

¹ Вінницький національний технічний університет;**Анотація.**

Запропоновано вдосконалений інтегральний критерій БОСО для оцінки якості мікроклімату в тепличних системах. Модель поєднує параметри VPD, CO₂, PAR та TDS із урахуванням їх взаємодії та добових режимів роботи. Критерій придатний для застосування в системах моніторингу та автоматизованого керування в реальному часі.

Ключові слова: БОСО, мікроклімат теплиці, VPD, CO₂, PAR, TDS, інтегральний критерій, автоматизоване керування, гідропоніка, полуниця.

Abstract.

An improved integral BOCO criterion is proposed for assessing the quality of microclimate in greenhouse systems. The model combines the parameters VPD, CO₂, PAR and TDS, taking into account their interaction and daily operating modes. The criterion is suitable for use in real-time monitoring and automated control systems.

Keywords: BOCO, greenhouse microclimate, VPD, CO₂, PAR, TDS, integral criterion, automated control, hydroponics, strawberry.

Вступ

Метою цього дослідження є розробка нормалізованого багатопараметричного індексу БОСО, який інтегрує ключові змінні теплиць (VPD, CO₂, PAR та характеристики поживного розчину) в єдину метрику для оцінки мікроклімату.

Сучасні системи тепличного вирощування в умовах контрольованого середовища характеризуються високою складністю та багатофакторністю процесів формування мікроклімату. Для таких культур, як полуниця, ефективність росту та якість продукції визначаються не окремими параметрами, а їх взаємодією, зокрема температурно-вологісного режиму, освітлення, концентрації CO₂ та стану живильного розчину [1].

Існуючі підходи до оцінки мікроклімату теплиць можна умовно поділити на три групи: фізико-математичні моделі, аналіз окремих параметрів та індекси оптимальності. Найбільш близькими до запропонованого підходу є моделі типу Optimality Degree, які забезпечують нормалізацію параметрів мікроклімату в діапазоні [0;1] Однак такі моделі [2, 3] не враховують взаємодію факторів та не забезпечують інтегральної оцінки їх сумісного впливу. У результаті це ускладнює прийняття рішень у системах автоматизованого керування та знижує ефективність оптимізації режимів вирощування.

На відміну від цього, запропонований індекс БОСО базується на мультиплікативній інтеграції ключових параметрів (VPD, CO₂, PAR, TDS), що дозволяє врахувати їх синергетичний вплив на фізіологічні процеси рослин. Це відрізняє його як від класичних моделей мікроклімату, що є складними для практичного застосування, так і від існуючих індексів, які мають обмежену інформативність.

Додатковою проблемою є відсутність універсального показника, придатного для використання в реальному часі в системах моніторингу та керування (зокрема IoT-рішеннях), який би одночасно:

- інтегрував ключові параметри мікроклімату;
- враховував відхилення від оптимальних умов;
- адаптувався до денного та нічного режимів;
- відображав як кількісні, так і якісні аспекти вирощування продукції.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки інтегрального критерію оцінки мікроклімату, здатного поєднати вплив основних факторів у єдину узагальнену метрику.

Запропонований критерій БОСО спрямований на вирішення цієї задачі шляхом інтеграції параметрів VPD, CO₂, PAR та TDS у єдиний індекс із використанням коефіцієнтів оптимальності. Це дозволяє забезпечити більш адекватну оцінку стану середовища та створює основу для підвищення ефективності автоматизованого керування мікрокліматом теплиці.

Результати дослідження

Критерій БОСО призначений для інтегральної оцінки якості мікроклімату в тепличних системах на основі поєднання ключових параметрів середовища, що визначають фізіологічні процеси рослин.

Дана робота є розвитком роботи [4] і усуває деякі недоліки критерій ВОСО.

Математично критерій реалізовано у вигляді мультиплікативної моделі з використанням коефіцієнтів оптимальності, які відображають ступінь відхилення поточних значень параметрів від заданих оптимальних умов:

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

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

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

CO_2 — концентрація вуглекислого газу (ppm);

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

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.

У даній роботі пропонується вдосконалений критерій ВОСО:

$$BOCO = K_{VPD} \cdot K_{CO_2} \cdot K_{PAR} \cdot K_{TDS}, \quad (2)$$

де $K_{VPD} = \frac{1}{1 + \frac{|VPD - OPT_{VPD}|}{OPT_{VPD}}}$ коефіцієнт відхилення VPD від оптимального, при занадто низькому або занадто високому буде менше значення.

$$K_{TDS} = \frac{1}{1 + \frac{|TDS - OPT_{TDS}|}{OPT_{TDS}}}$$
 дає штраф за відхилення від оптимуму,

$$K_{CO_2} = \min(1, \frac{CO_2}{OPT_{CO_2}})$$
 вдень та $K_{CO_2} = 1$ вночі, тому немає штучного бонусу за надлишок CO_2 ,

оскільки вночі немає PAR і немає фотосинтезу,

$$K_{PAR} = 1 + \min(1, \frac{PAR}{OPT_{PAR}})$$
 вдень та $K_{PAR} = 1$ вночі.

Фактор PAR був навмисно масштабований, щоб посилити денну фізіологічну активацію та розділити денний та нічний режими роботи. PAR вдень дає бонус, вночі не штрафує, але і не створює хибного “світлового ефекту”. Дані показники більш фізіологічно коректні стосовно процесу фотосинтезу.

Критерій ВОСО може бути використаний у системах моніторингу та автоматизованого керування мікрокліматом у режимі реального часу як узагальнений індикатор стану середовища (рис. 1).

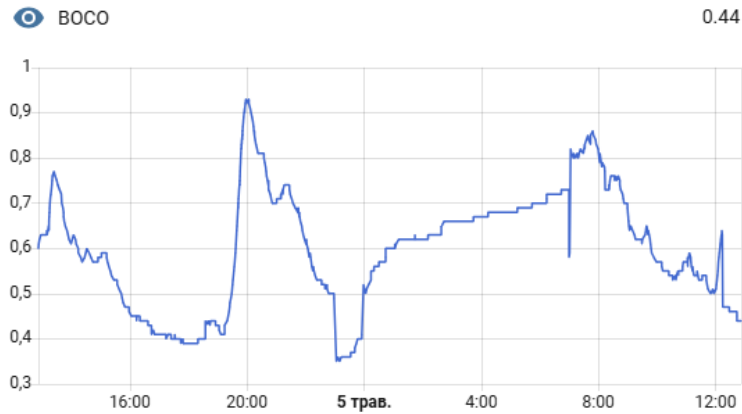


Рис. 1. Графік ВОСО в Home Assistant

Висновки

У роботі запропоновано вдосконалений інтегральний критерій ВОСО для оцінки якості мікроклімату в тепличних системах, який є розвитком попередніх версій моделі та враховує їх обмеження.

Розроблена математична модель забезпечує можливість оцінки стану мікроклімату в режимі реального часу та адаптується до добових режимів роботи теплиці (день/ніч), що забезпечує більш фізіологічно коректну оцінку процесів фотосинтезу.

Удосконалено структуру коефіцієнтів оптимальності, що дозволило підвищити чутливість моделі до відхилень параметрів від оптимальних значень, а також забезпечити більш стабільну поведінку індексу в умовах реальних експлуатаційних коливань даних.

Запропонований критерій ВОСО забезпечує більш адекватну інтегральну оцінку мікроклімату, поєднуючи простоту обчислення з урахуванням ключових фізіологічних процесів рослин, та може бути ефективно використаний у системах моніторингу і автоматизованого керування в режимі реального часу. Отримані результати свідчать про перспективність використання критерію ВОСО як узагальненого показника для задач моніторингу та автоматизованого керування мікрокліматом у теплицях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Application of eco-friendly practices alternative to soil chemical fumigation: preliminary results on strawberry / D. Giovannini et al. *Acta Horticulturae*. 2021. No. 1309. P. 463–470. URL: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2021.1309.66> (date of access: 05.05.2026).
2. Multi-State Modeling of Greenhouse Cucumber Yield Dynamics Under Microclimate Effects / E. Seri et al. URL: <https://arxiv.org/abs/2510.11485>.
3. Zhang Y., Mahrer Y., Margolin M. Predicting the microclimate inside a greenhouse: an application of a one-dimensional numerical model in an unheated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1997. Vol. 86, no. 3. P. 291–297. URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02422-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02422-7).
4. Суворін О., Кабачій В. Інтегральний критерій для оптимізації мікроклімату теплиць при вирощуванні полуниці. ВІТКП ВНТУ. Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, 2026. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2026/paper/view/28206>.

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