

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-83>

УДК 631.358

СУВОРІН ОЛЕГ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0004-9084-3411>

e-mail: Bestwebdoctors@gmail.com

КАБАЧІЙ ВЛАДИСЛАВ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0001-3158-2889>

e-mail: vkabachiy@gmail.com

ІНТЕГРАЛЬНИЙ КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ ПОЛУНИЦІ

Ефективне управління мікрокліматом у тепличному виробництві полуниці критично важливе для досягнення високих урожаїв та якості плодів. Стаття пропонує новий інтегральний показник ефективності управління мікрокліматом *BOCO* (Biophysical Optimality Criterion for CO₂-enriched Orchards with greenhouse conditions), що синтезує фізичні параметри мікроклімату (температуру, відносну вологість, концентрацію CO₂, освітленість PAR) та параметри розчину (TDS) через систему віртуальних сенсорів парціального тиску та дефіциту тиску водяної пари (*P*, *VPD*) та розрахованих коефіцієнтів оптимальності *KCO₂*, *KTDS*, *KPAR* відповідно CO₂, TDS та PAR. Запропонований критерій поєднує біофізичні закономірності фотосинтезу, транспірації та живлення рослин з інтелектуальною обробкою даних IoT-мереж у реальному часі. *BOCO* дозволяє оперативну оцінку стану мікроклімату та сформулювати автоматизовані рекомендації для керування вентиляцією, зволоженням, CO₂-збагаченням та поливом. Побудовано цільові діапазони *BOCO* для різних етапів вирощування полуниці (вегетативний ріст, цвітіння, зав'язь, активний ріст і дозрівання плодів) окремо для денного та нічного режимів, що дозволяє формувати фазозалежну стратегію керування мікрокліматом. Представлена експериментальна методологія дозволяє валідувати інтегральний критерій *BOCO* в теплиці з використанням доступних IoT технологій на базі відкритої системи Home Assistant. Інтегральний критерій *BOCO* коригує якість мікроклімату для полуниці краще, ніж традиційне управління за окремими параметрами. Експеримент спрямований на встановлення зв'язку між *BOCO* та біометричними параметрами росту полуниці, а також оцінку економічності ефективності автоматизованого управління мікрокліматом. Система забезпечує автоматизоване управління мікрокліматом для оператора, що має потенціал підвищити урожайність на 15–30% та поліпшити якість плодів.

Ключові слова: інтегральний критерій, *BOCO*, мікроклімат теплиці, полуниця, віртуальні сенсори, IoT, управління мікрокліматом, якість росту рослин.

SUVORIN OLEG, KABACHIIY VLADYSLAV

Vinnitsia National Technical University

INTEGRATED CRITERIA FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF MICROCLIMATE MANAGEMENT FOR STRAWBERRY GROWING

Effective microclimate management in greenhouse strawberry production is critical for achieving high yields and fruit quality. The article proposes a new integrated indicator of microclimate management efficiency *BOCO* (Biophysical Optimality Criterion for CO₂-enriched Orchards with greenhouse conditions), which synthesizes physical parameters of the microclimate (temperature, relative humidity, CO₂ concentration, PAR illumination) and solution parameters (TDS) through a system of virtual sensors of partial pressure and water vapor pressure deficit (*P*, *VPD*) and calculated optimality coefficients *KCO₂*, *KTDS*, *KPAR* for CO₂, TDS and PAR, respectively. The proposed criterion combines biophysical laws of photosynthesis, transpiration, and plant nutrition with intelligent processing of IoT data in real time. *BOCO* allows you to quickly assess the state of the microclimate and formulate automated recommendations for controlling ventilation, humidification, CO₂ enrichment, and irrigation. Target ranges of *BOCO* have been constructed for different stages of strawberry cultivation (vegetative growth, flowering, ovary, fruit filling, and ripening) separately for day and night modes, which allows forming a phase-dependent microclimate control strategy. The presented experimental methodology allows validating the integral *BOCO* criterion in a greenhouse using available IoT technologies based on the open Home Assistant system. The integral *BOCO* criterion corrects the microclimate quality for strawberries better than traditional control by individual parameters. The experiment is aimed at establishing a connection between *BOCO* and biometric parameters of strawberry growth, as well as assessing the cost-effectiveness of automated microclimate control. The system provides automated microclimate control for the operator, which has the potential to increase yield by 15–30% and improve fruit quality.

Keywords: integral criterion, *BOCO*, greenhouse microclimate, strawberry, virtual sensors, IoT, microclimate management, plant growth quality.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Суворін Олег, Кабачій Владислав

Вступ

Тепличне виробництво полуниці є одною з найбільш прибуткових та інтенсивних форм сільськогосподарської діяльності. Однак досягнення стабільно високих урожаїв (7–15 кг/м²) і доброї якості плодів залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів мікроклімату, що вимагають синхронного та прецизійного контролю. Стандартні підходи до управління теплицею, засновані на окремих параметрах (температура, вологість, CO₂), часто не дозволяють оцінити комплексний вплив мікроклімату на ростові

процеси та якість плодів [1]. Крім того, традиційні системи керування використовують фізичні сенсори, які вимірюють локальні умови, не відображаючи всієї складності взаємодії параметрів у межах рослини та теплиці.

Стандартні системи керування (такі як Priva, Ridder, Certhon) забезпечують відокремлене управління окремими параметрами [2]. Зазвичай вони регулюють температуру, вологість та CO₂ як незалежні параметри, встановлюючи прості цільові значення (наприклад, T = 21°C, RH = 70%), [3]. Однак ці параметри глибоко взаємопов'язані:

- Підвищення температури веде до зниження відносної вологості, що автоматично збільшує VPD та інтенсивність транспірації [4].
- Закриття вентиляції для утримання CO₂ призводить до накопичення вологи та тепла, створюючи умови для грибкових захворювань.
- Регулювання тільки температури без урахування водного дефіциту не забезпечує оптимальних умов для фотосинтезу та росту плодів [5].

Такий фрагментарний підхід часто призводить до суперечливих команд керування (наприклад, одночасного нагрівання та вентиляції), що знижує ефективність і збільшує енергоспоживання теплиці на 15-25%. [6]. Неправильне управління вологістю в теплиці призводить як до надлишкової транспірації (при високому VPD), так і до конденсації та грибкових захворювань (при високій відносній вологості) [7]. Дефіцит VPD (надмірна вологість): зниження фотосинтезу на 15-20%, розвиток Botrytis та інших грибкових хвороб, що призводить до втрат 10-25% врожаю. Надлишок VPD (надмірна сухість): закриття прохідів, зниження фотосинтезу на 20-30%, дегідратація плодів, розтріскування та зниження цукристості на 10-15% [8]. Дефіцит CO₂: сповільнення фотосинтезу на 25-35%, що веде до зниження врожайності на 15-20% [9].

Постановка проблеми

Існує брак комплексного показника якості мікроклімату. Оператори теплиці мають отримувати єдиний, зрозумілий показник якості умов для рослини. Натомість вони побачать десятки окремих параметрів (T, RH, CO₂, EC, pH, світло, швидкість повітря та інші), які часто суперечать один одному в своїх рекомендаціях.

Це перевантажує оператора інформацією і схиляє до суб'єктивних, інтуїтивних рішень, які не завжди оптимальні. Існуючі інтегральні показники (Growththerm, E-grower) часто є закритими комерційними рішеннями без прозорої наукової основи та адаптовані до обмеженої кількості культур.

Також управління водою та енергією в теплицях неоптимальне. Теплиці споживають 10-15% від загального обсягу зрошувальної води у сільському господарстві. Це веде до надмірних витрат води та енергії на опалювання/охолодження.

Енергоспоживання на управління мікрокліматом становить 40-50% від всіх енергетичних витрат теплиці. Неefективні системи керування призводять до надлишкового спалювання газу чи електроенергії. Це призводить до втрати врожаю та якості плодів. Навіть невеликі відхилення від оптимальних умов мікроклімату призводять до значних втрат. Неоптимальне живлення: розвиток симптомів дефіциту (наприклад, фіолетове забарвлення від дефіциту фосфору), зниження врожаю та якості. Середні втрати від неоптимального управління мікрокліматом в теплицях оцінюються в 15-30% потенційного врожаю.

Тому існує необхідність в комплексному показнику, що враховує як фізичні сенсорні дані, так і розраховані віртуальні параметри робить необхідним розробку інтегрального критерію. Цей показник базується на основі біофізичних моделей росту рослин і дозволяє оперативно оцінити якість мікроклімату та прийняти обґрунтовані рішення щодо його регулювання.

Розроблення та валідація інтегрального критерію для оцінки якості мікроклімату теплиці при вирощуванні полуниці є актуальним дослідженням, що відповідає глобальним трендам цифровізації сільського господарства, потребам європейської та українських сільськогосподарських сфер, а також вирішує конкретні наукові та практичні проблеми управління тепличним виробництвом. Результати цього дослідження можуть стати основою для розробки нових систем керування мікрокліматом і сприяти підвищенню ефективності та стійкості тепличного виробництва в Україні та за кордоном.

Мета та завдання дослідження

Проведений аналіз показав недостатньо ефективне управління мікрокліматом в теплицях та відсутність єдиного та зрозумілого критерію оцінки мікроклімату в цілому. **Мета** дослідження полягає у підвищенні ефективності управління мікрокліматом через розробку інтегрального критерію, що враховує як фізичні, так і віртуальні сенсори для інтегральної оцінки якості мікроклімату теплиці при вирощуванні полуниці.

Дослідження спрямоване на розробку методу комплексної оцінки якості мікроклімату теплиці для виробництва полуниці на основі критерію. Для цього необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Проаналізувати процеси формування мікроклімату теплиці та визначити сукупність параметрів, що істотно впливають на фотосинтез, транспірацію та живлення рослин, сформулювати перелік фізичних IoT-датчиків і віртуальних сенсорів VPD, P та розрахованих коефіцієнтів KCO₂, KTDS, KPAR.
2. Розробити математичну модель формування віртуальних сенсорів на основі первинних даних IoT-мережі та створити методи їхнього розрахунку в реальному часі для доповнення інформаційної моделі мікроклімату.
3. Сформулювати узагальнений показник як функцію взаємодії параметрів VPD, P, KCO₂, KTDS, KPAR з урахуванням біофізичних закономірностей росту рослин.

4. Провести експериментальну перевірку керування мікрокліматом у теплиці на основі критерію та підтвердити зв'язок між показником ВСО₂ і біофізичними параметрами росту рослин.

Наукова новизна критерію полягає у створенні комплексної, біофізично обґрунтованої моделі для оцінки якості мікроклімату теплиці в цілому, що поєднує фізичні сенсорні дані, віртуальні розраховані параметри та параметри живлення рослин.

Практична цінність полягатиме в розробці простої у застосуванні моделі, яка дозволить підвищити ефективність управління мікрокліматом в теплиці, підвищить урожай, зменшить навантаження на оператора та дозволить створити автоматичні рекомендації дій оператора для коректування мікроклімату.

Огляд літератури

Проведений огляд показав невелику кількість джерел, які пропонують комплексний критерій оцінки стану мікроклімату. Переважна більшість наукових досліджень розглядає окремі параметри мікроклімату (Т, RH, CO₂, TDS) незалежно, без урахування їх спільного впливу.

Більшість досліджень мікроклімату теплиці стосуються помідорів або огірків. Дані, специфічні для полуниці, в основному не розглядають критерій оцінки мікроклімату. ВСО₂ було розроблено спеціально для полуниці з калібрувкою оптимальних параметрів на основі фізіології цієї культури [7].

Існуючі рішення для комплексного критерію

Серед наукових джерел, які враховуються спільний вплив факторів мікроклімату найбільш близькими можна виділити комплексний індекс стану мікроклімату [10], Індекс комфортності рослин [11], кумулятивний фотосинтез як індекс [12].

Комплексний індекс стану мікроклімату [10] включає широкий спектр показників: температура та відносна вологість повітря всередині теплиці, температура і вологість ґрунту, швидкість руху повітря (вентиляція), концентрацію CO₂, рівень освітленості, а також характеристики поливної води (температура, рН, електропровідність). ці параметри об'єднуються в єдиний індекс як добуток окремих функцій відхилення фактичних значень від нормативних для кожного показника. Наприклад, для кожного параметра обчислюють відношення «фактичне/рекомендоване» та підносять до степеня (вагового коефіцієнта), після чого множать між собою. Уся формула приводить до безрозмірного значення (максимум 1 при ідеальній відповідності нормам).

Проте даний критерій має складнощі з налаштування вагових коефіцієнтів: вагові коефіцієнти встановлено на основі загальних аналізів (як для огірків). Їх треба адаптувати до конкретної культури (полуниці), інакше показник стає нерепрезентативним. Без наявності чіткої методики визначення ваг вибір залишається довільним. Також цей індекс жорстко прив'язаний до рекомендованих значень параметрів, які можуть змінюватися для різних сортів, фаз росту чи кліматичних умов. Якщо норми неактуальні чи не збалансовані для даної культури, індекс буде показувати неправильний показник «якості» росту.

В роботі [11] у індекс комфортності рослин включено основні кліматичні умови для росту рослин: температура повітря, відносна вологість повітря, концентрація CO₂ і рівень сонячного (фотоактивного) випромінювання. Для критерію використано метод оптимізації (штучний рій бджіл), де саме індекс слугує метрикою якості середовища при регулюванні клімату. Такий підхід дозволяє ефективно знижувати енергоспоживання систем (опалення, зволоження, освітлення, CO₂) при збереженні високого рівня “комфарту” для рослин.

Проте даний критерій має обмеженість параметрів - ігнорує деякі важливі фактори (наприклад, ґрунтову вологість чи якість води для поливу), зосереджуючись лише на загальному кліматі. Тож параметри, пов'язані із субстратом чи гідропонією (підґрунтові характеристики), не враховано. Також цей критерій залежність від «оптимуму» - потребує вказати рекомендовані значення для кожної культури і фази росту. Якщо ці еталони визначені невірно, критерій може давати неточні результати. Вибір ваг потребує експертного або емпіричного обґрунтування.

В роботі [12] пропонується індекс кумулятивного фотосинтезу. це комплексна міра залежить від світла, температури і CO₂ – тобто умов, що впливають на фотосинтез. Проте безпосередньо вимірюється не кожен з цих параметрів, а інтегрально – швидкість листової фотосинтезу для рослин. Підраховується сумарна фотосинтетична активність листя з початку цвітіння до дозрівання, тобто інтеграл добової фотосинтезної продукції. Потім її значення порівнюють з сумарним освітленням та температурним інтегралом. Автори виявили параметри, що найкраще корелює з часом досягання плодів – тобто цей індекс найкраще «передбачає» швидкість росту і дозрівання полуниці.

Хоча критерій враховує головні кліматичні фактори через їх вплив на фотосинтез, його застосування не дає прямої інтерпретації, який саме параметр (“паросток” або “тепло”) не спрацював на користь. Необхідно окремо міряти PAR (фотонний потік), температуру та CO₂, щоб визначити причини відхилень. Критерій має вимірювальна складність: потребує оснащення системами вимірювання фотосинтетичної активності (методом IRGA, лістерометром чи моделюванням), що значно складніше, ніж стандартні датчики середовища. Безпосереднє вимірювання фотосинтезу – складна і ресурсомістка процедура.

Усі розглянуті критерії є багатопараметричними, але відрізняються за складністю і спрямованістю. Підхід Лактіонова [10] використовує найповніший набір (клімат, ґрунт, воду) і дає детальну оцінку, однак вимагає надзвичайно складного устаткування та тонкого налагодження (багато вагових коефіцієнтів, нормативів). Напроти, «індекс комфортності» [10] спрощує задачу лише основними кліматичними факторами (Т, RH, CO₂, світло) і використовує формулу з сумою похибок – завдяки цьому його легше обчислити та

інтегрувати в системи управління, але він менш чутливий до підґрунтових умов та вимагає чіткого визначення «оптимумів» для культури та менше підходить для гідропоніки. Індекс сумарного фотосинтезу [12] поєднує в собі вплив усіх ключових факторів через реальний біофізіологічний результат, що робить його релевантним для ягід. Проте він важко масштабується і застосовується швидше в дослідженнях, ніж у щоденному моніторингу.

Жоден із розглянутих методів не є універсальним та не задовольняє всім вимогам, тому виникає необхідність у розробці власного критерію.

Розроблений критерій

Вимірювані параметри теплиці

Вимоги культури до умов вирощування - це в першу чергу вимоги до температури, світла, вологості, мінерального живлення, кислотності, засоленості, щільності ґрунту. Багато фермерів не до кінця усвідомлюють або задовольняють ці вимоги культури, й відповідно мають невисокі врожаї. Контроль мікроклімату у теплицях є критичним фактором для забезпечення стабільної врожайності [13].

У теплиці для контролю мікроклімату використовуються фізичні IoT сенсори: температура повітря (T , °C), відносна вологість (RH , %), концентрація CO_2 (ppm), розчин TDS (ppm). Також можна вимірювати освітленість, швидкість повітря [14].

У роботі використовуються обчислювані параметри, які працюються як віртуальні сенсори: насичений тиск водяної пари e_s (1), дефіцит тиску водяної пари VPD (2), фактичний парціальний тиск водяної пари P , коефіцієнт відхилення CO_2 від оптимуму K_{CO_2} (3), коефіцієнт відповідності K_{TDS} оптимальному рівню TDS (4), K_{PAR} - коефіцієнт фази доби на основі значень PAR (5).

Обчислювані параметри розраховуються наступним чином:

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{(T+237,3)}}, \quad (1)$$

де e_s - насичений тиск водяної пари, T - температура повітря, °C,

Дефіцит тиску водяної пари, що характеризує водний баланс і транспірацію рослини, індикатор закриття продихів та фотосинтезу:

$$VPD = e_s - P, \quad (2)$$

де $P = e_s \cdot \frac{RH}{100}$ - парціальний тиск водяної пари, індикатор абсолютної доступності води, RH - відносна вологість повітря, %.

Коефіцієнт відповідності оптимуму рівня вуглекислого газу, показує ефективність газообміну та фотосинтезу,

$$K_{CO_2} = 1 - \frac{|CO_2 - OPT_{CO_2}|}{OPT_{CO_2}}, \quad (3)$$

де CO_2 - рівень вуглекислого газу, ppm, OPT_{CO_2} - оптимальний рівень вуглекислого газу.

Коефіцієнт відповідності оптимуму рівня поживних речовин, показує ефективність живлення як обмежуючого фактора росту:

$$K_{TDS} = 1 + \frac{|TDS - OPT_{TDS}|}{OPT_{TDS}}, \quad (4)$$

де TDS - загальна кількість розчинених у воді неорганічних і органічних речовин, ppm, OPT_{TDS} - оптимальний рівень поживних речовин.

Коефіцієнт фази доби, розраховується як близькість значення PAR до оптимального PAR_0 ,

$$K_{PAR} = \frac{|PAR + PAR_0|}{PAR_0}, \quad (5)$$

де $PAR = Lux \cdot K$ - поточна освітленість ($\mu mol/m^2/s$), PAR_0 - мінімальний рівень, достатній для початку фотосинтезу (для полуниці $\approx 150-200$), K - коефіцієнт, який розраховується емпірично залежно від типу освітлення, у нашому випадку для люмінісцентних ламп емпіричне значення було отримане $K \approx 0,018$, Lux - освітленість.

Рівняння мікроклімату для оцінки росту рослин

VPD та P разом (2) характеризують баланс попиту (VPD) та пропозиції (P) води. K_{CO_2} характеризують ефективність значення CO_2 (3). Всі компоненти повинні бути високими для максимального ефекту. K_{TDS} характеризує якість та кількість живлення (4). Розташування в знаменнику означає, що недостатня концентрація поживних речовин обмежує весь $VOCO$. Для перемикання між денним і нічним режимом використовується змінна K_{PAR} , яка показує показника освітленості PAR до оптимального (5).

Критерій можна описати:

$$VOCO = \frac{VPD \cdot P \cdot K_{CO_2}}{K_{TDS}} \cdot K_{PAR}, \quad (6)$$

Це інтегральний критерій (6), який синтезує:

- Фізичні параметри мікроклімату теплиці (температура, вологість).
- Розраховані віртуальні параметри (VPD — дефіцит тиску водяної пари).
- Параметри живлення розчину (концентрація розчинених речовин).
- Біофізичні закономірності процесів фотосинтезу, транспірації та живлення.

Оптимальні діапазони для полуниці

На основі літературних даних та емпіричних спостережень встановлені наступні діапазони для полуниці, показані в таблиці 1 та 2.

Таблиця 1

Оптимальні параметри управління мікрокліматом вдень для ремонтної полуниці на різних стадіях росту

| День | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|----------|-----------------------|------------------|----------|------|---------|
| Етапи росту | T, °C | RH, % | VPD, кПа | CO ₂ , ppm | KCO ₂ | TDS, ppm | KTDS | ВОСО |
| 1. Вегетація | 22 | 68 | 0,8 | 950 | 0,95 | 1000 | 1,0 | 2,0–3,0 |
| 2. Адаптація | 22 | 65 | 0,95 | 1000 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 2,5–3,5 |
| 3. Цвітіння | 21 | 65 | 0,9 | 1000 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 2,5–3,5 |
| 4. Зав'язь | 22 | 68 | 0,85 | 1000 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 2,0–3,0 |
| 5. Активний ріст | 23 | 70 | 0,8 | 1000 | 1,0 | 1100 | 0,90 | 1,8–3,0 |
| 6. Дозрівання | 23–24 | 62 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 1100 | 0,90 | 2,0–3,5 |
| 7. Збір урожаю | 20–22 | 65 | 0,85 | 900 | 0,90 | 1000 | 1,0 | 1,5–2,5 |

Таблиця 2

Оптимальні параметри управління мікрокліматом вночі для ремонтної полуниці на різних стадіях росту

| Ніч | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|----------|-----------------------|------------------|----------|------|---------|
| Етапи росту | T, °C | RH, % | VPD, кПа | CO ₂ , ppm | KCO ₂ | TDS, ppm | KTDS | ВОСО |
| 1. Вегетація | 18 | 78 | 0,4 | 950 | 0,95 | 1000 | 1,0 | 0,6–0,9 |
| 2. Адаптація | 17 | 75 | 0,35 | 1000 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 0,5–0,8 |
| 3. Цвітіння | 16–17 | 73 | 0,32 | 1000 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 0,5–0,8 |
| 4. Зав'язь | 17–18 | 78 | 0,38 | 1000 | 1,0 | 1050 | 0,95 | 0,6–0,9 |
| 5. Активний ріст | 18 | 76 | 0,40 | 1000 | 1,0 | 1100 | 0,90 | 0,7–1,0 |
| 6. Дозрівання | 18–19 | 70–73 | 0,45 | 1050 | 0,95 | 1100 | 0,90 | 0,5–0,8 |
| 7. Збір урожаю | 15–17 | 72 | 0,35 | 900 | 0,90 | 1000 | 1,0 | 0,6–0,9 |

Реалізація вимірювання мікроклімату у гідропонній теплиці

Система гідропонної теплиці на базі Home Assistant

Представлено експериментальне дослідження для валідації інтегрального критерію на базі теплиці з комплексною системою IoT датчиків (T, RH, CO₂, TDS, PAR) та відкритою системою керування Home Assistant. Експеримент спрямований на встановлення зв'язку між ВОСО та біометричними параметрами росту полуниці, а також оцінку економічної ефективності автоматизованого управління мікрокліматом.

Період спостереження: 04:00 – 20:00 (16 годин), частота запису: 5-хвилинна агрегація в системі Home Assistant з IoT датчиками.

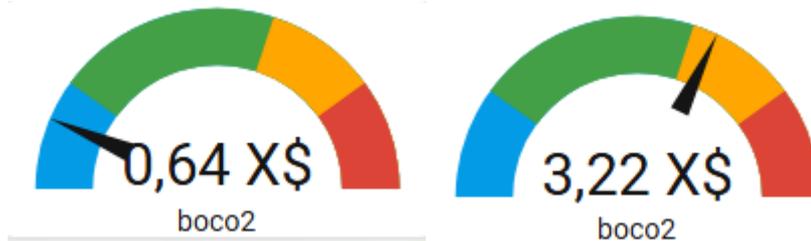


Рис. 1. Розраховане значення ВОСО в теплиці вдень і вночі



Рис. 2. Зміна значення ВОСО в теплиці протягом доби

Приклад розрахунку ВОСО вдень і вночі показаний на рис. 1. Крива на рис. 2 показує циклічну динаміку протягом світлового дня. Крива має класичний денний цикл: мінімум зранку (0,65), коли система переходить з нічного в денний режим, максимум вдень о 12:00–14:00 (3,22) - оптимальні умови та спад у вечір (1,2) - система переходить у нічний режим. Більшість дня (6–8 годин) ВОСО перебував в оптимальному діапазоні (1,5–4,0), що свідчить про добре налаштувану систему управління. Проте зранку ВОСО = 0,65, що є достатньо низьким показником — система потребує обігріву та вентиляції. Можлива рекомендація - необхідність включити зігрівальну систему раніше.

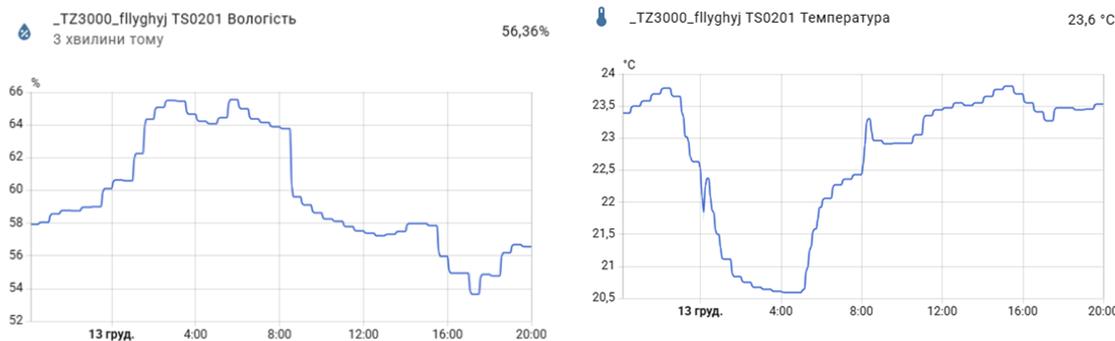


Рис. 3. Зміна значення температури та вологості в теплиці протягом доби

На рис. 3 показаний графік температури та вологості. Температура добре контролюється, утримується в оптимальному діапазоні весь день. Вологість в допустимому діапазоні (не надто висока, не надто низька). Однак, можна було б підвищити вологість вечорі до 70–75% для кращої гідратації плодів перед ніччю.

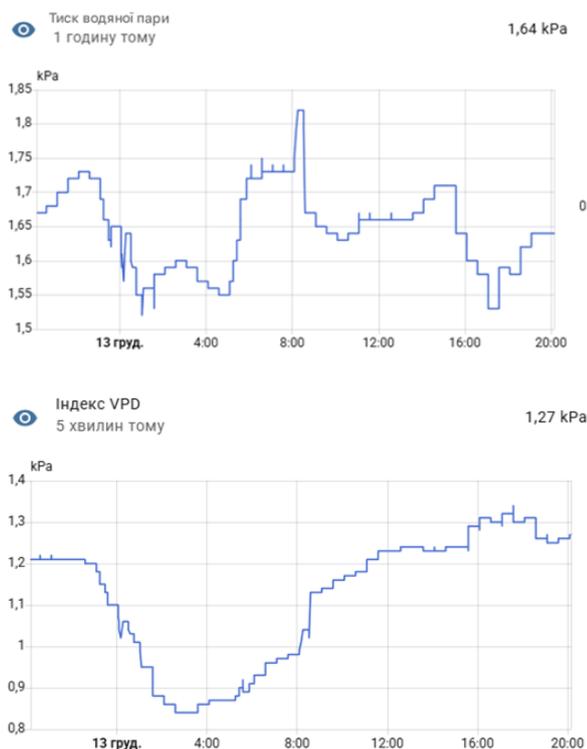


Рис. 4. Зміна значення тиску водяної пари та індексу VPD в теплиці протягом доби

На рис. 4 показаний графік тиск водяної пари (P) та індекс VPD(kPa).

Величина P стабільна і в нормі весь день. Індекс VPD = 1,31 kPa (максимум, о 12:00) — це вище оптимуму для полуниці (цільовий діапазон: 0,8–1,2 kPa). Ймовірна причина - висока температура та низька вологість. Рекомендація - включити туманоутворення о 11:00 для зниження VPD на 0,1–0,2 kPa.

TDS має денний мінімум = 779 ppm - це нижче від оптимуму (мета: 950–1050 ppm), що спричиняє дефіцит живлення — рослини можуть сповільнити ріст у полудень. Ймовірна причина - активний полив та живлення рослин вдень, розведення розчину. Рекомендація для системи: зменшити частоту поливу вдень щоб зберегти TDS та збільшити TDS вранці на 50–100 ppm (до 1000 ppm) перед піком денної активності, щоб привести до оптимуму $K_{TDS} = 0,95–1,0$.

ВОСО має чітку денну кривизну (синус-подібна), це свідчить про добре налаштовану систему управління. Можна передбачити, коли буде максимум (о 12:00–13:00). Т, RH, VPD, CO₂, TDS взаємопов'язані, це дозволить розробити предиктивні моделі для ВОСО і машинне навчання матиме хороші дані для тренування.

Системи Home Assistant з IoT датчиками надає достатню якість даних для розрахунку ВОСО у реальному часі на основі 5-хвилинної агрегації показників. ВОСО корелює з сумою всіх параметрів мікроклімату (Т, RH, VPD, CO₂, TDS), що підтверджує його інтегральну природу. Основна проблема системи: CO₂ дефіцит вдень (492 ppm при мету 950–1000 ppm), тому потребує CO₂-збагачення.

Система керування можна оптимізувати на 20–30% шляхом:

- Включення CO₂-подачі о 08:00.
- Автоматичного туманоутворення при VPD > 1,2 kPa.
- Кращого контролю TDS вдень.

Дані якості достатні для проведення експерименту ВОСО на полуниці. Очікується підвищення урожайності на 15–25% при оптимізації цих параметрів.

Представлена експериментальна методологія дозволяє валідувати інтегральний критерій ВОСО в теплиці з використанням доступних IoT технологій (Home Assistant). Інтегральний критерій ВОСО коригує якість мікроклімату для полуниці краще, ніж традиційне управління за окремими параметрами. Система забезпечує автоматизоване управління мікрокліматом для оператора, що має потенціал підвищити урожайність на 15–30% та поліпшити якість плодів. Результати можуть стати основою для наукової публікації та комерційного впровадження у тепличних господарствах.

Оскільки задача оператора теплиці зводиться до підтримання необхідного рівня ВОСО, для мотивації оператора можна передбачити нарахування премії з урахування середнього за місяць за сезон, визначити коефіцієнт якості $K_{ВОСО}$ у діапазоні 0...1.

Щоб уникнути ситуацій, коли ВОСО формально високий, а урожай все одно слабкий (через помилки в агротехніці), можна об'єднати декілька показників у (7) та (8):

$$K_{ВОСО} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \overline{ВОСО} < 0.5 \\ \frac{\overline{ВОСО} - 0.5}{3.5 - 0.5}, 0.5 \leq \overline{ВОСО} \leq 3.5 \\ 1, \overline{ВОСО} > 3.5 \end{array} \right\}, \quad (7)$$

$$P = S \cdot (0.3 \cdot K_{ВОСО} \cdot K_{SE} + 0.5 \cdot K_H + 0.2 \cdot K_Q), \quad (8)$$

де P – розрахована премія, S – ставка зарплати за місяць, K_{SE} – коригує складність роботи в різні сезони, $K_{se} = 0,8-1,5$, K_H – коефіцієнт урожайності, можна розрахувати як співвідношення реальної та планової урожайності, K_Q – коефіцієнт якості, розраховується за масою плода, Вгiх та частки бракованих ягід.

Дії оператора в теплиці при традиційному управлінні мікрокліматом

Оператор встановлює цільові значення наприклад $T = 21^\circ\text{C}$, $RH = 70\%$, $CO_2 = 800 \text{ ppm}$:

- Система моніторить кожен параметр окремо.
- При порушенні параметра видає команду керування.
- В результаті можливі часто суперечливі дії керування.

Це створює проблеми, оскільки не враховує взаємодію параметрів, недостатньо ефективно (переобробка одних параметрів, ігнорування інших), оператор змушений моніторити 15-20 параметрів.

Висновки

Запропоновано інтегральний критерій ВОСО як безрозмірний показник якості мікроклімату, що одночасно враховує температуру, вологість через систему віртуальних сенсорів VPD, P, KCO₂, KTDS, PAR; показано його зв'язок із фотосинтезом, транспірацією та засвоєнням поживних речовин полуницею.

Критерій пропонується як науково обґрунтований, практично застосовний та універсальний інструмент для оцінки якості мікроклімату теплиці. На відміну від простих параметричних індексів, ВОСО:

- Має біофізичну основу в процесах фотосинтезу, транспірації та живлення.
- Враховує функціональну взаємодію параметрів мікроклімату.
- Дозволяє швидко ідентифікувати причини порушень.
- Забезпечує автоматизацію рекомендацій для оператора.
- Дозволяє прогнозування та планування.
- Універсальний для інших культур.

Побудовано цільові діапазони ВОСО для різних етапів вирощування полуниці (вегетативний ріст, цвітіння, зав'язь, налив і дозрівання плодів) окремо для денного та нічного режимів, що дозволяє формувати фазозалежну стратегію керування мікрокліматом.

Показано, що критерій може використовуватися не лише як технічний індикатор для замкнутого контуру керування, але й як база для економіко мотиваційних моделей: розроблено схеми преміювання операторів теплиці, де розмір винагороди залежить від середнього з урахуванням сезонних коефіцієнтів, що підвищує прозорість і результативність мотивації персоналу.

Показано реалізацію управління мікрокліматом теплиці на базі відкритих технологій, таких як система Home Assistant.

Практична цінність системи з ВОСО, полягає в підвищенні ефективності для малих і середніх, тепличних господарств при управлінні мікрокліматом.

Подальші дослідження можуть бути присвячені детальній розробці, валідації та практичному застосуванню ВОСО для вирощування полуниці в теплицях.

Література

1. O. Suvorin and V. Kabachiy. "Optimization of water consumption in multilevel greenhouses using an automated irrigation system with recirculation of hydroponic nutrient solution." [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24000>.
2. A. G. Yusuf, F. A. Al-Yahya, A. A. Saleh, and A. M. Abdel-Ghany, "Optimizing greenhouse microclimate for plant pathology: challenges and cooling solutions for pathogen control in arid regions," *Frontiers Plant Sci.*, Volume 16 - 2025, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1492760>.
3. T. Tran, A. Ouammi, and L. A-Dessaint, "A Near-Zero Energy Smart Greenhouse Integrated Into a Microgrid for Sustainable Energy and Microclimate Management," *IEEE Access*, PP, pp. 1–1, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3537536>
4. E. Zakir *et al.*, "Effect of Thermal Screen Position on Greenhouse Microclimate and Impact on Crop Growth and Yield," *Nigerian J. Technol. Develop.*, vol. 19, pp. 417–432, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4314/njtd.v19i4.15>
5. H.-R. Ryu, E.-Y. Choi, and K.-Y. Choi, "Growth Characteristics, Yield and Fruit Soluble Carbohydrate Content of Hydroponically Grown Strawberry with Carbon Dioxide Fertilization," *Horticultural Sci. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 513–520, Aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12972/kjhst.20180051>.
6. Y. Miyoshi, K. Hidaka, T. Okayasu, D. Yasutake, and M. Kitano, "Effects of Local CO₂ Enrichment on Strawberry Cultivation during the Winter Season," *Environ. Control Biol.*, vol. 55, pp. 165–170, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2525/ecb.55.165>
7. O. Суворін, В. Кабачій, Я. Кулик, К. Овчинников, "Аналіз параметрів мікроклімату для управління теплицею", *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, vol. 353, no. 3.2, pp. 315–324, Jun. 2025, doi: 10.31891/2307-5732-2025-353-45.
8. R. Yamanaka *et al.*, "Relationship between Vapor Pressure Deficit Condition and Water-stress Status in Strawberry," *Horticulture J.*, vol. 94, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2503/hortj.SZD-015>.
9. T. Akpenpuun *et al.*, "Effect of Greenhouse Cladding Materials and Thermal Screen Configuration on Heating Energy and Strawberry (*Fragaria ananassa* var. "Seolhyang") Yield in Winter," *Agronomy*, vol. 11, p. 2498, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122498>
10. Laktionov, O. Vovna, and A. Zori, "Concept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses," *Bulgarian J. Agricultural Sci.*, vol. 23, pp. 668–673, Aug. 2017.
11. M. Jawad *et al.*, "Energy optimization and plant comfort management in smart greenhouses using the artificial bee colony algorithm," *Scientific Rep.*, vol. 15, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84141-5>
12. S. Ono *et al.*, "Effect of microclimate and photosynthesis on strawberry reproductive growth in a greenhouse: using cumulative leaf photosynthesis as an index to predict the time of harvest," *J. Horticultural Sci. Biotechnol.*, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14620316.2023.2254759>
13. O. Sharapa and A. Berdnikov, "Model of process control system in greenhouse agro-industrial complex," *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series: Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems*, no. 47, pp. 108–118, 2020. DOI: 10.26565/2304-6201-2020-47-08. Available: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/16494/15301>.
14. Лактіонов І. Інформаційно-вимірювальне забезпечення та апаратно-програмні засоби побудови комп'ютеризованих систем моніторингу стану мікроклімату теплиць : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05. Покровськ, 2021. 518 с. URL: https://uacademic.info/download/file/0521U100274/dis_Laktionov.pdf (дата звернення: 07.03.2025).
15. Суворін О. І., Кабачій В. В. Застосування віртуального датчика точки роси для запобігання конденсації та підвищення врожайності в теплицях // *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)»*, Вінниця, 15-16 червня 2025 р. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/23184>.

References

1. O. Suvorin and V. Kabachii. "Optimization of water consumption in multilevel greenhouses using an automated irrigation system with recirculation of hydroponic nutrient solution." [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24000>.
2. G. Yusuf, F. A. Al-Yahya, A. A. Saleh, and A. M. Abdel-Ghany, "Optimizing greenhouse microclimate for plant pathology: challenges and cooling solutions for pathogen control in arid regions," *Frontiers Plant Sci.*, Volume 16 - 2025, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1492760>.
3. T. Tran, A. Ouammi, and L. A-Dessaint, "A Near-Zero Energy Smart Greenhouse Integrated Into a Microgrid for Sustainable Energy and Microclimate Management," *IEEE Access*, PP, pp. 1–1, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3537536>

4. E. Zakir et al., "Effect of Thermal Screen Position on Greenhouse Microclimate and Impact on Crop Growth and Yield," *Nigerian J. Technol. Develop.*, vol. 19, pp. 417–432, Dec. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4314/njtd.v19i4.15>
5. H.-R. Ryu, E.-Y. Choi, and K.-Y. Choi, "Growth Characteristics, Yield and Fruit Soluble Carbohydrate Content of Hydroponically Grown Strawberry with Carbon Dioxide Fertilization," *Horticultural Sci. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 513–520, Aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12972/kjhst.20180051>.
6. Y. Miyoshi, K. Hidaka, T. Okayasu, D. Yasutake, and M. Kitano, "Effects of Local CO₂ Enrichment on Strawberry Cultivation during the Winter Season," *Environ. Control Biol.*, vol. 55, pp. 165–170, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2525/ecb.55.165>
7. O. Suvorin, V. Kabachii, Ya. Kulyk, and K. Ovchynnykov, "Analiz parametriv mikroklimatu dlia upravlinnia teplytaeiu", Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, vol. 353, no. 3.2, pp. 315–324, Jun. 2025, doi: 10.31891/2307-5732-2025-353-45.
8. R. Yamanaka et al., "Relationship between Vapor Pressure Deficit Condition and Water-stress Status in Strawberry," *Horticulture J.*, vol. 94, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2503/hortj.SZD-015>.
9. T. Akpenpuun et al., "Effect of Greenhouse Cladding Materials and Thermal Screen Configuration on Heating Energy and Strawberry (*Fragaria ananassa* var. "Seolhyang") Yield in Winter," *Agronomy*, vol. 11, p. 2498, Dec. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122498>
- J. Laktionov, O. Vovna, and A. Zori, "Concept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses," *Bulgarian J. Agricultural Sci.*, vol. 23, pp. 668–673, Aug. 2017.
10. M. Jawad et al., "Energy optimization and plant comfort management in smart greenhouses using the artificial bee colony algorithm," *Scientific Rep.*, vol. 15, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84141-5>
11. S. Ono et al., "Effect of microclimate and photosynthesis on strawberry reproductive growth in a greenhouse: using cumulative leaf photosynthesis as an index to predict the time of harvest," *J. Horticultural Sci. Biotechnol.*, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14620316.2023.2254759>
12. O. Sharapa and A. Berdnikov, "Model of process control system in greenhouse agro-industrial complex," *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series: Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems*, no. 47, pp. 108–118, 2020. DOI: 10.26565/2304-6201-2020-47-08. Available: <https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/16494/15301>.
13. Laktionov I. Informatsiino-vymiriuvalne zabezpechennia ta aparatno-prohranni zasoby pobudovy kompiuteryzovanykh system monitorynhu stanu mikroklimatu teplyts : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.13.05. Pokrovsk, 2021. 518 s. URL: https://uacademic.info/download/file/0521U100274/dis_Laktionov.pdf (data zvernennia: 07.03.2025).
14. Suvorin O. I., Kabachii V. V. Zastosuvannia virtualnoho datchyka tochky rosy dlia zapobihannia kondensatsii ta pidvyshchennia vrozhainosti v teplytsiakh // *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Molod v nautsi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2025)»*, Vinnytsia, 15-16 chervnia 2025 r. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/23184>.