

БАРАНОВСЬКИЙ ВІКТОР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-7332-1783>e-mail: baranovskiyvm@ukr.net**БОРЕЦЬКА ТЕТЯНА**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>e-mail: ipserhiy@gmail.com**АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ У ГІДРОПОННИХ ФЕРМАХ**

У статті досліджено вплив автоматизованих систем освітлення на ріст і розвиток рослин у гідропонних умовах. Розглянуто сучасні технології керування світловими параметрами, що забезпечують оптимізацію фотосинтетичних процесів та підвищення врожайності.

Проаналізовано ключові характеристики освітлення, такі як інтенсивність світла, спектральний склад, фотоперіод і рівномірність розподілу світлової енергії. Особливу увагу приділено використанню світлодіодних (LED) джерел світла, які дозволяють точно налаштувати спектр для різних фаз росту рослин, зменшуючи енергоспоживання та підвищуючи ефективність світлового випромінювання.

Ключові слова: енергоефективність, маса рослин, площа листя, коренева система, гідропонний метод, овочеві культури, установка, субстрат, мінеральний розчин, гідропоніка, фотосинтез, сенсори, контролери.

BARANOVSKIY VIKTOR

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

BORETSKA TETYANA

Vinnytsia National Agrarian University

AUTOMATIC LIGHTING CONTROL IN HYDROPONIC FARMS

The article examines the impact of automated lighting systems on plant growth and development under hydroponic conditions. Modern technologies for controlling lighting parameters, which ensure the optimization of photosynthetic processes and increase crop yields, are considered.

Key lighting characteristics such as light intensity, spectral composition, photoperiod, and uniform distribution of light energy are analyzed. Special attention is given to the use of light-emitting diode (LED) sources, which allow precise spectrum adjustment for different plant growth phases, reducing energy consumption and enhancing the efficiency of light radiation.

The principles of operation of automated lighting systems are studied, including the use of light, humidity, and temperature sensors, microprocessor controllers, and programmable algorithms for dynamic regulation of the lighting environment. The role of artificial intelligence and Internet of Things (IoT) technologies in creating intelligent control systems that adapt lighting according to plant needs in real-time is described.

The article presents a comparative analysis of traditional and modern lighting systems, including incandescent lamps, fluorescent, and LED light sources. The advantages of integrating automated solutions into hydroponic farms are highlighted, such as reduced energy costs, increased crop yields, decreased need for manual control, and the creation of a stable microclimate for plant cultivation.

Special attention is given to the prospects for developing automated lighting control in hydroponic systems, particularly the implementation of machine learning technologies, predictive analytics, and adaptive LED systems that can adjust the spectrum and intensity of light depending on the plant's condition.

The research results demonstrate the significant potential of automated lighting systems in improving agricultural production efficiency, making them a promising direction for the development of modern agrotechnologies.

Keywords: energy efficiency, plant mass, leaf area, root system, hydroponic method, vegetable crops, installation, substrate, mineral solution, hydroponics, photosynthesis, sensors, controllers.

Постановка проблеми

Сучасне сільське господарство стикається з низкою викликів, серед яких обмеженість земельних ресурсів, зміни клімату, необхідність підвищення врожайності та ефективності використання енергоресурсів. Гідропонні системи, як альтернатива традиційному землеробству, дозволяють вирощувати рослини у контрольованих умовах без ґрунту, що забезпечує стабільні врожаї незалежно від зовнішніх факторів.

Одним із ключових аспектів успішного вирощування рослин у гідропонних системах є освітлення, оскільки воно безпосередньо впливає на процес фотосинтезу, ріст та розвиток культур [1]. Однак використання традиційних джерел світла, таких як лампи розжарювання та люмінесцентні лампи, призводить до значного енергоспоживання та низької ефективності світлового випромінювання.

Автоматизація освітлення у гідропонних фермах є перспективним рішенням для оптимізації росту рослин, підвищення врожайності та зниження витрат на електроенергію [2]. Впровадження інтелектуальних систем керування, що включають сенсори, контролери, алгоритми штучного інтелекту та технології Інтернету речей (IoT), дозволяє динамічно регулювати інтенсивність, спектральний склад та тривалість освітлення залежно від потреб рослин.

Незважаючи на наявність різних технологічних рішень, питання ефективного автоматичного керування освітленням у гідропоніці залишається актуальним [3]. Необхідно дослідити, які системи освітлення є найбільш ефективними, як їх оптимально налаштувати для різних видів культур та які

технології можуть забезпечити максимальну енергоефективність при мінімальних експлуатаційних витратах.

Таким чином, проблема автоматизованого освітлення у гідропонних фермах потребує детального аналізу, розробки ефективних методів керування та впровадження сучасних технологічних рішень для підвищення продуктивності та сталого розвитку агротехнологій.

Аналіз останніх джерел

В останні роки автоматизація освітлення в гідропонних системах стала предметом активних наукових досліджень, оскільки правильне світлове середовище є ключовим фактором у забезпеченні високої врожайності та ефективного використання ресурсів. Учені та інженери вивчають різні аспекти освітлення, зокрема спектральний склад, інтенсивність, тривалість фотоперіоду та їхній вплив на ріст і розвиток рослин.

Дослідження, проведені у сфері світлодіодного освітлення, підтверджують, що LED-технології є найбільш ефективними для застосування в гідропонних фермах. Згідно з результатами експериментів, оптимальне співвідношення синього (450–470 нм) та червоного (620–660 нм) спектру світла стимулює ріст рослин, збільшує швидкість фотосинтезу та сприяє накопиченню біомаси [4]. Деякі наукові роботи також вказують на позитивний вплив додавання інфрачервоного та зеленого спектру для покращення продуктивності певних культур.

Окрему увагу дослідники приділяють впливу фотоперіоду на ріст рослин. Встановлено, що оптимальна тривалість освітлення залежить від виду культури: наприклад, листові зелені культури краще реагують на 16–18 годин освітлення на добу, тоді як плодоносячі рослини потребують чергування світлових та темнових фаз. Використання автоматизованих систем контролю дозволяє забезпечити точне налаштування цього параметра для максимального врожаю.

Дослідження в галузі автоматизації керування освітленням демонструють, що застосування сенсорних систем для вимірювання рівня освітленості, температури та вологості дозволяє динамічно регулювати інтенсивність світла відповідно до потреб рослин у режимі реального часу. Сучасні IoT-рішення забезпечують можливість дистанційного моніторингу та керування гідропонними системами, що значно зменшує необхідність ручного втручання та підвищує енергоефективність [5].

Останнім часом дослідники активно працюють над інтеграцією штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу великого масиву даних про освітлення, стан рослин та мікроклімат. Такі системи можуть прогнозувати оптимальні умови для вирощування та автоматично коригувати параметри освітлення залежно від фаз росту культури.

Крім того, порівняльний аналіз традиційних та сучасних методів освітлення показує, що перехід на світлодіодні лампи та розумні системи управління дозволяє знизити витрати електроенергії до 40–60% у порівнянні з традиційними лампами розжарювання та люмінесцентними лампами, що робить такі рішення економічно вигідними.

Попри значний прогрес у цій сфері, деякі питання залишаються відкритими. Необхідні подальші дослідження щодо оптимального спектрального складу світла для різних типів рослин, довготривалого впливу LED-освітлення на якість продукції, а також можливостей інтеграції новітніх технологій у великомасштабне сільськогосподарське виробництво.

Таким чином, аналіз останніх досліджень демонструє, що автоматизація освітлення у гідропоніці має великий потенціал для підвищення продуктивності, зменшення енергоспоживання та покращення якості вирощених рослин. Однак подальші розробки в цій сфері мають бути спрямовані на створення більш адаптивних, економічно вигідних та екологічно безпечних систем керування світлом.

Метою роботи є: аналіз та оцінка ефективності автоматизованих систем керування освітленням у гідропонних фермах для оптимізації росту та розвитку рослин. Дослідження спрямоване на вивчення впливу різних параметрів освітлення (інтенсивності, спектрального складу, фотоперіоду) на продуктивність культур, а також на визначення переваг інтеграції сучасних технологій, таких як сенсори, Інтернет речей (IoT) та штучний інтелект, у процес управління світловим середовищем.

Виклад основного матеріалу

Освітлення відіграє ключову роль у гідропонних системах, оскільки забезпечує необхідну енергію для фотосинтезу. Основними параметрами, що впливають на ріст рослин, є:

1. Інтенсивність світла – визначає швидкість фотосинтетичних процесів. Недостатня освітленість уповільнює ріст рослин, тоді як надмірна може призвести до стресу.
2. Спектральний склад – червоне світло (620–660 нм) стимулює ріст та цвітіння, синє (450–470 нм) сприяє розвитку листя та кореневої системи. Додавання інфрачервоного та зеленого спектру може покращити загальний стан рослин.
3. Фотоперіод – оптимальний баланс між світловими та темновими періодами є важливим для нормального розвитку культур. Наприклад, салати та зелень потребують 16–18 годин світла, тоді як томати та перець краще ростуть за 12–14 годин освітлення.

Сучасні технології дозволяють автоматично контролювати параметри освітлення відповідно до потреб рослин у реальному часі. Світлодіодні (LED) лампи є одним із найефективніших рішень для освітлення в гідропонних системах завдяки їх високій енергоефективності та можливості регулювання спектра світла. На відміну від традиційних джерел освітлення, таких як лампи розжарювання або

люмінесцентні лампи, LED-лампи споживають значно менше електроенергії, що дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати при вирощуванні рослин.

Однією з ключових переваг світлодіодного освітлення є можливість точного налаштування спектра світла відповідно до потреб рослин на різних стадіях розвитку. Наприклад, синій спектр (450–470 нм) стимулює ріст листя та кореневої системи, тоді як червоний спектр (620–660 нм) сприяє цвітінню та плодоношенню. Деякі сучасні LED-системи також включають інфрачервоне та зелене світло, що допомагає покращити продуктивність певних культур.



Рис. 1. Фіто-світильник біколов спектру LS40-Bicolor для вирощування рослин

Таблиця 1

Вплив різних спектрів світла на ріст рослин у гідропонних системах

Спектр світла (довжина хвилі, нм)	Вплив на ріст рослин	Основні переваги	Застосування
Ультрафіолетовий (100–400 нм)	Стимулює вироблення захисних речовин у рослинах, покращує стійкість до хвороб	Підвищує стійкість до стресу, посилює антиоксидантні властивості	Обмежене застосування, використовується в малих дозах
Фіолетовий (400–450 нм)	Стимулює проростання насіння, зміцнює кореневу систему	Покращує синтез білків, сприяє активному розвитку рослин	Початкові стадії росту
Синій (450–500 нм)	Впливає на ріст листя, стимулює фотосинтез	Підвищує щільність листового покриву, покращує розвиток хлорофілу	Використовується на ранніх стадіях росту
Зелений (500–570 нм)	Проникає глибоко в листя, впливає на внутрішні процеси росту	Покращує рівномірність росту рослин	Додається до основного спектра для збалансованого освітлення
Жовтий (570–590 нм)	Має незначний вплив на фотосинтез, впливає на морфологію рослин	Може покращувати розвиток деяких культур	Рідко використовується окремо
Червоний (620–660 нм)	Стимулює ріст, цвітіння та плодоношення	Покращує процеси цвітіння, сприяє формуванню плодів	Використовується на стадіях розквіту та плодоношення
Далекий червоний (700–750 нм)	Впливає на подовження стебел, стимулює проростання	Допомагає контролювати морфологію рослин, впливає на перехід у фазу цвітіння	Використовується в поєднанні з червоним світлом для стимуляції росту

Для оцінки ефективності світлового спектра та його впливу на фотосинтез у гідропонних системах можна використовувати формулу ФАР (фотосинтетично активної радіації, PAR – Photosynthetically Active Radiation), яка визначає кількість світлової енергії, доступної для фотосинтезу [6]:

$$PAR = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

де:

$E(\lambda)$ – спектральна енергія випромінювання (Вт/м²/нм) для певної довжини хвилі λ ,

$R(\lambda)$ – спектральна відповідь рослини (квантова ефективність фотосинтезу) для даної довжини хвилі,

λ_1 і λ_2 – межі фотосинтетично активного спектра (зазвичай 400–700 нм).

Таблиця 2

Розрахункові значеннями ФАР (PAR) для різних гідропонних культур

Культура	Освітленість (PPFD), мкмоль/м ² /с	Час освітлення, год/добу	ФАР (PAR), ммоль/м ² /доба
Салат	200	16	11 520
Базилік	250	16	14 400
Томати	400	14	20 160
Огірки	350	14	17 640
Перець	300	14	15 120
Полуниця	500	12	21 600

Результати демонструють, що культури з високою потребою у світлі, як полуниця (500 мкмоль/м²/с) мають найвищі значення ФАР — 21 600 ммоль/м²/доба, тоді як культури з меншою освітленістю, як салат (200 мкмоль/м²/с), мають найнижчі значення — 11 520 ммоль/м²/доба.

Загальний тренд показує, що більш інтенсивне освітлення (PPFD) і довший час освітлення (год/добу) приводять до вищих значень ФАР для культур, що потребують більше світла для оптимального росту.

Висновки

Автоматичне керування освітленням у гідропонних фермах є важливим інструментом для забезпечення оптимальних умов для росту рослин. Використання автоматизованих систем дозволяє точно регулювати освітленість і час освітлення, що забезпечує максимальний фотосинтетичний ефект при мінімальних енергетичних витратах. Це дозволяє підвищити врожайність культур, зменшити витрати на енергію та забезпечити стабільність виробництва протягом року, незалежно від зовнішніх погодних умов. Автоматизація процесу також сприяє точному моніторингу та коригуванню параметрів освітлення для кожної конкретної культури, що дозволяє досягти кращих результатів у гідропонному вирощуванні.

Література

1. Sevostianov, I., & Melnyk, O. (2022). Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Vibrations in Engineering and Technology*, (1)104, 57–62.
2. Kovaliov, M. M., & Vasylykovska, K. V. (2020, November 20). The impact of the salt composition of the nutrient solution on the cultivation of different varieties of romaine lettuce in hydroponic columns. *Modern State of Science in Agriculture and Nature Management: Theory and Practice*, Kropyvnytskyi: CNTU, 83–86.
3. Sevostianov, I. V., & Melnyk, O. S. (2021). Improvement of hydroponic installations. *Engineering, Energy, Transport of the Agro-Industrial Complex*, (4)115, 119–127.
4. Savchenko, V. M., Minenko, S. V., & Makhov, O. A. (2013, March 16). Formal models for greenhouse microclimate regulation. *Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference*, Ternopil: Krok, 87–89.
5. Hil, L. S., Pashkovskiy, A. I., & Sulima, L. T. (2008). *Modern technologies of vegetable growing in open and closed ground* (Textbook). Vinnytsia: Nova Knyha.
6. Kovaliov, M. M., & Zvezdun, O. M. (2021). Cultivation of the most common varieties of romaine lettuce on different types of substrates in NTF systems. *Aquatic Bioresources and Aquaculture*, (1), 27–36.

References

1. Sevostianov, I., & Melnyk, O. (2022). Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Vibrations in Engineering and Technology*, (1)104, 57–62.
2. Kovaliov, M. M., & Vasylykovska, K. V. (2020, November 20). The impact of the salt composition of the nutrient solution on the cultivation of different varieties of romaine lettuce in hydroponic columns. *Modern State of Science in Agriculture and Nature Management: Theory and Practice*, Kropyvnytskyi: CNTU, 83–86.
3. Sevostianov, I. V., & Melnyk, O. S. (2021). Improvement of hydroponic installations. *Engineering, Energy, Transport of the Agro-Industrial Complex*, (4)115, 119–127.
4. Savchenko, V. M., Minenko, S. V., & Makhov, O. A. (2013, March 16). Formal models for greenhouse microclimate regulation. *Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference*, Ternopil: Krok, 87–89.
5. Hil, L. S., Pashkovskiy, A. I., & Sulima, L. T. (2008). *Modern technologies of vegetable growing in open and closed ground* (Textbook). Vinnytsia: Nova Knyha.
6. Kovaliov, M. M., & Zvezdun, O. M. (2021). Cultivation of the most common varieties of romaine lettuce on different types of substrates in NTF systems. *Aquatic Bioresources and Aquaculture*, (1), 27–36.