

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЛЕНДЄЛ ТАРАС ІВАНОВИЧ

УДК 681.516.75:631.234

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ТЕПЛИЦІ
З УРАХУВАННЯМ СТАНУ БІОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Лисенко Віталій Пилипович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
завідувач кафедри автоматики та
робототехнічних систем ім. акад. І. І. Мартиненка

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фурман Ілля Олександрович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Герасимчук Юрій Васильович,
Національний науковий центр «Інститут механізації та
електрифікації сільського господарства»,
завідувач відділу електрифікації та автоматизації

Захист відбудеться «29» березня 2016 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. Генерала Родимцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

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 розісланий «__» лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Овочівництво захищеного ґрунту – важливий сектор сільського господарства, що забезпечує населення свіжими овочами протягом всього року. У теплицях, що є характерними представниками споруд закритого ґрунту, технологічні параметри вирощування рослин підтримують системи мікроклімату, а їх функціонування супроводжується значними витратами енергетичних ресурсів, що у свою чергу впливає на собівартість продукції. Сучасні системи забезпечення процесу вирощування рослин, як правило, не відстежують їх стани як реакцію на дії природних збурень, що не дає можливості накопичувати знання про рослину, не дозволяє прогнозувати її врожайність.

В окремих випадках існуючі сьогодні системи дозволяють спостерігати за ростом та основними показниками розвитку однієї рослини за допомогою стаціонарних фітометричних сенсорів. Оскільки кількість рослин у теплиці значна, а вартість сенсорів та відповідного обладнання є високою, то простежити за розвитком кожної рослини чи навіть групи рослин стає економічно недоцільним. Тому, як наслідок, виникає потреба у розробці методу енергоефективного керування електротехнічним комплексом у теплиці, що враховує особливості біологічної складової об'єкта у процесі свого функціонування для максимізації прибутку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилися у Національному університеті біоресурсів і природокористування України відповідно до наукової тематики: «Розробка теорії побудови систем управління агропромисловим виробництвом з біотехнічними об'єктами і особливостями природних збурень» (номер державної реєстрації 0110U003609, 2010–2014 рр.).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – забезпечити енергоефективне керування електротехнічним комплексом в теплиці з урахуванням стану біологічного об'єкта та параметрів мікроклімату для максимізації прибутку виробництва.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасні електротехнічні комплекси, що забезпечують параметри мікроклімату, та їх енергетичні витрати для вирощування томатів у теплицях.

2. На основі досліджень особливостей біотехнологічного об'єкта, яким є теплиця з рослинами, створити його просторово-розподілену математичну модель, що описує температурне поле теплиці з урахуванням температури рослини.

3. Обґрунтувати структуру системи формування стратегій енергоефективного керування електротехнічним комплексом для забезпечення параметрів мікроклімату в теплиці на основі використання інформації про якість томатів як зворотного зв'язку.

4. Розробити метод енергоефективного керування електротехнічним комплексом для забезпечення параметрів мікроклімату у спорудах закритого ґрунту з урахуванням особливостей рослин.

5. Провести практичні випробування системи енергоефективного керування електротехнічним комплексом для забезпечення параметрів мікроклімату на основі оптимізаційного методу Харрінгтона для максимізації прибутку.

Об'єктом дослідження є процеси керування електротехнічним комплексом, що створює температурно-вологісний режим у спорудах закритого ґрунту для вирощування томатів.

Предметом дослідження є взаємозв'язки між параметрами вирощування рослинної продукції у теплиці, якістю цієї продукції та споживанням енергетичних ресурсів і прибутком виробництва.

Методи дослідження. Для вирішення зазначеного завдання використано методи системного аналізу (для аналізу технологічного процесу вирощування томатів у теплиці), математичного моделювання (у тому числі станів біологічної складової), нейронні мережі (для розробки стратегії керування процесом вирощування томатів у теплиці), положення теорії автоматичного керування, експериментальний метод дослідження. Експериментальна перевірка теоретичних положень проводилася у виробничих умовах та з використанням фітотрону.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні положення роботи, які визначають новизну наукових результатів досліджень, полягають у наступному:

1) вперше розроблено метод енергоефективного керування електротехнічним комплексом, котрий на основі оцінки якості рослинної продукції як інформації зворотного зв'язку, за використання функції бажаності Харрінгтона, дає змогу визначити значення параметрів мікроклімату (температура рослини, температура і вологість повітря), що забезпечують максимізацію прибутку виробництва;

2) запропоновано новий критерій оцінки стану рослини (фітотемпературний критерій), котрий, з урахуванням різниці температур рослини і навколишнього середовища, використовується під час керування електротехнічним комплексом, що дозволяє із більшою точністю реалізовувати вимоги технологів;

3) удосконалено математичну модель температурного поля теплиці як об'єкта із розподіленими параметрами, що, на відміну від існуючих, містить фактори: температуру рослини, взаємозв'язок між технологічними параметрами вирощування і реакцією рослини як біологічної складової.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена система енергоефективного керування пройшла випробування і впроваджена у ПАТ «Комбінат «Тепличний», що засвідчується відповідними документами (акт впровадження наукової розробки від 19.08.2015 р.). Запропонована система захищена патентами України (92971UA, МПК (2014.01) G05B13/00; 95283 UA, МПК (2014.01) A01G 25/00, A01D 45/00, A01G 3/00, A01B 51/00; 95612 UA, МПК (14/01) G05B 13/00). Її переваги над існуючими системами, що функціонують за принципом стабілізації технологічних параметрів вирощування, полягають у підвищенні якості продукції та зниженні її собівартості, що забезпечує збільшення прибутку.

Підготовлені рекомендації щодо розробки електротехнічного комплексу для енергоефективного керування мікрокліматом у теплиці з урахуванням зворотної інформації про якість рослинної продукції, котрі розглянуті та затверджені на засіданні секції технічної політики, сільськогосподарського машинобудування та

охорони праці Науково-експертної ради Міністерства аграрної політики та продовольства України України (протокол № 74 від 5 червня 2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. Здобувачем відокремлено біологічну складову біотехнологічного об'єкта та проведено аналіз впливу на неї електротехнічних комплексів, що є складовими технології виробництва продукції рослинництва в теплицях [1]; досліджено залежність станів біологічної складової від параметрів мікроклімату й зовнішніх природних збурень [2, 5]; отримано просторову математичну модель розподілу температури у теплиці; обґрунтовано вибір узагальненого критерію оптимізації для системи формування стратегій керування електротехнічними комплексами під час вирощування томатів за умов, що інформація про якість рослинної продукції використовується як зворотний зв'язок [7, 13, 19]; обґрунтовано структуру нейромережі, що була використана для побудови алгоритмів керування електротехнічними комплексами [7]; створено математичні моделі температурних станів біологічного об'єкта та здійснено оцінку їх адекватності [1, 2]; створено окремі вузли та складові технічної реалізації, програмного та інформаційного забезпечення розробленого комплексу [2, 4]; розроблено рекомендації щодо використання цих методів в умовах виробництва.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та матеріали дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях: III Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 15–16 листопада 2012 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 16–18 жовтня 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції з нагоди 115-річчя заснування Національного університету біоресурсів і природокористування України «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 5–6 листопада 2013 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні», (м. Київ, 26–27 червня 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 15–16 жовтня 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 16–17 жовтня 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 6–7 листопада 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ, 27 листопада 2014 р.); II Міжнародній науковій конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» (м. Київ, 19–21 березня 2015 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні» (м. Київ, 25–26 червня 2015 р.); XVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми

землеробської механіки» (м. Київ, 17–19 жовтня 2015 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 21 наукову працю, в яких викладено основний зміст проведених досліджень, із них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, 3 патенти України на корисну модель та 10 матеріалів і тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 136 найменувань і додатків. Повний обсяг дисертації – 185 сторінок, у тому числі 153 сторінки основного тексту, 135 рисунків, 28 таблиць і 6 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «*Аналіз енергетичних витрат під час вирощування овочевих культур у спорудах закритого ґрунту*» проаналізовано особливості технологічних процесів виробництва продукції рослинництва у спорудах закритого ґрунту. Наведено перелік і дано характеристику електротехнічним комплексам та системам керування такими (вказаними) комплексами. До складу електротехнічних комплексів теплиці входять: котли опалення з електричними засобами; вентилятори з електричними приводами; мотор-редуктори; лампи досвічування; електричні насоси; електроклапани; пускозахисна апаратура, регулятори, програмні пристрої. Зазначені електротехнічні комплекси забезпечують реалізацію стратегій керування складним біотехнологічним об'єктом, яким є теплиця.

Однією із найважливіших складових у теплиці є система обігріву, що підтримує необхідні умови для вирощування рослин, і для забезпечення її функціонування витрачається найбільша кількість енергетичних ресурсів. Так, за результатами вимірювань встановлено, що для весняного періоду добове споживання газу для теплиці № 9 ПАТ «Комбінат «Тепличний» складає 6000 м³ (рис. 1). До того ж електротехнічний комплекс такої теплиці протягом доби споживає близько 6000 кВт·год електроенергії (рис. 2), що значною мірою визначає собівартість продукції (частка енергетики у собівартості томатів наближається до 70 %).

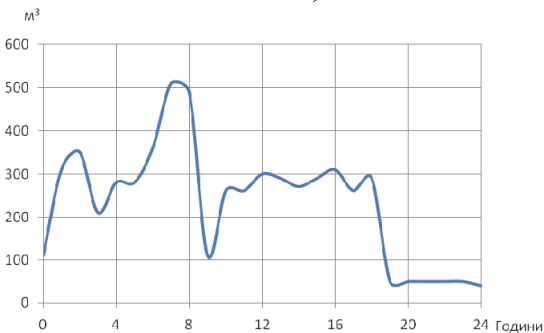


Рис. 1. Добове споживання природного газу системами керування у теплиці № 9 ПАТ «Комбінат «Тепличний»

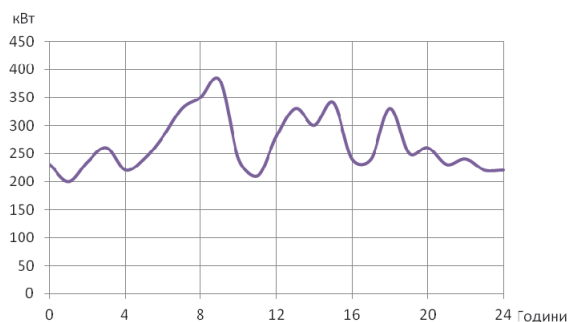


Рис. 2. Добове споживання електроенергії електротехнічними комплексами у теплиці № 9 ПАТ «Комбінат «Тепличний»

Основний вплив на кількість споживаної енергії здійснюють системи, що формують стратегії керування біотехнологічним об'єктом – теплицею.

Формування стратегій керування відбувається шляхом аналізу заданих технологічних параметрів та реальних їх значень. Однак у таких стратегіях не враховується наявність біологічної складової теплиці – рослини – та її власної реакції на такі природні збурення, як: сонячна радіація, температура і вологість навколишнього середовища (рис. 3).

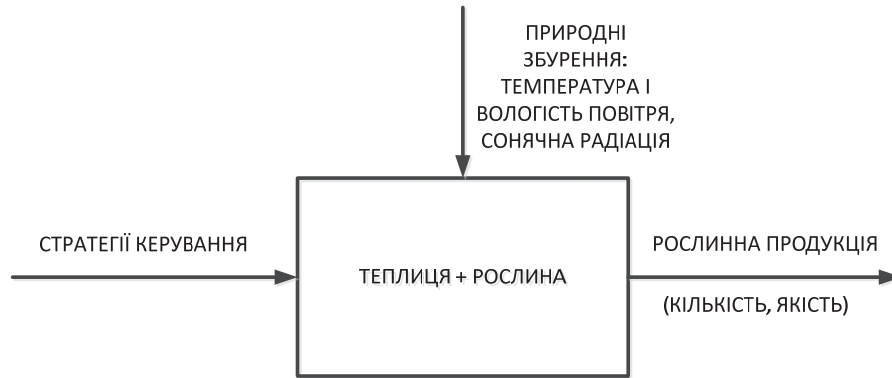


Рис. 3. Вхідні і вихідні дії теплиці з рослинами як у біотехнологічному об'єкті

У сучасній світовій практиці використовують системи керування, котрі реалізують алгоритми стабілізації, орієнтовані на максимальну продуктивність рослини, однак не враховують при цьому стани біологічної складової (рослини) та мають такі недоліки:

- не спроможні відстежувати та враховувати реакцію рослин у теплиці на дію керуючих і зовнішніх збурень;
- температурне поле у просторі теплиці є нерівномірним;
- технології вирощування рослин у теплицях потребують значних обсягів енергії, що значною мірою і визначає собівартість продукції.

На основі аналізу технологій вирощування та статистики споживання енергетичних ресурсів визначено, що зменшити енергетичні витрати під час вирощування рослин у теплицях можливо за умов використання системи енергоефективного керування електротехнічним комплексом, здатної оцінювати стани рослин і формувати стратегії керування із урахуванням цих станів.

У другому розділі «*Математична модель біотехнологічного об'єкта – теплиці із рослинами*» проаналізовано стани, в яких перебуває рослина у просторі однієї з теплиць у ПАТ «Комбінат «Тепличний», що під впливом внутрішніх і зовнішніх збурень (температури рослини, температури та вологості повітря, зміни сонячної радіації) дало можливість використати результати вимірювань для формування стратегій керування електротехнічними комплексами. Визначено, що основними факторами у процесі розвитку рослини є її температура та середовища навколо неї. Результати вимірювань температур наведено на рис. 4.

Проведені дослідження виявили, що в денний період часу температура рослини збільшується за рахунок впливу сонячної радіації, попри те, що

температура повітря в теплиці залишається незмінною. Оскільки перегрів рослин може негативно вплинути на їх розвиток, для формування керуючих дій відстежувати та враховувати необхідно не лише температуру середовища, а й температуру рослин.

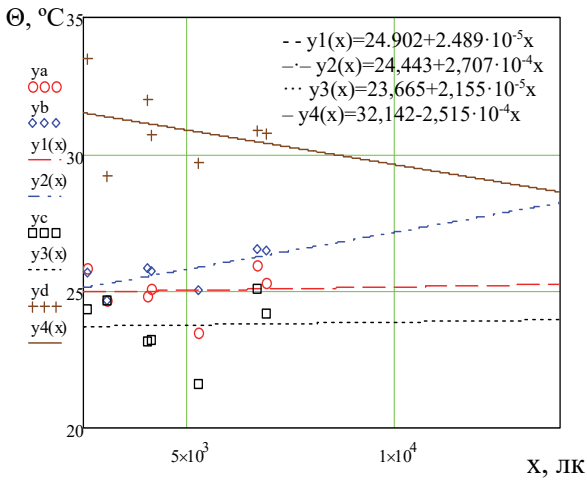


Рис. 4. Залежності температур рослини та повітря біля рослини від освітленості: y_a – результати вимірювань температури стебла, y_b – результати вимірювань температури плоду, y_c – результати вимірювань температури листка, y_d – результати вимірювань температури повітря біля рослини, x – освітленість.

Проведені вимірювання у теплиці виявили суттєву нерівномірність температури, що пояснюється великою кількістю поверхонь теплообміну, котрі сприяють тепловтратам, а значить, і нерівномірному розвитку рослин. Цю особливість, а саме, що теплиця – це об'єкт із розподіленими параметрами (рис. 5), і потрібно враховувати для оцінки станів рослин та формування керуючих впливів.

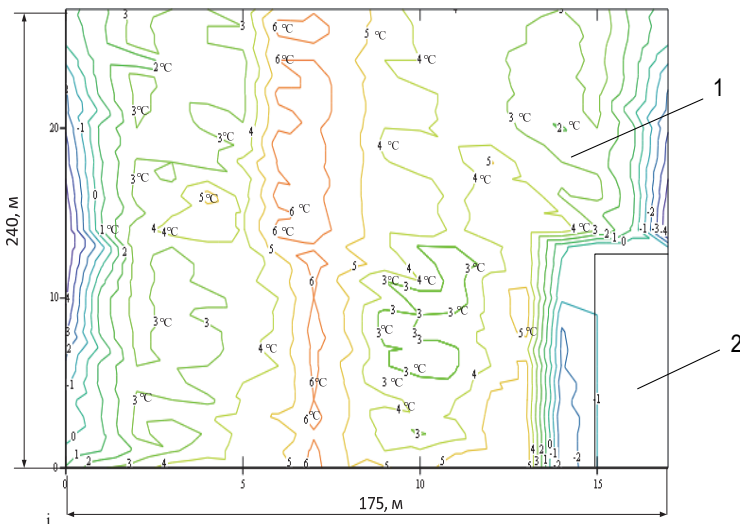


Рис. 5. Різниця фактичних значень температур у теплиці та технологічно-заданих: 1 – площа для вирощування помідорів; 2 – площа для основних і допоміжних систем керування; i – координати розмірів теплиці, м.

Із цією метою була розроблена математична модель, що враховувала просторову координату по ширині секції та дозволила розрахувати температуру повітря залежно від впливу зовнішніх збурень (рис. 6). При цьому простір однієї секції теплиці умовно розділено на 8 температурних зон за шириною теплиці із урахування конструктивних особливостей секції (рис. 7).

Було прийнято, що кожна секція впливає на температурний баланс теплиці, а кількість теплоти для i -ї зони Q_i залежатиме від кількості теплоти Q_{i+1} і Q_{i-1} , що

віддається чи отримується від сусідніх зон ($i+1$, $i-1$). Таким чином, можна записати:

$$\frac{dQ_i}{d\tau} = Q_{t,i} + Q_{s,i} - Q_{sr,i} - Q_{v,i} + Q_{i+1} + Q_{i-1}, \quad (1)$$

де $i=1\dots 8$, Q_t – кількість теплоти, що поступає від системи опалення; Q_s – кількість теплоти, отриманої від сонця, Дж; Q_v – втрати теплоти через дах теплиці та торцеві стіни, Дж; Q_{i+1} , Q_{i-1} – кількість теплоти, що поступає від сусідніх температурних зон, Дж; $Q_{sr,i}$ – кількість теплоти, що поглинається рослинами в i -й зоні, Дж; τ – час, с.

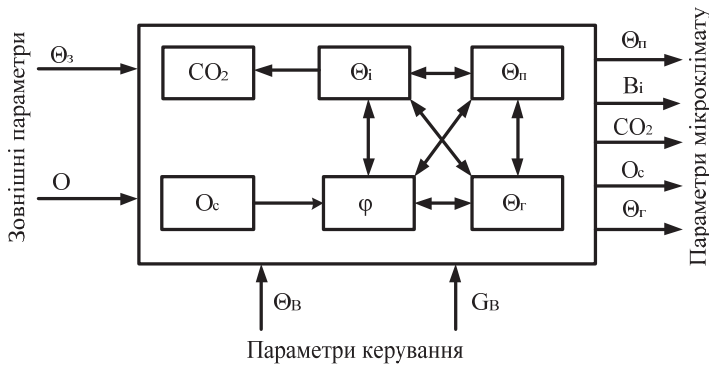


Рис. 6. Структурна схема моделі клімату в секції теплиці з урахуванням зовнішніх параметрів і параметрів керування: Θ_z – температура ґрунту; Θ_n – середня температура повітря; CO_2 – концентрація вуглекислого газу у секції; O_c – інтенсивність сонячної радіації у секції; Θ_B – температура гарячої води; Θ_z – температура зовнішнього повітря; G_B – витрати гарячої води; φ – вологість повітря; O – інтенсивність сонячної радіації; Θ_z – температура повітря зовні; Θ_i – температура повітря у секції.

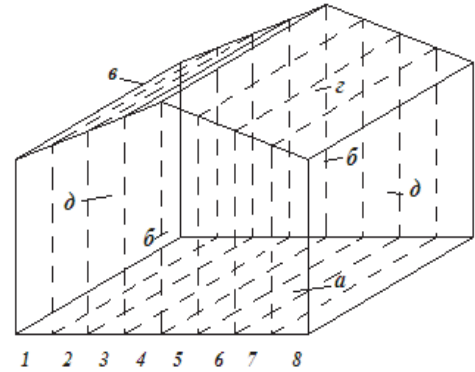


Рис. 7. Поділ об'єму секції теплиці на зони: a – ґрунтова поверхня теплиці; b – торцеві поверхні; c – дах теплиці; d – бічні поверхні; $1\dots 8$ – зони секції теплиці.

Враховуючи геометричні розміри температурних зон теплиці (табл. 1), її теплофізичні характеристики (коефіцієнти теплопередачі від води до стінки труби, стінки труби до повітря теплиці, від повітря теплиці до скла стінки теплиці, скла до повітря зовнішнього середовища) рівняння теплового балансу для i -ї зони буде мати вигляд:

$$6,443 \cdot 10^5 \cdot \Theta_i \frac{dQ_i}{d\tau} = 1,658 \cdot 10^3 \cdot (\Theta_{w,i} - \Theta_i) + 3 \cdot S_{k,i} + 4 \cdot (S_{b,i} - S_{k,i})(\Theta_i - 20) + \\ + 0,026 \cdot S_{i-1,i} (\Theta_{i-1} - \Theta_i) + 0,026 \cdot S_{i+1,i} (\Theta_{i+1} - \Theta_i) - 3,3 \cdot S_{k,i}. \quad (2)$$

де Θ_i – температура повітря в i -й зоні; $\Theta_{w,i}$ – температура теплоносія в i -й зоні; $S_{b,i}$ – площа бічної поверхні в i -й зоні; $S_{k,i}$ – площа даху в i -й зоні.

Модель кожної зони враховує вплив сусідніх температурних зон, а саме у першій і восьмій зонах секції враховано теплообмін із навколишнім середовищем через торцеві поверхні. Сонячна енергія передається через дах кожної зони з урахуванням його нахилу. Враховуючи зазначене, остаточний баланс для теплиці буде записаний у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} 6,443 \cdot 10^5 \cdot \Theta_i \frac{dQ_1}{d\tau} = 11 \cdot S_t (\Theta_{w,1} - \Theta_1) + 1,181 \cdot 10^3 \cdot (\Theta_1 - 20) + \\ + 8,19 \cdot (\Theta_2 - \Theta_1) - 25,8; \\ 6,443 \cdot 10^5 \cdot \Theta_i \frac{dQ_i}{d\tau} = 11 \cdot S_t (\Theta_{w,i} - \Theta_i) + 3 \cdot S_{k,i} + 4 \cdot S_{b,i} + S_{k,i} (\Theta_i - \Theta_3) + \\ + 0,026 \cdot S_{i-1,i} (\Theta_{i-1} - \Theta_i) + 0,026 \cdot S_{i+1,i} (\Theta_{i+1} - \Theta_i) - 3,3 \cdot S_{k,i}, \quad i = 2 \dots 7; \\ 6,443 \cdot 10^5 \cdot \Theta_i \frac{dQ_8}{d\tau} = 11 \cdot S_t (\Theta_{w,8} - \Theta_8) + 3 \cdot S_{k,8} + 1,181 \cdot 10^3 \cdot (\Theta_8 - \Theta_{i+1}) + \\ + 8,19 \cdot (\Theta_7 - \Theta_8) - 25,8. \end{array} \right. \quad (3)$$

Таблиця 1

Геометричні розміри температурних зон

№ з/п	Висота зони, м	Площа бічної поверхні, м ²	Об'єм зони, м ³
1	5,155	9,155	457,735
2	6,309	11,464	573,205
3	7,464	13,774	688,675
4	8,619	16,083	804,145
5	8,619	16,083	804,145
6	7,464	13,774	688,675
7	6,309	11,464	573,205
8	5,155	9,155	457,735

Розроблена математична модель (3) досліджувалася із використанням програмного середовища MATLAB Simulink для таких вхідних параметрів: $O_c=300$ Вт/м² та $\Theta_3=20$ °С. Температура повітря у різних зонах після закінчення перехідного процесу (рис. 8) стабілізується на рівні від 23,5 до 26 °С, а час розгону при цьому становить від 2000 до 6000 секунд. Така розбіжність пояснюється різним об'ємом кожної зони та дією зовнішніх збурень на крайні зони, що призводить до нерівномірного теплообміну середовища теплиці із системою опалення. Результати розрахунку відповідно до математичної моделі та експериментальні виміри температур у поперечному розрізі (рельєф температури) секції теплиці від 1 до 8 зони наведено на рис. 9. При цьому середньоквадратичне відхилення становить 1,05 °С, що підтверджує адекватність моделі.

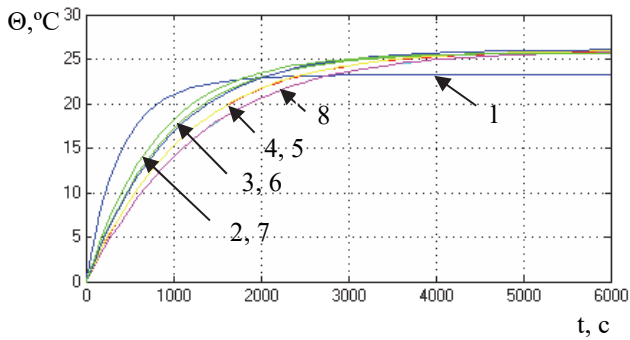


Рис. 8. Зміна температури в теплиці: 1...8 – зони секції.

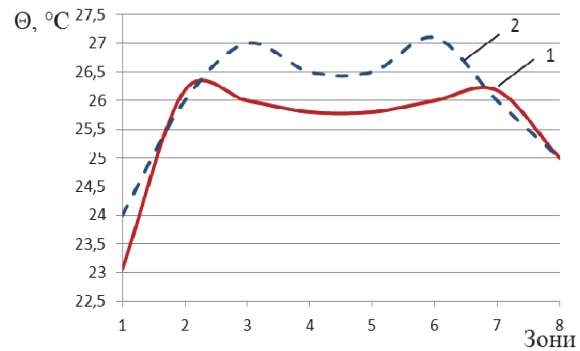


Рис. 9. Розподіл температури повітря: 1 – розраховані значення температури; 2 – виміряні значення температури повітря для секції теплиці (статичний режим).

Для спостереження за розвитком рослин, визначення відповідних коефіцієнтів математичних моделей розвитку рослини була створена камера штучного мікроклімату (фітотрон), яка складається з: відсіку із вегетаційним посудом для вирощування томатів; резервуара із живильним розчином; насоса; зволожувача повітря; пристрою для подачі CO_2 ; лампи освітлення камери; вентиляторів; нагрівачів повітря; датчиків температури; датчика освітленості; газоаналізатора CO_2 ; мікропроцесорного блока вимірювання та керування. Функціонально-алгоритмічна схема комплексу фітотрону зображена на рис. 10.

Для створення математичної моделі залежності якості томатів від дії технологічних параметрів у камері штучного мікроклімату (рис. 11) проведено активний багатофакторний експеримент. При цьому вхідними факторами були: температура рослин, температура і вологість повітря, газовий склад повітря, освітленість, а вихідними – якість томатів.

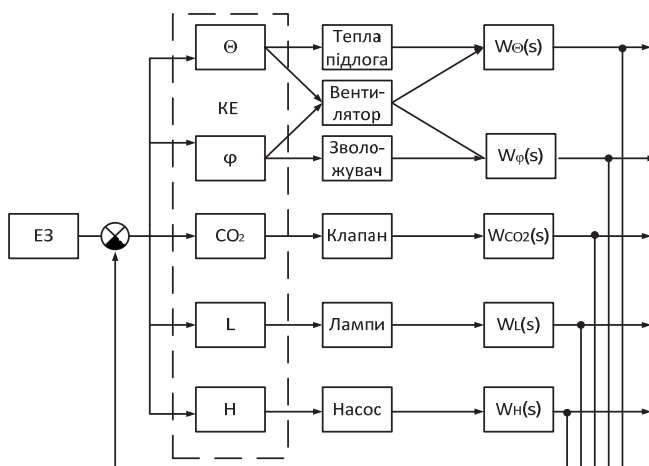


Рис. 10. Функціонально-алгоритмічна схема фітотрону: $EЗ$ – елемент задавання; $КЕ$ – керуючий елемент; $W_I(s)$, $W_\phi(s)$, $W_{CO_2}(s)$, $W_L(s)$, $W_H(s)$ – передатні функції об'єкта керування для каналів: температура, вологість, загазованість повітря, освітленість і полив.

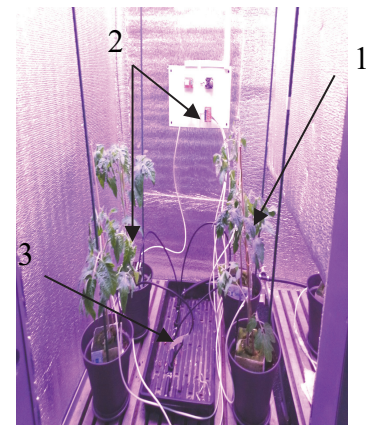


Рис. 11. Камера штучного мікроклімату: 1 – рослини помідорів; 2 – сенсори; 3 – крапельний полив.

Оцінка якості томатів здійснювалася із використанням зображень, отриманих із RGB-фотокамери, обробку котрих проводили із використанням вейвлет-перетворень. При цьому кожне фотозображення розкладалося на хвильові функції (вейвлети), із використанням яких для початкового зображення визначалися вейвлет-коефіцієнти $f(x,y)$:

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

$$\varphi_{y,i}(x) = 2^{y/2} \varphi(2^y x - i), \quad \psi_{y,j}(x) = 2^{y/2} \varphi(2^y x - j),$$

де r – глибина вейвлет-розкладу функції; $\lambda_{y,i,j}^{HV}$, $\lambda_{y,i,j}^{VH}$, $\lambda_{y,i,j}^{VH}$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення.

Показники якості плодів томатів розрізнялися у відповідності до шкали, що представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Шкала якості томатів

Оцінка якості	Значення показника якості за шкалою
Дуже добра	0,99 – 0,80
Добра	менше 0,80 – 0,64
Задовільна	менше 0,63 – 0,38
Погана	менше 0,37 – 0,21
Дуже погана	менше 0,20 – 0,01

Таку шкалу використано як вихідний параметр у математичній моделі оцінки якості рослинної продукції та стратегій керування.

У третьому розділі «*Стратегії керування електротехнічними комплексами для максимізації прибутку в теплиці*» наведено результати розробки системи автоматизації, що забезпечує максимізацію прибутку виробництва за рахунок використання інформації про якість рослинної продукції, як зворотної.

Запропоновано новий критерій оцінки розвитку рослини та її температурного середовища r (фітотемпературний критерій), який розраховується як:

$$r = \frac{\Theta_p - \Theta_3}{\Theta_0 - \Theta_3}, \quad (5)$$

де Θ_p – температура рослини, °С; Θ_0 – температура повітря в теплиці, °С; Θ_3 – температура зовнішнього повітря, °С.

Врахування значення фітотемпературного критерію під час забезпечення температурного режиму в теплиці дає можливість отримати більше продукції, а саме збільшити приріст з одного куца помідора до 151 грама/день.

Для визначення впливу технологічних параметрів, якості та кількості рослинної продукції на прибуток у спорудах закритого ґрунту були проведені дослідження із використанням нейронної мережі. До вхідних параметрів віднесли температури повітря та рослини, вологість повітря та кількість і якість рослинної продукції, вихідним параметром є прибуток. Стратегії керування електротехнічними комплексами, що супроводжують виробництво томатів, розраховувалися із використанням двох послідовно з'єднаних нейронних мереж (рис. 12).

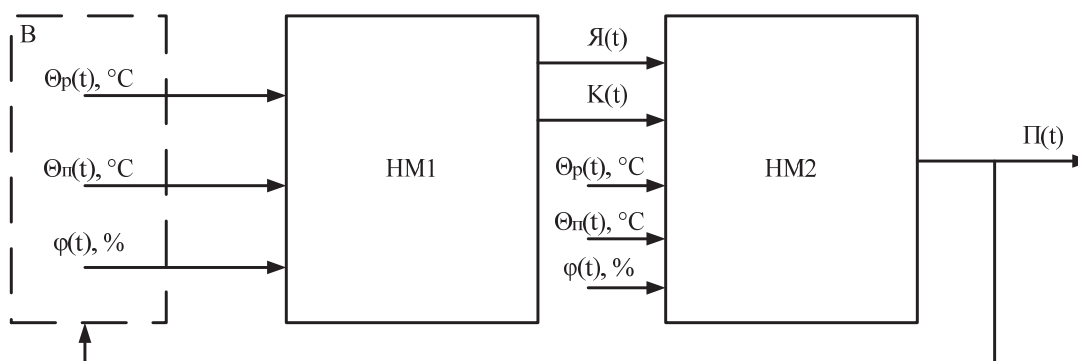


Рис. 12. Нейронні мережі для оцінки прибутку підприємства: $\Theta_p(t)$ – температура рослини, $^\circ\text{C}$; $\Theta_n(t)$ – температура повітря, $^\circ\text{C}$; $\varphi(t)$ – вологість повітря, $\%$; $Я(t)$ – показник якості, $\%$; $K(t)$ – кількість виробленої продукції, кг; B – витрати виробництва, Вт; $\Pi(t)$ – прибуток, грн; t – час, год.

Досліджувалися нейронні мережі різних структур. Найвищу точність показала мережа зі структурою «багатошаровий перцептрон» (рис. 13 а, б). Для зменшення величини похибки за допомогою «Конструктора мереж» у програмному пакеті Statistica 6.0 проведено додаткове навчання, за рахунок чого нейронна мережа цієї архітектури забезпечила похибку навчання 2,4 %, а контрольну – 1,9 %.

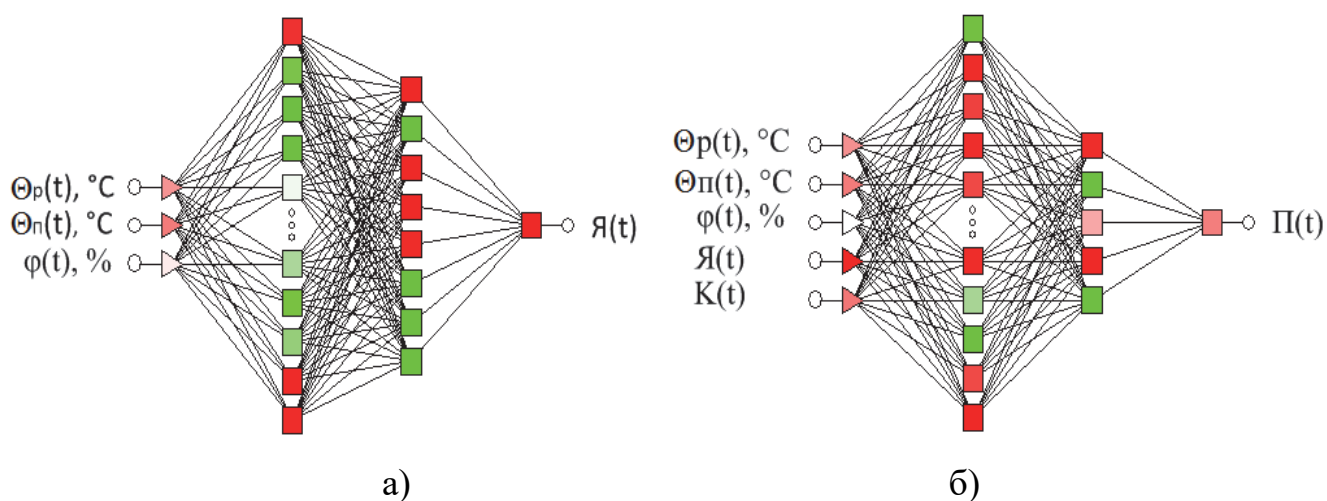


Рис. 13. Архітектури нейронних мереж: а) НМ1 (для оцінки якості); б) НМ2 (для оцінки прибутку).

За результатами роботи нейронних мереж отримано залежність якості томатів від температури повітря та рослини (рис. 14 а) і залежність прибутку від кількості продукції та її якості (рис. 14 б) з урахуванням витрат на забезпечення технологічних вимог.

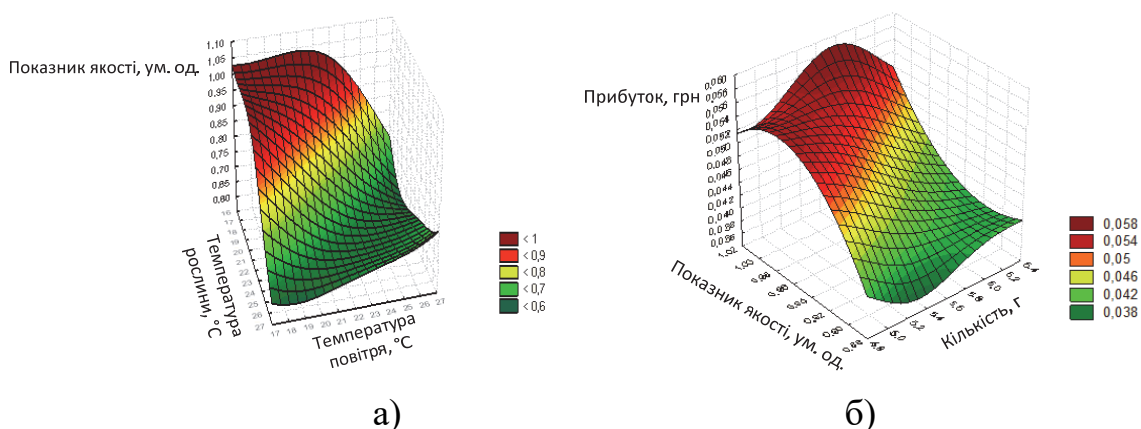


Рис. 14. Результати роботи нейронних мереж: а) залежність якості продукції від температур повітря та рослини; б) залежність прибутку від кількості та якості продукції.

Аналіз отриманих результатів (рис. 14) дозволяє зробити висновок, що за температури повітря в межах 20...24 °С можливий максимальний прибуток становить 0,06 грн з одного куща на добу, при цьому приріст якісної продукції становить 6 г/год.

Результати досліджень можуть бути представленими у вигляді рівнянь регресії, що описують залежності якості продукції Y та витрат B від технологічних параметрів вирощування:

$$Y(\Theta_p, \Theta_n, \varphi) = -4,96 + 0,059 \cdot \Theta_p - 0,243 \cdot \Theta_n + 0,125 \cdot \varphi + 0,027 \cdot \Theta_p \cdot \Theta_n + 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta_p \cdot \varphi - 9,093 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta_n \cdot \varphi - 0,0175 \cdot \Theta_p^2 - 0,0175 \cdot \Theta_n^2 - 1,357 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi^2 \quad (6)$$

$$B(\Theta_p, \Theta_n, \varphi) = -4,236 + 0,059 \cdot \Theta_p - 0,499 \cdot \Theta_n + 0,257 \cdot \varphi + 0,0113 \cdot \Theta_p \cdot \Theta_n - 6,251 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta_p \cdot \varphi + 8,033 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta_n \cdot \varphi + 2,873 \cdot \Theta_p^2 - 5,391 \cdot 10^{-3} \cdot \Theta_n^2 - 2,235 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi^2 \quad (7)$$

де Θ_p – температура рослини, °С; Θ_n – температура повітря, °С; φ – вологість повітря, %.

Для визначення значень факторів, що дозволять максимізувати прибуток, скористалися функцією бажаності Харрінгтона. Узагальнений критерій оптимізації F (функція бажаності Харрінгтона в безрозмірній формі) забезпечує на поточний момент реалізацію максимально можливого прибутку виробництва і визначається як:

$$F(Y(\Theta_p, \Theta_n, \varphi), B(\Theta_p, \Theta_n, \varphi)) = (Y(\Theta_p, \Theta_n, \varphi))^{0,5} \cdot (B(\Theta_p, \Theta_n, \varphi))^{0,5} \rightarrow \max, \quad (8)$$

$$Y(\Theta_p, \Theta_n, \varphi) \rightarrow \max, B(\Theta_p, \Theta_n, \varphi) \rightarrow \min,$$

де показник 0,5 використовується як ваговий коефіцієнт (прийняті однаковими, оскільки Y і B діють рівнозначно на дохід виробництва).

Для визначення області значень технологічних параметрів, що задовольняють задані вимоги та за яких досягається максимально можливий показник бажаності, проведено оптимізацію. На рис. 15, як результат досліджень, наведена одна із площин, де зображено лінії рівня залежності узагальненого критерію оптимізації від двох змінних технологічних параметрів (Θ_p , Θ_n) за сталої вологості повітря $\varphi = 70\%$.

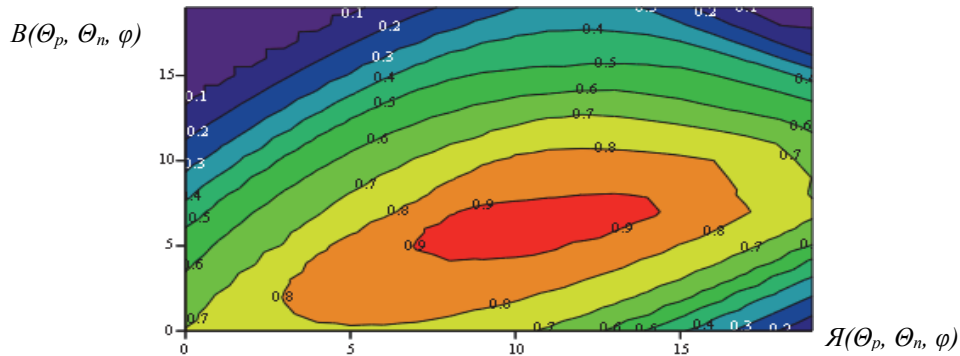


Рис. 15. Лінії рівня залежності узагальненого критерію оптимізації за сталої вологості повітря $\varphi = 70\%$ (якість і видатки подані в безрозмірній формі)

За результатами досліджень створено систему керування біотехнологічним об'єктом (рис. 16), що складається з: підсистеми прийняття рішень 1 (включає блок фільтрації вхідного сигналу 2, блок нейромережевого прогнозування якості продукції 3, нейромережевий блок оцінки прибутку 4, блок прийняття рішень 5, блок керування 6); мобільного робототехнічного блока моніторингу технологічних параметрів 7; локальної системи керування 8 (складається з локального автоматичного керуючого пристрою 9, виконавчих елементів 10, об'єкта керування 11).

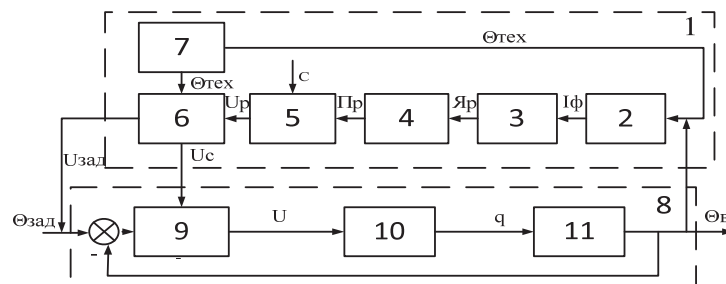


Рис. 16. Функціональна схема керування вирощуванням якісної овочевої продукції для максимізації прибутку: $\Theta_{\text{тех}}$ – сигнал із сприймаючих елементів; I_{ϕ} – інформація про якісний параметр біологічної складової; Y_p – прогнозоване значення якості продукції; P_p – зпрогнозоване значення прибутку; C – дані вартості складових прибутку; U_p – вибір стратегії керування; $U_{\text{зад}}$ – задана керуюча дія; U_c – створена стратегія керування; U – стратегія керування; q – керуюча дія; $\Theta_{\text{зад}}$ – задане значення сигналу; Θ_v – вихідний сигнал.

Максимальний прибуток виробництва досягається за умов, що температура рослини має становити $21,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура повітря $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вологість повітря – 60% . При цьому досягається виробництво продукції з показником Y в межах «дуже добре» за мінімальних енергетичних витрат.

У четвертому розділі «Розробка енергоефективного електротехнічного комплексу та його дослідження» представлено структуру енергоефективного електротехнічного комплексу, його апаратне, інформаційне і програмне забезпечення та зв'язок зазначених складових із типовим електротехнічним комплексом теплиці.

Для вимірювання технологічних параметрів та керування електротехнічними пристроями використано систему «СОТА 818. Систему фітотестування реалізовано на базі мікроконтролера Atmega2560, що вмонтований на платі Arduino Mega 2560 Rev3, датчиків температури DS18B20, датчика вологості DHT11 та датчиків освітленості.

Програмне забезпечення для зазначеної системи реалізовано у програмному середовищі LabVIEW (рис. 17). У цьому ж середовищі розроблено інтерфейс оператора та передбачено запис вимірних значень у базу даних для їх подальшої обробки.

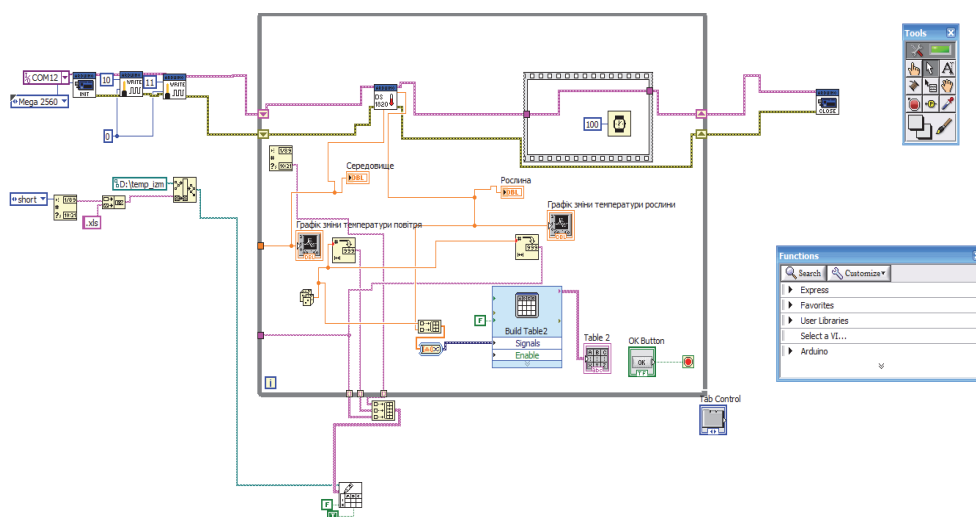


Рис. 17. Програма зчитування даних із датчиків

Контроль якості томатів здійснюється за допомогою обробки зображень (рис. 18), аналіз яких дозволяє визначити стиглість плодів за кольором, розмір плоду і стебла рослини.

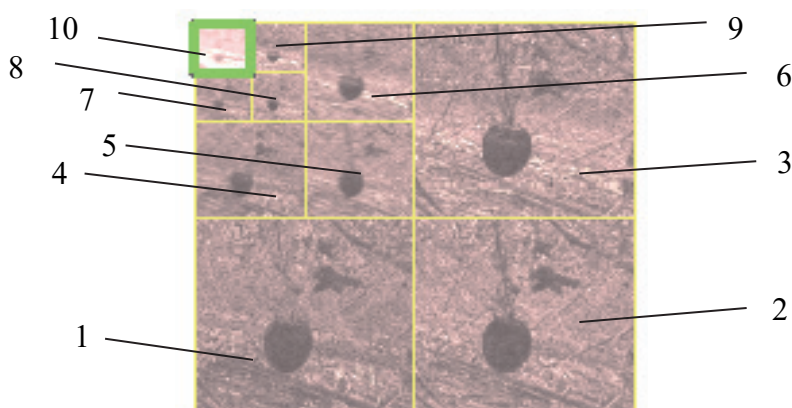


Рис. 18. Обробка зображень із використанням вейвлет-перетворення: 1...9 – глибина розкладання зображення під час вейвлет-перетворення; 10 – оброблене зображення.

Розроблену систему енергоефективного керування електротехнічним комплексом випробувано в ПАТ «Комбінат «Тепличний». Похибки вимірювальних каналів температури та вологості при цьому становлять: для вологості – 0,62 %, температури – 0,2 °С.

У п'ятому розділі «Впровадження та економічна оцінка системи енергоефективного керування електротехнічним комплексом» показано, що використання результатів вимірювань фітометричних, фітокліматичних параметрів томатів, як реакції на природні збурення та використання цих вимірювань для формування керуючих впливів, дозволяє суттєво збільшити прибуток виробництва. Так, енергоефективне керування електротехнічним комплексом з урахуванням стану біологічного об'єкта в теплиці ПАТ «Комбінат «Тепличний» дозволило отримати додатковий прибуток у розмірі 0,15 грн/(м²·день). У процесі випробування система керування електротехнічним комплексом теплиці продемонструвала: енергоефективне споживання впродовж виконання досліджень, збільшення показника якості томатів, та збільшення кількісного показника приросту продукції до 0,151 кг/добу з куща помідора. Термін окупності розробки при цьому становив 9 місяців.

ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційного дослідження вирішено актуальну науково-прикладну задачу – розроблено метод енергоефективного керування електротехнічним комплексом теплиці для вирощування рослинної продукції, що здатний враховувати значення технологічних параметрів, якість продукції, стани рослин та результати аналізу природних збурень. Зазначене дало змогу максимізувати прибуток виробництва для поточного моменту часу.

1. На основі проведеного аналізу функціонування сучасних електротехнічних комплексів теплиці встановлено, що частка енергетичних ресурсів у собівартості продукції сягає до 65–70 %, тому ефективно використання енергоресурсів є додатковою можливістю істотного зменшення собівартості виробленої продукції.

2. За результатами натурних досліджень встановлено, що температура рослин суттєво відрізняється від температури повітря в теплиці (до 7 °С), що слід враховувати для реалізації відповідних алгоритмів керування електротехнічними комплексами. Розроблені математичні моделі для використання під час налагодження електротехнічних комплексів на визначені технологічні параметри. При цьому похибки розрахунку за моделями не перевищували 0,82 °С – для розрахунку температури стебла; 0,507 °С – для розрахунку температури плоду; 1,188 °С – для розрахунку температури листка; 1,37 °С – для розрахунку температури повітря біля рослини.

3. Уточнено математичну модель просторового розподілу температури повітря в теплиці як об'єкта із розподіленими параметрами. Адекватність математичної моделі підтверджується збіжністю результатів натурних вимірів та імітаційного моделювання (середньоквадратичне відхилення при цьому не перевищувало 1,05 °С).

4. Обґрунтовано структуру електротехнічного комплексу для енергоефективного керування параметрами мікроклімату (температурою повітря) в теплиці, котра на відміну від існуючої включає інформацію про якість продукції та температуру рослин.

5. Розроблено метод енергоефективного керування електротехнічними комплексами, що максимізує прибуток виробництва томатів у теплиці, в основу якого, на відміну від існуючих, покладено використання нейронних мереж зі структурою багат шарового персептрона та інформації (як зворотний зв'язок) про якість продукції. Визначено залежності якості продукції та енергетичних витрат від технологічних параметрів (температури рослини, температури і вологості повітря), що дозволило використати їх для формування оптимальних стратегій керування.

6. Для розрахунку значень параметрів мікроклімату, що максимізують прибуток підприємства, адаптовано метод Харрінгтона. Результати використовувалися для налагодження електротехнічних комплексів у теплиці, що дозволило вирощувати помідори з оцінкою якості «дуже добре», мінімізуючи при цьому енергетичні витрати. Так, для температури зовнішнього середовища 20 °С (весняний період) енергетичні витрати для вирощування помідорів із оцінкою якості «дуже добре» мінімізуються, якщо в теплиці підтримується: температура повітря – 22,5 °С, температура рослини – 21,3 °С, вологість повітря – 60 %.

7. Випробування системи енергоефективного керування проводилося в теплиці ПАТ «Комбінат «Тепличний», у результаті чого отримали збільшення прибутку з одного куща помідору на 0,06 грн/день (додатковий прибуток у розмірі 0,15 грн/(м²·день)). Зазначене дозволило підготувати рекомендації щодо розробки електротехнічного комплексу для енергоефективного керування мікрокліматом у теплиці з урахуванням зворотної інформації про якість рослинної продукції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Лисенко В. П. Фітотемпературний критерій оцінки розвитку рослини / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, **Т. І. Лендел** // Енергетика і автоматика. – 2013. – № 3 (11). – С. 122–128. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia_2013_3_19]. (Автор розробив критерій оцінки розвитку рослини за температурою).

2. Програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці / [Лисенко В. П., Болбот І. М., **Лендел Т. І.**, Чернов І. І.] // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2014. – Вип. 154. – С. 42–45. (Автор розробив програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці).

3. Лисенко В. П. Моделювання просторового розподілу температурних зон в теплиці / В. П. Лисенко, В. О. Мірошник, **Т. І. Лендел** // Біоресурси і природокористування. – 2015. – Т. 7. – № 1–2. – С. 159–165. (Автор брав участь у розробленні просторово розподіленої математичної моделі біотехнологічного об'єкта).

**Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

4. Програмно-апаратне забезпечення підсистеми моніторингу зовнішніх температури і вологості при енергоефективному керуванні мікрокліматом у теплиці / [Лисенко В. П., Решетюк В. М., Штепа В. М., Руденський А. А., Пуха В. М., Дудник А. О., **Лендел Т. І.**] // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 194. – Ч. 2. – С 107–114. *(Автор розробив апаратне забезпечення підсистеми моніторингу зовнішніх температури і вологості).*

5. Прогноз та оцінка доцільності застосування різних видів джерел енергії застосування різних видів енергії на тепличних комплексах // [Лисенко В. П., Решетюк В. М., Штепа В. М., Дудник А. О., **Лендел Т. І.**, Чернов І. І.] // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 194. – Ч. 3. – С. 178–185. *(Автор розробив прогноз застосування різних видів джерел енергії, застосування різних видів енергії на тепличних комплексах).*

6. Температура рослин як параметр для регулювання // [Лисенко В. П., Болбот І. М., Мірошник В. О., **Лендел Т. І.**] // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2015. – Вип. 209. – Ч. 1. – С. 64–72. *(Автор дослідив реакцію рослини на збурення керуючої дії електротехнічних комплексів теплиці та зовнішнього середовища).*

7. Лисенко В. П. Оптимізація вирощування томатів в теплиці з використанням функції бажаності Харрінгтона / В. П. Лисенко, В. О. Мірошник, **Т. І. Лендел** // Автоматизація технологічних та бізнес-процесів. – 2015. – Т. 7. – № 4. – С. 33–39. *(Автор запропонував використання функції бажаності Харрінгтона для визначення оптимальних технологічних параметрів у спорудах закритого ґрунту при яких досягається максимум прибутку виробництва).*

Стаття у науковому виданні іншої держави

8. Лысенко В. Ф. Вейвлет-анализ в фитометрии растений / В. Ф. Лысенко, И. М. Болбот, **Т. И. Лендел** // Актуальные вопросы современной науки. – 2014. – С. 163–173. *(Автор розробив метод використання Вейвлет-аналізу для оптимізації опрацювання вхідних каналів систем керування).*

Патенти на корисну модель:

9. Пат. 92971 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами / Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., Болбот І. М., Дудник А. О., **Лендел Т. І.**; заявник і власник: Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № u201404129; заявл. 17.04.2014; опубліковано 10.09.2014, Бюл. № 17/2014.

10. Пат. 95283 UA, МПК (2014.01) A01G 25/00, A01D 45/00, A01G 3/00, A01B 51/00. Мобільний самохідний електротехнічний комплекс фітомоніторингу в теплиці / Лисенко В. П., Болбот І. М., **Лендел Т. І.**, Чернов І. І.; заявник і

власник: Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № а201305341; заявл. 25.04.2013; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24/2014.

11. Пат. 95612 UA, МПК (2014.01) G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами / Лисенко В. П., Болбот І. М., Штепа В. М., **Лендел Т. І.**, Чернов І. І.; заявник і власник: Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № u201408491; заявл. 25.07.2014; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24/2014.

Матеріали та тези наукових доповідей:

12. Лисенко В. П. Інтелектуальний електротехнічний комплекс для енергоефективного управління в теплиці / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, **Т. І. Лендел** // Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта: міжнар. наук.-практ. конф., 15–16 листоп. 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 64–65. *(Здобувачем обґрунтовано принципи побудови системи управління біологічних об'єктів).*

13. Дудник А. О. Побудова систем керування мікрокліматом у теплицях з використанням інтелектуальних складових / А. О. Дудник, В. П. Лисенко, **Т. І. Лендел** // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: наук.-практ. конф., 16–18 жовт. 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 171–172. *(Автор здійснив узагальнений аналіз системи керування).*

14. Лисенко В. П. Використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин в системі автоматичного регулювання / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, **Т. І. Лендел** // Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: міжнар. наук.-практ. конф., 5–6 листоп. 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 12–13. *(Автор створив критерій керування температурним режимом у теплиці).*

15. Підсистема фітомоніторингу в теплиці / [Лисенко В. П., Болбот І. М., Штепа В. М., **Лендел Т. І.**] // Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: міжнар. наук.-практ. конф., 15–16 жовт. 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 73–74. *(Автор розробив підсистему фітомоніторингу в теплиці).*

16. Лисенко В. П. Урахування температури рослин при вирощуванні в спорудах закритого ґрунту / В. П. Лисенко, **Т. І. Лендел**, І. І. Чернов // Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: міжнар. наук.-практ. конф., 16–17 жовт. 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 93–94. *(Автор розробив підходи керування процесом вирощування помідорів в теплиці з урахуванням температури рослин).*

17. Прогнозування вартості природного газу на тепличних комплексах / [Лисенко В. П., Штепа В. М., **Лендел Т. І.**, Чернов І. І.] // Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні: міжнар. наук.-практ. конф., 26–27 черв. 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 106–108. *(Автор розробив прогноз застосування різних видів джерел енергії, застосування різних видів енергії на тепличних комплексах).*

18. Лисенко В. П. Економічне обґрунтування застосування робототехнічного комплексу в теплиці / В. П. Лисенко, **Т. І. Лендел** // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління

організаційно-технічними та технологічними комплексами: міжнар. наук.-техн. конф., 27 листоп. 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 143–144. *(Автор розрахував економічне обґрунтування застосування робототехнічного комплексу в теплиці).*

19. Лисенко В. П. Моделювання просторового розподілення температурних зон в теплиці при вирощуванні томатів / В. П. Лисенко, **Т. І. Лендел** // Інноваційний розвиток аграрної сфери: міжнар. наук. конф., 19–21 берез. 2015 р.: тези доп. – К., 2015. – С. 36–38. *(Автор брав участь у розробленні просторово розподіленої математичної моделі біотехнологічного об'єкту).*

20. Лисенко В. П. Вплив зворотнього зв'язку про стан рослин на алгоритми керування / В. П. Лисенко, В. О. Мірошник, **Т. І. Лендел** // Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні: міжнар. наук.-практ. конф., 25–26 черв. 2015 р. – 2015. – С. 121–122. *(Автор створив концепцію керування електротехнічними комплексами в теплиці з урахуванням показника якості овочевої продукції).*

21. Лисенко В. П. Формування оптимальних стратегій керування в спорудах закритого ґрунту / В. П. Лисенко, **Т. І. Лендел** // Сучасні проблеми землеробської механіки: міжнар. наук. конф., 17–19 жовт. 2015 р.: тези доп. – К., 2015. – С. 50–51. *(Автор запропонував метод оптимізації Харрінгтона для визначення оптимальних технологічних параметрів у спорудах закритого ґрунту).*

АНОТАЦІЯ

Лендел Т. І. Енергоефективне керування електротехнічним комплексом теплиці з урахуванням стану біологічного об'єкта. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2016.

Дисертацію присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці наукових основ керування електротехнічними комплексами для підвищення енергоефективності та продуктивності, базуючись на особливостях динаміки станів складних біотехнологічних об'єктів.

За результатами досліджень встановлено, що традиційні системи стабілізації не враховують стани, в яких перебувають біологічні об'єкти під дією природних і керуючих збурень, що призводить до підвищення енергоспоживання і, як наслідок, до зниження рентабельності виробництва.

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень проаналізовано стани, в яких перебувають біологічні об'єкти, та розроблено відповідні математичні моделі, що дало можливість використовувати результати для розрахунку стратегій керування електротехнічними комплексами.

Із використанням нейронних мереж проведена оцінка впливу якості продукції на прибуток виробництва. Розроблено математичні моделі виробництва томатів із урахуванням особливостей біологічного об'єкта і на їх основі сформовано енергоефективні стратегії керування електротехнічними комплексами з використанням функції бажаності Харрінгтона.

Виконані експериментальні дослідження й економічні розрахунки підтвердили економічну ефективність упровадження систем керування

електротехнічними комплексами у спорудах закритого ґрунту та достовірність теоретичних положень.

Ключові слова: електротехнічні комплекси, біотехнологічний об'єкт, томат, стани біологічних об'єктів, якість продукції, нейронна мережа, фітомоніторинг.

АННОТАЦІЯ

Лендел Т. И. Энергоэффективное управление электротехническим комплексом теплицы с учетом состояния биологического объекта. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы, которая заключается в разработке научных основ управления электротехническими комплексами для повышения энергоэффективности и производительности, основываясь на особенностях динамики состояний сложных биотехнологических объектов.

Исследован процесс выращивания качественной продукции в овощеводстве защищенного грунта, который является важным сектором сельского хозяйства, обеспечивает население свежими овощами в течение всего года. В теплицах, характерных представителях сооружений закрытого грунта, технологические параметры выращивания растений поддерживают системы микроклимата, а их функционирование сопровождается значительными затратами энергетических ресурсов, в свою очередь, влияет на себестоимость продукции. Современные системы обеспечения процесса выращивания растений, как правило, не отслеживают их состояния как реакцию на действия природных возмущений, не дают возможности накапливать знания о растении, не позволяют прогнозировать ее урожайность.

Исследовано, что одним из основных технологических параметров выращивания растений в сооружениях закрытого грунта является температура воздуха. Предварительные исследования показывают, что низкие или слишком высокие температуры негативно влияют на развитие растения, а также интенсивность процессов респирации и транспирации. Необходимо постоянно проводить контроль за развитием растений с одновременным управлением параметров микроклимата.

В отдельных случаях существующие сегодня системы позволяют наблюдать за ростом и основными показателями развития одного растения с помощью стационарных фитометрических сенсоров. Поскольку количество растений в теплице значительное, а стоимость сенсоров и соответствующего оборудования высока, то проследить за развитием каждого растения или даже группы растений становится экономически нецелесообразным. Поэтому, как следствие, возникает потребность в разработке метода энергоэффективного управления электротехническим комплексом в теплице, учитывающего особенности

биологической составляющей объекта в процессе своего функционирования для максимизации прибыли.

Для решения указанной задачи использованы методы системного анализа (для анализа технологического процесса выращивания томатов в теплице), математического моделирования (в том числе состояний биологической составляющей), нейронные сети (для разработки стратегии управления процессом выращивания томатов в теплице), положения теории автоматического управления, экспериментальный метод исследования. Экспериментальная проверка теоретических положений проводилась в производственных условиях и с использованием фитотрона.

По результатам исследований установлено, что традиционные системы стабилизации не учитывают состояния, в которых находятся биологические объекты под действием естественных и управляющих возмущений, что приводит к повышению энергопотребления и, как следствие, к снижению рентабельности производства. На основе проведенного анализа затрат на энергетические ресурсы установлено, что доля энергетических ресурсов в себестоимости продукции достигает 65...70 %, поэтому эффективное использование энергоресурсов – дополнительная возможность существенно уменьшить себестоимость продукции.

С использованием нейронных сетей проведена оценка влияния качества продукции на прибыль производства. Разработаны математические модели производства томатов с учетом особенностей биологического объекта, и на их основе сформированы энергоэффективные стратегии управления электротехническими комплексами с использованием функции желательности Харрингтона. Использование функции желательности Харрингтона позволило создать обобщенный критерий оптимизации, составляющим которого являются качество продукции и расходы на обеспечение технологии выращивания томатов.

Предложен новый критерий оценки состояния растения (фитотемпературный критерий), который, с учетом разницы температур растения и окружающей среды, используется во время управления электротехническим комплексом, что позволяет с большей точностью реализовывать требования технологов.

Усовершенствована математическая модель температурного поля теплицы как объекта с распределенными параметрами, что, в отличие от существующих, содержит факторы: температуру растения, взаимосвязь между технологическими параметрами выращивания и реакцией растения как биологической составляющей.

В диссертационной работе обоснована структура электротехнического комплекса для энергоэффективного управления параметрами микроклимата (температура воздуха) в теплице, которая, в отличие от существующей, включает информацию о качестве продукции и температуру растений.

Выполненные экспериментальные исследования и экономические расчеты подтвердили экономическую эффективность внедрения систем управления электротехническими комплексами в сооружениях закрытого грунта и достоверность теоретических положений.

В результате диссертационного исследования разработан метод, позволяющий обеспечить энергоэффективное управление электротехническим

комплексом в теплице с учетом состояния биологического объекта и параметров микроклимата для максимизации прибыли производства.

Ключевые слова: электротехнические комплексы, биотехнологический объект, томат, состояния биологических объектов, качество продукции, нейронная сеть, фитомониторинг.

ABSTRACT

Lendiel T. I. Energy-efficient control of electrotechnical greenhouse complex in the condition of a biological object. – The manuscript.

Thesis for scientific degree of PhD in Technical sciences, specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, 2016.

Dissertation is devoted to solving scientific and applied problems, which is to develop the scientific foundations of electrical systems for energy efficiency and productivity, based on the features of the dynamics states of complex biotechnological facilities.

According to the research results it was found that traditional regulating systems do not take into account statuses in which biological facilities are under the control and influence of natural disturbances, which leads to an increase in energy consumption and, consequently, profitability reduction.

According to the results of theoretical and experimental researches analyzed the statuses in which biological facilities lie and developed the appropriate mathematical models that allowed us to use the results to calculate the strategies of electrical systems.

Using neural networks assess the impact of product quality on the profit made. The mathematical models of tomato production in view of features of a biological facilities and, based on energy-efficient strategy is formed electrical systems using the Harrington's desirability function.

Experimental studies and economic calculations confirmed the cost-effectiveness of management systems of electrical systems in areas under glass and the accuracy of the theoretical positions.

Key words: electrical systems, biotechnological facility, tomato, biological facility status, production quality, neural network, phytomonitoring.

Підписано до друку 12.02.2016 р. Зам. № 93
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 0,9
Друк «ЦП «КОМПРИНТ», Свідоцтво ДК №4131, від 04.08.2011р.
м. Київ, вул. Предславинська, 28
528-05-42, 067-209-54-30