

УДК 631.234:628.8

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.2.3>

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ В ТЕПЛИЦІ

Березюк І. А. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнського національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0003-1903-8204

Зубенко В. О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного
будівництва, водної та електричної інженерії
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-8401-755X

У статті розглянуто аналітичне моделювання температурно-вологісного режиму в теплицях як одного з ключових чинників, що визначають ефективність вирощування сільськогосподарських культур у захищеному ґрунті. В сучасних кліматичних умовах та зростанні вартості енергоносіїв проблема підтримання оптимального мікроклімату в теплицях набуває особливої актуальності. У роботі представлено математичну модель процесів тепло- та масообміну між основними компонентами теплиці – ґрунтом, повітрям, світлопроникливим огородженням та рослинами.

Модель реалізована у вигляді системи диференціальних рівнянь теплового балансу, яка враховує інтенсивність сонячної радіації, потужність систем обігріву, температури зовнішнього середовища та інші параметри. Отримана система рівнянь приведена до стандартної форми Коші, що дало змогу провести структурно-аналітичне дослідження об'єкта керування, оцінити його керованість та спостережність з використанням критеріїв Калмана. Розраховано відповідні матриці стану, керованості та спостережності для конкретного типу теплиці на основі реальних конструктивних параметрів.

Результати моделювання підтверджують повну керованість та спостережність об'єкта, що створює передумови для реалізації ефективних систем автоматичного регулювання мікроклімату. Зазначено, що через високу інерційність об'єкта доцільно застосовувати інтелектуальні адаптивні системи керування, зокрема на основі нейронних мереж і нечіткої логіки. Визначено оптимальні критерії керування – температура повітря та температура ґрунту, які повинні підтримуватись згідно з агротехнічними нормативами. Обґрунтовано необхідність переходу від традиційного графікового керування до інтелектуальних систем, що враховують велику кількість змінних і забезпечують енергоефективність та стабільність мікроклімату в тепличному господарстві.

Ключові слова: теплиця, температурно-вологісний режим, керованість, спостережуваність, система автоматичного управління.

Bereziuk I. A., Zubenko V. O. The analytical studies of the temperature-humidity regime in a greenhouse

The article presents an analytical study of the temperature-humidity regime in greenhouses as one of the key factors determining the efficiency of crop cultivation in protected soil. Under current climate conditions and rising energy costs, maintaining an optimal microclimate in greenhouses is becoming increasingly relevant. The paper proposes a mathematical model of heat and mass exchange processes between the main components of a greenhouse – soil, air, translucent enclosure, and plants.

The model is implemented in the form of a system of differential equations describing the heat balance, taking into account solar radiation intensity, heating system power, outside air temperature, and other parameters. The resulting system is reduced to the standard Cauchy form, which makes it possible to perform structural and analytical analysis of the control object and assess its controllability and observability using Kalman's criteria. State, controllability, and observability matrices are calculated based on actual design parameters of a selected greenhouse type.

The modeling results confirm full controllability and observability of the system, creating the prerequisites for the implementation of efficient automatic microclimate control systems. It is noted that due to the high inertia of the object, it is advisable to apply intelligent adaptive control systems, in particular those based on neural networks and fuzzy logic. The optimal control criteria – air temperature and soil temperature – are determined according to agronomic standards. The need to transition from traditional schedule-based heating control to intelligent systems that account for a wide range of influencing factors and ensure energy efficiency and climate stability in greenhouse operations is substantiated.

Key words: greenhouse, temperature and humidity conditions, controllability, observability, automatic control system.

Постановка проблеми. У сучасних умовах ведення сільського господарства тепличні технології відіграють надзвичайно важливу роль у забезпеченні стабільного та високоякісного виробництва овочевої та плодовоовочевої продукції. Особливо це актуально для регіонів із нестабільними кліматичними умовами або обмеженим періодом вегетації у відкритому ґрунті. Теплиці створюють штучне середовище для росту рослин, яке дає змогу підтримувати оптимальні умови розвитку незалежно від пори року чи зовнішніх погодних факторів.

Важливим чинником, що визначає ефективність функціонування теплиці, є температурно-вологісний режим [2, 3]. Порушення цього балансу може призвести до погіршення фотосинтетичної активності, затримки розвитку рослин, підвищення ризику захворювань та втрати врожаю. Водночас надмірне опалення або зволоження призводить до значних енерговитрат, що є критично важливим в умовах високої вартості енергоресурсів.

У цьому контексті все більшої уваги набувають методи аналітичного моделювання мікроклімату теплиць [4, 8, 9], які дозволяють прогнозувати динаміку змін температури та вологості залежно від зовнішніх умов, характеристик конструкції теплиці та активності рослин. Такі моделі є незамінним інструментом для розробки ефективних систем управління мікрокліматом, оптимізації витрат на енергозабезпечення та підвищення врожайності.

Моделювання температурно-вологісного режиму [7, 8, 11] передбачає врахування широкого спектра фізичних процесів: теплообміну через покриття теплиці, внутрішньої конвекції, радіаційного обміну, випаровування та конденсації вологи, вентиляції та масообміну між рослинами й навколишнім середовищем. Важливим аспектом є також інтеграція моделей з системами автоматизованого контролю на основі сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів [5, 12, 13], що відкриває нові можливості для підвищення точності регулювання параметрів мікроклімату.

Таким чином, аналітичне дослідження температурно-вологісного режиму в тепличних умовах є актуальним науково-практичним завданням, що вимагає міждисциплінарного підходу з використанням знань у галузях теплофізики, біології рослин, системного аналізу та інформаційних технологій

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітичний огляд [3, 6, 8, 12] показав, що однією з головних причин низької ефективності тепличного виробництва в Україні є погіршення матеріально-технічного забезпечення, відставання у впровадженні сучасних технологій вирощування, а також застарілість інженерних систем. Більшість вітчизняних теплиць експлуатуються вже понад два десятиліття, мають високе енергоспоживання та не відповідають сучасним вимогам до ресурсоефективності та якості продукції.

Наявні системи управління мікрокліматом у теплицях мають значні обмеження, що пов'язані з надмірним спрощенням внутрішніх процесів, які впливають на кліматичні умови. Зокрема, часто не враховується температура на поверхні

рослин, а також застосовуються математичні моделі, що не здатні адаптуватися до змін у реальному часі.

Дослідження [2, 3, 11, 13] підтверджують, що ключовими керованими параметрами є температура повітря та ґрунту, а головна мета автоматизованого управління мікрокліматом полягає у підтриманні цих параметрів у межах, визначених агротехнічними нормативами. Проте існуючі в Україні системи керування є малоефективними через відсутність інтеграції з комп'ютерними технологіями та інтелектуальними алгоритмами. Практика експлуатації теплиць свідчить про часті порушення нормативів енергоспоживання і невиконання температурних режимів вирощування овочів.

З огляду на це, завдання підтримки стабільного температурно-вологісного режиму в теплиці є технічно складним. [4, 10, 12] До того ж процеси керування ускладнюються наявністю взаємозалежностей між температурою повітря і ґрунту та іншими мікрокліматичними параметрами, а також часовими затримками між впливами і реакцією системи. Інерційність тепличної конструкції щодо змін зовнішніх метеоумов, які виступають основними збурювальними чинниками, додатково ускладнює задачу автоматизації керування.

Мета статті – дослідити процеси формування температурно-вологісного режиму в теплиці та побудувати математичну модель, яка дозволяє оцінити вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на мікроклімат. На основі цієї моделі визначити умови ефективного керування температурою і вологістю, а також обґрунтувати доцільність використання сучасних інтелектуальних систем для автоматизації керування мікрокліматом у теплицях.

Виклад основного матеріалу. При створенні математичної моделі формування температурно-вологісного режиму в теплицях виникає задача вдосконалення моделі динаміки процесів теплообміну між рослинами і навколишнім середовищем, а також динаміки зміни відносної вологості повітря у споруді захищеного ґрунту, що розглядається.

Аналіз літературних джерел [2, 7, 9, 13] довів, що для дослідження динаміки температурно-вологісного режиму у теплиці достатньо розглянути диференційні рівняння теплового балансу для: поверхні ґрунту, повітря, світлопроникливого огороження і рослин.

Зв'язок між зміною потужності обігрівачів повітря та ґрунту, інтенсивності сонячної радіації та температури зовнішнього повітря із змінами температури в приміщенні теплиці, температури ґрунту та температури рослин можна визначити системою диференційних рівнянь, яка включає:

- рівняння теплового балансу для поверхні ґрунту:

$$J \cdot f + P_{\text{гр}} = (m_{\text{гр}} \cdot c_{\text{гр}} + m_p \cdot c_p) \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} + \alpha \cdot f \cdot (\Theta - t); \quad (1)$$

- рівняння теплового балансу для повітря:

$$P_n + \alpha \cdot f \cdot (\Theta - t) = m_n \cdot c_n \cdot \frac{dt}{d\tau} + \alpha_s \cdot F_c \cdot (t - \Theta_c) + \alpha_p \cdot f_p \cdot (t - \Theta_p); \quad (2)$$

- рівняння теплового балансу для світлопроникливого огороження:

$$m_c \cdot c_c \cdot \frac{d\Theta_c}{d\tau} = \alpha_c^s \cdot F_c^s \cdot (t - \Theta_c) - \alpha_c^n \cdot F_n^n \cdot (\Theta_c - t_s); \quad (3)$$

- рівняння теплового балансу для рослин:

$$m_p \cdot c_p \cdot \frac{d\Theta_p}{d\tau} = \alpha_p \cdot f_p \cdot (t - \Theta_p), \quad (4)$$

де Θ , t , t_3 – температури ґрунту, внутрішнього повітря і зовнішнього середовища відповідно, в $^{\circ}\text{C}$;

Θ_c – температура огорожі, $^{\circ}\text{C}$;

Θ_p – температура рослинного покриву, $^{\circ}\text{C}$;

J – інтенсивність сонячної радіації, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

P_n, P_{cp} – потужність обігрівачів повітря і ґрунту, Вт ;

m_n, m_{cp}, m_p, m_c – маси повітря, ґрунту, рослин і огороження (стіна зі скла) в об'ємі теплиці, кг (до маси ґрунту відноситься коренева система і нагрівальні елементи, а до маси повітря відноситься маса огорожі та рослин);

C_{cp}, C_c, C_p, C_n – питома теплоємність ґрунту, огороження, теплоємність рослин і теплоємність повітря, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$;

f, f_p, F_c, F_H – площі поверхонь ґрунту, рослин і огороження, м^2 ;

$k, \alpha_6, \alpha, \alpha_c, \alpha_p$ – коефіцієнти тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$.

Отримані таким чином диференціальні рівняння складають аналітичну модель об'єкта керування. Однак, рівняння (1–4) не дозволяють дослідити керованість та спостережність об'єкта керування, як того вимагають положення сучасної теорії керування [1, 3, 9]. Якщо привести зазначені рівняння до форми Коші, то отримаємо наступну систему рівнянь стану

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + G\Psi \\ y = Cx \end{cases}, \quad (5)$$

де x – вектор станів теплиці, який має вигляд

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ t \\ \theta_c \\ \theta_p \end{bmatrix}; \quad (6)$$

A – матриця станів теплиці розміру 4×4

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha f}{m_{cp}C_{cp} + m_pC_p} & -\frac{\alpha f}{m_{cp}C_{cp} + m_pC_p} & 0 & 0 \\ \frac{\alpha f}{m_nC_n} & -\frac{\alpha f + \alpha_6 F_c + \alpha_p f_p}{m_nC_n} & \frac{\alpha_6 F_c}{m_nC_n} & \frac{\alpha_p f_p}{m_nC_n} \\ 0 & \frac{\alpha_c F_c}{m_c C_c} & -\frac{\alpha_c^6 F_c^6 + \alpha_c^n F_c^n}{m_c C_c} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_p f_p}{m_p C_p} & 0 & -\frac{\alpha_p f_p}{m_p C_p} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

u – вектор керування, що дорівнює

$$u = \begin{bmatrix} P_{cp} \\ P_n \end{bmatrix}; \quad (8)$$

B – матриця керування розміру 4×2 така, що

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{cp}C_{cp} + m_pC_p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_nC_n} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

ψ – вектор збурень вигляду

$$\Psi = \begin{bmatrix} J \\ t_z \end{bmatrix}; \quad (10)$$

G – матриця, яка характеризує вплив збурень на температурно-вологісний режим у теплиці

$$G = \begin{bmatrix} \frac{f}{m_{cp}C_{cp} + m_pC_p} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_c^H F_H^H}{m_cC_c} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Система рівнянь виступає аналітичною моделлю температурно-вологісного режиму теплиці як об'єкта керування, що дає змогу оцінити її керованість. Для аналізу спостережності модель доповнюється рівнянням спостереження, побудованим з урахуванням особливостей програмно-технічного комплексу автоматизованого вимірювання параметрів мікроклімату. Рівняння має матричну форму та відповідає умовам застосування теореми Калмана.

$$y = Cx, \quad (12)$$

де y – вектор контрольованих виходів об'єкта керування, який з урахуванням можливостей комплексу [] представлений як

$$y = \begin{bmatrix} \theta \\ t \end{bmatrix}; \quad (13)$$

C – матриця спостереження, яка дорівнює

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

В основі дослідження керованості об'єкта керування за Калманом лежить визначення рангу матриці керованості N_k , яка з урахуванням кількості змінних стану для температурно-вологісного процесу у теплиці може бути [1, 5] визначена за формулою

$$N_k = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B]. \quad (15)$$

Якщо матриця (15) має повний ранг, то об'єкт є повністю керованим та є сенс починати розробку системи керування.

Оснoву для дослідження спостережності об'єкта керування складає матриця спостережності N_v , яка з урахування порядку об'єкта керування може бути [3, 6] визначена за формулою

$$N_v = [C' \quad A'C' \quad (A')^2C' \quad (A')^3C']', \quad (16)$$

де $'$ – символ транспонування матриці. Якщо ранг матриці N_v дорівнює кількості змінних стану, то система є повністю спостережною.

Визначення керованості та спостережності здійснене для обраної теплиці [2, 3] в результаті підстановки конструктивних параметрів (табл. 1) до виразів (7), (9), (11) та використання матриць N_k, N_v .

Підстановка числових значень параметрів дозволила визначити наступний вигляд матриць (7), (9)

$$A = \begin{bmatrix} -5.18 \cdot 10^{-3} & 5.18 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 1.613 & -1.85 & 1.99 \cdot 10^{-2} & 0.218 \\ 0 & 0.521 & -1.206 & 0 \\ 0 & 1.14 \cdot 10^{-3} & 0 & -1.14 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}; \quad (17)$$

Таблиця 1

Конструктивні параметри стану теплиці

№	Позначення параметру	Значення параметру	Одиниця виміру
1	α	8	коефіцієнти тепловіддачі повітря, Вт/м ² °С
2	f	10 000	площа поверхні ґрунту, м ²
3	m_{zp}	1400	маса ґрунту, кг
4	C_{zp}	$4 \cdot 10^3$	теплоємність ґрунту, Дж/кг · °С
5	m_p	9000	маса рослин, кг
6	C_p	$1,05 \cdot 10^3$	теплоємність рослин, Дж/с
7	m_n	0,77	маса повітря, кг/м ³
8	C_n	$1,05 \cdot 10^3$	теплоємність повітря, Дж/с
9	α_θ	1	коефіцієнт теплопередачі повітря
10	F_c	985	площа поверхні огороження теплиці, м ²
11	α_p	6	коефіцієнт теплопередачі рослини, Вт/м ² °С
12	f_p	1800	площа поверхні рослинного покриву, м ²
13	α_c^e	1,5;	коефіцієнт теплопередачі огороження (скла), Вт/м ² °С
14	F_c^e	1500	площа поверхні огороження із скла; м ²
15	m_c	1350	маса огороження (скла), кг
16	C_c	$0,0021 \cdot 10^3$	питома теплоємність огороження, Дж/кг · °С
17	α_c^u	0,9	коефіцієнт теплопередачі огороження (скла), Вт/м ² °С
18	F_c^u	1300	площа поверхні огороження із скла; м ²

$$B = \begin{bmatrix} 6.48 \cdot 10^{-8} & 0 \\ 0 & 2.02 \cdot 10^{-5} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Отримані таким чином матриці з рівнянь стану (5) та рівнянь спостереження (12) дозволяють визначити такі матриці керованості N_k

$$N_k = \begin{bmatrix} 0.648 & 0 & -3.36 \cdot 10^{-3} & 1.05 & 5.43 \cdot 10^{-3} & -1.94 & -0.01 & 3.61 \\ 0 & 202 & 1.05 & -3.74 & -1.94 & 695 & 3.61 & -1296 \\ 0 & 0 & 0 & 105 & 0.545 & -322 & -1.67 & 750 \\ 0 & 0 & 0 & 0.23 & 1.19 \cdot 10^{-3} & -0.426 & -2.21 \cdot 10^{-3} & 0.793 \end{bmatrix} 10^{-7};$$

та спостережності N_v

$$N_v = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 \\ -5.18 & 5.18 & 0 & 0 \\ 1613 & -1850 & 19.9 & 218 \\ 8.38 & -9.61 & 0.103 & 1.13 \\ -2992 & 3442 & -60.8 & -404 \\ -15.5 & 17.9 & -0.316 & -2.1 \\ 5567 & -6414 & 142 & 751 \end{bmatrix} 10^{-3}. \quad (19)$$

Оскільки ранги матриць керованості та спостережності дорівнюють порядку системи (4), температурно-вологісний режим теплиці є повністю керованим і спостережним. Це означає, що зміна температури повітря й ґрунту може ефективно регулюватися шляхом корекції потужностей обігрівачів. Якість такого керування залежить від вибраного алгоритму.

Аналіз рівнянь стану дозволяє оцінити інерційність процесу. Визначивши власні числа матриці стану A та їх обернені значення, можна оцінити часові характеристики теплиці як об'єкта керування.

$$\lambda_1 = -1.87; \quad \lambda_2 = -1.19; \quad \lambda_3 = -1.62 \cdot 10^{-3}; \quad \lambda_4 = -2.05 \cdot 10^{-5}.$$

Таким чином, найбільша стала часу об'єкту складає,

$$T_{\max} = -\frac{1}{\lambda_4} = 4.89 \cdot 10^4, \text{ с.}$$

Для підвищення точності моделювання теплиця розглядається як динамічний об'єкт з розподіленими у просторі параметрами. Вплив на мікроклімат здійснюють зовнішні фактори: температура, вологість повітря, швидкість вітру та інтенсивність сонячного випромінювання, а також конструктивні обмеження споруди.

Ключовими критеріями оптимізації обрано температуру внутрішнього повітря (T °C) і температуру ґрунту (Θ °C), що мають вирішальний вплив на розвиток рослин. Отримані математичні моделі підтверджують можливість оптимального

керування мікрокліматом. Статистичний аналіз показав адекватність моделі, що дозволяє використовувати її для подальшої оптимізації системи управління.

Висновки. Розроблені математичні моделі тепературно-вологісного режиму теплиці блочного типу як об'єкта керування із зосередженими та розподіленими параметрами. Модель об'єкта у вигляді рівнянь стану дозволила довести, що температурно-вологісний режим у теплиці обраного типу буде повністю керованим та спостережним, якщо для керування мікрокліматом використовувати підігрів ґрунту та повітря, а значення потужностей відповідних нагрівачів формувати з сигналів про температуру повітря та ґрунту. Встановлено, що у досліджуваній теплиці доцільним є керування температурою повітря при сталому підігріві ґрунту (температура ґрунту підтримується на рівні згідно агротехнічних вимог). Виконаний аналіз динаміки об'єкта керування (відділення теплиці аркового типу) довів, що він має високу інерційність, внаслідок чого існує запізнення в керуванні.

Доведено, що виникає невизначеність щодо параметрів моделі об'єкта керування. В таких умовах одним з найбільш доцільних методів автоматизації процесу керування температурно-вологісним режимом теплиці є застосування інтелектуальних адаптивних систем керування, побудованих за допомогою нейронних мереж та нечіткої логіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Блохін Л.М., Осадчий С.І., Дідик О.К. та ін. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів: монографія. Кропивницький: Видавець Лисенко. 2023. 292 с.
2. Віхрова Л.Г., Каліч В.М., Прокопенко Т.О. Адаптивна автоматизована система збору та контролю основних параметрів мікроклімату в теплиці. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. вип. 29. С. 168–172.
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, КПІ 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., Лебедєв 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.

REFERENCES:

1. Blokhin, L.M., Osadchyi, S.I., Didyk, O.K., Vikhrova, L.H., & Kalich, V.M. (2023). Tekhnolohii konstruiuvannya suchasnykh konkurentospromozhnykh kompleksiv keruvannya stokhastychnym rukhom ob'ektiv [Technologies for designing modern competitive complexes for controlling stochastic motion of objects]. Kropyvnytskyi : Lysenko V.F. [in Ukrainian].

2. Vikhrova, L.G., Kalich, V.M. & Prokopenko, T.O. (2016) Adaptivna avtomatyzovana systema zboru ta kontroliu osnovnykh parametriv mikroklimatu v teplytsi [Adaptive automated system for collection and control of basic parameters of microclimate in a greenhouse] *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia – Agricultural Production, equipment, industrial mechanical engineering, automation*, 29, 168–172. [in Ukrainian].

3. Lysenko, V.P., Bolbot, I.M., Lendel, T.I., & Chernov, I.I. (2018). Prohramno-aparatne zabezpechennia systemy fitomonitorynhu v teplytsi [Software and hardware support for the phytomonitoring system in a greenhouse]. *Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK – Energetics and Computer-Integrated Technologies in the Agro-Industrial Complex*, 2, 65 [in Ukrainian].

4. Laiko, B., & Tsopa, O. (2023). Informatsiina systema keruvannya mikroklimatom rozumnoi teplytsi [Information system for smart greenhouse microclimate management]. Proceedings from: *V International Scientific and Theoretical Conference “The driving force of science and trends in its development”*, (pp. 125–128) Coventry, UK. Retrieved from <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1507> [in Ukrainian].

5. Prokopenko, T.O., Bereziuk, I.A., & Zubenko, V.O. (2020). Avtomatyzovana systema keruvannya temperaturno–volohisnym rezhymom teplytsi na osnovi aparatu nechitkoi lohiky. [Automated control system of the temperature-humidity regime of a greenhouse based on fuzzy logic apparatus]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 31(70)(6), Part 1, 129–134 [in Ukrainian].

6. Diordiiev, V.T., Kashkarov, A.O., & Diordiiev, O.O. (2018). Avtomatyzovana systema monitorynhu ta keruvannya mikroklimatom u teplytsi [Automated system for monitoring and control of the greenhouse microclimate]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 8(2), 1–9 [in Ukrainian].

7. Vasylieva, Y.D., & Morozova, M.M. (2019). Neiromerezha dlia kontroliu parametriv mikroklimatu teplytsi [Neural network for controlling greenhouse microclimate parameters]. Proceedings: *XII Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh “Pohliad u maibutnie pryladobuduvannya” – the XII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and*

Young Scientists: "A Look into the Future of Instrument Engineering" (pp. 429–432). Kyiv : PBF, Igor Sikorsky KPI, Center for Educational Literature [in Ukrainian].

8. Yevseenko, O.M. (2020). Rozrobka aparatno-prohramnoi systemy keruvannia mikroklimatom teplytsi. [Development of a hardware-software system for greenhouse microclimate control]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 1(85), 104–109 [in Ukrainian]

9. Haidukevych, S.V., Semenova, N.P., & Leskiv, Ya.A. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti v systemakh keruvannia mikroklimatychnymy parametramy prymishchen zakrytoho gruntu. [Improving the efficiency of control systems for microclimatic parameters in closed soil facilities]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I.Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky – Scientific Notes of Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, (6), 58–64 [in Ukrainian].

10. Hoque, J., Ahmed, R., & Hannan, S. (2020). An automated greenhouse monitoring and controlling system using sensors and solar power. *European Journal of Engineering Research and Science*, 5(4), 510–515 [in English].

11. Laktionov, I.S., Vovna, A.V., Berezhnoj, M.O., & Lebedev, V.A. (2019). Komp'uteryzovana systema kompleksnoho monitorynhu i upravlinnia mikroklimatom promyslovykh teplyts na bazi nechitkoi lohiky [Computerized system for integrated monitoring and control of the microclimate of industrial greenhouses based on fuzzy logic]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 3(116), 120–129 [in Ukrainian].

12. Maher, A., Kamel, E., Enrico, F., Atif, I., & Abdelkader, M. (2016). An intelligent system for the climate control and energy savings in agricultural greenhouses. *Energy Efficiency*, 9, 1241–1255 [in English].

13. Kanarskyi, Y., Orekhov, O., & Zheltukhin, O. (2022). Rozrobka avtomatyzovanoi systemy keruvannia teplychnym hospodarstvom [Development of an automated greenhouse management system]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 3(103), 5–12 [in Ukrainian]