

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка світлодіодного опромінювального приладу для міні
теплиць**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-41
спеціальнос
ті 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Данцев О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Філюк Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач
кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Микулик П.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 23 » січня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Данцеву Олексію Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка світлодіодного опромінювального приладу для міні теплиць

Керівник роботи ... Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 22 » Січня 2024 року № 4/7-50

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати літературні дані щодо методів дослідження впливу спектрального складу. Розглянуто існуючі опромінювальні установки. На основі отриманої інформації розробити експериментальну методика

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 23 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	30.01.2024	
2	Аналітичний розділ	26.02.2024	
3	Проектно-конструкторський розділ	29.03.2024	
4	Розрахунковий розділ	22.04.2024	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	13.05.2024	
6	Висновки	31.05.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	07.06.2024	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2024	

Студент

(підпис)

Данцев О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2024.

Стор.55; рис.28 ; табл.11 ; джерел 12; додатків –.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка світлодіодного опромінювального приладу для міні теплиць».

Мета кваліфікаційної роботи є розробка ефективного світлодіодного освітлювального приладу для підсвічування рослин.

Було проведено дослідження, що дають змогу розробити опромінювальний прилад. Було виявлено, що зсув у червону область у спектрі ФАР сприяє збільшенню площі листя і довжини пагона рослини. За результатами проведеного дослідження, було підібрано світлодіоди різних корпусів і від різних виробників

Було проведено фотометричні дослідження випромінювальної частини приладу, для визначення максимально ефективної конфігурації. Також було проведено дослідження про вплив короткохвильової і довгохвильової області ФАР на величину потоку ФАР.

Було обрано оптимальну конфігурацію випромінювача. Вона мала максимальний потік ФАР при цьому маючи високу ефективність. У розробленому випромінювачі дотримано баланс між величиною потоку випромінювання та ефективністю.

Ключові слова: спектральний склад, світлодіод, фотосинтез, комп'ютерне моделювання.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Фізіологічна роль різних ділянок спектра світла	7
1.2 Висновки до розділу	18
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Методи дослідження та проектування дослідницької гідропонної установки	19
2.2 Дослідження впливу короткохвильової та довгохвильової складової спектра ФАР, а також рівня опроміненості на морфометричні показники рослин	21
2.3 Розробка світлодіодного світильника для рослинництва	27
2.3.1 Розрахунок необхідного потоку випромінювання	27
2.3.2 Вибір світлодіодів	29
2.5 Висновки до розділу	34
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	35
3.1 Фотометричні вимірювання випромінювача	35
3.2 Світлодіодний випромінювальний прилад для рослинництва	42
3.3 Висновки до розділу	45
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	47
4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок	47
4.2 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54

ВСТУП

Актуальність роботи. На даний момент дуже активно розвивається тепличні комплекси, а також системи опромінення, якими оснащені сучасні теплиці. Одним з найбільш актуальних завдань сучасної світлотехніки є оптимізація існуючих і розробка нових опромінювальних установок і режимів опромінення. З кожним роком все більше уваги приділяється питанням цілорічного забезпечення населення свіжими овочами і фруктами. Створення ефективних режимів опромінення і впровадження систем вирощування рослин в закритому ґрунті і в безпосередній близькості від споживача дозволить значно скоротити витрати на логістику і транспортування продукції, тим самим сприяючи забезпеченню населення свіжими овочами і зеленню.

У наш час існує велика кількість різних систем. Особливо перспективними є системи зі світлодіодним освітленням. Світлодіоди дуже зручні у використанні, завдяки простій настройці і регулюванню енергетичного потоку випромінювання, а також світлодіоди дозволяють підібрати для рослин буквально будь-який спектральний склад випромінювання. Цей факт надає великі можливості при проектуванні даних систем. Але метод освітлення світлодіодним випромінюванням ще мало вивчений, через що існуючі опромінювальні установки не настільки ефективні, як могли б бути, і в порівнянні з традиційними джерелами програють в економічному плані.

Найбільший внесок у розвиток рослинного організму вносить світло. Ефективність фотосинтезу тісно пов'язана з інтенсивністю світла і його спектральним складом. І від того, наскільки ефективна реакція фотосинтезу, залежить врожайність рослини.

Зелений, ультрафіолетовий та інфрачервоний складові також впливають на фотосинтез і виконують регулюючі функції, але при проектуванні світлодіодних освітлювальних приладів теплиці ними нехтують і вважають за краще використовувати червоні і сині світлодіоди в співвідношенні 7:1, 5:1 і т.д., що не дозволяє в повній мірі розкрити потенціал світлодіодного освітлення. Але незважаючи на всі переваги світлодіодних систем освітлення для тепличних комплексів, вони не можуть бути набагато ефективніше люмінесцентних або

газорозрядних аналогів. Це пов'язано з тим, що більшість світлодіодних опромінювальних установок не мають повноцінних спектральних складів. Необхідно розробити світлодіодний випромінювач повного спектру з високою квантовою ефективністю. Використання випромінювачів повного спектру дозволить створити світлове середовище, наближене до природного. Також, щоб підвищити ефективність використання світлодіодних випромінювачів і розкрити весь їх потенціал, необхідно розробляти проекти освітлення тепличних комплексів спеціально для використання випромінювачів на основі світлодіодів. Таким чином, можна значно підвищити ефективність використання світлодіодних систем освітлення рослин, що дозволить підвищити ефективність тепличних комплексів і їх похідних для вирощування рослин в штучних умовах.

Мета роботи є розробка ефективного світлодіодного освітлювального приладу для підсвічування рослин

Для досягнення поставленої мети в даній роботі необхідно було:

1. Проаналізувати літературу з вивчення впливу світлодіодного випромінювання на стан рослин.
2. Розробити дослідну установку і провести ряд експериментів. На основі отриманих результатів виявити закономірність впливу параметрів опромінення на морфометричні параметри рослин.
3. Розрахувати необхідні значення параметрів оптичного випромінювання (спектральний склад, радіаційний потік, КСС), які повинен мати освітлювальний прилад для ефективного вирощування рослин.
4. Дослідити вплив довгохвильової та короткохвильової складових спектра на квантову ефективність світлового пристрою.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Фізіологічна роль різних ділянок спектра світла

Випромінювання, що бере участь у процесах фотосинтезу рослини, називають фотосинтетично активною радіацією (ФАР) або ж актинічним світлом. Область ФАР лежить у межах довжин хвиль від 350 нм до 800 нм. У процесі життєдіяльності рослина отримує світлову енергію і перетворює її на хімічну, яка перерозподіляється і витрачається рослиною.

Крім енергетичного забезпечення світло виконує ще й регуляторну функцію. Можна припустити, що рослина використовує кожен ділянку спектра актинічного світла по-різному. Тобто кожна ділянка спектра виконує свою функцію в процесі вегетації рослини.

У творі світлокультура рослин історія виникнення і становлення [1-6] показано вплив спектрального складу на фотосинтез і продуктивність рослин. Як піддослідні рослини було обрано перець сорту *Віні-пук* 80-ти денного віку. У досліді використовували люмінесцентні лампи, що мають максимуми інтенсивності випромінювання в червоній, зеленій і синій областях ФАР. Потік випромінювання всіх ламп був вирівняний за числом квантів, що падають, і дорівнював $19,7 \cdot 10^{15}$ квант \cdot см⁻² \cdot с⁻¹ [2-3]. У результаті експерименту було виявлено, що у рослин на синьому світлі спостерігався загальмований ріст листя і осьових органів. Під зеленим випромінюванням рослини виростили з низьким вмістом хлорофілу, витягнутими і з маленькою площею листя, також урожайність була низькою. Під час опромінення червоним світлом спостерігався сильний ріст осьових органів і площі листя, маса рослини була більшою, ніж під час опромінення зеленим і синім світлом. На червоному світлі спостерігався найсильніший ростовий ефект, на шкоду зростанню репродуктивних органів.

Також у цьому дослідженні показується, що взяті окремо області ФАР малоприсадибні для вирощування повноцінних рослин. Так, за різних пропорцій основних областей ФАР було досягнуто максимальних показників щодо продуктивності рослин та ефективності фотосинтезу. При використанні червоного

світла і додаванні до нього 25% синього, що залишає, була досягнута максимальна маса плодів [6].

Проводилися дослідження впливу спектрів світлодіодного випромінювання і порівнювалося кілька джерел світлодіодного випромінювання з натрієвою лампою високого тиску. У цій роботі було використано п'ять видів джерел випромінювання з таким спектральним складом рисунок 1.1:

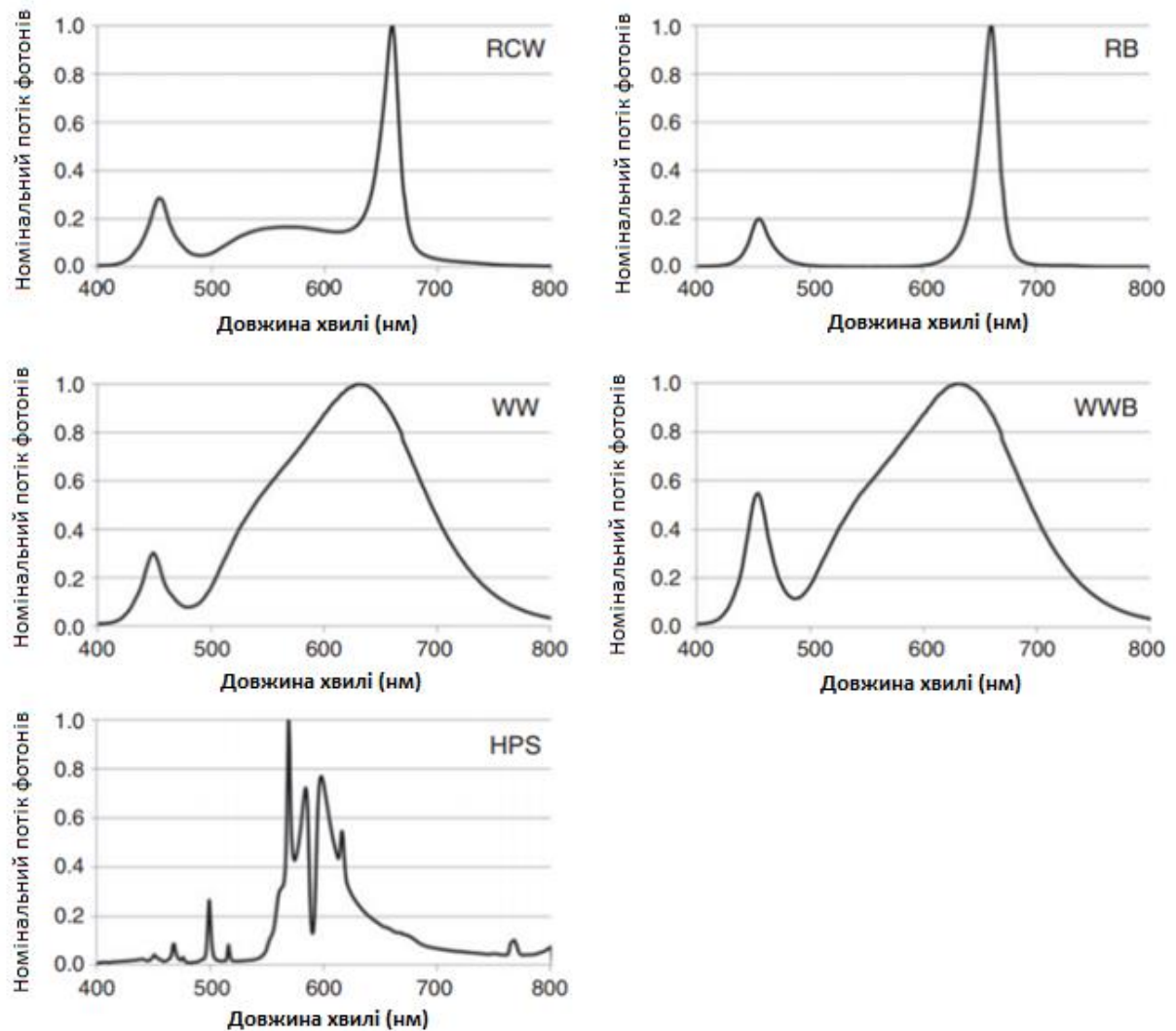


Рисунок 1.1 - Спектри джерел випромінювання. RCW - червоний + холодний білий; RB червоний + холодний білий; RB –червоний + синій; WW - теплий білий; WWB - теплий білий + синій; HPS - HPS - HPS - HPS. натрієва лампа високого тиску [7].

Як модельну рослину використовували салат. Салат був висаджений у лотки по 20 штук і розділений між собою непрозорою відбивною плівкою.

Оцінювання врожаю рослин проводилося за кількома параметрами, а саме суха маса рослин, вітамінний склад, площа листя, кількість листя, маса рослини.

У результаті досліджень було встановлено, що повнота спектра значною мірою впливає на параметри рослин рисунок 1.2. Так, рослини вирощені під червоним і синім світлом, а також під червоним і холодним білим були на 40% меншими за масою і габаритами, ніж рослини, вирощені під теплим білим і синім, теплим білим, а також натрієвою лампою. При цьому рівень опроміненості у всіх комірках мав значення 200 мкмоль/с-м^2 [7].

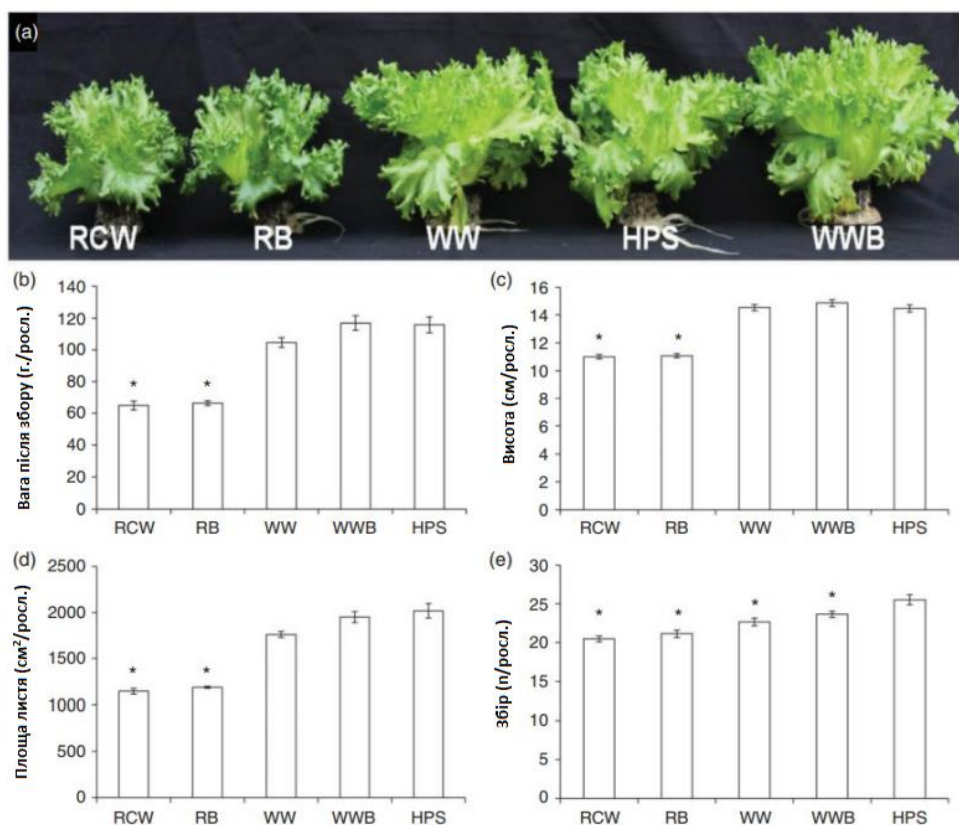


Рисунок 1.2 - Результат дії світлодіодного випромінювання з різним спектральним складом [7].

Таким чином згідно з даним дослідженням за інших рівних умов рослина буде краще розвиватися, якщо спектральний склад буде повним по всій області ФАР.

Також у хлорофілу ще є так званий відгук на ту чи іншу область спектра. Так, наприклад, існує графік, що показує відгук хлорофілу на області ФАР і для наочності порівнюється з кривою видимості людського ока рисунок 1.3.

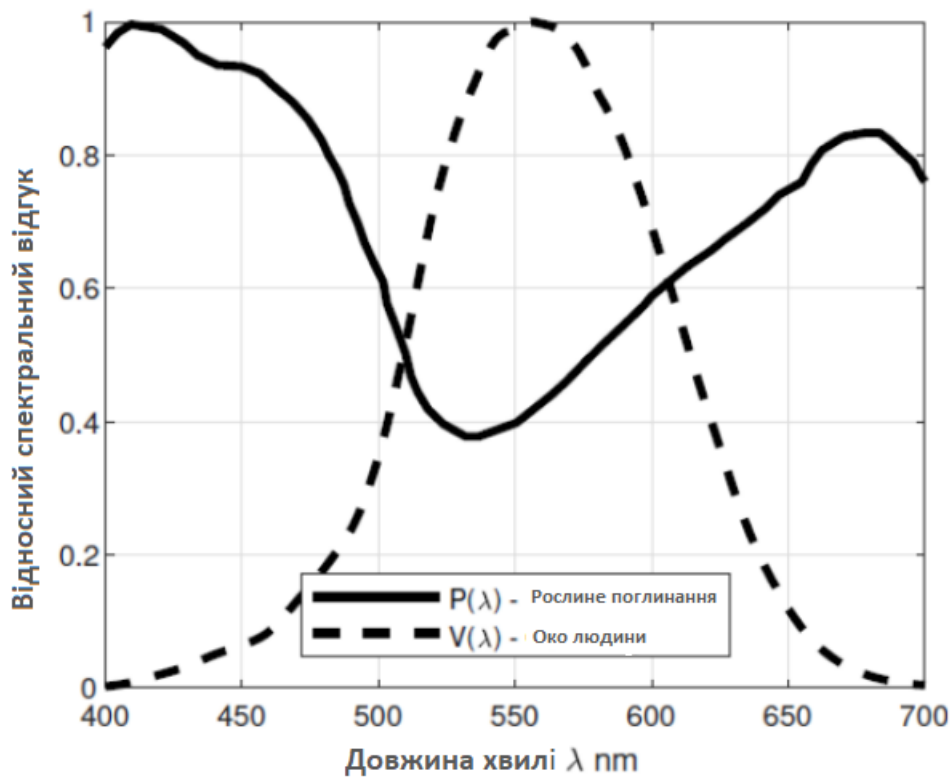


Рисунок 1.3 - Відносний спектральний відгук рослин $P(\lambda)$ порівняно з людським $V(\lambda)$ [8].

Цей відгук рослини пов'язаний зі спектром поглинання хлорофілу побічно може характеризувати вплив на ефективність фотосинтезу від спектрального складу випромінювання.

Є параметр, що характеризує вплив, який чиниться на ефективність фотосинтезу квантів світла з тією чи іншою довжиною хвилі. Цей показник має назву "PAF - photosynthesis action factor" [8]. Іншими словами, це крива, яка показує, як сильно впливає та чи інша довжина хвилі опромінювача на ефективність фотосинтезу з урахуванням його загального енергетичного потоку. Графіки наочно показують закономірності тих чи інших параметрів рисунок 1.4-1.6.

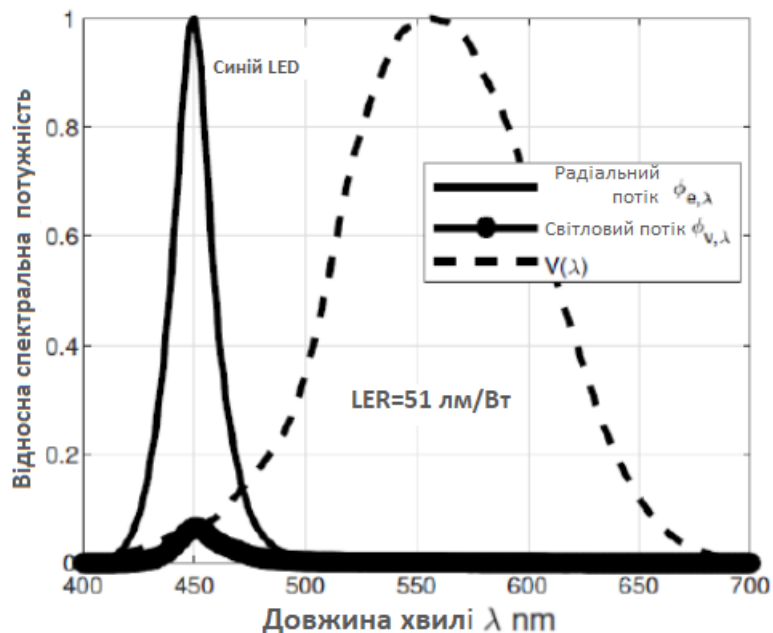


Рисунок 1.4 - "LER – Світлова ефективність випромінювання" Відносний спектральний розподіл потужності синього світлодіода і його зважена за довжиною хвилі еквівалентна сила світла [8].

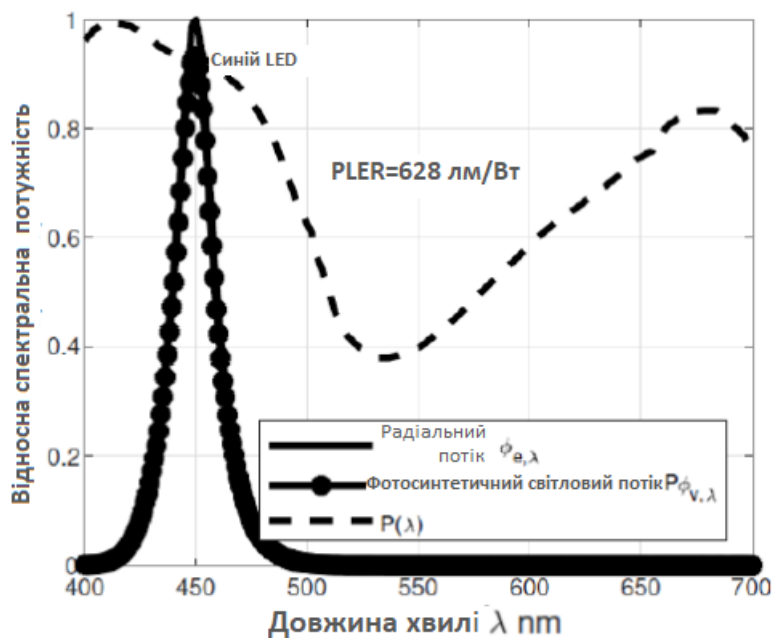


Рисунок 1.5 - "PLER – Фотосинтетичний світловий потік"

Відносний спектральний розподіл потужності фотосинтетичної потужності фотосинтетично активного випромінювання і його зважена за довжиною хвилі еквівалентна сила світла [8].

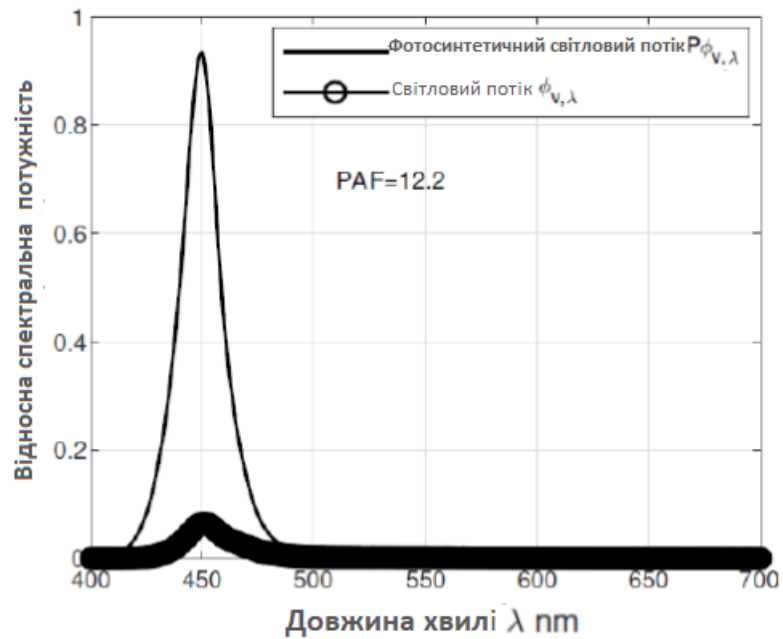


Рисунок 1.6 - "PAF – Фактор дії фотосинтезу" світловий потік з області ФАР і його фотосинтетичний еквівалент [8].

Приміром, візьмемо довжину хвилі 450 нм, яка відповідає випромінюванню синього кольору. Кванти світла з такою довжиною хвилі роблять малий внесок у світловий потік випромінювача, але мають високу ефективність в утворенні фотосинтезу. Параметр PAF [8] визначається як відношення світлового потоку до фотосинтетичного. За допомогою цього параметра можна оцінювати ефективність фіто випромінювачів.

Для наочності розглянемо, як змінюється цей параметр за різного спектрального складу рисунок 1.7-1.9.

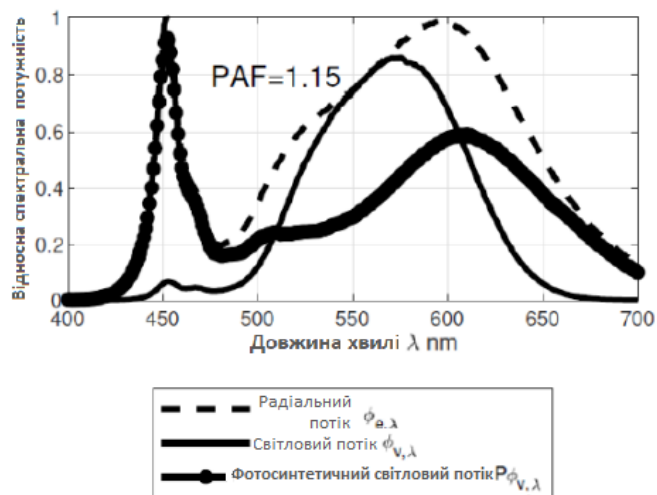


Рисунок 1.7 - Білий світлодіод [8].

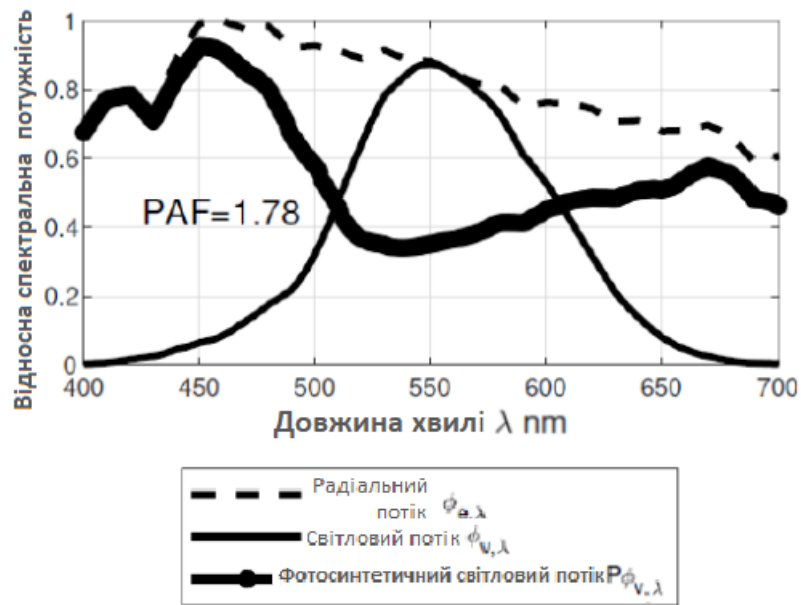


Рисунок 1.8 - Денне світло [8].

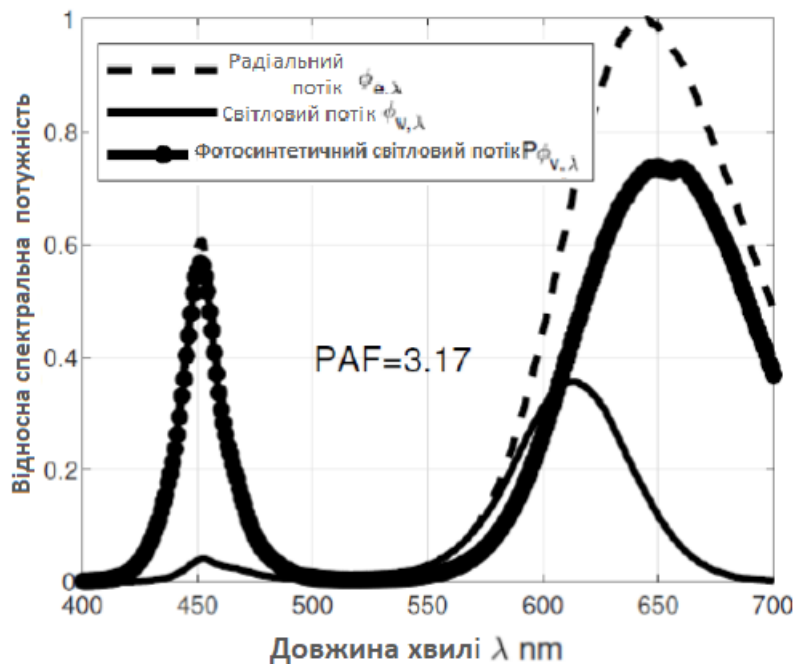


Рисунок 1.9 - Квазімонохроматичний спектр (пурпурний) червоного і синього світлодіодів [8].

Видно, що квазімонохроматичний спектр має більшу фотосинтетичну ефективність порівняно з білим світлом, у якому присутні зелена і помаранчеві області, які не беруть участі у збудженні молекул хлорофілу. При цьому синя і червона складові спектра ФАР відрізняються за ступенем внеску в ефективність фотосинтетичної реакції рисунок 1.10.

У цьому дослідженні також було проведено вимірювання фотосинтетичного відгуку на різні спектри випромінювання.

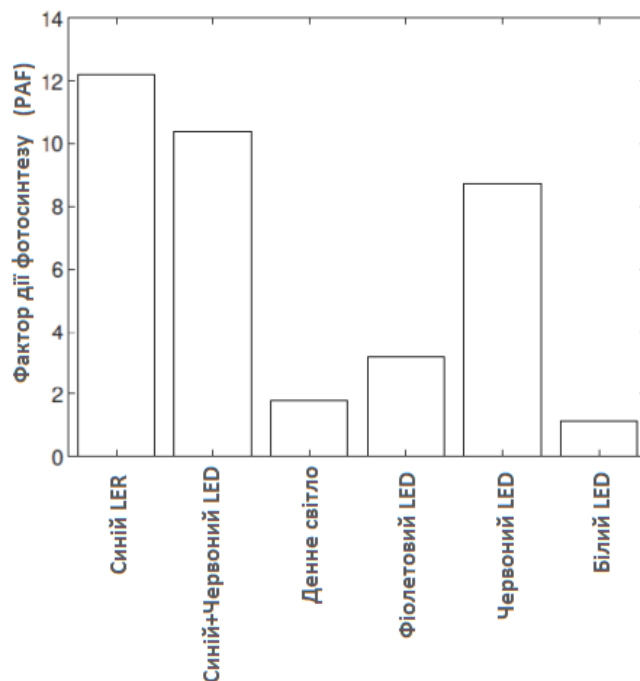


Рисунок 1.10 - внесок різних джерел випромінювання в ефективність фотосинтетичної реакції [8].

Видно, що синє випромінювання має найбільший внесок у фотосинтетичну реакцію рослини. Це дослідження дає змогу оцінювати фотосинтетичний внесок того чи іншого спектра випромінювання з перерахунком енергоспоживання випромінювача. Інакше кажучи, під час проектування опромінювальних установок видно, яку ділянку ФАР необхідно збільшити або зменшити в спектральному складі випромінювача для підвищення фотосинтетичного ефекту або ж для підвищення енергоефективності. Таким чином можна оцінювати енергоефективність тих чи інших випромінювачів і створювати максимально енергоефективні системи опромінювання. Важливо зазначити, що наведені в дослідженні параметри не можуть бути застосовані для розрахунку оптимальних спектральних характеристик випромінювачів, а лише показують, який внесок в ефективність фотосинтезу дає та чи інша довжина хвилі з області ФАР за мінімальних енергетичних витрат. Це дослідження допоможе проектувати випромінювачі з мінімальним енергоспоживанням.

Однак незважаючи на те, що синя і червона області мають максимальний фотосинтетичний ефект, зелена, далека червона і ультрафіолетова також необхідні для розвитку та ефективного росту рослин.

Таким чином, незважаючи на те, що зелене випромінювання має низьку фотосинтетичну активність, воно може задіяти більшу кількість світлосбірних комплексів рослини і тим самим підвищити ефективність фотосинтезу. При цьому зелене випромінювання підвищує вміст вітамінів та антиоксидантів у рослинних організмах.

Так само в дослідженні, проведеному науковою командою [10], демонструється позитивний вплив повноспектрального випромінювання на морфогенез базилика і салату. Так в експерименті використовували чотири види випромінювання, три з яких були повноспектральними з різним співвідношенням червоної, зеленої та синьої ділянок спектра ФАР, і квазімонохроматичне випромінювання. Рівень опроміненості становив 160 мкмоль/с-м^2 [10]. Співвідношення складових спектра ФАР представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - відносне співвідношення червоної, зеленої та синьої областей ФАР у результируючих спектральних складах [10].

Спектральний склад	Співвідношення щільності потоку фотонів із різних областей ФАР		
	Синя область	Зелена область	Червона область
Повний спектр №1	1	4	4
Повний спектр №2	1	2	2
Повний спектр №3	1	2	12
Квазімонохроматичний спектр	1	0	4

У результаті дослідження було встановлено, що зразки салату та базилику, вирощені під дією повноспектрального випромінювання, мали більшу загальну масу. Результати представлені у вигляді діаграми на рисунку 1.11.

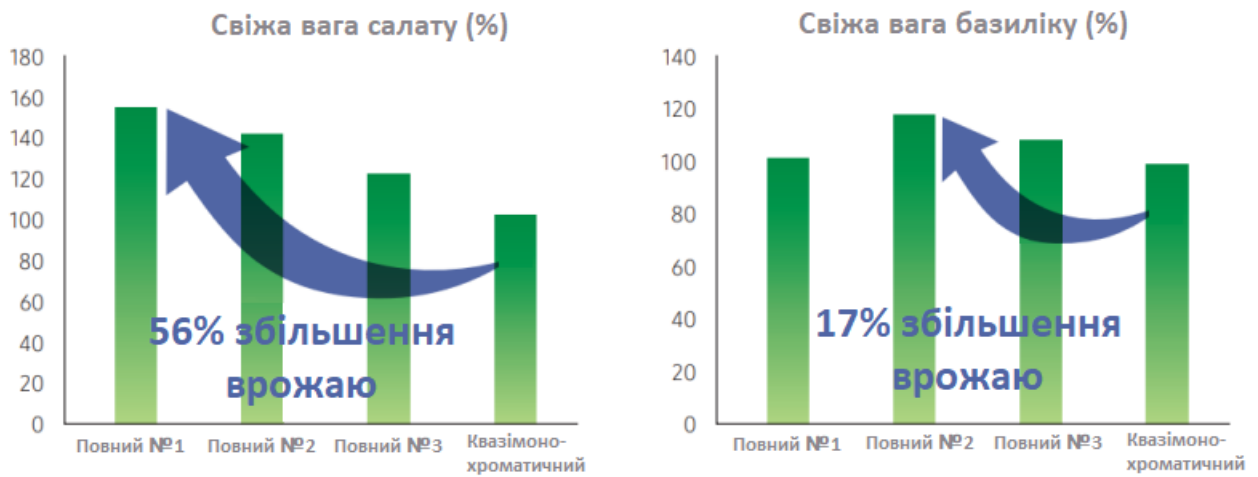


Рисунок 1.11 - загальна маса зразків, вирощених під випромінюванням різного спектрального складу [10].

Салат, вирощений під повноспектральним випромінюванням, мав масу врожаю на 54% більшу ніж під квазімонохроматичним випромінюванням. Базилік при цьому мав на 17% більшу масу врожаю під повноспектральним випромінюванням ніж під квазімонохроматичним випромінюванням [10]. При цьому приріст урожаю салату більший, ніж приріст базилика, це пов'язано з різним пігментним складом. Можна зробити висновок, що базилику потрібен спектральний склад, що містить більшу кількість синього випромінювання, це ще раз підтверджує, що різним видам рослин потрібен різний спектральний склад випромінювання.

Таким чином, незважаючи на те, що синє і червоне випромінювання чинить більший фотосинтетичний ефект, за відсутності зеленої і помаранчевої області ФАР розвиток рослини протікає менш ефективно. Зелена і помаранчева області ФАР необхідні для ефективного фотосинтезу рослин. Однак за того самого споживання електроенергії квазімонохроматичні джерела червоного випромінювання є енергоефективнішими, бо згідно із законом Планка червоне випромінювання має вищу квантову ефективність завдяки більшій кількості квантів, які випускає випромінювач [12]. Співвідношення між світлом і енергією, яку воно може нести, описано в Законі Планка [13]. Цей закон пояснює нам, чому за однакової кількості енергії фотони в червоному спектрі мають сильніший вплив на фотосинтез рослин, ніж, наприклад, синій фотон. Це викликано тим, що за того самого енергетичного потоку випромінювання, квантів червоного

випромінювання потрібно більше, ніж квантів синього випромінювання. Кількість квантів і кількість енергії, що переноситься цими квантами, обернено пропорційна довжині хвилі. А, згідно з різними дослідженнями, інтенсивність фотосинтезу зумовлена не енергією квантів, а їхньою кількістю [14].

Було проведено кілька досліджень щодо впливу червоного та дальнього червоного випромінювання на ріст рослин. Дальнє червоне випромінювання сприяє посиленому росту рослин у висоту та збільшенню площі листя. Так у дослідженні [11] показало, що випромінювання з дальнього червоного діапазону (700 - 750 нм) має фотосинтетичний ефект. Так у дослідженні основними джерелами випромінювання слугували натрієві лампи високого тиску. До основного випромінювання додавалося кілька видів випромінювання в кількості від 10% до 35% від основного, при цьому рівень опроміненості завжди становив 400 мкмоль/с-м² [14]. Так додавання дальнього червоного випромінювання (700-750 нм) до основного рівня опроміненості призвело до збільшення маси врожаю на 6%-21% відповідно [11]. При цьому додавання більш короткохвильового випромінювання (400 - 700 нм) також призводило до збільшення маси врожаю на 6% - 21% відповідно [14]. Однак кількість поглинутих короткохвильових фотонів становила в середньому 95,9%, а поглинання довгохвильових фотонів становило лише 34,2% [11]. Це говорить про більшу ефективність квантів червоного випромінювання при активації фотосинтезу. При цьому цей приріст відбувався тільки за наявності короткохвильових квантів і білого світла.

Для розроблення ефективного випромінювача необхідно враховувати перелічені вище фактори. Так, короткохвильова складова спектра ФАР необхідна для підтримання високого рівня фотосинтезу і для утворення речовин, що відповідають за смакові якості. Зелена частина спектра необхідна для накопичення вітамінів і антиоксидантів рослини, а також підвищує ефективність фотосинтезу завдяки високій проникаючій здатності випромінювання. Довгохвильова область ФАР є основним джерелом енергії, а також сприяє прискоренню росту рослини і дозріванню плодів. Для створення енергоефективного випромінювача необхідно дотримуватися балансу тих чи інших складових випромінювання ФАР. Так необхідно забезпечити такий спектральний склад, у якому буде високе значення параметра PAF [8] -

фотосинтетичного відгуку, при цьому в спектрі має бути присутній і зелений складник ФАР. Разом з цим необхідно забезпечити високу ефективність квантів, відповідно у випромінюванні має бути присутня частка довгохвильової складової ФАР, що забезпечить високий потік випромінювання розроблюваного випромінювача.

1.2 Висновки до розділу

У першому розділі проаналізовано літературні дані щодо методів дослідження впливу спектрального складу та інтенсивності опромінення на морфометричні характеристики рослин. Розглянуто існуючі опромінювальні установки, що використовуються для дослідження впливу світлодіодного випромінювання на рослини.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Методи дослідження та проектування дослідницької гідропонної установки

Для експериментів було сконструйовано дослідницьку гідропонну установку. ВУ дає змогу моделювати різні параметри мікроклімату, як-от вологість, температуру, рівень опроміненості та спектральний склад випромінювання, а також змінювати фотоперіод.

Було проведено кілька експериментів, у яких досліджували вплив короткохвильової та довгохвильової області спектра ФАР на фотосинтетичний апарат рослин і процеси культивування. А також було проведено експерименти з вивчення впливу рівня опромінення на організм рослин.

Потім за результатами досліджень було визначено оптичні параметри розроблюваного світлодіодного світильника для рослинництва.

Для досягнення максимальної ефективності світильника було випробувано кілька видів світлодіодів різних виробників. Дослідні зразки світильника з різними конфігураціями джерела випромінювання пройшли фотометричні вимірювання на двокоординатному гоніофотометрі.

Цю установку стелажного типу побудовано на основі конструкційних сталевих профілів, з'єднаних між собою болтовим з'єднанням, що утворюють каркас. Каркас ВУ обшитий білими пластиковими

"сендвіч-панелями". Установка має три яруси, на кожному встановлено по два лотки. При цьому на кожному ярусі сусідні лотки розділені стінками, утворюючи незалежні комірки на кожному ярусі. Таким чином кожна комірка відокремлена, що дає змогу вести дослідження незалежно в кожній комірці.

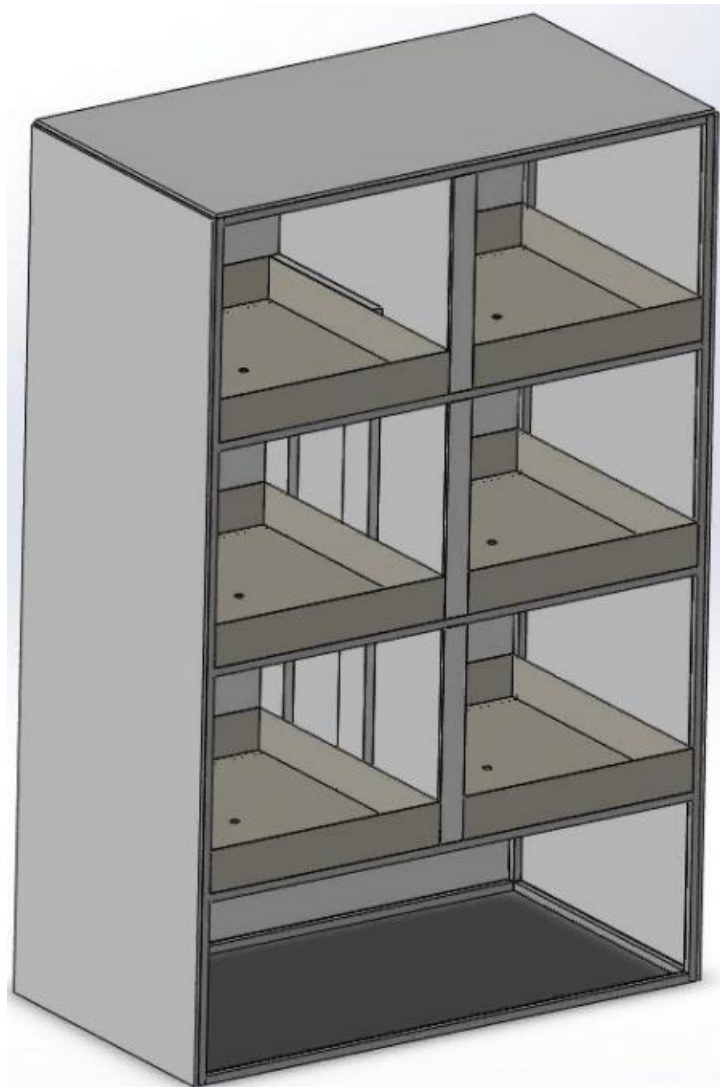


Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд дослідницької установки.

Гідропонна установка працює за припливно-відливним принципом. У нижній частині установки є бак на 90 літрів, у який опущено занурювальний насос. Насос під'єднаний через роздільник до двох шлангів. У шлангах є відгалуження під кожен лоток, по три відгалуження на шланг відповідно. У кожному лотку є отвір по центру для подачі живильного розчину. Кожне відгалуження має вентиль для налаштування кількості поживного розчину, так можна налаштувати кількість поживного розчину, що надходить у кожен лоток, аж до подачі його тільки в один лоток. Кінці шлангів занурені в бак, тому зайва вода назад надходить у бак.

Насос нагнітає воду з поживними речовинами в лоток, заповнюючи його до певного значення, потім насос відключається, і розчин, просочивши субстрат,

стікає назад у бак через шланги подачі. Час роботи насоса налаштовується попередньо, для забезпечення субстрату необхідною кількістю води.

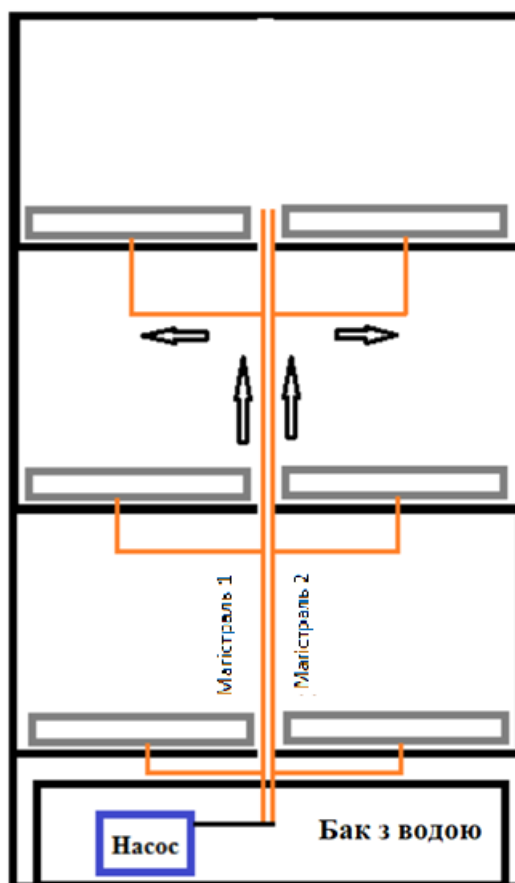


Рисунок 2.2 - Схема пристрою гідропонної установки.

2.2 Дослідження впливу короткохвильової та довгохвильової складової спектра ФАР, а також рівня опроміненості на морфометричні показники рослин

Об'єктом досліджень слугували рослини салату гладколистого, базилік синій і гірчиці. Насіння рослин було висаджено в лотки з ґрунтовою сумішшю, по 10 насінин кожного виду рослин на один лоток. На третій день, коли з'явилися паростки, рослини помістили в ІУ зі штучним кліматом і освітленням. В одній комірці знаходилося 2 лотки кожного виду рослин, всього в одну комірку було поміщено 6 лотків. Таким чином в комірці знаходилося 20 рослин одного виду, всього 60 зразків рослин.

У цьому експерименті рослини були поміщені в комірки № 1, 2, 3 і 4. У першій комірці використовується випромінювач потужністю 80Вт, спектральний склад якого зміщений у короткохвильову область спектра ФАР. Комірка № 2 має випромінювач тієї самої потужності, що й комірка №1, а спектральний склад має переважання в довгохвильовій частині спектра і смугу випромінювання з довжиною хвилі 660 нм. В комірці № 3 і 4 використовується 50Вт світлодіодний опромінювач, спектральний склад якого має переважання в довгохвильовій частині. В комірці №4 спектральний склад має переважання в короткохвильовій частині спектра ФАР. У комірці № 1 і 2 рівень опроміненості дорівнює приблизно $130 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$, а в комірках № 3 і 4 дорівнює $65 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$. Спектральний склад випромінювання в комірках представлено на рисунку 2.3





Рисунок 2.3 - Спектральний склад випромінювання в кімнатках № 1, 2, 3 і 4. У кімнатці № 1 використовується випромінювач потужністю 80Вт, спектральний склад якого зміщений у короткохвильову область спектра ФАР. Комірка № 2 спектральний склад має переважання в довгохвильовій частині спектра і смугу випромінювання з довжиною хвилі 660 нм. В кімнатці № 3 і 4 використовується 50Вт світлодіодний опромінювач, спектральний склад якого має переважання в довгохвильовій частині. В кімнатці №4 спектральний склад має переважання в короткохвильовій частині спектра ФАР.

Проводили заміри довжини стебла та площі листків. Заміряли по п'яти зразків рослин, потім отримували середнє арифметичне значення довжини та площі листка. Дані заносили в таблицю. Заміри проводили кожні три дні протягом місяця. За даними з таблиць були сформовані апроксимовані діаграми росту.

Паралельно з дослідженням впливу спектрального складу випромінювання на організм рослин проводилося вивчення реакції організму рослин на різний рівень опромінення. Оскільки комірка № 1 і № 3 мають переважання короткохвильової складової спектра ФАР, а комірка № 2 і № 4 переважання довгохвильової складової, при цьому рівень опроміненості в цих осередках відрізняється вдвічі, то відмінності в динаміці розвитку рослини будуть обумовлені різним рівнем опроміненості. Таким чином протягом одного місяця проводили одразу два спостереження за реакцією організму рослин на різний спектральний склад і рівень опромінення.

Було виявлено, що зразки всіх видів рослин, які брали участь в експерименті, краще виростили за вищого рівня опроміненості, а також за спектрального складу, в якому переважає червона складова спектра ФАР. Діаграми зміни довжини стебла зразків рослин представлено на рисунку 2.4. Так зразки з комірки №2, вирощувані за рівня опроміненості $130 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$, були вищими: салат на 25%, рукола на 50%, гірчиця на 21%, редиска на 28% за те, що вирощували в комірці №4 з рівнем опроміненості $65 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ з аналогічним спектральним складом випромінювання. При цьому зразки з комірки №2 були вищими: салат на 17%, рукола на 14%, гірчиця на 14%, редиска на 17%, ніж з комірки №1 за однакових рівнів опроміненості, але з відмінним спектральним складом.

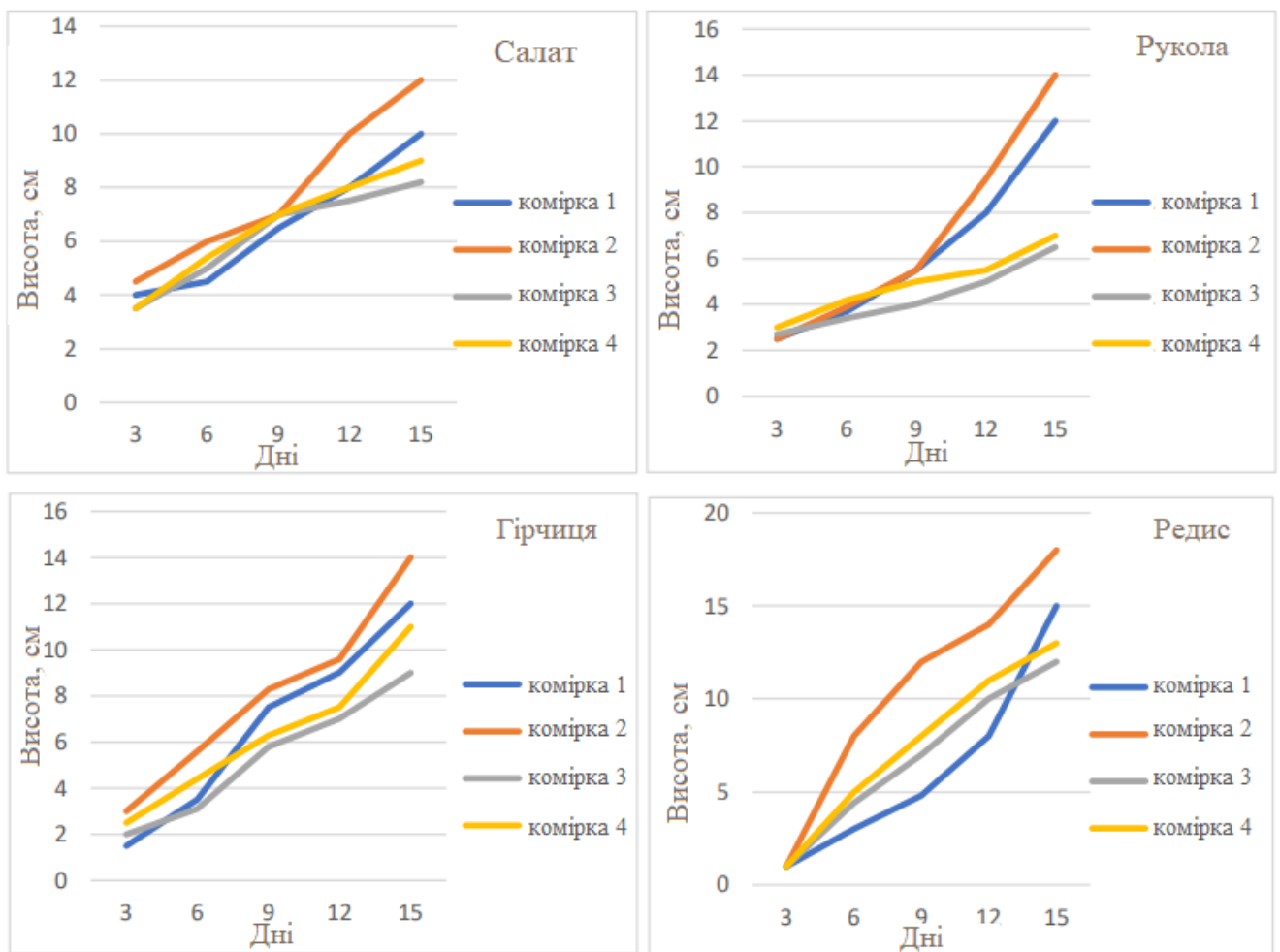


Рисунок 2.4 - Діаграми зміни довжини стебла зразків рослин.

Також зразки з комірки №2 мали більшу площу листя. Так, за аналогічного спектрального складу, але вдвічі вищого рівня опроміненості, ніж у комірці №4, площа листя була більшою: у салату на 51%, у гірчиці на 25%, у редиски на 43%. При цьому зразки з комірки №2 також мали більшу площу листя: салат на 8%, гірчиця на 2%, редиска на 24%, ніж з комірки №1 за однакових рівнів опроміненості, але відмінного спектрального складу. Кінцева площа листя руколи однакова у всіх комірках. Це пояснюється тим, що площа листя цього виду рослин досягла максимальної площі до цього часу. Однак за графіком також видно, що в комірці №2 площа збільшувалася швидше.

Діаграми збільшення площі листя зразків рослин представлено на рисунку 2.5

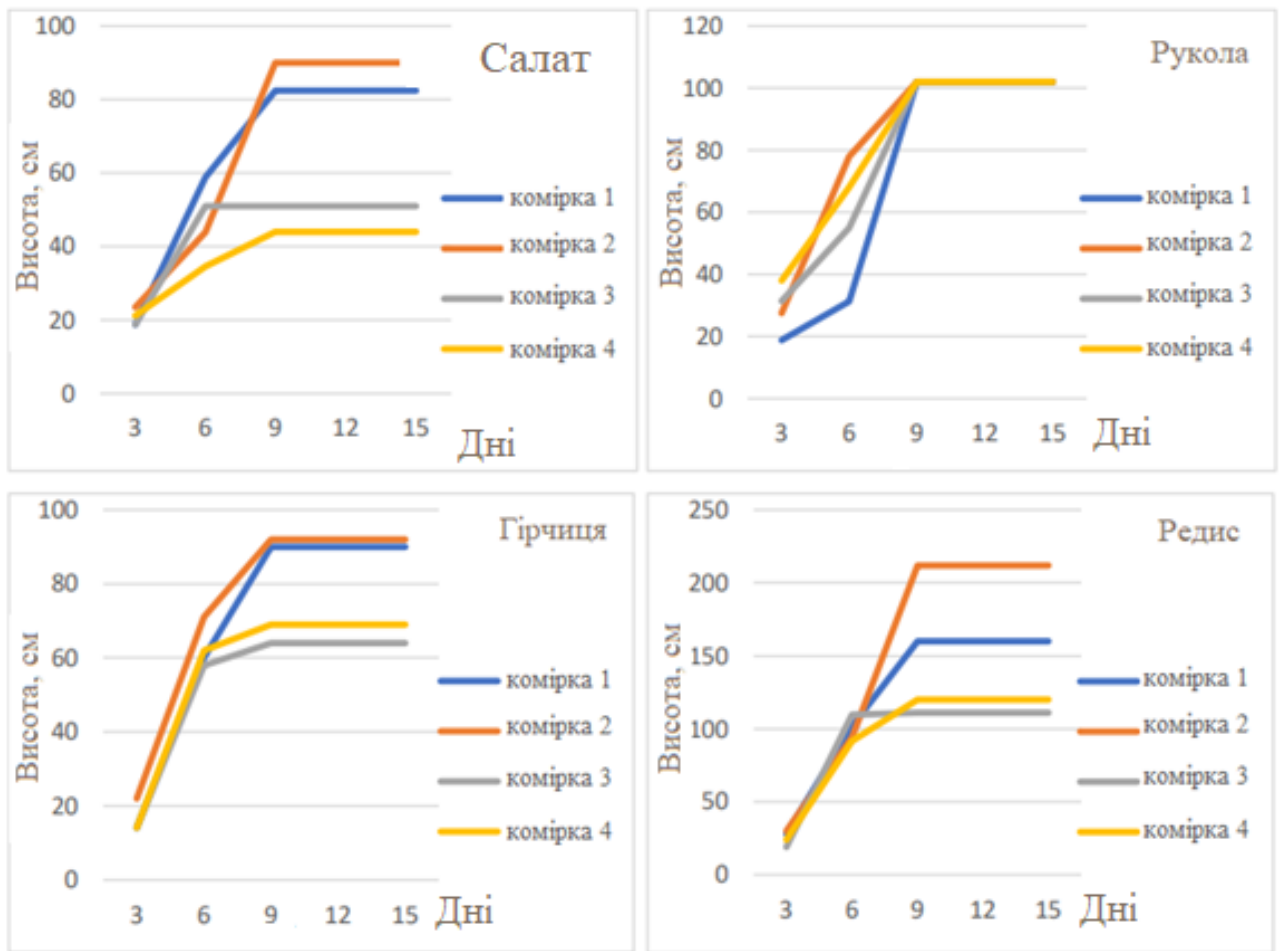


Рисунок 2.5 - Діаграми збільшення площі листя зразків рослин.

За результатами досліджень видно, що підвищений рівень опроміненості сприяє активнішому зростанню, а також збільшенню площі листя і збільшенню врожайності. При цьому переважання червоної складової в спектрі випромінювання також сприяє посиленому росту.

Це дослідження чудово узгоджується з уже проведеними, тут також було помічено позитивний вплив червоної складової спектра ФАР на ростову активність. При цьому варто зауважити, що випромінювання, використане в експерименті, є повноспектральним у всіх випадках, як і йшлося раніше, окремо, складові спектра ФАР - неефективні. Таким чином для розробки випромінювального приладу необхідно використовувати всі ділянки ФАР. Для цього знадобляться білі світлодіоди. Оскільки в білих світлодіодах використовується синє випромінювання для перетворення його на біле, то таким чином білі світлодіоди стануть джерелом синього і зеленого випромінювання. Також у випромінювачі необхідно застосувати червоні світлодіоди, оскільки

згідно з дослідженнями червона складова спектра ФАР сприяє активному росту рослин. З цього випливає, що у випромінювачі буде застосовано два види світлодіодів - білі та червоні в певних пропорціях.

2.3 Розробка світлодіодного світильника для рослинництва

За результатами досліджень впливу параметрів випромінювання було визначено світлодіоди за спектральним складом випромінювання. Потім було розраховано енергетичний потік ФАР для забезпечення оптимального рівня опроміненості. Далі були проведені фотометричні вимірювання випромінювача з різним співвідношенням світлодіодів з різною колірною температурою і довжиною хвилі випромінювання. Потім за допомогою фотометричних вимірювань підібрано конфігурацію з максимальною квантовою ефективністю. На основі проведених вимірювань було визначено найбільш ефективну комбінацію світлодіодів. Таким чином точну кількість і співвідношення світлодіодів, а також електричні параметри, визначені експериментально, було застосовано в тепловому розрахунку випромінювального приладу, який розробляється.

2.3.1 Розрахунок необхідного потоку випромінювання

Згідно з проведеними дослідженнями, було виявлено тенденцію посиленого росту за рівня опроміненості вище $65 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$. Так рослини, які розвивалися за рівня опромінення $130 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ мали більшу площу листя та загальну масу. Також згідно з дослідженнями впливу рівня опромінення при підвищенні рівня опромінення з $80 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ до $200 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ спостерігалась тенденція посилення росту осьових органів та площі листків рослин [6]. Проте з $200 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ і до $400 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ змін не спостерігалось, відбувалося призупинення ефекту посилення ростових процесів, а понад $400 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$, навпаки, відбувалося пригнічення росту та фотодиструкція листя [6]. Таким чином для рослин таких як салат, базилік, помідори та їхня розсада, а також більшість видів мікрозелені оптимальним значенням рівня опромінення є $200 - 300 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$.

Оскільки опромінювальний прилад, що розробляється, буде застосовуватися для домашнього рослинництва, то, імовірно, його використовуватимуть на підвіконнях або окремо розташованих столах. Так можна оцінити площу опромінюваної поверхні і висоту підвісу. Площа опромінюваної поверхні дорівнює приблизно $0,5-1 \text{ м}^2$. При цьому відстань від опромінювача до поверхні дорівнює $0,7-1 \text{ м}$.

У світильнику буде застосована фокусувальна оптика. За допомогою групової лінзи випромінювання буде ефективно зосереджуватися на поверхні з рослинами. Таким чином потік випромінювання світильника буде максимально ефективно використовуватися рослинами. На відміну від світильників, у яких немає вторинної оптики, випромінювання в розроблюваному світильнику буде спрямоване на опромінення рослин, мінімізуючи засвічення приміщення, що сприятливо позначається на комфорті використання цього світильника.

Маючи вихідні дані щодо умов використання світильника перейдемо до розрахунку значення потоку випромінювання, необхідного для забезпечення рівня опромінення $200 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$. Розрахунок проведемо для світильника з КСС Г90.

Розраховувати потік випромінювання світильника будемо методом коефіцієнта використання потоку випромінювання.

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot z}{\eta}$$

де "E" заданий рівень опромінення, $E = 200 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$, . Площа $S = 0,75 \text{ м}^2$. Коефіцієнт нерівномірності z у разі використання світильника з КСС на поверхні з такою площею прийmemo $0,75$. За довідником з проектування освітлювальних установок знаходимо коефіцієнт використання потоку випромінювання η . Для визначення коефіцієнта використання необхідно знайти індекс приміщення i.

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}$$

Де h - висота підвісу світильника над робочою поверхнею, м; $h = 0,7 - 1 \text{ м}$, виберемо середню висоту, тоді $h = 0,85 \text{ м}$.

A - довжина приміщення, м

B - ширина приміщення, м

$$i = \frac{0,75 \cdot 0,75}{0,85 \cdot (0,75 \cdot 0,75)} = 0,44$$

де

Тоді за таблицею коефіцієнт використання потоку випромінювання $\eta = 0,58$.

Необхідний потік випромінювання світильника:

$$\Phi = \frac{200 \cdot 0,75 \cdot 0,75}{0,58} = 194 \text{ мкмоль / с}$$

2.3.2 Вибір світлодіодів

Спектральний склад є найважливішим фактором у розвитку рослини. Важливо дотриматися балансу між короткохвильовою і довгохвильовою складовою спектра ФАР. Також важливим є наявність зелених і помаранчевих квантів у спектрі. Так, згідно з дослідженнями, Samsung наявність у спектрі квантів з довжиною хвилі 660 і 730 нм прискорює утворення бутонів у плодоносних рослин, а також посилює ріст у довжину і масу рослин. Зелені кванти мають високу проникаючу здатність, що сприяє збільшенню ефективності фотосинтезу. Таким чином використання білих світлодіодів забезпечить наявність середньохвильової складової в спектрі, а використання світлодіодів з різною колірною температурою дасть змогу сформувати оптимальне співвідношення між довгохвильовими та короткохвильовими складовими спектра випромінювання. Для забезпечення вищевказаних характеристик, а саме спектрального складу і рівня опроміненості, в опромінювальному приладі має бути два або три види світлодіодів. Так, білі світлодіоди з холодним спектром (6000K-5000K) забезпечуватимуть наявність короткохвильової складової в спектрі приладу, а білі теплі світлодіоди (3500K-2700K) потрібні для забезпечення довгохвильової складової. Також використання білих світлодіодів дасть змогу забезпечити середній діапазон спектра ФАР - це зелене і помаранчеве випромінювання. Ще в приладі необхідний світлодіод з глибоким або дальнім червоним

випромінюванням (650 - 730 нм.), оскільки кванти з такою довжиною хвилі мають яскраво виражений вплив на розміри і масу рослин.

Так у розроблюваному світильнику було застосовано три види світлодіодів. Було відібрано світлодіоди від різних виробників. На рисунок 2.6 представлено Samsung LM281B.



Рисунок 2.6 - Світлодіод типу Samsung LM281B.

Цей світлодіод було обрано з двома колірними температурами: 5000К, 3500К і 3000К. Світлодіод має формфактор типу 2835. Основні параметри світлодіода вказані в таблиці № 2.1.

Таблиця №2.1 - Основні параметри світлодіода Samsung LM281B+ при постійному струмі 0,15А.

Параметр	Тип світлодіода		
	5000 К	3500 К	3000 К
Споживана потужність, Вт	0.5	0.5	0.5
Пряма напруга, В	3	3	3
Світловий потік, лм	82.5	75	70
Світловіддача, лм/Вт	165	150	140



Рисунок 2.7 - Світлодіод типу Samsung LM301B.

На рисунок 2.7 представлено світлодіод типу Samsung LM301B. Цей світлодіод було обрано з двома варіантами колірної температури: 5700K і 3000K. Світлодіод має формфактор типу 3030. Основні параметри світлодіода вказані в таблиці № 2.2.

Таблиця №2.2 - Основні параметри світлодіода Samsung LM301B при постійному струмі 0,07А.

Параметр	Тип світлодіода	
	5000K	3000K
Споживана потужність, Вт	0.2	0.2
Пряма напруга, В	3	3
Світловий потік, лм	44	40
Світловіддача, лм/Вт	220	200

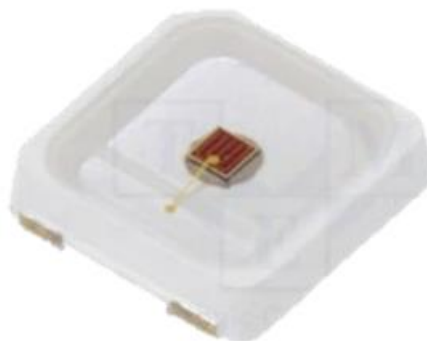


Рисунок 2.8 - Світлодіод типу ProLight PW2R-FFME-A.

На рисунок 2.8 представлено світлодіод типу ProLight PW2R-FFME-A. Цей світлодіод з випромінюванням глибокого червоного випромінювання з довжиною хвилі 660нм. Світлодіод має формфактор типу 2835. Основні параметри світлодіода вказані в таблиці № 2.3.

Таблиця №2.3 - Основні параметри світлодіода ProLight PW2R-FFME- А при постійному струмі 0,15А.

Параметр	
Споживана потужність, Вт	0,31
Пряма напруга, В	2,1
PPF, мкмоль/с	0,75
PPE, мкмоль/Дж	2,38
Довжина хвилі, нм.	660

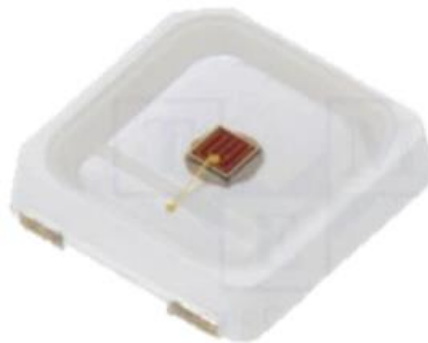


Рисунок 2.9 - Світлодіод типу 2835RCT - 02V.

На рисунок 2.9 представлено світлодіод типу 2835RCT - 02V. Цей світлодіод з випромінюванням глибокого червоного випромінювання з довжиною хвилі 650нм. Світлодіод має формфактор типу 2835. Основні параметри світлодіода вказані в таблиці № 2.4.

Таблиця №2.4 - Основні параметри світлодіода 2835RCT-02V150 за постійного струму 0,15А.

Параметр	
Споживана потужність, Вт	0,31
Пряма напруга, В	2,1
PPF, мкмоль/с	0,6
PPE, мкмоль/Дж	2,1
Довжина хвилі, нм.	660

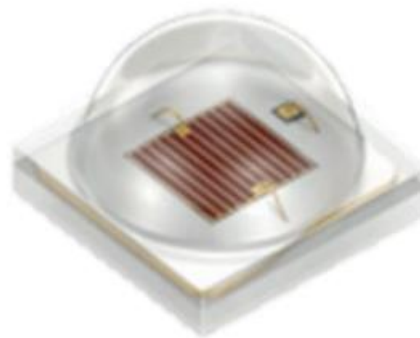


Рисунок 2.10 - Світлодіод типу OSLOM Square Hyper Red GHCSSRM4.24-V7V9-1-1-700- OSLOM Square Hyper Red GHCSSRM4.24-V7V9-1-1-700-R3.

На рисунок 2.10 представлено світлодіод типу OSLOM Square Hyper Red. Цей світлодіод глибокого червоного спектра (670нм.) має формфактор типу 3030. Основні параметри світлодіода вказані в таблиці № 2.5.

Таблиця №2.5 - Основні параметри світлодіода OSLOM Square Hyper Red Red при постійному струмі 0,7А.

Параметр	
Споживана потужність, Вт	1,47
Пряма напруга, В	2,1
PPF, мкмоль/с	5,42
PPE, мкмоль/Дж	3,69
Довжина хвилі, нм.	670

Збірка прототипів випромінювача проводилася на основі трьох типорозмірів корпусу світлодіодів, це SMD 2835, SMD 3030, SMD 3535.

2.5 Висновки до розділу

Було проведено дослідження, що дають змогу розробити опромінювальний прилад. Було виявлено, що зсув у червону область у спектрі ФАР сприяє збільшенню площі листя і довжини пагона рослини. Приріст довжини склав у середньому 15%, а приріст площі листя в середньому 11%. Також збільшення рівня опроміненості сприяє збільшенню довжини пагона в середньому на 30% і збільшенню площі листя в середньому на 40%.

Згідно з дослідженнями, було підібрано світлодіоди різних корпусів і від різних виробників.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Фотометричні вимірювання випромінювача

Для розроблення оптичної частини світлодіодного опромінювача було проведено фотометричні вимірювання. За результатами вимірювань було виявлено найефективнішу конфігурацію світлодіодного випромінювача.

Вимірювання проводили на двокоординатному гоніофотометричному комплексі. Отримані результати світлового потоку у фотометричних одиницях вимірювання перевели в енергетичні. Переведення здійснювали в програмі Matchad за формулою:

$$F_{\Phi AP} = \int_{350}^{800} \frac{E_{\lambda} \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot N_A} d\lambda \quad (3.1)$$

де $F_{\Phi AP}$ - фотосинтетичний потік фотонів, мкмоль/с;

E_{λ} - спектральна щільність розподілу енергії випромінювання приладу, Дж/нм;

λ - довжина хвилі, нм;

h - постійна Планка; c - швидкість світла;

N_A - число Авогадро;

Розрахунок квантової ефективності випромінювачів в області ФАР проводили за формулою:

$$\eta_{\Phi} = \frac{F_{\Phi AP}}{P} \quad (3.2)$$

де η_{Φ} - ефективність приладу в області ФАР, мкмоль/Дж;

$F_{\Phi AP}$ - фотосинтетичний потік фотонів, мкмоль/с;

P - споживана приладом потужність, Вт.

Вимірювання спектрального складу випромінювання проводили за допомогою спектрометра.

Були проведені фотометричні вимірювання декількох варіантів розроблюваного світлодіодного випромінювача з різним співвідношенням

світлодіодів з теплою і холодною колірною температурою, а також різною кількістю червоних світлодіодів.

Для проведення фотометричних вимірів було виготовлено кілька друкованих плат. Загалом на платі було 288 світлодіодів. Розводка друкованої плати представлено на рисунку 3.1

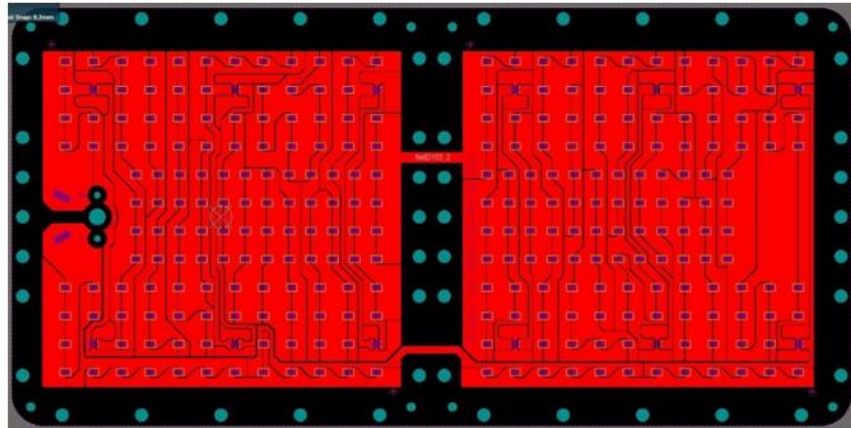


Рисунок 3.1 - Розводка друкованої плати.

У випромінювальному приладі було застосовано лінзи представлені на рисунку 3.2. Вона формувала потік випромінювання з кутом розбіжності 55 - 60 град. (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.2 – Фото лінз світлодіодного опромінювача.

Було проведено кілька вимірів, за допомогою яких було оцінено внесок короткохвильової і довгохвильової складових спектра ФАР. Передбачалося, що світлодіоди, які мають нижчу колірну температуру, здатні випускати більшу

кількість квантів, ніж ті, в яких колірна температура вища. Це пов'язано з тим, що чим нижча колірна температура, тим сильніше спектральний склад зсунутий у червону ділянку ФАР, при цьому знижується щільність синього випромінювання. Також передбачалося, що червоні світлодіоди слугуватимуть джерелом квантів. Змінюючи їхню кількість у випромінювальному приладі, можна змінювати потік випромінювання.

Так спочатку було зібрано випромінювач на платі, що має два види білих світлодіодів (5700К і 3000К) у рівних пропорціях і червоні світлодіоди. Потім було проведено заміри випромінювача з такою самою платою, але з великою кількістю червоних світлодіодів, при цьому зменшивши на таку саму кількість світлодіодів із колірною температурою 5700К. Далі було проведено замір випромінювача з платою, що має світлодіоди в іншому виконанні (SMD2835), але з рівною кількістю білих світлодіодів (5000К і 3500К). Наступний вимір полягав у виявленні впливу спектра світлодіодів з температурами 5000К і 3500К на величину потоку ФАР. При цьому на платі відключали ті чи інші групи світлодіодів. Потім було зібрано оптимальну збірку на білих світлодіодах 5000К LM281B+ і червоних OSRON Square Hyper Red.

Зразок 1 мав світлодіоди Samsung LM301B з двома колірними температурами 5700К і 3000К у рівних пропорціях, у кількості 132 шт. кожної колірної температури. Червоних світлодіодів Prolight H2 650-660nm у корпусі 3030 з довжиною хвилі 660 нм було встановлено 24 штуки.

Зразок 2 мав світлодіоди Samsung LM301B з двома колірними температурами 5700К і 3000К. У цьому прототипі було збільшено кількість червоних світлодіодів. При цьому на таку саму кількість світлодіодів із колірною температурою 5700К було менше. У цьому експерименті досліджували внесок короткохвильової області ФАР у величину потоку квантів. Оскільки за законом Планка червоне випромінювання несе більшу кількість квантів у розрахунку на 1Дж, то імовірно очікувалося збільшення потоку. Таким чином світлодіодів Prolight H2 650-660nm було 36 шт., світлодіодів з колірною температурою 5700К було 120 шт., а з колірною температурою 3000К було 132 шт.

Зразок 3 мав більш бюджетні світлодіоди Samsung LM281B з колірною температурою 5000К і 3500К у рівних пропорціях, у кількості 132 шт. кожної

колірної температури та 24 червоні світлодіоди 2835RCT-002V у корпусі 2835 з довжиною хвилі 650-665нм.

Зразок 4 мав плату зі світлодіодами LM281B з колірною температурою 5000К у кількості 138 штук, а також 24 червоних світлодіоди OSRON Square Hyper Red. При цьому потужність випромінювача склала 58,6Вт, оскільки групи світлодіодів з колірною температурою 3500К були відключені.

Зразок 5 мав плату зі світлодіодами LM281B з колірною температурою 3500К у кількості 138 штук, а також 24 червоних світлодіоди OSRON Square Hyper Red.

Зразок 6 мав світлодіоди Samsung LM281B з однією колірною температурою 5000К, у кількості 264 шт., а також червоні світлодіоди Osram OSRON Square у корпусі 3535 з довжиною хвилі 665нм у кількості 12 шт.

Результати вимірювань світлодіодних випромінювачів було занесено в таблицю №3.1.

Таблиця №3.1 Порівняння оптичних та електричних параметрів світлодіодних випромінювачів.

Параметр	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5	Зразок 6
Споживана потужність, Вт	96,19	95,14	98,85	58,6	58,98	103,5
Світловий потік, лм	14806	14140	13771	8244	7578	14656
Світлова віддача, лм/Вт	154	149	139	141	128	142
Енергетичний потік, Вт	48,54	47,18	44,5	30,2	27,458	49,8
Потік фотосинтетично активної радіації (PPF), мкмоль/с	223,57	224	211	143,7	136,1	232,4
Квантова ефективність, мкмоль/Дж	2,32	2,35	2,13	2,45	2,31	2,25

В результаті фотометричних вимірювань були отримані КСС випромінювачів і потік випромінювання випромінювачів.

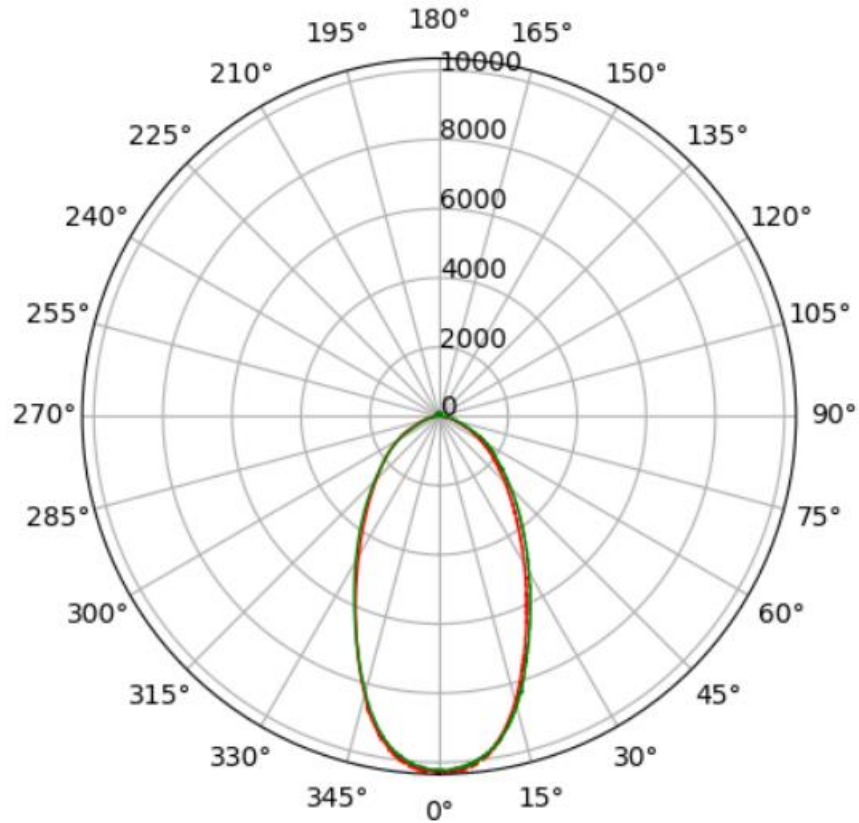
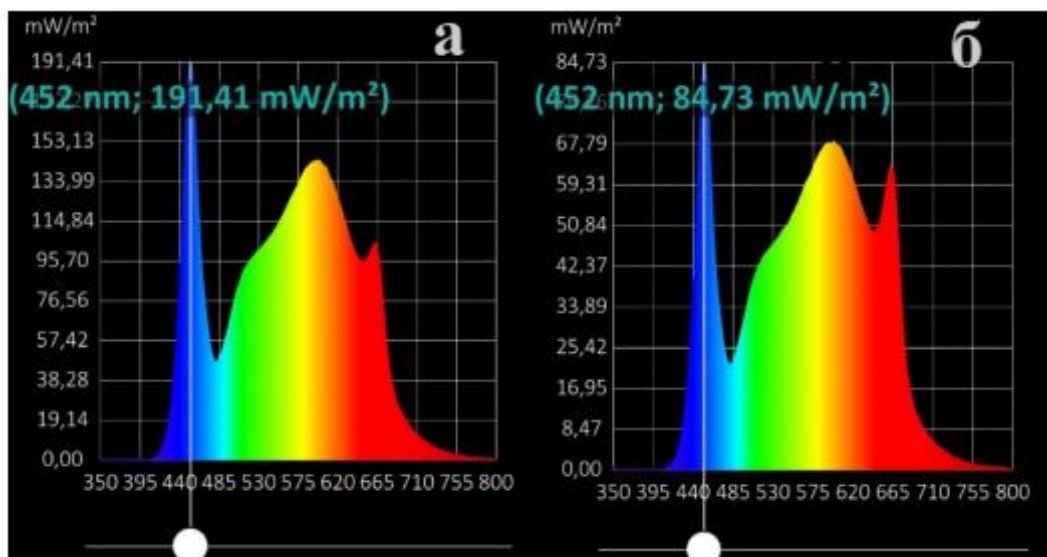


Рисунок 3.3 - Просторовий розподіл випромінювання з використанням лінз

На рисунку 3.4 показано спектральний склад випромінювання світлодіодних випромінювачів.



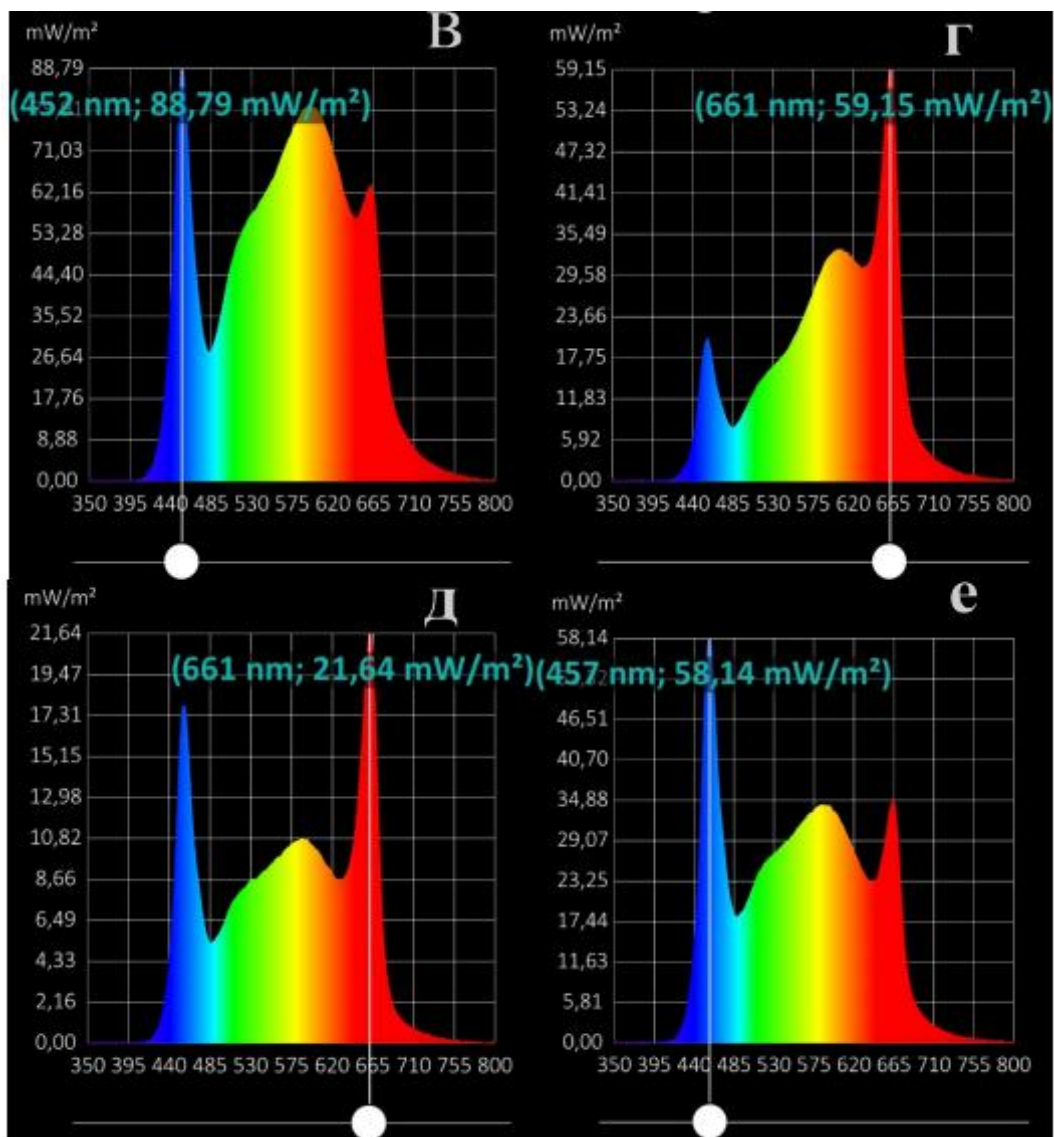


Рисунок 3.4 - спектральний склад випромінювачів. (а - зразок №1, б – зразок №2, в - зразок №3, г - зразок №4, д - зразок №5, зразок №6)

Видно зміну спектрального складу за різних комбінацій світлодіодів та їх співвідношення.

У результаті вимірів було виявлено, що збільшення кількості червоних світлодіодів підвищує квантову ефективність випромінювача. Це пов'язано з тим, що випускається більша кількість квантів. Однак потік випромінювання збільшується несуттєво, це, своєю чергою, пов'язано з тим, що білий світлодіод має в основі синій кристал, падіння напруги на якому становить 3 В, а червоний кристал споживає лише 2,1 В, тож загальна потужність нижча, а отже, і, відповідно, потік випромінювання практично не змінюється. Так, квантова ефективність зразка №1 дорівнює 2,32 мкмоль/Дж, а зразка №2 - 2,35 мкмоль/Дж.

Також унаслідок вимірів було виявлено, що білі світлодіоди з колірною

температурою 5000К є ефективнішими, незважаючи на спектр, зміщений у синю ділянку. Так зразок №4 має квантову ефективність 2,45 мкмоль/Дж, а зразок №5 2,31 мкмоль/Дж. Це пояснюється тим, що світлодіоди з більш низькою колірною температурою мають більшу концентрацію частинок люмінофора, а це своєю чергою збільшує втрати. Також у результаті вимірювань було виявлено, що світлодіоди LM301В є більш ефективні ніж LM281В.

Далі було проведено вимірювання газорозрядної натрієвої лампи ДНаТ НPS 600. Результати вимірювань натрієвої лампи порівнювали з результатами світлодіодного випромінювача, який має найбільший потік випромінювання. Результати наведено в таблиці №3.2 для порівняння. Оскільки світлодіодний випромінювач має модульну конструкцію, то його можна збирати в збірки з необхідною потужністю.

Таблиця №3.2 - Порівняння параметрів світлодіодного випромінювача і ДНаТ з перерахунком потужності.

Параметр	Зразок 6	Перерахунок	ДНаТ НPS 600"
Споживана потужність, Вт	103,5	724,5	745
Світловий потік, лм	14656	102592	83916
Світлова віддача, лм/Вт	142	142	113
Енергетичний потік, Вт	49,8	348,6	273,92
Потік ФАР, мкмоль/с	232,4	1626,8	1414
Квантова ефективність, мкмоль/Дж	2,25	2,25	1,9
Кут розкриття потоку випромінювання, град.	58x56°	58x56°	145x99°
Колірна температура, К	5006	50006	2064
Індекс передачі кольору	90,2	90,2	50,3

Світлодіодний випромінювальний прилад має ефективність вищу на 16%, ніж ДНаТ. Але водночас співвідношення потоку ФАР і енергетичного потоку в ДНаТ вище, це свідчить про те, що більша частина випромінювання бере участь у

процесі фотосинтезу. Це пов'язано з тим, що у ДНаТ основна частина спектра перебуває в червоній області. Таким чином світлодіодний випромінювач є більш ефективним, однак при цьому не вся частина цього випромінювання сприяє збільшенню кількості квантів у потоці. Такий самий ефект спостерігався під час порівняння зразка №1 і №2, коли у другого зразка енергетичний потік знизився, при цьому потік ФАР збільшився.

Таким чином, зсуваючи спектральний склад у червону ділянку, можна домогтися більшого співвідношення енергетичного потоку і потоку ФАР, однак необхідно дотримуватися балансу як в енергетичному плані, так і в економічному, адже червоні світлодіоди мають меншу потужність, і прилад може вийти малопотужним, при цьому маючи порівняно великі габарити, а також червоні світлодіоди дорожчі.

3.2 Світлодіодний випромінювальний прилад для рослинництва

Випромінювач був виконаний на основі плати з максимальним потоком ФАР. Зовнішній вигляд реального прототипа розробленого світильника для рослинництва представлено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 - Зовнішній вигляд реального прототипа розробленого світильника для рослинництва.

Випромінювальний прилад має алюмінієву плату з товщиною 3 мм. За рахунок своєї площі і товщини, плата одночасно є корпусом і радіатором випромінювача. Випромінювач має кронштейн для монтажу, до якого приєднано драйвер.

Випромінювач має 46 груп білих світлодіодів із колірною температурою 5000К. В одній групі 6 світлодіодів з'єднаних паралельно. Між собою групи з'єднуються послідовно. Також випромінювач має 6 груп червоних світлодіодів (660нм.), у групі по два світлодіода, які з'єднані паралельно. Схема підключення світлодіодів наведено на рисунку 3.6.

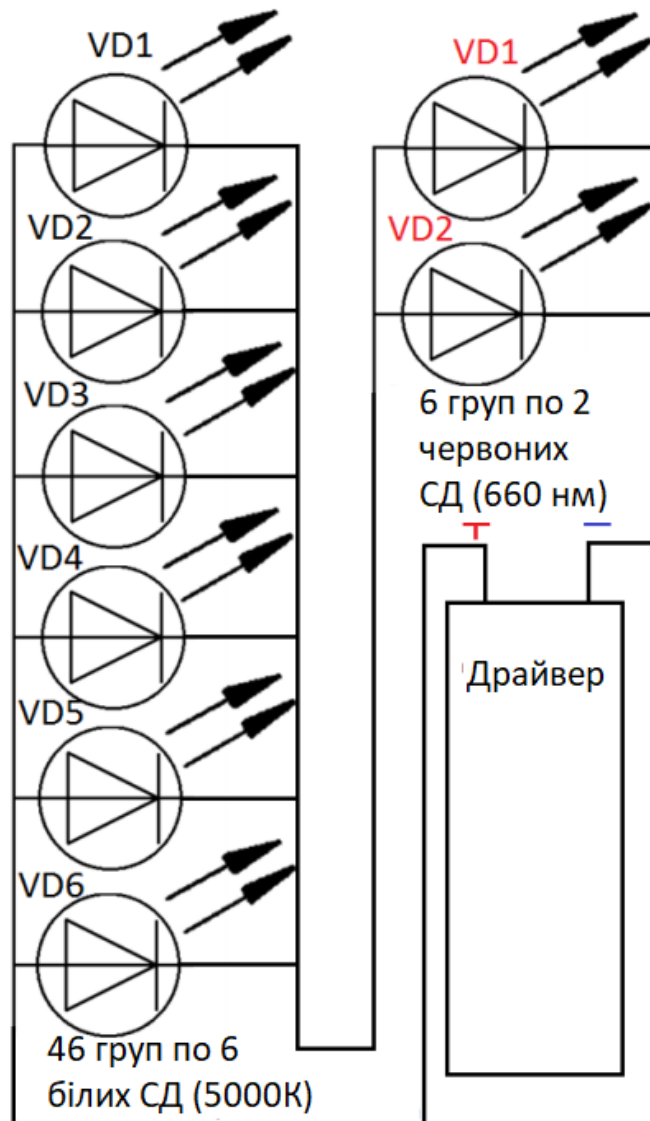


Рисунок 3.6 - схема підключення світлодіодів.

Загальна пряма напруга дорівнює 150В. Сила струму живлення всієї плати дорівнює 700мА.

Виходячи з електричних параметрів живлення було підібрано драйвер. У випромінювачі застосовувався драйвер Philips Xitanium (рисунок 3.7), параметри в таблиці №3.3.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд драйвера

Таблиця №3.3 - Основні параметри драйвера.

Параметр	Паспортне значення
Потужність макс, Вт	150
Струм макс, мА	700
Напруга вих, В	96-214
ККД, %	92

Було відібрано світлодіоди для забезпечення необхідного спектрального складу, а також визначено їх співвідношення для забезпечення найбільшої ефективності. Комбінації світлодіодів було апробовано на базі наявного комерційного світильника. Було обрано найбільш ефективну комбінацію. Таким чином було визначено оптичні та електричні параметри розроблюваного випромінювача, які представлені в таблиці №3.4.

Таблиця №3.4 - Електричні та фоторадіометричні параметри випромінювача.

		Зразок 1
Електричні параметри	Напруга мережі, В. F= 50 Гц	230
	Споживана потужність, Вт	103,5
	Пусковий струм, А	0,7
	Струм споживання, А	0,454
	Коефіцієнт потужності, Pf	0,989
	Час виходу на робочий режим, хв.	60
	Температура корпусу (max), °С	62
	Температура джерела живлення (макс), °С	49
	Коефіцієнт пульсацій, %	3
Світлові параметри	Світловий потік, лм	14656
	Світлова віддача, лм/Вт	142
	Енергетичний потік, Вт	49,8
	Потік фотосинтетично активної радіації (ФАР), мкмоль/с	232,4
	Квантова ефективність, мкмоль/Дж	2,246
	Щільність фотосинтетичного потоку фотонів на відстані 1м (PPFD), мкмоль/с·м ²	-
	Максимальна сила світла, кд (кут, град) , (площина)	11013 (0°) (Для всіх)
	Кут розкриття потоку випромінювання, град.	54x53°
	Колірна температура, К площину.	5004
	Індекс передачі кольору	90,2

3.3 Висновки до розділу

Було проведено фотометричні дослідження випромінювальної частини приладу, для визначення максимально ефективної конфігурації. Так, у результаті досліджень було виявлено, що червоні світлодіоди сприяють збільшенню

ефективності, однак завдяки меншій потужності випромінювальний прилад випромінює менше квантів у перерахунку на габарити приладу. Також було проведено дослідження про вплив короткохвильової і довгохвильової області ФАР на величину потоку ФАР. Так, у результаті вимірювань було виявлено, що білі світлодіоди з колірною температурою нижче 5000К випромінюють меншу кількість квантів, незважаючи на їхній спектральний склад, який зміщений у червону область. Це пов'язано з тим, що чим нижча колірна температура, тим більше світлоперетворювальних часток у люмінофорі світлодіода, а також товстіший шар люмінофора, що призводить до втрат оптичного випромінювання.

Було обрано оптимальну конфігурацію випромінювача. Вона мала максимальний потік ФАР при цьому маючи високу ефективність. У розробленому випромінювачі дотримано баланс між величиною потоку випромінювання та ефективністю.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок

При дослідженні систем живлення електроустановки трансформаторних підстанцій оглядаються без зняття з них напруги, на віддалі від струмоведучих частин. Дефекти виявляються візуально – оглядом і на слух. Право одноособового огляду електроустановки має черговий із кваліфікаційною групою не нижче III або адміністративно-технічний працівник, що має V групу в установках напругою вище 1000 В і IV групу в електроустановках напругою нижче 1000 В.

При оглядах діючих електроустановок не можна проходити за огороження, знімати їх і входити в камери розподільних пристроїв, що не мають бар'єрів. При необхідності дозволяється працівникові з кваліфікаційною групою не нижче IV увійти за огороження, але за умови, що струмоведучі частини недоступні, тобто нижні фланці ізоляторів знаходяться від сталі на відстані більше 2 м, а неогорожені струмоведучі частини - на відстані більше 2,75 м при напрузі 35 кВ і 3,5 м при напрузі 110 кВ.

При менших відстанях входити за огороження можна тільки в присутності другої особи, що має кваліфікаційну групу не нижче III, і за умови, що струмоведучі частини знаходяться на відстані зазначеному в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі відстані від місця проведення робіт до струмоведучих частин у залежності від їх напруги

Номінальна напруга електроустановки, кВ	Допустима відстань, м
до 15	0,7
від 15 до 35	1,0
від 35 до 110	1,5
154	2
220	2,5
330	3,5
400 і 500	4,5

Вимкнення і зміни в електричних схемах РЕМ здійснюються тільки за розпорядженням або з відома чергового персоналу, у керуванні або підпорядкуванні якого знаходиться устаткування. При пожежах, нещасних випадках або при стихійних лихах негайно потрібно вимикати електроустаткування без узгодження, з послідуочим записом у оперативному журналі.

Розпорядження вважається виконаним після того, як черговий повідомить особисто або телефоном черговому диспетчерові енергосистеми мереженого району, черговому інженерові, тобто особі, що дала розпорядження. Керуватися показами приладів та повідомленнями осіб не оперативного персоналу про виконання розпорядження не можна.

Особа, що віддає розпорядження про переключення, обов'язково перевіряє послідовність операцій за оперативною схемою. Черговий, який отримав розпорядження, зобов'язаний повторити його і записати в оперативний журнал.

За оперативною схемою або макетові цей черговий намічає порядок операції. Якщо переключення виконують дві особи, то перша особа є старшою, роз'ясняє другій (виконавцю) завдання і послідовність його виконання.

В електроустановках напругою вище 1000 В, не обладнаних повністю блокованими від неправильних операцій роз'єднувачів, складні переключення проводяться за бланками. В бланку переключень виконується запис усіх операцій про увімкнення і вимкнення електрообладнання точно у тій послідовності, у якій ці операції повинні виконуватись.

Прості переключення на одному електричному приєднанні і переключення в електроустановках повністю обладнаних блокуванням роз'єднувачів від неправильної операції, можуть виконуватися без бланків.

Бланки переключень заповнює і підписує черговий який є безпосереднім виконавцем. Старший черговий контролюючий виконання операцій, перевіряє бланк і також його підписує. Старший черговий зачитує зміст операції виконавець повторює прочитане і приступає до виконання. Старший контролює дії виконавця і відразу відзначає в бланку виконання операції. При сумніві в правильності

операцій робота припиняється до вияснення правильного порядку переключень. Якщо черговий робить переключення одноосібно, то він зачитує

послідовність операцій вказаних у бланку телефоном старшому черговому який віддав розпорядження. Цей черговий є контролюючою особою.

Дозвіл на переключення виконавець зобов'язаний одержати телефоном безпосередньо перед їх виконанням. Приєднання вмикають або вимикають з допомогою вимикачів.

Роз'єднувачі необхідно вмикати ривком. Якщо при цьому виникає дуга, то ножі необхідно довести до кінця. У протилежному випадку зворотний хід ножа викличе виникнення дуги й нещасний випадок. Вимикати роз'єднувачі треба, навпаки, повільно, особливо в початковий момент. Якщо з'явиться дуга при відході ножів від губок, то роз'єднувач необхідно увімкнути назад.

Роз'єднувачі відключають (включають) у діелектричних рукавицях. Роз'єднувачі з пофазним керуванням і з вертикальним розташуванням – у діелектричних рукавицях, з використанням ізолюючих штанг і стоячи на ізолюючій підставці. Старшим може бути черговий, що має не меншу ніж IV кваліфікаційну групу. Прості перемикання на одному електричному приєднанні дозволяється виконувати оперативному персоналу, що має не нижче ніж IV кваліфікаційну групу, одноосібно.

Перевіряти відсутність напруги, накладати й знімати переносні заземлення дозволяється не менш ніж двом виконавцям.

4.2 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху

Для того, щоб зрозуміти всю складність проблем загрози ЕМІ і заходів щодо захисту від неї, необхідно коротко розглянути історію вивчення цього фізичного явища і сучасний стан знань у цій області.

Те, що ядерний вибух буде обов'язково супроводжуватися електромагнітним випромінюванням, був ясно фізикам-теоретикам ще до першого випробування ядерного пристрою в 1945 році. Під час проводилися в

кінці 50-х - початку 60-х років ядерних вибухів в атмосфері і космічному просторі наявність ЕМІ було зафіксовано експериментально. Однак кількісні характеристики імпульсу вимірювалися в недостатній мірі, по-перше, тому що

була відсутня контрольно-вимірювальна апаратура, здатна реєструвати надзвичайно потужне електромагнітне випромінювання, що існує надзвичайно короткий час (мільйонні частки секунду), по-друге, тому що в ті роки в радіоелектронній апаратурі використовувалися виключно електровакуумні прилади, які рідко схильні до впливу ЕМІ, що знижувало інтерес до його вивчення.

Створення напівпровідникових приладів, а потім і інтегральних схем, особливо пристроїв цифрової техніки на їх основі, і широке впровадження засобів в радіоелектронну військову апаратуру примусили військових фахівців з іншого оцінити загрозу ЕМІ. З 1970 року питання захисту зброї і військової техніки від ЕМІ стали розглядатися міністерством оборони США як що мають вищу пріоритетність.

Механізм генерації ЕМІ полягає в наступному. При ядерному вибуху виникають гамма і рентгенівське випромінювання і утворюється потік нейтронів. Гамма-випромінювання, взаємодіючи з молекулами атмосферних газів, вибиває з них так звані комптонівські електрони. Якщо вибух здійснюється на висоті 20-40 км., То ці електрони захоплюються магнітним полем Землі і, обертаючись відносно силових ліній цього поля створюють струми, що генерують ЕМІ. При цьому поля ЕМІ когерентно підсумовуються у напрямі до земної поверхні, тобто магнітне поле Землі виконує роль, подібну фазованою антеною грат. В результаті цього різко збільшується напруженість поля, а отже, і амплітуда ЕМІ в районах південніше і на північ від епіцентру вибуху. Тривалість даного процесу з моменту вибуху від 1 - 3 до 100 нс.

На наступній стадії, що триває приблизно від 1 мкс до 1 з, ЕМІ створюється комптонівськими електронами, вибитими з молекул багато разів відображеним гамма-випромінюванням і за рахунок непружного зіткнення цих електронів з потоком що випускаються при вибуху нейтронів. Інтенсивність ЕМІ при цьому виявляється приблизно на три порядки нижче, ніж на першій стадії.

На кінцевій стадії, що займає період часу після вибуху від 1 з до декількох хвилин, ЕМІ генерується магнітогідродинамічним ефектом, породжуваним збуреннями магнітного поля Землі струмопровідних вогняною кулею вибуху.

Інтенсивність ЕМІ на цій стадії вельми ризика і становить декілька десятків вольт на кілометр.

Найбільшу небезпеку для радіоелектронних засобів представляє перша стадія генерування ЕМІ, на якій відповідно до закону електромагнітної індукції через надзвичайно швидкого наростання амплітуди імпульсу (максимум досягається на 3 - 5 нс після вибуху) наведеної напруга може досягати десятків кіловольт на метр на рівні земної поверхні, плавно знижуючись в міру віддалення від епіцентру вибуху.

Амплітуда напруги, що наводяться ЕМІ в провідниках, пропорційна довжині провідника, що перебуває в його полі, і залежить від його орієнтації щодо вектора напруженості електричного поля.

Так, напруженість поля ЕМІ в високовольтних лініях електропередачі може досягати 50 кВ/м, що призведе до появи в них струмів силою до 12 тис.А.

ЕМІ генеруються і при інших видах ядерних вибухів - повітряному і наземному. Теоретично встановлено, що в цих випадках його інтенсивність залежить від ступеня асиметричності просторових параметрів вибуху. Тому повітряний вибух з точки зору генерації ЕМІ найменш ефективний. ЕМІ наземного вибуху буде мати високу інтенсивність, проте вона швидко зменшується в міру віддалення від епіцентру.

Ідеальною захистом від ЕМВ стало б повне укриття приміщення, в якому розміщена радіоелектронна апаратура, металевий екран.

Разом з тим ясно, що практично забезпечити такий захист у ряді випадків неможливо, тому що для роботи апаратури часто потрібно забезпечити її електричну зв'язок із зовнішніми пристроями. Тому використовуються менш надійні засоби захисту, такі, як струмопровідні сітки або плівкові покриття для вікон, стільникові металеві конструкції для повітрязабірників і вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, які розміщуються по периметру дверей і люків.

Більш складною технічною проблемою вважається захист від проникнення ЕМІ в апаратуру через різні кабельні вводи. Радикальним вирішенням цієї проблеми міг би стати перехід від електричних мереж зв'язку до практично не схильним до дії ЕМІ волоконно-оптичних. Однак заміна напівпровідникових

приладів у всьому спектрі виконуваних ними функцій електронно-оптичними пристроями можливо тільки у віддаленому майбутньому. Тому в даний час засобів захисту кабельних вводів найбільш широко використовуються фільтри, в тому числі волоконні, а також іскрові розрядники, металлокисні варистори і високошвидкісні зенеревські діоди.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено дослідження, що дають змогу розробити опромінювальний прилад. Було виявлено, що зсув у червону область у спектрі ФАР сприяє збільшенню площі листя і довжини пагона рослини. Приріст довжини склав у середньому 15%, а приріст площі листя в середньому 11%. Також збільшення рівня опроміненості сприяє збільшенню довжини пагона в середньому на 30% і збільшенню площі листя в середньому на 40%.

Згідно з дослідженнями, було підібрано світлодіоди різних корпусів і від різних виробників. Було проведено фотометричні дослідження випромінювальної частини приладу, для визначення максимально ефективної конфігурації. Так, у результаті досліджень було виявлено, що червоні світлодіоди сприяють збільшенню ефективності, однак завдяки меншій потужності випромінювальний прилад випромінює менше квантів у перерахунку на габарити приладу. Так при додаванні червоних світлодіодів ефективність зросла з 2,32 до 2,35 мкмоль/Дж, при цьому потік випромінювання практично не збільшився. Також було проведено дослідження про вплив короткохвильової і довгохвильової області ФАР на величину потоку ФАР. Так, у результаті вимірювань було виявлено, що білі світлодіоди з колірною температурою нижче 5000К випромінюють меншу кількість квантів, незважаючи на їхній спектральний склад, який зміщений у червону область. Так зразок випромінювача, що має тільки білі світлодіоди з колірною температурою 5000К, мав ефективність 2,45 мкмоль/Дж, а зразок з колірною температурою 3000К лише 2,31 мкмоль/Дж. Це пов'язано з тим, що чим нижча колірна температура, тим більше світлоперетворювальних часток у люмінофорі світлодіода, а також товстіший шар люмінофора, що призводить до втрат оптичного випромінювання.

У підсумку було обрано оптимальну конфігурацію випромінювача. Вона мала максимальний потік ФАР при цьому маючи високу ефективність. У розробленому випромінювачі дотримано баланс між величиною потоку випромінювання та ефективністю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Червінський Л.С , Сторожук Л.О. СВІТЛОКУЛЬТУРА РОСЛИН ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ І СТАНОВЛЕННЯ м.Київ 2006 р.
2. Hytönen, T., Pinho, P., Rantanen, M., Kariluoto, S., Lampi, A., Edelmann, M., Elomaa, P. «Effects of LED light spectra on lettuce growth and nutritional composition» <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153517701300> 2017 р.
3. Shailesh K R "Energy efficient LED lighting design for horticulture" https://www.researchgate.net/publication/340622622_Energy_efficient_LED_lighting_design_for_horticulture 2019р
4. Samuolienė, G., Urbonavičiūtė, A., Duchovskis, P., Bliznikas, Z., Vitta, P., Žukauskas, A. 2009. Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator. HortScience 44: 1857-1860.
5. SAMSUNG LED https://image.led.samsung.com/content/samsung/p6/led/lighting/applications/horticulture-lighting/greenhouse/PC_2021H2_Greenhouse_Lighting_EN_v1018.pdf 2023 р.
6. Bkiznikas Z. Zukauskas A. Giedre S. Akvile V. “Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of green vegetables” https://www.researchgate.net/publication/259871978_Effect_of_supplementary_pre-harvest_LED_lighting_on_the_antioxidant_and_nutritional_properties_of_green_vegetables 2012 р.
7. Karttunen H., Kroger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J. Fundamental Astronomy. — 5th Edition. — Berlin: Springer, 2007. — 510 p. — ISBN 978-3-540-34143-7.
8. S.Zhen, V.Bugbee- Plant, cell & environment, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pce.13730> 2020 р.
9. Андрійчук В.А. Дослідження світлодіодних джерел світла у випадку імгектного живлення / Андрійчук В.А., Наконечний М.С., Осадца Я.М., Філюк

Я,О. // Технічна електродинаміка, 2021. – №1. – Стор. 68-72.
<https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>.

10. Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power / Volodymir Andriichuk, Myroslav Nakonechnyi, Yaroslav Filiuk // Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics, 2023. — Vol 26, P. 230-235. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.230>.

11. Дослідження кінетики свічення світлодіодних джерел світла / Андрійчук, В. А., Наконечний, М. С., і Філюк, Я. О, Костик Л. М., Осадца, Я. М. // Вісник Хмельницького національного університету: 2023. — Том 1. — №5. —С.

12. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіджний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.