

Зубенко В.О.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

Березюк І.А.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті представлено результати комплексного дослідження процесу оптимізації параметрів мікроклімату в тепличних спорудах. Основна увага приділена аналізу впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на температурний режим, який є критичним для забезпечення нормального росту, розвитку та врожайності овочевих культур. Проведено ідентифікацію ключових змінних, що визначають динаміку мікрокліматичних умов у теплиці, зокрема таких як маса повітря, маса ґрунту, потужність повітряного та ґрунтового обігрівачів, а також час розігріву системи.

На основі методу математичного планування експерименту складено обґрунтований план дослідження, що охоплює широкі діапазони варіювання керованих параметрів. Проведено серію експериментальних випробувань, результати яких використано для побудови емпіричних регресійних моделей залежності температури повітря та ґрунту від змінних факторів. Отримані моделі пройшли перевірку на адекватність, відтворюваність та інформативність за критеріями математичної статистики, що підтверджує їх надійність для подальших прикладних розрахунків і впровадження.

У процесі дослідження застосовано методіку експертних оцінок для визначення вагових коефіцієнтів кожного з критеріїв оптимізації, що дало змогу сформулювати узагальнений критерій ефективності функціонування системи. Обґрунтовано доцільність переходу від традиційного регулювання, яке базується переважно на зовнішній температурі, до гнучкого, інтелектуального управління з урахуванням широкого спектра внутрішніх і зовнішніх факторів. Як перспективний напрямок запропоновано впровадження адаптивних систем керування з використанням методів штучного інтелекту – нейронних мереж і нечіткої логіки.

Такий підхід дозволяє ефективно розподіляти енергетичні ресурси, зменшувати витрати палива, підвищувати стабільність мікроклімату відповідно до агротехнічних вимог та забезпечувати підвищення врожайності. Розроблена нейро-комп'ютерна система відкриває нові можливості для автоматизації та інтелектуалізації управління в сучасних тепличних комплексах, сприяючи зростанню енергоефективності, економічної доцільності та технологічної гнучкості сільськогосподарського виробництва.

Ключові слова: теплиця, мікроклімат, температурний режим, математичне моделювання, регресійний аналіз, багатофакторна оптимізація, нейронні мережі, нечітка логіка, адаптивне управління, енергоефективність, автоматизація, агротехнології.

Постановка проблеми. У сучасних умовах підвищення цін на енергоносії, кліматичних змін та зростаючих вимог до якості аграрної продукції, ефективне управління мікрокліматом у теплицях стає одним з ключових завдань агропромислового комплексу. Температура повітря, температура ґрунту та вологість – критичні чинники, що впливають на ріст, розвиток і врожайність сільськогосподарських культур. Відсутність належного контролю за цими параметрами може призвести до зниження урожайності, погіршення

якості продукції та нераціонального використання ресурсів.

На практиці, у багатьох тепличних господарствах України досі використовуються застарілі системи регулювання мікроклімату, в яких температура теплоносія жорстко пов'язана з зовнішньою температурою повітря. Такий підхід ігнорує внутрішні умови теплиці, зокрема теплову інерційність конструкцій, вплив сонячного випромінювання, теплоакуюлюючі властивості ґрунту та інші чинники. Внаслідок цього

виникає або дефіцит тепла, або його надлишок, що в обох випадках призводить до перевитрат енергії та зниження ефективності тепличного виробництва.

Таким чином, виникає необхідність у створенні точних математичних моделей мікроклімату теплиці та запровадженні адаптивних систем керування, здатних забезпечувати оптимальні умови вирощування культур при мінімальних енергетичних витратах. Це підвищує не лише економічну ефективність, але й сприяє екологічній сталості тепличного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, теплиця – складний об'єкт, для ефективного автоматичного керування яким слід збирати, обробляти, зберігати та аналізувати значні за обсягами потоки інформації [1, 2–4]. Проте, в багатьох господарствах України ще використовується система подачі тепла по графіках температури, коли температура теплоносія жорстко прив'язана до зовнішньої температури. Це призводить до перевитрат палива і дефіциту тепла в теплиці. Причина в тому, що, при такому регулюванні температури, не враховується величезна кількість необхідної інформації для правильного розрахунку температури. Стає очевидним, що без єдиної системи збору інформації і прийняття рішень на основі всіх зібраних даних не обійтись. Сучасна система управління повинна прораховувати необхідну кількість енергії і розподіляти її між всіма джерелами тепла. Така система управління теплиць повинна включати комп'ютерну техніку і складатись з приладового та програмного забезпечення. Вирішення цієї проблеми вбачається в застосуванні нейрокомп'ютерної системи [3, 5, 8, 12, 13].

Більшість існуючих систем керування теплицями ґрунтуються на простих алгоритмах – наприклад, регулювання температури всередині залежно лише від зовнішньої температури. При цьому ігноруються особливості самої теплиці, такі як теплоізоляція, маса повітря і ґрунту, або наявні джерела тепла. У деяких випадках застосовуються більш складні системи типу SCADA або мікропроцесорні контролери, проте їх реалізація часто вимагає значних фінансових вкладень і спеціалізованого обслуговування. Крім того, ці системи не завжди здатні адаптуватися до швидких змін погодних умов або біологічних потреб рослин.

Постановка завдання. З огляду на вище сказане, у цьому дослідженні ставиться завдання побудувати більш гнучку і точну модель управ-

ління температурним режимом у теплиці. Передбачається моделювання взаємозв'язків між основними критеріями (температура повітря та температура ґрунту) і керованими факторами: маса повітря, маса ґрунту, потужність повітряного і ґрунтового обігрівачів, тривалість розігріву. Крім того, мета полягає у визначенні оптимального поєднання цих параметрів таким чином, щоб досягти стабільного температурного режиму без перевитрат енергії. Для цього буде застосовано математичне планування експерименту, побудовано регресійні моделі, а також здійснено багатокритеріальну оптимізацію із застосуванням експертних оцінок. Особливу увагу буде приділено врахуванню впливу конструктивних особливостей теплиці, технологічних рішень і експлуатаційних умов. Одним із важливих завдань є також визначення оптимальних умов роботи системи керування, з урахуванням одночасного впливу декількох показників (температури повітря і ґрунту), для досягнення найкращих умов вирощування культур.

Виклад основного матеріалу. У ході аналізу досліджень [3, 5, 8, 12, 13] було обґрунтовано вибір критеріїв оптимізації процесу керування мікрокліматом у теплиці. Основними критеріями виступають температура повітря в середині теплиці та температура ґрунту, оскільки саме ці параметри мають вирішальний вплив на розвиток і продуктивність овочевих культур. Згідно з агротехнічними нормами, оптимальні значення температури повітря мають перебувати в межах 16–28 °С, а температури ґрунту – 18–26 °С.

Фактори мікроклімату, які підлягають регулюванню складають систему, в яку входять температура ґрунту, температура повітря в середині теплиці та вологість повітря в середині теплиці, які змінюються в функції від часу.

Будемо вважати, що факторами, які здійснюють вплив на систему, є такі параметри навколишнього середовища, як температура, вологість повітря, швидкість вітру, та інтенсивність сонячного випромінювання.

На тепловий режим впливають не тільки параметричні чинники, а також обмеження конструкції будівлі (стіни, скління, перекриття).

Температури ґрунту та повітря, є важливими факторами, які впливають на вирощування різних овочевих культур в теплиці.

Таким чином, в якості критеріїв оптимізації вибрано:

- температуру ґрунту;
- температуру повітря.

Відповідно до нормативів технологічного проектування системи інженерного забезпечення мікроклімату теплиці необхідно підтримувати в залежності від виду овочів, які вирощуються в теплицях [2]:

– температуру внутрішнього повітря Y_1 – на рівні від 16°C до 28°C;

– температуру ґрунту Y_2 – від 18 до 26°C.

У якості критеріїв оптимізації процесу управління параметрами мікроклімату у теплиці вибрано температуру внутрішнього повітря $T^\circ\text{C}$ та температуру ґрунту $\Theta^\circ\text{C}$.

При визначенні керованих факторів було розглянуто всі існуючі групи факторів, що можуть здійснювати вплив на процес управління параметрами мікроклімату теплиці. Вибираючи фактори (група X), враховувалася область, що обмежує їх можливе варіювання, а також їх розмірність. Ступінь точності математичної моделі визначається діапазоном їх зміни.

На основі викладеної вище інформації для кожного i -го фактору встановлювалися наступні значення:

x_{i0} – основний рівень фактору; x_{imax} , x_{imin} – верхній та нижній рівні i -го фактору, що застосовуються під час дослідження; Δx_i – інтервал варіювання.

Для факторів, що не входять у математичну модель управління мікрокліматом теплиці встановлено рівні фіксації.

Для моделювання процесу управління температурою внутрішнього повітря та ґрунту на основі аналізу проведеного ранжирування було визначено групу факторів, що більше за всіх впливають на величину критеріїв оптимізації, та встановлено рівні їх варіювання (табл. 1). В матрицю планування як керовані фактори були внесені: час розігріву, потужність повітряного обігрівача, потужність ґрунтового обігрівача, маса ґрунту та маса повітря (табл. 1).

Таблиця 1

Фактори та рівні їх варіювання

№	Фактори	Позначення	Рівні варіювання
1	Маса повітря, кг/м ³	X_1	0,3 ... 1,24
2	Маса ґрунту, кг	X_2	1200... 1600
3	Потужність повітряного обігрівача, Вт/м ²	X_3	120...500
4	Потужність ґрунтового обігрівача, Вт/м ²	X_4	100...120
5	Час розігріву, год.	X_5	46...223

У зв'язку з тим, що розрахунок за математичними моделями та результатами експериментальних досліджень значень критеріїв оптимізації у пробних точках є трудомістким, в роботі використано відповідне програмне забезпечення. Отриманий план представляє собою матрицю, кожний рядок якої містить кодовані значення незалежних змінних для кожного рівня, представлений у табл. 2 у вигляді робочої матриці.

Таблиця 2

План експерименту в кодованих значеннях

№	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25
3	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75
4	0,125	0,625	0,875	0,875	0,625
5	0,625	0,125	0,375	0,375	0,125
6	0,375	0,375	0,625	0,125	0,875
7	0,875	0,875	0,125	0,625	0,375
8	0,0625	0,9375	0,6875	0,3125	0,1875
9	0,5625	0,4375	0,1875	0,8125	0,6875
10	0,3125	0,1875	0,9375	0,5625	0,4375
11	0,8125	0,6875	0,4375	0,0625	0,9375
12	0,1875	0,3125	0,3125	0,6875	0,5625
13	0,6875	0,8125	0,8125	0,1875	0,0625
14	0,4375	0,5625	0,0625	0,4375	0,8125
15	0,9375	0,0625	0,5625	0,9375	0,3125
16	0,03125	0,53125	0,40625	0,21875	0,46875

Після цього проведено перехід від кодованих значень до натуральних, що значно спрощує реалізацію плану експерименту (табл. 3).

Таблиця 3

План експерименту в натуральних значеннях

№	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,77	1400	310	110	135
2	0,54	1500	215	115	90
3	1,01	1300	405	105	179
4	0,42	1450	453	118	157
5	0,89	1250	263	108	68
6	0,65	1350	358	103	201
7	1,12	1550	168	113	112
8	0,36	1575	381	106	79
9	0,83	1375	191	116	168
10	0,59	1275	476	111	123
11	1,06	1475	286	101	212
12	0,48	1325	239	113	146
13	0,95	1525	429	103	57
14	0,71	1425	144	109	190
15	1,18	1225	334	119	101
16	0,33	1412	274	104	129

На основі одержаних результатів проводились експериментальні дослідження впливу факторів на критерій оптимізації – температуру внутрішнього повітря. В результаті експериментальних досліджень приймаємо: маса повітря $0,77 \text{ кг/м}^3$, маса ґрунту 1400 кг , потужність повітряного обігрівача 310 Вт/м^2 , потужність ґрунтового обігрівача 110 Вт/м^2 , час розігріву 135 год . При цих умовах визначали температуру внутрішнього повітря та температуру ґрунту.

За результатами експерименту (табл. 4) за допомогою відповідного програмного забезпечення проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі залежностей критеріїв оптимізації, які характеризують температуру внутрішнього повітря $T^\circ\text{C}$ та температуру ґрунту $\Theta^\circ\text{C}$ від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

Таблиця 4

**Значення критеріїв оптимізації –
температури внутрішнього повітря $T^\circ\text{C}$
та температури ґрунту $\Theta^\circ\text{C}$**

№	Значення температури внутрішнього повітря $T^\circ\text{C}$		Значення температури ґрунту $\Theta^\circ\text{C}$	
	Y1.1	Y1.2	Y2.1	Y2.2
1	23	20	18	24
2	20	22	19	23
3	20	24	20	19
4	22	18	21	18
5	21	24	20	22
6	23	20	21	21
7	24	23	23	20
8	24	22	20	21
9	22	24	21	22
10	18	20	22	23
11	19	24	20	22
12	19	21	19	21
13	24	23	22	20
14	23	21	21	20
15	22	20	22	19
16	24	24	23	22

В якості початкових даних використовувалися матриця планування та результати експериментальних досліджень.

Після обробки результатів експерименту отримані математичні моделі, що описують залежність температури внутрішнього повітря $T^\circ\text{C}$ та температури ґрунту $\Theta^\circ\text{C}$ від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= 11,8552 + 0,59367x_3 - 0,413x_1x_5^2 - \\
 &- 0,502729x_3x_4^2 - 0,586957x_5 - 0,384668x_1 + \\
 &+ 1,13098x_2^3x_3 + 0,542075x_4^2 - 0,420439x_1x_4^2; \\
 Y_2 &= 17,3438 + 2,25994x_2^3x_3 + 1,35827x_4^3 + \\
 &+ 1,66604x_1x_3^2 - 1,72968x_3x_4^2 + 1,32511x_2^3x_5 + \\
 &+ 1,69418x_3x_5^3 + 0,72398x_5^2 + 0,599102x_2^2,
 \end{aligned} \quad (1)$$

де Y_1 , Y_2 – математичні моделі в кодованих значеннях для температури внутрішнього повітря $T^\circ\text{C}$ та температури ґрунту $\Theta^\circ\text{C}$ відповідно.

Формули переходу від кодованих значень до натуральних:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 1(X_1 - 1); \\
 x_1^2 &= 1,6(X_1^2 - 0,625); \\
 x_2^2 &= 1,60639(X_2^2 - 0,000330781X_2 - 0,377154); \\
 x_2^3 &= 3,08876(X_2^3 - 0,00135689X_2^2 - 0,675275X_2 + \\
 &+ 0,000387002); \\
 x_2^4 &= 6,76881(X_2^4 - 0,00319984X_2^3 - 0,957068X_2^2 + \\
 &+ 0,00172471X_2 + 0,106279); \\
 x_3 &= 0,00272109(X_3 - 712,5); \\
 x_3^2 &= 1,6401(X_3^2 - 0,058157X_3 - 0,366097); \\
 x_3^3 &= 3,13503(X_3^3 - 0,0241896X_3^2 - \\
 &- 0,644398X_3 - 0,0124354); \\
 x_4 &= 8,97817(X_4 - 0,368619); \\
 x_4^2 &= 1,83884(X_4^2 - 0,0877399X_4 - 0,368613); \\
 x_4^3 &= 3,31359(X_4^3 - 0,124617X_4^2 - 0,600399X_4 + \\
 &+ 0,0135935); \\
 x_5 &= 0,0079028(X_5 - 786,463); \\
 x_5^2 &= 1,61702(X_5^2 - 0,0366532X_5 - 0,36933); \\
 x_5^3 &= 3,11914(X_5^3 - 0,0100424X_5^2 - \\
 &- 0,659528X_5 - 0,00982813),
 \end{aligned}$$

де X_1 , X_2 , X_3 , X_4 та X_5 – конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори, перелічені у відповідній таблиці

Отримані залежності перевірені на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики. Результати статистичного аналізу представлені в таблиці 5.

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за G – критерієм Кохрена. Для всіх регресійних залежностей $G_{\text{розн}} < G_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені.

Перевірка гіпотези на адекватність отриманих моделей результатів експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера. Для одержання моделей при прийнятому рівні значимості $\alpha = 0,05$ $F_{\text{розн}} < F_{\text{табл}}$, тому модель адекватно відображає результат експерименту.

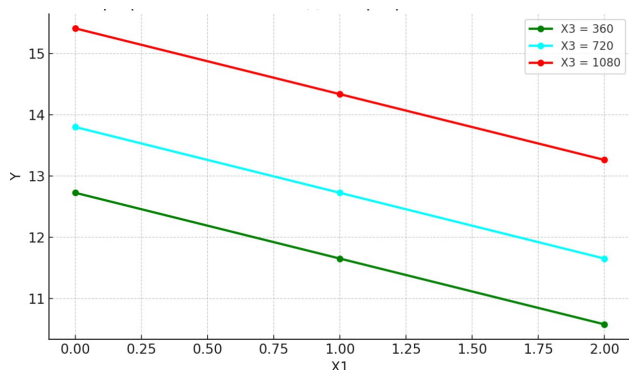
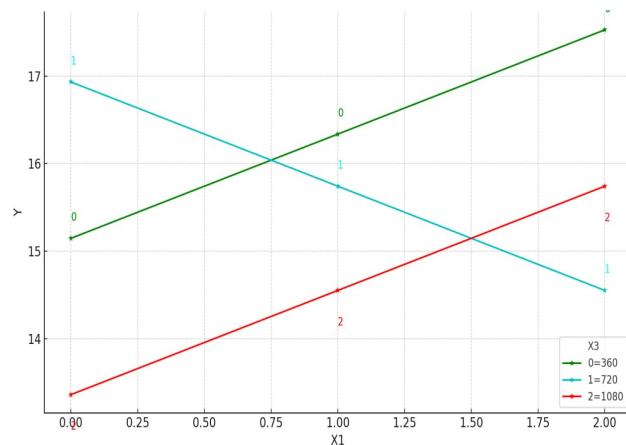
Оцінка якості отриманих математичних моделей проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистич-

Статистичні характеристики моделей

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей	
	Y_1	Y_2
Залишкова дисперсія	0,08991	0,273543
Дисперсія відтворюваності	0,04813	0,131559
Розрахункове значення F-критерію	1,86821	2,07923
Рівень значимості F-критерію для адекватності для ступенів свободи	0,05 $V_1 = 8$ $V_2 = 7$	0,05 $V_1 = 8$ $V_2 = 23$
Табличне значення F-критерію для адекватності	2,6572	2,6572
Стандартна помилка оцінки	0,327098	0,554523
Стандартна помилка оцінки скоректована з урахуванням ступенів свободи	0,447897	0,759312
Частка розсіювання, що пояснюється моделлю	0,917237	0,951927
Уведено регресорів	9	9
Коефіцієнт множинної кореляції	0,957725	0,975667
Коефіцієнт множинної кореляції, скоректований з урахуванням ступенів свободи	0,919141	0,953867
F відношення для R	9,69739	17,3264
Рівень значимості F-критерію для інформативності для ступенів свободи	0,05 $V_1 = 8$ $V_2 = 23$	0,05 $V_1 = 8$ $V_2 = 23$
Табличне значення F-критерію для інформативності	2,37481	2,37481
Критерії Бокса і Веда для інформативності	1	1

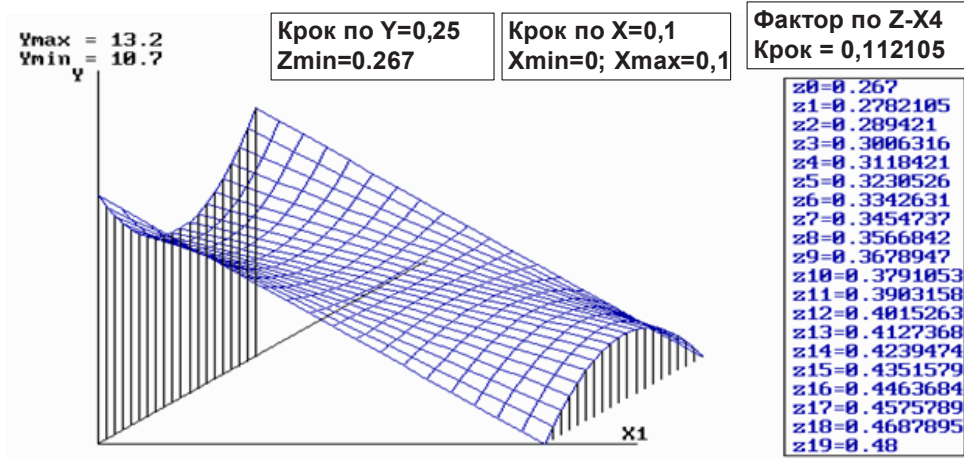
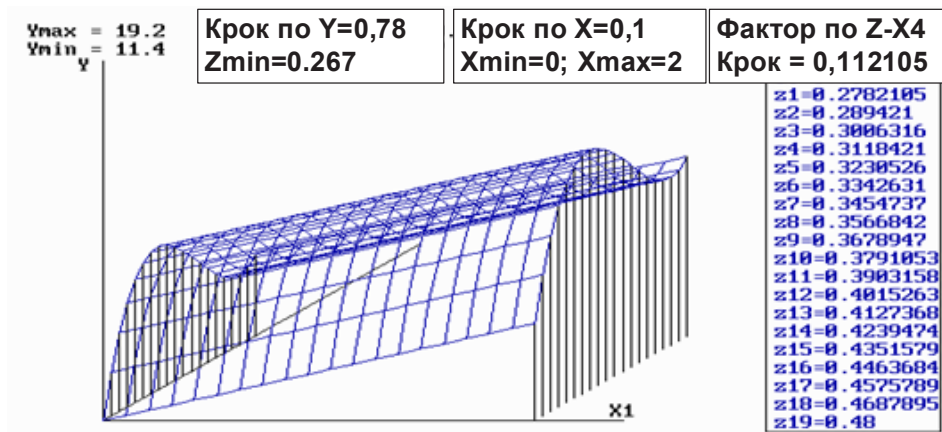
ного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i і початковим експериментальним результатам. В отриманих математичних моделях коефіцієнти множинної кореляції статистично значимі, тобто $F_{\text{розр}} > F_{\text{табл}}$, при прийнятому рівні значимості, отже моделі інформативні і несуть корисну інформацію про процес, що моделюється.

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерії оптимізації, які характеризують температуру внутрішнього повітря $T^{\circ}\text{C}$ та температуру ґрунту $\Theta^{\circ}\text{C}$. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис. 1 та рис. 2).

Рис. 1. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_3)$ Рис. 2. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_3)$

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке на протязі всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект.

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідних геометричних поверхонь, які представлені на рис. 3 та рис. 4.

Рис. 3. Поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_4)$ в тривимірному просторіРис. 4. Поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_4)$ в тривимірному просторі

Результати статистичного аналізу дозволяють зробити висновок, що регресійні залежності адекватні та інформативні, результати відтворені, коефіцієнти b_0 і b_i статистично значимі. Усе це говорить про те, що регресійні залежності адекватно описують процес і їх можна використовувати для аналізу і оптимізації процесу управління мікрокліматом теплиці.

Побудовані в роботі моделі підтверджують можливість оптимізації параметрів мікроклімату теплиці та визначення таких їх значень, які забезпечують стабільний температурний режим відповідно до агротехнічних вимог. Статистичний аналіз засвідчив, що отримані залежності є адекватними, інформативними та відтворюваними. Це дає підстави використовувати їх для подальшого аналізу й оптимізації систем управління мікрокліматом у тепличних умовах.

Висновки. У процесі дослідження встановлено, що для ефективного управління мікро-

кліматом у теплиці доцільно здійснювати регулювання температури повітря за умови сталого підігріву ґрунту, підтримуючи його температуру на рівні, що відповідає агротехнічним вимогам. Аналіз динамічних характеристик теплиці аркового типу показав її високу інерційність, що зумовлює певне запізнення в реакції на зміну керуючих дій. Крім того, виявлено наявність невизначеності параметрів моделі об'єкта керування, що ускладнює застосування класичних регуляторів. У таких умовах найбільш ефективним підходом до автоматизації процесу є впровадження інтелектуальних адаптивних систем керування, зокрема побудованих з використанням нейронних мереж та нечіткої логіки. Це дозволяє забезпечити стабільне функціонування теплиці, зменшити енерговитрати та підтримувати оптимальний мікроклімат для вирощування овочевих культур.

Список літератури:

1. Лисенко В.П., Дудник А.О. Оптимальне управління: стан та перспективи розвитку в тепличній галузі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2011. Вип. 166. С. 53–56
2. Іноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу / А.П.Ладанюк, В.М.Решетюк, В.Д.Кишенько, Я.В.Смітюх. Київ: Центр учбової літератури, 2014. 280 с.
3. Прокопенко Т. О., Березюк І. А., Зубенко В. О. Автоматизована система керування температурно-вологісним режимом теплиці на основі апарату нечіткої логіки. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70), № 6, ч. 1. С. 129–134.
4. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І., Чернов І. І. Програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2018. № 2. С. 65.
5. Лайко Б., Цопа О. Інформаційна система керування мікрокліматом розумної теплиці. *V International Scientific and Theoretical Conference «The driving force of science and trends in its development: матеріали наук. – прак. конф. 22 грудня 2023 р. Ковентрі, Велика Британія : SCIENTIA*. 2023. С. 125–128.
6. Діордієв В. Т., Кашкарьов А. О., Діордієв О. О. Автоматизована система моніторингу та керування мікрокліматом у теплиці. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 1–9
7. Васильєва Ю. Д., Морозова М. М. Нейромережа для контролю параметрів мікроклімату теплиці. *Погляд у майбутнє приладобудування: зб. праць XII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Київ, 2019р. Київ.: ПБФ, КПП ім. Ігоря Сікорського, Центр учбової літератури, 2019. С. 429–432.*
8. Євсеєнко О. М. Розробка апаратно-програмної системи керування мікрокліматом теплиці. *Технічна інженерія*. 2020. № 1 (85). С. 104–109.
9. Гайдукевич С. В., Семенова Н. П., Леськів Я. А. Підвищення ефективності в системах керування мікрокліматичними параметрами приміщень закритого ґрунту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 6. С. 58–64.
10. Hoque J., Ahmed R., Hannan S. An Automated Greenhouse Monitoring and Controlling System using Sensors and Solar Power. *European Journal of Engineering Research and Science*. 2020. Vol. 5 (4). P. 510–515.
11. Лактіонов І. С., Вовна А. В., Бережної М. О., Лебедев В. А. Комп'ютеризована система комплексного моніторингу і управління мікрокліматом промислових теплиць на базі нечіткої логіки. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2019. № 3 (116). С. 120–129.
12. Maher A., Kamel E., Enrico F., Atif I., Abdelkader M. An intelligent system for the climate control and energy savings in agricultural greenhouses. *Energy Efficiency*. 2016. Vol. 9. P. 1241–1255.
13. Канарський Є., Орехов О., Желтухін О. Розробка автоматизованої системи керування тепличним господарством. *Молодий вчений*. 2022. № 3 (103). С. 5–12.

Bereziuk I.A., Zubenko V.O. OPTIMIZATION OF THE GREENHOUSE MICROCLIMATE PARAMETERS CONTROL PROCESS USING MATHEMATICAL MODELING

The article presents the results of a comprehensive study on the optimization of microclimate parameters in greenhouse structures. The primary focus is on analyzing the influence of structural, technological, and operational factors on the temperature regime, which is critical for ensuring the normal growth, development, and productivity of vegetable crops. Key variables that determine the dynamics of microclimatic conditions inside the greenhouse were identified, including air mass, soil mass, the power of air and soil heaters, and heating time.

A justified experimental design was developed using the method of mathematical planning of experiments, covering a wide range of controllable parameter variations. A series of experimental tests was conducted, and the results were used to construct empirical regression models describing the dependence of air and soil temperature on the influencing factors. The models were statistically verified for adequacy, reproducibility, and informativeness, confirming their reliability for further applied calculations and implementation.

An expert evaluation method was applied to determine the weighting coefficients of each optimization criterion, which made it possible to form a generalized efficiency indicator for system performance. The feasibility of transitioning from traditional temperature regulation based solely on external conditions

to a flexible, intelligent control approach that accounts for a wide range of internal and external factors was substantiated. A promising direction is the implementation of adaptive control systems using artificial intelligence methods – namely neural networks and fuzzy logic.

This approach enables efficient distribution of energy resources, reduces fuel consumption, improves the stability of the microclimate according to agrotechnical requirements, and increases crop yields. The developed neuro-computer system opens new opportunities for automation and intelligent control of modern greenhouse complexes, contributing to improved energy efficiency, economic viability, and technological flexibility in agricultural production.

Key words: *greenhouse, microclimate, temperature control, mathematical modeling, regression analysis, multifactor optimization, neural networks, fuzzy logic, adaptive control, energy efficiency, automation, agrotechnologies.*