно фитометрический и фитотемпературный критерии, использование которых системой автоматизации процессов управления энергетическими потоками при производстве растительной продукции обеспечивает заданное высокое качество растений и продукции с учетом фаз развития растений.

Для производства продукции заданного высокого качества в пространственно-распределенных биотехнических объектах – промышленных теплицах, разработана новая концепция системы автоматизации процессов управления энергетическими потоками, функционирующая на основе использования результатов фитомониторинга, поступающих от мобильного робота, и нейросетевого анализа.

Ключевые слова: энергоэффективная система управления, мобильный робот, генетические алгоритмы, нейронные сети, фитомониторинг, математическое моделирование, вейвлет-преобразования, неопределенность, пространственная распределенность, тепличные комплексы, мониторинг качества, мониторинг фитосостояния и состояния атмосферы, стратегии управления.

ANNOTATION

Bolbot I. M. Automation of Greenhouse Complex Control Processes on Product Quality Monitoring. – The Manuscript.

The thesis on competing a scientific degree of a Doctor of Technical Sciences by the speciality 05.13.07 «Automation of Control Processes». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, Ukraine, 2020.

The thesis is devoted to the solution of an important topical scientific and applied problem, namely the development of the scientific basis for the creation of an energy-efficient system of automation of the processes of energy flow control in spatially distributed biotechnical facilities and greenhouse complexes, operating under uncertainty while monitoring the quality of vegetable products. The essence of the problem is to ensure the implementation of a given technology of plant production in a greenhouse with minimal energy consumption through the automation of control processes based on the use of results of monitoring the condition of plants and product quality.

The key element is to reach a compromise between the resource costs and product quality is the greenhouse microclimate control system. The main limitations of crops growing efficiency in greenhouses are due to several reasons: firstly, uncertainties due to natural random disturbances (temperature and humidity of the outdoor environment, solar radiation), incomplete information about the condition of plants, environmental parameters around them and the quality of plant products; secondly, limited data on the correlation between energy consumption and plant conditions in terms of spatial distribution of phytoclimatic conditions of their development and quality of plant products; thirdly, the lack of general principles for the construction of automation systems for energy flow control in spatially distributed biotechnical facilities, greenhouses, for monitoring the quality of these products. Based on this, it can be argued that currently the requirements for energy efficient energy flow control systems of spatially distributed biological facilities, greenhouses, are constantly growing, and the scientific basis for their construction is absent. All the above led to the choice of the topic of the thesis and helped define its purpose and objectives.

The author developed an intelligent method for the formation of energy-efficient strategies for managing energy flows in biotechnical facilities, industrial greenhouses, which differs in the use of a new criterion of energy efficiency and neural network analysis, which minimizes energy costs on growing technology under external natural disturbances, incomplete information about plants distribution and climatic conditions. The genetic algorithm allowed to establish the optimal number of basic plant life support factors, for the support of which 70 % of energy resources are spent.

Based on the mathematical apparatus of wavelet transform, a new method of non-contact determination of phytometric parameters of plants was offered, which allowed to assess the quality of plant development; the method of variational calculus, a mathematical model of mobile robot movement, allowed to minimize the energy consumption of its battery; the method of spatial orientation of the mobile robot for phytomonitoring in the greenhouse space, which is based on the application of the probabilistic automata theory and stimulating learning, created conditions for its independent movement in the space of the industrial greenhouse, avoiding obstacles.

According to the results of the parametric synthesis and the methodology of the optimal design and use of mobile robots, a rational variant of the structure of the mobile robot of phytomonitoring is provided, which ensures the monitoring of phyto- and air conditions, analyzes phytoclimatic data and forms on this basis solutions for optimizing the route of movement, planning the sequence of actions, recognition of patterns and obstacles, which provides that the tasks are carried out at minimum cost and time.

A spatially distributed mathematical model of an industrial greenhouse has been developed, which is based on solving the Navier-Stokes equations, which makes it possible to estimate the value of temperature as the main technological parameter in its space and use these results to form a mobile phytomonitoring robot.

The following criteria are proposed: efficient use of energy resources, the essence of which is to minimize the difference between the relative indicators

of phytoclimatic life and phytodevelopment of plants, which minimizes energy costs, ensuring a given high quality of plants and products; criteria for assessing the condition of plants and plant products development, namely phytometric and phytotemperature criteria, the use of which by the automation system of energy flow control processes in plant production ensures a given high quality of plants and products taking into account the phases of plant development.

In order to produce products of the required high quality in spatially distributed biotechnical facilities, industrial greenhouses, a new concept of the system of automation of energy flow control processes is offered, which operates on the basis of phytomonitoring results from the mobile robot and neural network analysis.

Key words: energy efficient control system, mobile robot, genetic algorithms, neural networks, phytomonitoring, mathematical modeling, wavelet transform, uncertainty, spatial distribution, greenhouse complexes, product quality and atmospheric monitoring, control strategies.

Підписано до друку 01.10.2020 р. Формат 60х84\16
Ум. друк. арк. 1,9 Обл.-вид.арк. 1,9
Наклад 100 прим. Зам. № 200508

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, тел.: 527-81-55
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4097 від 17.06.2011

