



## ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ РОСЛИН ТА МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

Мазур О.В.<sup>1</sup>, Рогачук О.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Одеська національна академія харчових технологій, Одеса

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



DOI: [10.15673/2312-3125. 21/](https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/)

### Анотація

Даний матеріал буде корисний при розробці та експлуатації систем світлодіодного освітлення рослин. Виділяються і описуються характерні особливості впливу інтенсивності та спектрального складу опромінювання на процес вирощування рослин та особливості вимірювання реальної фотосинтетичної ефективності світлодіодних випромінювачів. Розглянута методика оцінки рівня фотосинтетичної активної радіації (ФАР) світлодіодних джерел випромінювання на базі трьохколірного фотоприймача.

### Annotation

This paper will be helpful in development and application of LED lighting systems for plants. The paper emphasizes and describes key aspects of radiation intensity and spectral distribution's impact on plant growth and key aspects of measuring real photosynthetic efficiency of a LED lamp. In this paper we discuss a method for measuring the level of photosynthetic active radiation (FAR) of LED radiation sources based on tricolour light detector.

### Ключові слова

Фотосинтез, спектр випромінювання, додаткове опромінення рослин, ФАР (фотосинтетична активна радіація), світлодіодний фітопрожектор, адаптивні випромінювальні установки.

Рівень освітлення та його спектральний склад є одним з найважливіших чинників, що впливає на рівень врожаю та якість сільськогосподарської продукції. Для повноцінного розвитку і зростання кожної сільськогосподарської культури існує притаманний їй оптимальний рівень та спектральний склад освітлення, який може змінюватися в залежності від фази її розвитку, часу доби та ін. При недостатньому рівні інсоляції (освітлення) різко знижується приріст, врожайність та якість сільськогосподарської продукції. Перевищення ж рівня освітлення не приводить до збільшення врожаю та якості продукції, а тягне за собою лише збільшення енерговитрат. При надмірному рівні освітлення воно, навпаки, пригнічує рослину і зменшує врожайність сільськогосподарських культур.

Сонце - головний постачальник теплової енергії та енергії для здійснення процесів фотосинтезу є ідеальним джерелом випромінювання для освітлення рослин. Головна особливість природного освітлення - значна мінливість інтенсивності та спектрального складу його випромінювання. Інтенсивність та спектральний склад сонячного випромінювання піддається впливу закономірних і випадкових факторів. Закономірні фактори, що впливають на мінливість природного освітлення - пора року, час доби і географічна широта. Випадкові чинники визначаються в основному станом атмосфери - ясно, хмарно, туман і т.п. Цілорічне вирощування сільськогосподарських культур в більшості регіонів можливо лише в умовах захищеного ґрунту при додатковому штучному опроміненні та опаленні тепличних комплексів.



## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Виходячи з цього, для ефективного вирощування рослин в умовах захищеного ґрунту при додатковому штучному опроміненні необхідно застосовувати адаптивні випромінювальні установки, які можуть змінювати не тільки інтенсивність, але й спектральний склад випромінювання, підтримуючи при цьому заданий рівень сумарного опромінювання в залежності від типу рослин, фази їх розвитку та часу доби.

Ще академіком К.А. Тімірязевим доведено, що головним процесом життєдіяльності рослин, відповідальним за їх розвиток є фотосинтез. Понад 95% сухої речовини рослин створюється в результаті цього процесу. Фотосинтез - фотохімічний процес, при якому світлова енергія, що падає на лист, поглинається хлорофілами і каротиноїдами. Одержана таким чином світлова енергія використовується фотосинтетичною системою для утворення органічних сполук з вуглекислого газу ( $CO_2$ ), що поглинається листям під час денного дихання та води, яка всмоктується корінням. Цей процес перетворення світлової енергії в енергію хімічних сполук має досить низьку ефективність (3-5%), яка в свою чергу досить значно залежить від довжини хвилі опромінювання.

Інтенсивність фотосинтезу має два максимуми відповідно двом максимумам поглинання хлорофілу, як показано на рис. 1[3].

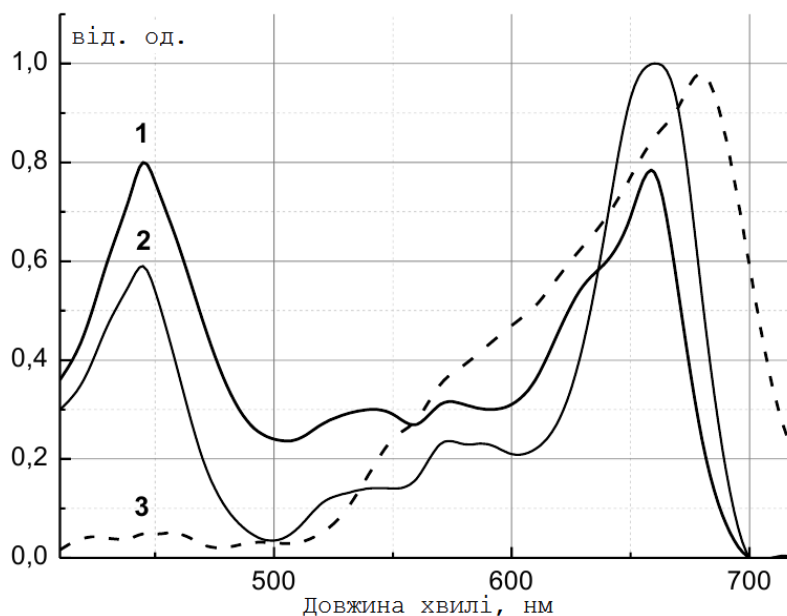


Рис. 1 – Активність процесів: 1 – синтез хлорофілу; 2 – фотосинтез; 3 – фотоморфогенез

Максимум поглинання на довжині хвилі 680 нм пов'язаний з використанням фотосинтетичною системою випромінювання, енергія квантів якого більша за енергію кванта з довжиною хвилі 720 нм. Ця фотосинтетична система зазвичай використовується рослинами для синтезу основної маси хімічних сполук при формуванні плодів. Цією системою фотосинтезу синтезується від 60 до 80% органічних сполук рослини. Максимум поглинання на довжині хвилі 435 нм пов'язаний з другою фотосинтетичною системою, яка відповідає за синтез білків та інших сполук завдяки якій формуються сама рослина. Цією системою фотосинтезу синтезується від 10 до 30% органічних сполук рослини. Електромагнітне випромінювання зеленої частини спектру від 500 до 600 нм специфічно регулює морфогенез рослин. Фітохром, криптохром та інші регуляторні пігменти, поглинаючи світло з довжинами хвиль 515, 524,5, 532, 543 та 553 нм, входять до системи фоторегуляції і морфогенеза рослин, відповідальну за синтез фітогормонів[1]. Для сталого функціонування цієї системи доля електромагнітного випромінювання від 500 до 600 нм повинна складати не менше 5 - 10% від загальної потужності. Саме тому електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль 380—710 нм відомо як "фотосинтетична активна радіація" - ФАР (PAR).

Рівень енергетичного опромінення в діапазоні ФАР зазвичай вимірюється недорогими неселективними приладами. Одиницями вимірювання таких приладів можуть бути  $Вт/м^2$ ,  $мВт/см^2$  або  $мВт/м^2$ . Такі прилади дають непогані результати при вимірюванні ФАР таких джерел опромінення як сонце, або лампи і мало придатні для вимірювання параметрів світлодіодних випромінювачів. Для більш детального оцінювання спектру випромінювання використовують спектрорадіометри, які на кожній довжині хвилі вимірюють енергетичний потік випромінювання, але їх використання обмежено в основному рамками наукових досліджень через дуже високу



## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

вартість. Крім того, результат вимірювання такими приладами потребує досить складних розрахунків. Спектральну потужність енергетичного потоку визначають як:

$$F_p = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} F_p(\lambda) d\lambda,$$

де  $F_p(\lambda)$  - спектральна щільність енергетичного світлового потоку (Вт),  $\lambda_{\min}$  і  $\lambda_{\max}$  - граничні довжини хвиль діапазону вимірювання.

Фотосинтетичний фотонний потік (Photosynthetic Photon Flux – PPF) в різних діапазонах ФАР, вимірюється в кількості мікромоль фотонів в секунду (мкмоль/с) і розраховується наступним чином [3]:

$$N = \frac{t}{hc} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda F_p(\lambda) d\lambda,$$

де  $N$  - кількість фотонів променевого потоку за секунду в діапазоні ФАР;  $t$  – час (с),  $h$  - постійна Планка ( $h=6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж\*с),  $c$  – швидкість світла у вакуумі ( $c=2,998 \cdot 10^8$  м/с).

Саме тому число фотонів в секунду в діапазоні від 400 до 700 нм падаюче на поверхню використовується для оцінки кількості світла, необхідного для процесу фотосинтезу, та має назву «щільність фотосинтетичного фотонного потоку» (Photosynthetic Photon Flux Density – PPFD). Щільність фотосинтетичного фотонного потоку може порівнюватися з поняттям освітленості. Її вимірюють за допомогою квантового датчика і виражають в кількості мікромоль фотонів на одиницю площі в секунду (мкмоль/м<sup>2</sup>/с) [5].

Щільність фотосинтетичного потоку фотонів, що падає на поверхню від джерела випромінювання, можна розрахувати за формулою [3]:

$$PPFD = \frac{N}{A_{\text{опр}} \cdot N_A \cdot t}$$

де  $N_A$  – число Авогадро ( $N_A=6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>);  $A_{\text{опр}}$  - площа опромінюваної поверхні (м<sup>2</sup>).

Процес фотосинтезу має дискретний характер, пов'язаний з поглинанням окремих квантів електромагнітної енергії, і кількість синтезованих органічних сполук залежить не від загальної енергії потоку випромінювання, а від кількості квантів, використаних фотосинтетичною системою. На рис. 2 відображені можливі шляхи використання фотосинтетичною системою з максимумом поглинання на довжині хвилі 660 нм енергії електронного збудження та енергетичні стани молекули хлорофілу в процесі синтезу органічних сполук[2].

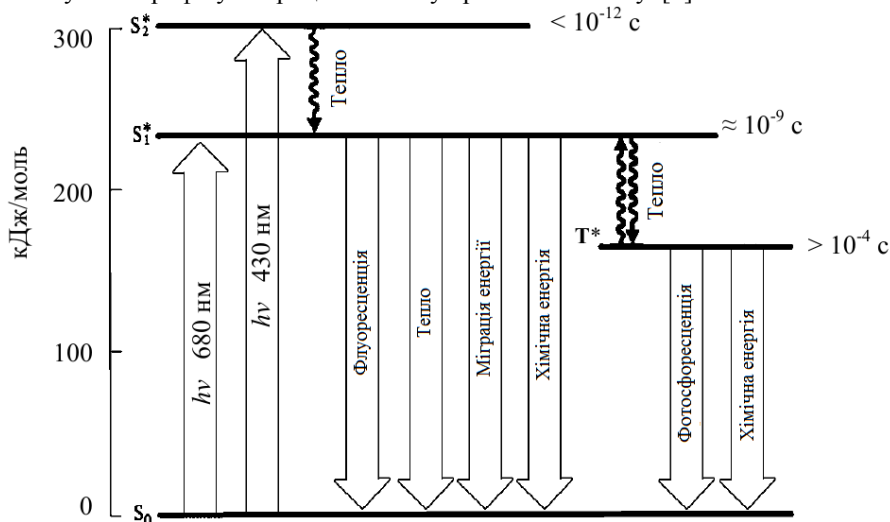


Рис. 2 – Енергетичні стани молекули хлорофілу і різні шляхи використання енергії електронного збудження

Зрозуміло, що використання цієї системою квантів електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі більше 680 нм буде менш ефективним внаслідок перетворення частини енергії квантів на тепло. Таким чином, при формуванні необхідної інтенсивності та спектрального складу додаткового опромінювання необхідно враховувати те, що енергія кванта зростає зі зменшенням довжини хвилі випромінювання (рис. 3а), а кількість квантів



## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

електромагнітної енергії при рівній потужності джерела випромінювання буде зростати при збільшенні довжини хвилі (рис. 3б).

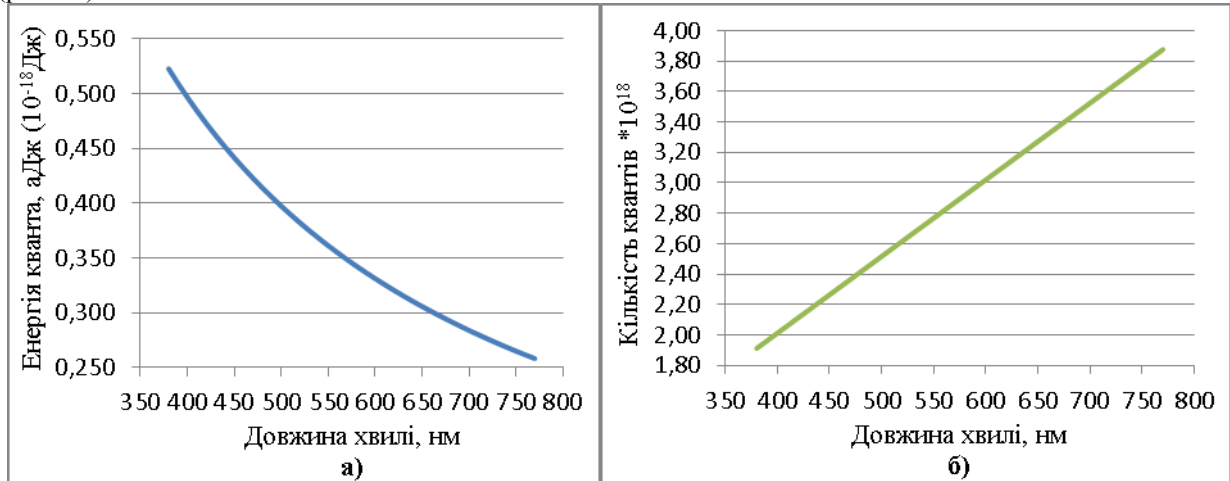


Рис. 3 – а) Залежність енергії кванта від довжини хвилі електромагнітного випромінювання; б) Залежність кількості квантів за секунду від довжини хвилі у випромінюванні потужністю 1 Вт

Тому, при формуванні спектру додаткового опромінювання, скоріш за все, потрібно, виконавши мінімальні потреби рослини в освітленні в діапазонах 430 - 470 нм та 500 - 600 нм, основну енергію освітлення сформувати в діапазоні 660 - 680 нм.

Для додаткового освітлення рослин, в якості джерел випромінювання до останнього часу використовувались спочатку лампи розжарювання, потім газорозрядні ртутні або натрієві лампи, спектр яких приведений на рис. 4 та 5.

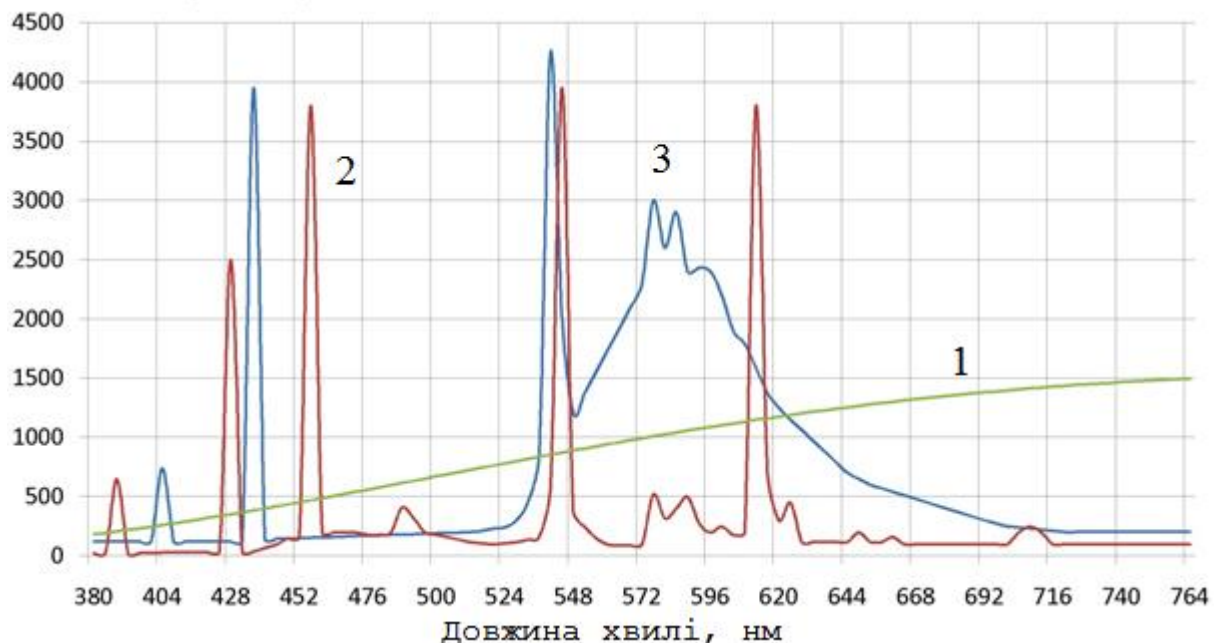


Рис. 4 – Спектр випромінювання: 1 - лампи розжарювання; 2 - енергозберігаючої лампи «теплого білого» світла; 3 - енергозберігаючої лампи «холодного білого» світла

Найбільш ефективними з цих джерел випромінювання є газорозрядні натрієві лампи, але через низький рівень «синього» і «червоного» діапазону в спектрі випромінювання цих ламп, їх фотосинтетична ефективність відносно невелика.



## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

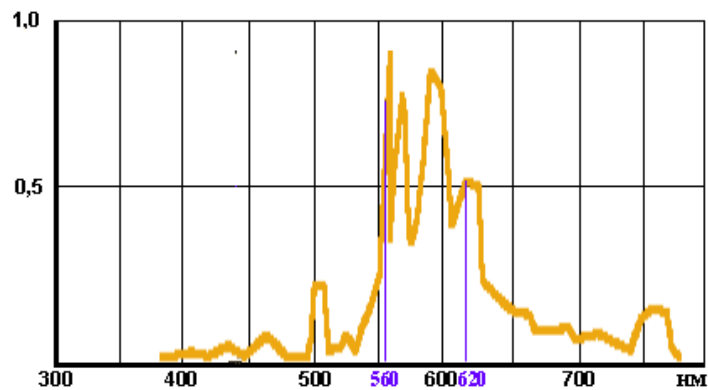


Рис. 5 – Спектр випромінювання натрієвої лампи

На сьогоднішній час доступних по ціні спектрорадіометрів масового використання промисловість не випускає, тому для оцінки потужності джерел зазвичай користуються недорогими неселективними приладами і формулами «переведення люксів» в радіометричні величини (таблиця 1) [4].

Таблиця 1 - Конвертування фотометричних в фотосинтетичні величини для різних джерел світла

Джерело випромінювання	з PPFD (мкмоль/м <sup>2</sup> /с) в PAR(Вт/м <sup>2</sup> )	з Люксів в PPFD (мкмоль/м <sup>2</sup> /с)	з Люксів в PAR(Вт/м <sup>2</sup> ).
Сонце	0,219	0,019	$4,02 \cdot 10^{-3}$
Холодна біла флуоресцентна	0,218	0,014	$2,93 \cdot 10^{-3}$
ДНаТ	0,201	0,012	$2,45 \cdot 10^{-3}$
Натрієва низького тиску	0,203	0,009	$1,92 \cdot 10^{-3}$

Останнім часом у зв'язку з поширенням та удосконаленням напівпровідникових джерел випромінювання для досвічування рослин застосовують світлодіодні випромінювачі. Вони мають вузькосмуговий спектр випромінювання, який характеризується піковою довжиною хвилі та шириною смуги половинної інтенсивності і має характер нормального розподілення. Ширина цієї смуги для різних типів світлодіодів може коливатися від 20 до 30 нм. Промисловість випускає різні типи світлодіодів з піковими довжинами хвилі в усьому діапазоні ФАР. На рис. 6 приведенні типові спектри випромінювання синього, зеленого і червоного світлодіодів.

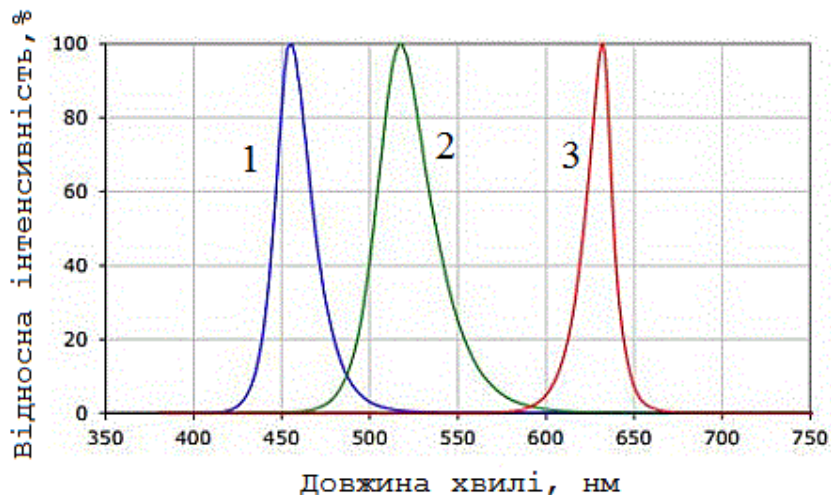


Рис. 6 - Спектр випромінювання світлодіодів: 1 - синього; 2 – зеленого; 3 – червоного



## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Випускаються також білі світлодіоди з максимумом випромінювання на довжині хвилі 420 - 460 нм, покриті шаром люмінофору, який поглинає електромагнітну енергію на довжині випромінювання світлодіода та генерує електромагнітне випромінювання з більшими довжинами хвиль. Спектр вторинного випромінювання такого світлодіода та інтенсивність досить нестабільні в часі і залежить від складу люмінофору та конструкції його оптичної системи. На рис. 7 приведені типові спектри випромінювання білих світлодіодів з різним спектральним складом в залежності від складу люмінофору.

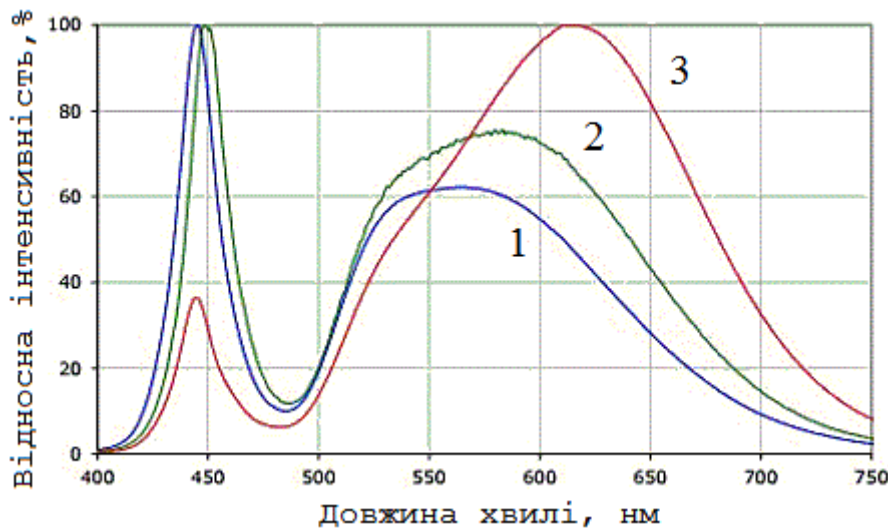


Рис. 7 – Спектр випромінювання білого світлодіода: 1 – холодний білий; 2 – нейтральний білий; 3 – теплий білий

Основними перевагами світлодіодних випромінювачів є:

- високий енергетичний к.к.д. (досягає 50% для окремих довжин хвиль);
- можливість зміни потужності випромінювання в широкому діапазоні без втрати к.к.д. та без зміни спектру випромінювання;
- тривалий термін експлуатації (до 100 тис. годин).

Основними недоліками світлодіодних випромінювачів є:

- залежність к.к.д. від температури світлодіода (до 25%);
- поступове зниження к.к.д. під час експлуатації (до 30%);
- скорочення терміну експлуатації при підвищених температурах випромінювачів;

Наявність у складі світлодіодних ламп різних типів випромінювачів, дозволяє змінювати спектральний склад і інтенсивність випромінювання, що дає можливість створювати енергоефективні керовані випромінювальні установки.

Застосування неселективних методів вимірювання рівня енергетичного опромінювання для світлодіодних джерел випромінювання некоректне, тому що результат такого вимірювання в значній мірі буде залежати від пікової довжини хвилі спектру їх випромінювання для монохроматичних світлодіодів, а для білих вона буде залежати ще й від складу та стану люмінофору. Через недоступність для масового використання дорогих спектрорадіометрів для оцінювання фотосинтетичного фотонного потоку в різних діапазонах ФАР, сформованого світлодіодним фітопрожектором, розглянемо можливість використання дешевого, але сучасного оптичного датчика кольоровості до складу якого входять три фотодіода зі смугопр пропускаючими фільтрами в діапазонах синього (400 – 500 нм), зеленого (500 – 600 нм) та червоного (600 – 700 нм) кольору (рис. 8).

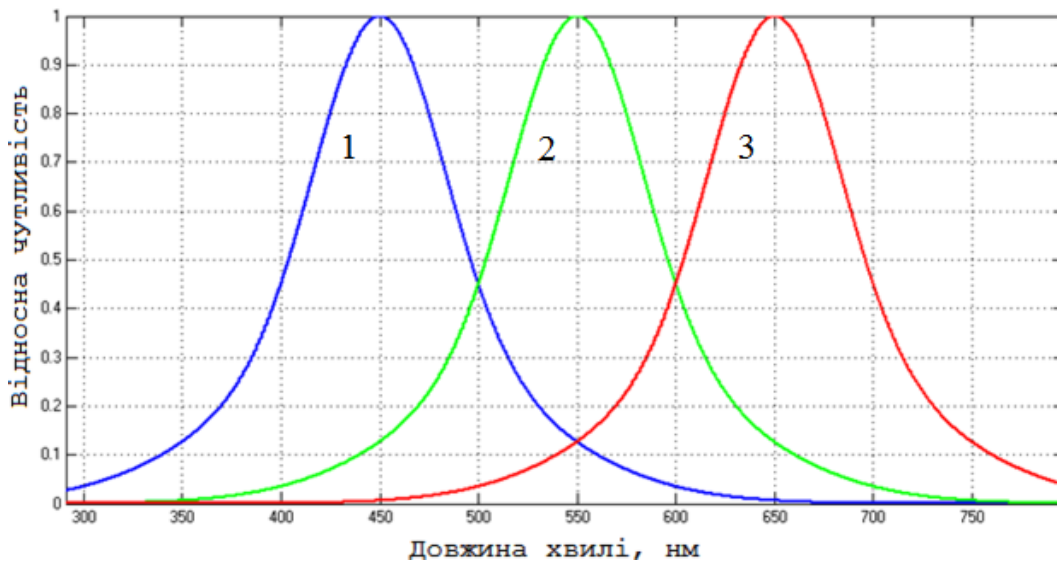
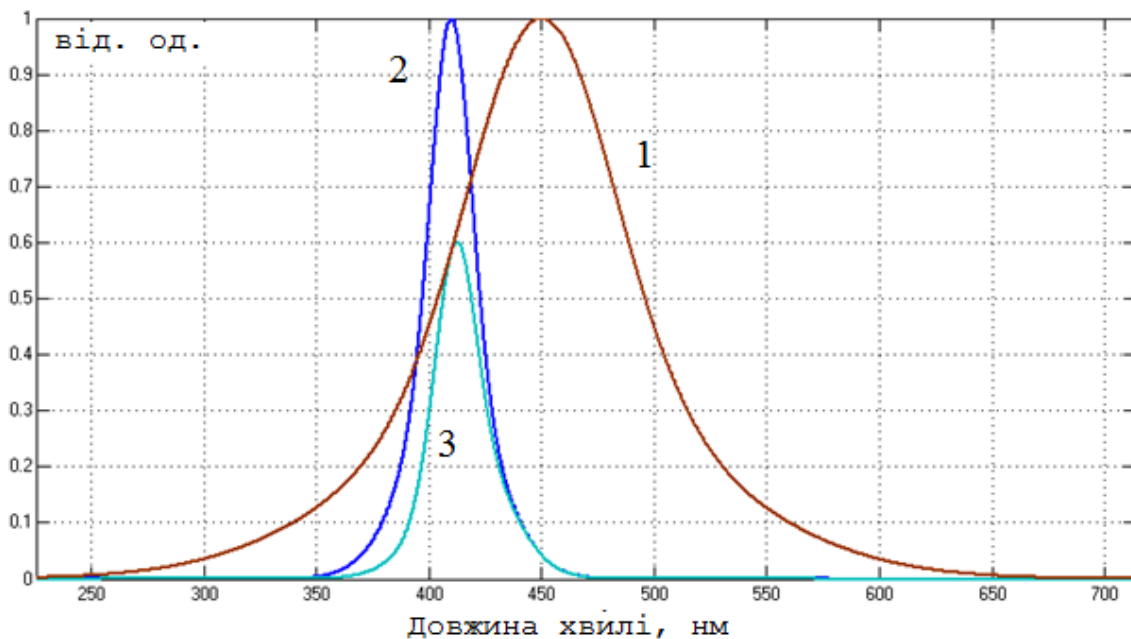
**2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Рис. 8 – Спектральна чутливість оптичного датчика кольоровості: 1 – синього; 2 – зеленого; 3 – червоного

Роздивимось детальніше процес формування сигналу одним з фотодіодів, наприклад з «синім» фільтром (400 – 500 нм). Відносне розподілення інтенсивності оптичної потужності випромінювання світлодіода описується кривою 2 ( $F_e(\lambda)$ ) (рис. 9). Вона називається енергетичним (оптичним) спектром випромінювання світлодіода. Відносна спектральна чутливість фотодіода з «синім» фільтром (400 – 500 нм) до електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль - описується кривою 1 ( $V(\lambda)$ ). Перемноживши значення відносних амплітуд спектра випромінювання світлодіода на відносну спектральну чутливість «синього» фотодіода для всіх довжин хвиль спектр випромінювання світлодіода, отримаємо криву 3 ( $F_v(\lambda)$ ), яка описує відносний рівень складових сигналів фотодіода, що викликані випромінюванням світлодіода на різних довжинах хвиль.

Рис. 9 – Визначення рівня сигналу з фотодіода: 1 – Відносна спектральна чутливість фотодіода з «синім» фільтром (400 – 500 нм) ( $V(\lambda)$ ); 2 - відносне розподілення інтенсивності оптичної потужності випромінювання світлодіода ( $F_e(\lambda)$ ); 3 – відносний рівень складових сигналів фотодіода ( $F_v(\lambda)$ )



## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Проінтегрувавши отриману криву в діапазоні довжин хвиль спектру випромінювання світлодіода, одержимо значення миттєвого відклику фотодіоду під впливом опромінення його спектром випромінювання цього світлодіода.

Тоді відносна енергетична чутливість «синього» фотодіоду до випромінювання світлодіода з даною піковою довжиною хвилі визначається як:

$$E_v = \frac{F_v}{F_e},$$

де  $F_e$ ,  $F_v$  - інтеграли функцій  $F_e(\lambda)$ ,  $F_v(\lambda)$ .

Рівень миттєвого відклику фотодіода буде залежати від взаємного розташування та форми спектра випромінювання світлодіода та відносної спектральної чутливості фотодіода. Прорахувавши рівень відносної енергетичної чутливості кожного з фотодіодів трьохколірного датчика до світлодіодів з різними піковими довжинами хвиль побудуємо залежність відносних коефіцієнтів чутливості фотодіодів трьохколірного датчика від пікових довжин хвиль світлодіодів (рис. 10).

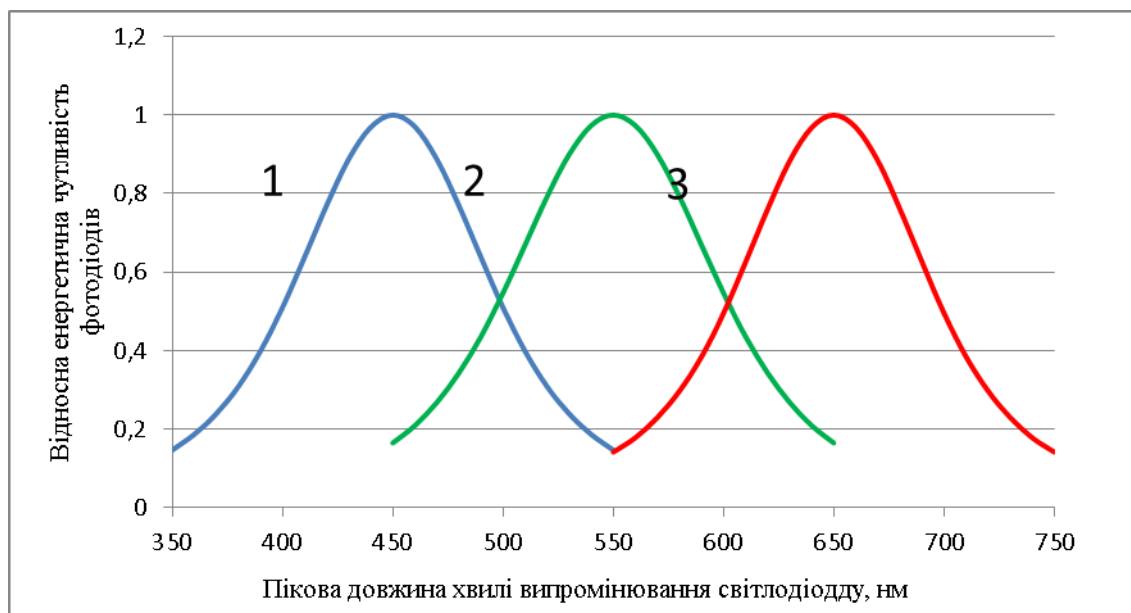


Рис. 10 – Залежності відносної енергетичної чутливості фотодіодів трьохколірного сенсора від пікової довжини хвилі випромінювання світлодіодів: 1 – «синього» фотодіоду (400 – 500 нм); 2 – «зеленого» фотодіоду (500 – 600 нм); 3 – «червоного» фотодіоду (600 – 700 нм)

Зрозуміло, що при підвищенні інтенсивності випромінювання світлодіодом пропорційно підвищиться її рівень миттєвого відклику фотодіода. Враховуючи те, що світлодіод має лінійну залежність потужності випромінювання від струму через нього, вимірявши рівень відклику фотодіода для двох відомих значень струму через світлодіод, маємо можливість одержати реальну відносну енергетичну чутливість фотодіоду до випромінювання досліджуваного світлодіода і, порівнявши її з визначеною раніше, вирахувати реальну пікову довжину хвилі випромінювання досліджуваного світлодіода. Знаючи енергетичну чутливість фотодіода на центральній довжині хвилі фотодіоду, залежність чутливості фотодіоду від пікової довжини хвилі світлодіода та пікову довжину хвилі світлодіода, маємо можливість визначити енергетичну освітленість поверхні фотодіода, а також вирахувати щільність фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD). Рівень реального PPFD, вирахований за даною методикою для трьох діапазонів спектру випромінювання 400 – 500 нм, 500 - 600 нм, 600 - 700 нм, може стати базою для створення системи автоматичного управління світлодіодним фітопржектором для додаткового освітлення рослин.

### Висновки

На сьогоднішній день для зменшення споживання електроенергії при досвічуванні рослин необхідно замінити ртутні та натрієві лампи на світлодіодні фітопржектори, які б змогли при недостатньому освітленні сонячним світлом компенсувати недоліки природної інсоляції. Для цього запропонована методика визначення





## 2 АВТОМАТИЧНІ ТА АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

енергетичної освітленості поверхні та щільності фотосинтетичного фотонного потоку (PPFD) з використанням звичайного напівпровідникового оптичного датчика кольоровості. Рівень реального PPFD, вирахований за даною методикою в реальному часі для трьох діапазонів спектру випромінювання 400 – 500 нм, 500 - 600 нм, 600 - 700 нм, може стати базою для створення систем автоматичного управління освітленням рослин. Макет адаптивного світлодіодного фітопрожектора, створений в лабораторії електроніки та мікропроцесорної техніки кафедри автоматизації виробничих процесів ОНАХТ, проходить випробування та доопрацювання програмного забезпечення. Юридичні та фізичні особи зацікавлені в розробці та використанні адаптивних систем освітлення рослин можуть звертатися за адресою [mazur@onaft.edu.ua](mailto:mazur@onaft.edu.ua).

### Література

1. Головацкая Ирина Феоктистовна. Регуляторная роль зеленого света в морфогенезе и гормональном статусе растений : диссертация ... доктора биологических наук : 03.00.12 / Головацкая Ирина Феоктистовна; [Место защиты: Сиб. федер. ун-т].- Томск, 2009.- 345 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-3/168;
2. Маракаев, О.А. Экологическая физиология растений : фотосинтез и свет : Текст лекций / О.А. Маракаев ;Яросл. гос. ун-т. – Ярославль: ЯрГУ, 2005. – 95 с. ISBN 5-8397-0373-7;
3. Козырева И.Н. «Формирование фитопотоков светодиодных облучательных установок для выращивания сельскохозяйственных культур в условиях защищенного грунта» Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук;
4. <https://olkpeace.org/cannapedia/Osveshhenie/FotometrijaRadiometrijaFormulyPerevoda/show.html> - Фотометрия и Радиометрия. Формулы перевода;
5. <http://www.venlo.ru/index.php?page=316> - Статьи VENLO свет и растения.

### References

1. Golovackaya irina feoktistovna. regulatorynaya rol zelenogo sveta v morfogeneze i gormonalnom statuse rastenij : dissertaciya ... doktora biologicheskix nauk : 03.00.12 / golovackaya irina feoktistovna; [mesto zashhity: sib. feder. un-t].- tomsk, 2009.- 345 s.: il. rgb od, 71 09-3/168;
2. Marakaev, o.a. ekologicheskaya fiziologiya rastenij : fotosintez i svet : tekst lekcij / o.a. marakaev ;yarosl. gos. un-t. – yaroslavl: yargu, 2005. – 95 s. isbn 5-8397-0373-7;
3. Kozyreva i.n. «formirovanie fitopotokov svetodiodnyx obluchatelnyx ustanovok dlya vyrashhivaniya selskoxozyajstvennyx kultur v usloviyax zashhishhennogo grunta» dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk;
4. <https://olkpeace.org/cannapedia/osveshhenie/fotometrijairadiometrijaformulyperevoda/show.html> - fotometriya i radiometriya. formuly perevoda;
5. <http://www.venlo.ru/index.php?page=316> - stati venlo svet i rasteniya.