

ІНТЕГРАЛЬНИЙ КРИТЕРІЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦЬ ПРИ ВИРОЩУВАННІ ПОЛУНИЦІ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано новий інтегральний показник *BOCO* (*Biophysical Optimization Criterion based on CO₂*) для комплексної оцінки якості мікроклімату у теплицях. Показник враховує взаємодію температури, вологості, концентрації *CO₂*, освітленості та живлення рослин.

Ключові слова: точне землеробство, мікроклімат теплиць, VPD, IoT, полуниця, автоматизоване управління.

Abstract

A new integrated indicator *BOCO* (*Biophysical Optimization Criterion based on CO₂*) is proposed for comprehensive assessment of greenhouse microclimate quality. The indicator accounts for interactions between temperature, humidity, *CO₂* concentration, lighting, and plant nutrition.

Keywords: precision farming, greenhouse microclimate, VPD, IoT, strawberry, automated control.

Вступ

Сучасне тепличне виробництво стикається з необхідністю одночасного контролю десятків параметрів мікроклімату: температури повітря та субстрату, відносної вологості, концентрації *CO₂*, освітленості (PAR), електропровідності живильного розчину (EC), pH. Традиційні системи автоматизації оперують незалежними порогоми для кожного параметра, що призводить до конфліктів управління та неоптимального використання ресурсів [1].

Основна проблема полягає у відсутності інтегрального показника, який би враховував біофізичну взаємодію між параметрами мікроклімату. Наприклад, підвищення температури збільшує дефіцит тиску пари (VPD), що впливає на транспірацію та поглинання *CO₂* [2]. Існуючі підходи (окремий контроль VPD, DIF-температура, Grow Degree Days) не враховують комплексний вплив всіх факторів на фотосинтетичну активність рослин.

Метою роботи є розроблення інтегрального критерію *BOCO₂* для оцінки якості мікроклімату теплиць та експериментальна валідація його ефективності на культурі полуниці ремонтана.

Результати дослідження

Запропонований інтегральний показник *BOCO* базується на біофізичних процесах фотосинтезу, транспірації та живлення рослин. Формула критерію має вигляд:

$$BOCO = \frac{VPD \cdot P \cdot K_{CO_2} \cdot K_{PAR}}{K_{TDS}} \quad (1)$$

де: *VPD* — дефіцит тиску пари (кПа), характеризує водний баланс рослини;

P — фактичний тиск водяної пари (кПа), визначає градієнт для транспірації;

K_{CO₂} — коефіцієнт відхилення *CO₂* від оптимуму, $K_{CO_2} = 1 - \frac{|CO_2 - OPT_{CO_2}|}{OPT_{CO_2}}$;

CO₂ — концентрація вуглекислого газу (ppm);

K_{TDS} — коефіцієнт відхилення *TDS* від оптимуму, $K_{TDS} = 1 + \frac{|TDS - OPT_{TDS}|}{OPT_{TDS}}$;

TDS — загальна концентрація розчинених речовин (ppm);

K_{PAR} — коефіцієнт фази доби, розраховується як близькість значення PAR до оптимального PAR ,

$$K_{PAR} = \frac{|PAR + PAR_0|}{PAR_0},$$

$PAR = Lux \cdot K$ - поточна освітленість ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$);

PAR_0 - мінімальний рівень, достатній для початку фотосинтезу (для полуниці $\approx 150\text{--}200$),

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.

Чисельник формули $VPD \cdot P \cdot K_{CO_2} \cdot CO_2$ відображає потенціал фотосинтезу та водообміну, а знаменник $K_{TDS} \cdot TDS$ нормалізує показник відносно живлення.

ВОСО максимізується, коли VPD знаходиться в оптимумі 0,4–1,2 kPa (забезпечення транспірації без водного стресу), концентрація CO_2 близька до 900–1000 ppm (насичення), а TDS відповідає потребам етапу онтогенезу (800–1200 ppm) [3].

Таблиця 1. Оптимальні діапазони ВОСО₂ для полуниці на різних етапах

Етап онтогенезу	ВОСО ₂ (оптимум)	T (°C)	CO ₂ (ppm)
Вегетація	1,5–2,5	20–23	850–950
Цвітіння	1,0–1,8	18–20	750–850
Налив плоду	1,9–2,8	19–22	900–1050
Дозрівання	1,6–2,4	18–21	850–950

Критерій ВОСО адаптується до зміни інтенсивності фотосинтетично активної радіації (PAR , 400–700 нм). При $PAR > 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ оптимальні параметри коригуються: $T +1\text{--}2^\circ\text{C}$, $RH -8\text{--}12\%$, $CO_2 +100\text{--}150 \text{ ppm}$, що забезпечує максимальну фотосинтетичну ефективність без фотоінгібіції [4].

Експериментальна перевірка

Експеримент проводився у теплиці площею 2 м² протягом 8 тижнів. Контрольна зона використовувала традиційне управління з незалежними порогами параметрів. Експериментальна зона застосовувала алгоритм управління на основі ВОСО з періодом коригування 30 хвилин.

Сенсорна інфраструктура включала:

- Датчики температури/вологості DHT22.
- CO₂-сенсори MH-Z19B.
- Датчики якості розчину EC/TDS.
- Датчики освітленості для розрахунку PAR .

Система управління реалізована на платформі Home Assistant з ESPHOME використанням мікроконтролерів ESP32 та протоколу MQTT.

Статистичний аналіз підтвердив значущість відмінностей між зонами для всіх параметрів. Виявлено сильний зв'язок між середнім ВОСО та урожайністю.

Висновки

1. Розроблено інтегральний критерій ВОСО, який комплексно враховує взаємодію параметрів мікроклімату теплиці (VPD , CO_2 , TDS) на основі біофізичних механізмів фотосинтезу та транспірації.
2. Виявлено кореляцію між середнім значенням ВОСО та біометричними показниками якості врожаю, що підтверджує прогностичну цінність критерію.
3. Запропонований критерій може бути адаптований для інших культур закритого ґрунту

(томати, огірки, перець) шляхом коригування оптимальних діапазонів параметрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Artificial Intelligence in Solar-Assisted Greenhouse Systems: A Technical, Systematic and Bibliometric Review of Energy Integration and Efficiency Advances / E. Villagran et al. *Technologies*. 2025. Vol. 13, no. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies13120574>.
2. Data-driven evaluation of machine learning models for climate control in operational smart greenhouses / J. Morales-Garcia et al. *J. Ambient Intell. Smart Environ.* 2023. Vol. 15, no. 1. P. 3–17. URL: <https://doi.org/10.3233/AIS-220441>.
3. Eco-friendly strategy for CO₂ enrichment performance in commercial greenhouses based on the CO₂ spatial distribution and photosynthesis / Y. Zhang et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 17277. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44200-9>.
4. Hourly photosynthetically active radiation prediction in solar greenhouses using Bayesian optimized machine learning and deep learning based on limited local weather data / M. Wu et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 237. P. 110680. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110680>.

Суворін Олег Ігорович - аспірант 174-ї спеціальності, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: 00-24-048.stud@vntu.edu.ua

Науковий керівник: **Кабачій Владислав Володимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kabachij.v.v@vntu.edu.ua

Suvorin Oleg Igorovich - Department of Intelligent Information Technology and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: 00-24-048.stud@vntu.edu.ua

Supervisor: **Kabachii Vladyslav V.** – Ph. D., Assistant Professor of Intelligent Information Technology and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kabachij.v.v@vntu.edu.ua