

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-70-74>

УДК 681.5:631.5:004.89:519.87

ЦИФРОВЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ЯК КОНЦЕПЦІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛИЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ

Сотнікова Т.Г., Анікєєв М.А.

DIGITAL EXPERIMENTAL ENVIRONMENT AS A CONCEPT FOR IMPROVING GREENHOUSE MICROCLIMATE CONTROL EFFICIENCY

Sotnikova T.H., Anikieiev M.A.

У статті запропоновано концепцію цифрового експериментального середовища (*digital experimental environment*) для дослідження та вдосконалення систем керування мікрокліматом теплиць. Необхідність такого підходу зумовлена складністю сучасних тепличних об'єктів, для яких важливим є одночасне забезпечення агротехнічно необхідних параметрів середовища, зниження енергоспоживання, економічної ефективності та екологічної прийнятності технологічних рішень. Застосування цифрового середовища дає змогу проводити багаторазове відпрацювання алгоритмів керування, аналізувати динаміку процесів і оцінювати наслідки зміни режимів без втручання в роботу реального обладнання.

Запропонований підхід поєднує засоби імітаційного моделювання, SCADA/HMI-візуалізацію, інструменти збору й оброблення експериментальних даних, а також оптимізаційні методи, орієнтовані на пошук раціональних режимів функціонування системи. Розглянуто ієрархічну структуру керування, у якій нижній рівень забезпечує стабілізацію основних параметрів мікроклімату, зокрема температури, вологості та концентрації CO₂, тоді як верхній рівень реалізує оптимізацію цільових функцій з урахуванням зовнішніх збурень, прогнозованих змін середовища та технічних обмежень. Як критерії оптимізації розглядаються витрати енергії, вартісні показники, а також умови, що впливають на продуктивність технологічного процесу.

У межах дослідження цифрове експериментальне середовище використано для відпрацювання сценаріїв керування тепловим контуром із теплообмінником, у якому джерелом теплоти є вторинна технологічна пара. Це дозволило

проаналізувати роботу системи в різних режимах, оцінити стійкість контурів регулювання та перевірити доцільність використання вторинних енергетичних ресурсів у тепличному господарстві. Показано, що застосування такого середовища підвищує відтворюваність експериментів, зменшує ризики впровадження нових алгоритмів у реальні умови експлуатації та створює основу для подальшого використання інтелектуальних методів аналізу й оптимізації, зокрема засобів штучного інтелекту, у системах керування тепличним мікрокліматом.

Ключові слова: теплиця, мікроклімат, цифрове експериментальне середовище, SCADA, енергоефективність.

Вступ. Тепличне виробництво є одним із найбільш технологічно насичених сегментів сучасного аграрного сектору. У керуванні мікрокліматом теплиці поєднуються біологічні цілі (стабільний ріст і якість продукції) та інженерні обмеження (інерційність системи, залежність від погоди, обмеження потужності, вартість енергоресурсів). В умовах зростання ціни енергії та посилення вимог до декарбонізації особливої ваги набуває перехід від «жорсткого» підтримання уставок до керування, орієнтованого на оптимум – тобто на компроміс між продуктивністю культури, витратами та екологічним слідом.

Окремою проблемою є практична перевірка керуючих алгоритмів. Реальна теплиця – складний об'єкт з істотною інерцією,

неповнотою вимірювань і ризиком втрати врожаю в разі помилки. Тому сучасні підходи дедалі частіше спираються на цифрові двійники, імітаційне моделювання, історичні дані та сценарне тестування. У цій роботі розвиток отримує саме такий підхід – створення цифрового експериментального середовища як проміжної ланки між теорією керування та промисловим впровадженням.

Мета і задачі. Метою є розширення концепції цифрового експериментального середовища для керування тепличним мікрокліматом з акцентом на енергоефективність і економічну доцільність. Для досягнення мети розв'язуються задачі:

1. формалізація ієрархічної структури керування мікрокліматом;
2. побудова математичних моделей теплового контуру й об'єкта керування;
3. інтеграція моделі з HMI/SCADA для відтворення режимів і збору даних;
4. визначення набору оптимізаційних критеріїв із включенням економічної компоненти (вартість енергії) та екологічної компоненти (ефективне використання вторинної теплоти).

Загальну ієрархію запропонованого підходу до керування тепличним комплексом наведено на рис. 1.

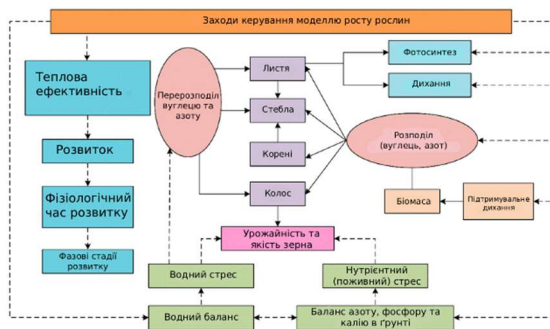


Рис. 1. Концептуальна ієрархія керування тепличним комплексом (нижній рівень – стабілізація, верхній – оптимізація)

Основна частина. Відповідно до оглядових досліджень з керування тепличним мікрокліматом, найбільш перспективним є поєднання багаторівневої структури керування з методами прогнозування та оптимізації. Нижній рівень реалізує контури стабілізації (PID/PI, логічні регулятори, локальні MPC-контури), тоді як верхній рівень формує уставки та обмеження на основі прогнозу погоди, стану культури, доступної енергії та економічних параметрів. Таким чином формується

керування, де «ціна енергії» або «доступність вторинної теплоти» стає таким же вхідним фактором, як і температура зовнішнього повітря.[5]

Базовим елементом цифрового експериментального середовища є модель динаміки температури в зоні рослин (або контрольованій зоні теплиці). У спрощеному вигляді тепловий баланс описується диференціальним рівнянням:

$$C_{eff} \cdot \frac{dT_i}{dt} = Q_i(t) - Q_{loss}(t) + Q_{dist}(t)$$

де C_{eff} – ефективна теплоємність контрольованого об'єму; T_i – температура в зоні керування; $Q_i(t)$ – підведена теплота (нагрів/охолодження); $Q_{loss}(t)$ – тепловтрати через огорожувальні конструкції та інфільтрацію; $Q_{dist}(t)$ – збурення, що пов'язані з вентиляцією, сонячною радіацією та внутрішніми тепловиділеннями. У межах середовища параметри C_{eff} та складові Q_{loss} , Q_{dist} можуть уточнюватися за експериментальними даними, що робить модель адаптивною та придатною для різних тепличних конструкцій.[2]

Екологічний і економічний контекст: вторинне тепло. Практична цінність цифрового середовища зростає, коли модель включає реальні джерела енергії та обмеження. У роботі розглянуто використання вторинної технологічної пари як джерела теплоти для нагріву повітря теплиці через теплообмінник. Такий підхід є типовим прикладом промислової симбіозності: відхідне тепло підприємства стає ресурсом агровиробництва, зменшуючи споживання первинного палива та пов'язані викиди.[10]

У сучасних умовах розвитку аграрного виробництва тепличні господарства дедалі частіше розглядаються не лише як інженерні споруди для захисту рослин від несприятливих зовнішніх факторів, а як складні техніко-біологічні системи, у яких поєднуються теплотехнічні, автоматизаційні та інформаційні процеси. Забезпечення стабільного мікроклімату в теплиці є необхідною умовою отримання прогнозованого врожаю високої якості, проте водночас потребує значних енергетичних витрат, основна частка яких припадає на системи опалення. Саме тому підвищення енергоефективності тепличних комплексів є одним із ключових напрямів їхнього технологічного розвитку. У межах даної

роботи теплиця розглядається як об'єкт автоматизованого керування, у якому теплозабезпечення реалізується на основі рекуперації вторинної технологічної теплової енергії. Такий підхід ґрунтується на використанні тепла, що утворюється в промислових технологічних процесах і зазвичай не використовується або втрачається в навколишнє середовище. Залучення вторинної технологічної пари до системи опалення теплиці дозволяє істотно знизити споживання первинних енергоресурсів, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити загальну ефективність енергетичного балансу.

Принципову схему використання вторинної технологічної пари для теплопостачання теплиці наведено на рис. 2.

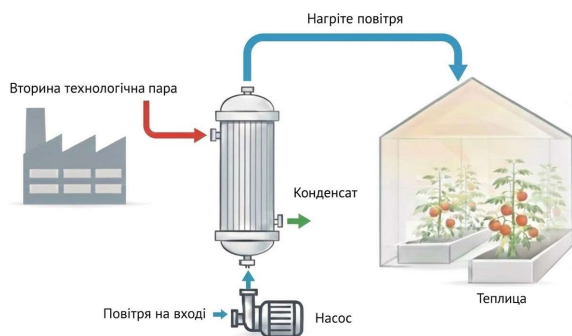


Рис. 2. Принципова схема використання вторинної технологічної пари для теплопостачання теплиці

Ключовим елементом такої системи є кожухотрубний теплообмінник, який виконує функцію теплотехнічної розв'язки між промисловим джерелом тепла та тепличним господарством. У теплообміннику теплота вторинної технологічної пари передається робочому теплоносію, що циркулює в замкненому контурі системи опалення теплиці. При цьому утворений у процесі теплопередачі конденсат відводиться та може бути повернутий у виробничий цикл, що додатково підвищує ресурсну ефективність системи. Така схема забезпечує безпечну інтеграцію промислового та аграрного об'єктів, мінімізуючи ризики прямого контакту технологічних середовищ.

У тепличному комплексі тепла енергія, отримана в теплообміннику, використовується для нагріву повітря та підтримання заданого температурного режиму в зоні росту рослин. Для цього застосовується система циркуляції теплоносія з використанням насосного обладнання, а також елементи повітророзподілу

та вентиляції, які забезпечують рівномірний розподіл тепла по об'єму теплиці. Вентиляційні системи виконують подвійну функцію: з одного боку, вони підтримують температурний баланс, а з іншого забезпечують необхідний повітрообмін, запобігаючи надмірному накопиченню вологи та продуктів життєдіяльності рослин.

Інтеграція з SCADA/HMI та цифровим стендом. Цифрове експериментальне середовище реалізується як зв'язка «імітаційна модель → система збору даних → HMI/SCADA-інтерфейс → модуль керування/оптимізації». Така композиція дозволяє:

1. відтворювати сценарії керування у прискореному масштабі часу;
2. перевіряти коректність сигналів та меж регуляторів;
3. накопичувати дані для подальшого аналізу та ідентифікації;
4. готувати інтерфейси оператора ще до запуску на об'єкті.

З практичного погляду це особливо важливо для тепличних систем, де «ціна помилки» вимірюється не лише енергією, а й врожаєм.[7]

Приклад візуалізації цифрового експериментального середовища у середовищі SCADA/HMI наведено на рис. 3.



Рис. 3. Візуалізація цифрового експериментального середовища: мнемосхема теплового контуру та тренди температур (SCADA/HMI)

Роль даних та моделей культури. Керування мікрокліматом має сенс лише у зв'язку з цільовою функцією культури: вегетаційний розвиток, урожайність та якість. Тому перспективні підходи поєднують моделі мікроклімату з моделями росту (фізіологічними або даними-орієнтованими). У цифровому середовищі це означає, що дані сенсорів (температура, вологість, CO₂, радіація, параметри поливу й живлення) перетворюються на індикатори стану культури, а далі – на оптимізаційні рішення щодо уставок.[1]

Узагальнену схему взаємодії факторів мікроклімату з ростом та розвитком рослин подано на рис. 4.

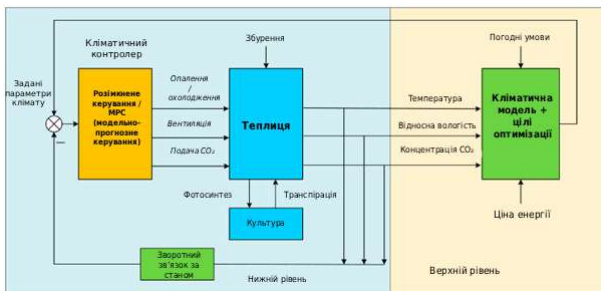


Рис. 4. Узагальнена схема взаємодії факторів мікроклімату з ростом та розвитком рослин

Економічно-оптимізаційний аспект у середовищі. На відміну від класичного регулювання, де метою є мінімізація відхилення від уставки, верхній рівень у цифровому середовищі може мінімізувати сукупну функцію витрат, наприклад:

$$J = \alpha \cdot E + \beta \cdot \Delta u + \gamma \cdot R,$$

де E – енергоспоживання (або його вартість за тарифом), Δu – відхилення ключових показників мікроклімату від оптимальних для культури, R – штраф за порушення обмежень (перегрів, конденсація, критична вологість тощо), а α , β , γ – вагові коефіцієнти. У такій постановці «економіка» вбудовується безпосередньо в алгоритм керування: за зростання тарифу або дефіциту тепла система шукає раціональні компроміси (зміна нічних уставок, перерозподіл вентиляції/подачі CO_2 , використання теплової інерції).[12]

Обговорення і співставлення з літературою. Оглядові роботи з використанням штучного інтелекту та ієрархічних алгоритмів у теплицях показують тенденцію до інтеграції МРС, прогнозування та цифрових двійників у єдину систему. Водночас практичний бар'єр часто полягає в доступності безпечного середовища для тестування й уніфікації даних. Запропоноване цифрове експериментальне середовище саме й покликане закрити цей розрив: воно формує структуру, де інженерні моделі, дані та інтерфейси оператора узгоджуються в одному контурі.

Висновки. Розвинено концепцію цифрового експериментального середовища для керування тепличним мікрокліматом як інструменту перевірки алгоритмів і підготовки промислового впровадження. Обґрунтовано

ієрархічну структуру керування, що поєднує стабілізацію параметрів та оптимізацію енергетичних/економічних критеріїв. Показано, що інтеграція моделі теплового контуру з SCADA/HMI забезпечує відтворюваність сценаріїв та накопичення даних. В роботі продемонстровано доцільність включення у модель джерел вторинної теплоти (технологічної пари) як екологічно й економічно значущого чинника. Подальші дослідження доцільно спрямувати на поглиблення моделі культури, інтеграцію прогнозів погоди та застосування методів машинного навчання для адаптації параметрів і прийняття рішень у режимі реального часу.

Література

- Chen J., et al. Artificial intelligence applications for greenhouse microclimate control: A survey. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 5. Art. 1388.
- Masteika R., et al. Real-time optimization and control of greenhouse heating system using excess heat from server room. *Applied Energy*. 2023. Vol. 343. Art. 121190.
- Анікеев М. М. Комп'ютерно-інтегрована система керування тепличним мікрокліматом з використанням вторинної технологічної пари: магістерська робота. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2025.
- van Straten G., van Willigenburg L., van Henten E. *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- Körner O., Challa H. Process-based humidity control in greenhouse crops. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 84, No. 4. P. 457–469.
- Hemming S. Use of models in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*. 2008. Vol. 801. P. 383–392.
- Марченко Д. Д. *Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарської техніки: метод. рек.* Миколаїв, 2021. 106 с.
- Велика українська енциклопедія. Ам'ячна селітра. URL: https://vue.gov.ua/Ам'ячна_селітра (дата звернення: 15.05.2024).
- Концевой А. Л. *Технологія зв'язаного азоту і хімічних добрив: технологія та алгоритми розрахунків виробництва азотних добрив*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 227 с.
- 76-а науково-практична конференція «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК». Київ: НУБіП України, 2023. 207 с.
- Целіщев О. Б., Єлісеєв П. Й., Лорія М. Г., Захаров І. І. *Математичне моделювання технологічних об'єктів: підручник*. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту, 2011. 421 с.

12. Hemming S. Systematic design of greenhouse crop production systems. INCOSE, 2008. 15 p..

References

1. Chen J., et al. Artificial intelligence applications for greenhouse microclimate control: A survey. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 5. Art. 1388.
2. Masteika R., et al. Real-time optimization and control of greenhouse heating system using excess heat from server room. *Applied Energy*. 2023. Vol. 343. Art. 121190.
3. Anikieiev M. M. Kompiuterno-intehrovana systema keruvannia teplychnym mikroklimatom z vykorystanniam vtorynnoi tekhnolohichnoi pary: mahisterska robota. *Skhidnoukr. nats. un-t im. V. Dalia*, 2025.
4. van Straten G., van Willigenburg L., van Henten E. *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
5. Körner O., Challa H. Process-based humidity control in greenhouse crops. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 84, No. 4. P. 457–469.
6. Hemming S. Use of models in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*. 2008. Vol. 801. P. 383–392.
7. Marchenko D. D. Elektroobladnannia ta zasoby avtomatyzatsii silskohospodarskoi tekhniki: metodychni rekomendatsii. Mykolaiv, 2021. 106 p.
8. Velyka ukrainska entsyklopediia. *Amiachna selitra*. URL: https://vue.gov.ua/Amiachna_selitra (accessed: 15.05.2024).
9. Kontsevoi A. L. Tekhnolohiia zviazanoho azotu i khimichnykh dobryv: tekhnolohiia ta alhorytmy rozrakhunkiv vyrobnytstva azotnykh dobryv. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. 227 p.
10. 76-a naukovopraktychna konferentsiia “Enerhozabezpechennia, elektrotekhnolohii, elektrotekhnika ta intelektualni upravliaiuchi systemy v APK”. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 2023. 207 p.
11. Tselishchev O. B., Yelisieiev P. I., Loria M. H., Zakharov I. I. *Matematychni modeliuvannia tekhnolohichnykh obektiv: pidruchnyk*. Luhansk: Vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu, 2011. 421 p.
12. Hemming S. Systematic design of greenhouse crop production systems. INCOSE, 2008. 15 p..

Sotnikova T.H. Anikieiev M.A. Digital experimental environment as a concept for improving greenhouse microclimate control efficiency

The article substantiates the concept of a digital experimental environment as a tool for improving greenhouse microclimate control under current energy, economic, and environmental constraints. The study is motivated by the need to test advanced control strategies in a safe virtual space before their transfer to real greenhouse facilities, where errors may lead not only to excessive energy consumption but also to crop losses. The proposed environment integrates simulation models,

SCADA/HMI visualization, data acquisition modules, and hierarchical decision-making logic into a unified research and engineering framework.

The lower control level is intended for stabilization of key microclimate parameters, primarily temperature, humidity, and CO₂ concentration, whereas the upper level performs optimization of operating modes with regard to weather disturbances, crop requirements, technical limitations, and the cost of energy resources. Special attention is paid to the possibility of combining greenhouse climate models with crop-oriented indicators, which allows the transition from simple setpoint tracking to economically justified and biologically meaningful control. In this interpretation, the digital environment serves not only as a simulation tool but also as a prototype of a future digital twin for greenhouse production.

The paper also develops the practical idea of using secondary technological steam as an alternative heat source in greenhouse heating systems. The integration of waste-heat recovery into the digital environment makes it possible to assess the stability of thermal control loops, compare operating scenarios, and estimate the potential reduction in primary energy demand and environmental burden. The obtained results show that such an environment increases reproducibility of experiments, supports data-driven optimization, and creates a foundation for further implementation of model predictive control, machine learning, and artificial intelligence methods in greenhouse management. In addition, the proposed approach improves the preparation of operator interfaces, facilitates parameter identification from experimental data, and reduces the risks associated with direct full-scale trials in industrial greenhouse conditions.

Keywords: *greenhouse microclimate, digital experimental environment, model predictive control, energy efficiency, SCADA, digital twin.*

Сотнікова Тетяна Генадіївна – к. т. н., доцент кафедри комп’ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля, ORCID: [0000-0001-6929-7672](https://orcid.org/0000-0001-6929-7672) e-mail: sotnikova@snu.edu.ua

Анікєєв Микита Андрійович – магістр кафедри комп’ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, e-mail: ORCID [0009-0003-4399-7752](https://orcid.org/0009-0003-4399-7752) atp-24dm-717@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 23.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом, відповідно до умов ліцензії **Creative Commons (CC BY 4.0)**