

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
НУБІП України

02.01 – МР 175 «С» 2021 01.02.21 019. ПЗ

СТАДНІЦЬКИЙ МИКОЛА ОЛЕГОВИЧ
НУБІП України

2021
НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.3:631.24(477.81)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

ПОГОДЖЕНО

Завідувач кафедри

Директор Інституту енергетики,
автоматики і енергозбереження

електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

Каплун В.В.

(підпис)

Жильцов А.В.

(підпис)

« ___ » _____ 2021 р.

« ___ » _____ 2021 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

Розробка та дослідження світлодіодного світильника-опроміювача та системи його живлення.

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика / електротехніка та електромеханіка

Магістерська програма / Енергоінжиніринг // Електротехніка та електротехнології /

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Керівник магістерської роботи

Д.Т.Н., проф
(науковий ступінь та вчене звання)

Червінський Д.С.

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Стадницький М.О.

(підпис)

(ПІБ)

Нормоконтроль К.Т.Н.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.

(ПІБ)

Консультант К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Чуєнко Р.М.

(ПІБ)

КИЇВ – 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
електротехнологій

д.т.н. проф.

Жильцов А.В.

(підпис)

2021 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Стадніцькому Миколі Олеговичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Магістерська програма Енергоінжиніринг / Електротехніка та електротехнології / Світлотехніка і джерела світла

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: «Розроблення і дослідження світлодіодного світильника-опромінювача та системи його живлення.»

затверджена наказом ректора НУБіП/України від 01.02.2021 № 175"С"

Термін подання завершеної роботи на кафедру 12.11.2021

Вихідні дані до магістерської роботи

«Правила устрою електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Розробка макету установки та програми експериментальних досліджень по визначенню ефективного спектру оптичного випромінювання для вирощування рослин
2. Розробка методики та проведення досліджень по визначенню ефективного спектру та інтенсивності випромінювання світлодіодного світильника для теплиць
3. Розробка універсального світлодіодного світильника-опромінювача
4. Розробка і вибір схеми і драйвера живлення світлодіодного світильника-опромінювача
5. Висновки та пропозиції по магістерській роботі

Дата видачі завдання 15.11.2020 р.

Керівник магістерської роботи, проф. _____

Червінський Л. С.

(підпис)

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____

Стадніцький М.О.

(підпис)

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

НУБІП України
 Робота складається з вступу, чотирьох розділів та основних висновків викладена на 87 аркушах друкованого тексту в тому числі: 10 таблиць, 16 рисунків, з використанням 43 джерел інформації.

НУБІП України
Актуальність теми: В сучасних аграрних технологіях велику увагу приділяють підвищенню кількості і якості сільськогосподарської продукції. Одним з важливих екологічних факторів впливу на продуктивність рослин є оптичне випромінювання, зокрема, його інтенсивність, тривалість та спектр випромінювання. Тому, розробка світильника-опромінювача, який забезпечуватиме можливість керування спектром та інтенсивність випромінювання має важливе практичне значення.

НУБІП України
Мета дослідження: Метою роботи є обґрунтування і розробка практичного світлодіодного світильника-опромінювача та системи його живлення.

НУБІП України
Об'єкт дослідження: Процес взаємодії енергії оптичного випромінювання з складовими фотосинтезу в рослинах при їх зростанні

НУБІП України
Предмет дослідження: Визначення ефективних спектрів та доз випромінювання для різних етапів розвитку рослини і розробка відповідного світлодіодного світильника

Задачі дослідження:

- НУБІП України
- 1) Проаналізувати ефективність застосування енергії фотосинтезного випромінювання в рослинництві
 - 2) Обґрунтувати, розробити і дослідити універсальний світлодіодний світильник-опромінювач для вирощування рослин в теплицях.

НУБІП України
Ключові слова: Спектр фотосинтезної дії, оптичне випромінювання, світлодіодний світильник, режими опромінювання

ЗМІСТ

НУБІП України

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....6

ВСТУП.....7

РОЗДІЛ 1. РОЗРОБКА МАКЕТУ УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ЕФЕКТИВНОГО СПЕКТРУ
ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН 9

1.1. Розроблення макету фітотрону для вирощування рослин.....9

1.2. Розробка методики досліджень по визначенню ефективного спектру та

інтенсивності випромінювання світлодіодного світильника для
теплиць.....14

1.3. Дослідження впливу зміни інтенсивності фотосинтезного

випромінювання на ріст рослин.....17

1.4.. Дослідження спектрального впливу фотосинтезного випромінювання
на зростання рослин.....20

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА-ОПРОМІНЮВАЧА ТА СИСТЕМИ ЙОГО ЖИВЛЕННЯ.26

2.1. Обґрунтування застосування світлодіодів для освітлення рослин в
захищеному ґрунті.....26

2.2. Електричні, оптичні та теплові характеристики світлодіодів.....29

2.3. Розрахунок параметрів підключення світлодіода до джерела живлення.. 31

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕПЛИЧНИХ СВІТЛОДІОДНИХ СВІТИЛЬНИКІВ-

ОПРОМІНЮВАЧІВ І СХЕМИ КЕРУВАННЯ.....36

3.1 Обґрунтування схеми з'єднань світлодіодів у матриці світильника-
опромінювача.....36

3.2. Вибір драйвера живлення світлодіодного світильника.....39

НУБІП України

3.4. Розробка системи живлення світлодіодних опромінювачів для споруд захищеного ґрунту.....44

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $\Delta\lambda$ – інтервал довжини хвилі, виділений монохроматором
- P_{λ_0} – потужність випромінювання ліній еталонного джерела, Вт
- ρ_{λ_0} – спектральна щільність безперервного випромінювання еталонного джерела, Вт/нм
- b – ширина розкриття середньої щілини подвійного монохроматора (або вихідної щілини одинарного прилада), мм
- D_{λ} – дисперсія монохроматора, мм/нм
- $K_{\text{абс}}$ -- коефіцієнт переходу до абсолютних енергетичних одиниць
- N – нормований світловий параметр (світловий потік, лм, або сила світла, св)
- 683 – світловий еквівалент променистої потужності, лм/Вт
- ρ'_{λ_0} – відносна спектральна потужність, яка створюється світловим еталонном
- ϕ'_{λ} – відносна спектральна чутливість обраного приймача випромінювання
- v_{λ} – коефіцієнт відносної видимості
- $\rho_{\lambda_0}, P_{\lambda_0}$ – відповідно потужності випромінювання безперервного фону та випромінювання ліній еталонного джерела (в енергетичних одиницях)
- λ_1, λ_2 – межі чутливості досліджуваного приймача випромінювання, нм
- $i_{\lambda i}$ – величина сигналу для даного положення теплового приймача відносно вихідної оптичної осі
- Δb – фіксована відстань від оптичної осі
- N – число зміщень теплового приймача вздовж фокальної площини
- λ – довжина хвилі спектра збуджуючого люмінофора, нм
- τ_{λ} – спектральний коефіцієнт пропускання
- ρ_{λ} -- спектральний коефіцієнт відображення
- a_{λ} -- спектральний коефіцієнт поглинання
- $\frac{K_{\phi} \cos \beta}{S_{xy}}$ характеризує геометричні параметри;

ВСТУП

На сьогоднішній день одним із найзатратніших напрямків у тепличному господарстві є витрати на електроенергію використану на освітлення та опромінення рослин. У зв'язку з тим, що до теперішнього часу в нашій країні і цілому світі немає повноцінного рослинницького джерела світла, створення такого джерела є важливим завданням для подальшого розвитку світлокультури рослин. Враховуючи перспективність і стрімкий розвиток LED технологій, які в наш час вже є повністю доступними для населення, як по технічних параметрах, так і по ціні, витрати на опромінення можна скоротити більш ніж на 70%. У цьому плані становлять великий інтерес наукові дослідження з вивчення спектрального складу світла, найбільш ефективного для вирощування конкретних рослин.

Тому перед нами стояли завдання з'ясувати або уточнити:

1) які інтенсивності ФАР в умовах фітотрона є найбільш ефективними для вирощування цибулі і салату;

2) яка специфічність дії на ріст і фотосинтез у трьох основних областей ФАР - синьої, червоної і зеленої;

3) як змінюється продуктивність цибулі та салату в залежності від співвідношення частин спектрального складу світла;

4) який розподіл енергії по спектру ФАР бажано мати в джерелі світла для світлокультури цибулі та салату.

З огляду на ту обставину, що в природних умовах зростання рослини, ніколи не отримують чисто червоне, чисто синє або чисто зелене світло, а отримують їх суму з різними максимумами випромінювання в залежності від щільності посіву та географічної широти місця знаходження теплиці, ми використовували джерела, які мають максимум випромінювання в тій або іншій області спектра, - кольорові світлодіодні лампи.

При визначенні біологічної ефективності джерела штучного світла або окремих областей спектра в якості основних критеріїв оцінки ми брали показники інтенсивності фотосинтезу і швидкості росту – основні фізіологічні процеси, що визначають продуктивність рослин. Дані характеристики досліджувались на фітотронній установці.

При постановці і проведенні фітотронних досліджень ми виходили з того, що для рослин життєво-важливим є випромінювання з довжинами хвиль: червоне (600-720 нм), а також синє та фіолетове (380-490 нм).

Випромінювання червоної області спектру є основним фактором для проходження фотосинтезу і значним чином впливає на швидкість дозрівання плодів, а синьої області – в основному стимулює утворення білків та регулює швидкість розвитку. А що стосується жовтого жовтого (565-600 нм) та зеленого (490-565 нм) випромінювання, то вважається, що вони не відіграють

особливої ролі в розвитку рослин. Враховуючи те, що на певних етапах дозрівання рослин спектральний склад опромінювачів необхідно змінювати, можна зробити висновок, що світлодіоди це реальне раціональне і економічно правильне рішення даної проблеми.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1.

Н] РОЗРОБКА МАКЕТУ УСТАНОВКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ЕФЕКТИВНОГО СПЕКТРУ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН

НУБІП України

1.1. Розроблення макету фітотрону для дослідження спектрів впливу на рослини рослин

Фотосинтез органічних речовин в рослинах є основою їх розвитку і життєдіяльності. Роль хлорофілу у фотосинтезі вперше визначив К. А. Тімірязєв, показавши, що хлорофіл, поглинаючи енергію випромінювання, бере активну участь в окисно-відновній реакції, в результаті якої з води і вуглекислого газу утворюється органічна речовина і вільний кисень. Світло, отримане різними пігментами, витрачається на різні цілі: пігменти з піком чутливості в червоній області спектра відповідають за розвиток кореневої системи, дозрівання плодів, цвітіння рослин; пігменти з піком поглинання в синій області відповідають за збільшення зеленої маси; зелена частина спектра випромінювання корисна для фотосинтезу щільних листя і листя нижніх ярусів, куди сині та червоні промені майже не проникають. Системні проведені дослідження вченими різних країн показують, що спектр фотосинтезної дії є

узагальнюючим для всіх рослин, але різні частини спектру випромінювання по-різному впливають на їх розвиток.

Для визначення впливу оптимальної кольорової гамми, та кількісного співвідношення світлодіодів різного спектру, порівняння впливу цих світлодіодів та визначення їх оптимального кількісного співвідношення на монтажних модулях для створення комбінованого спектрального складу випромінювання різного спектрального складу і інтенсивності було розроблено спеціальний багатофункціональний світлодіодний модуль-світильник. Цей світильник було розміщено в створену спеціальну фітотронну установку.

Експериментальна установка – фітотрон для дослідження впливу різних комбінацій світлодіодних модулів на зростання рослин приведена на рис. 1.1

нижче.

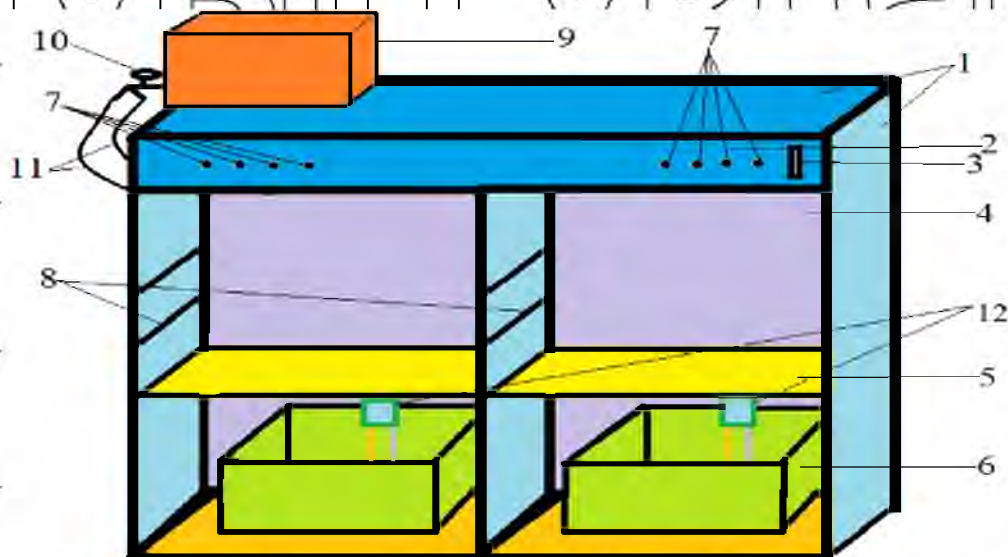


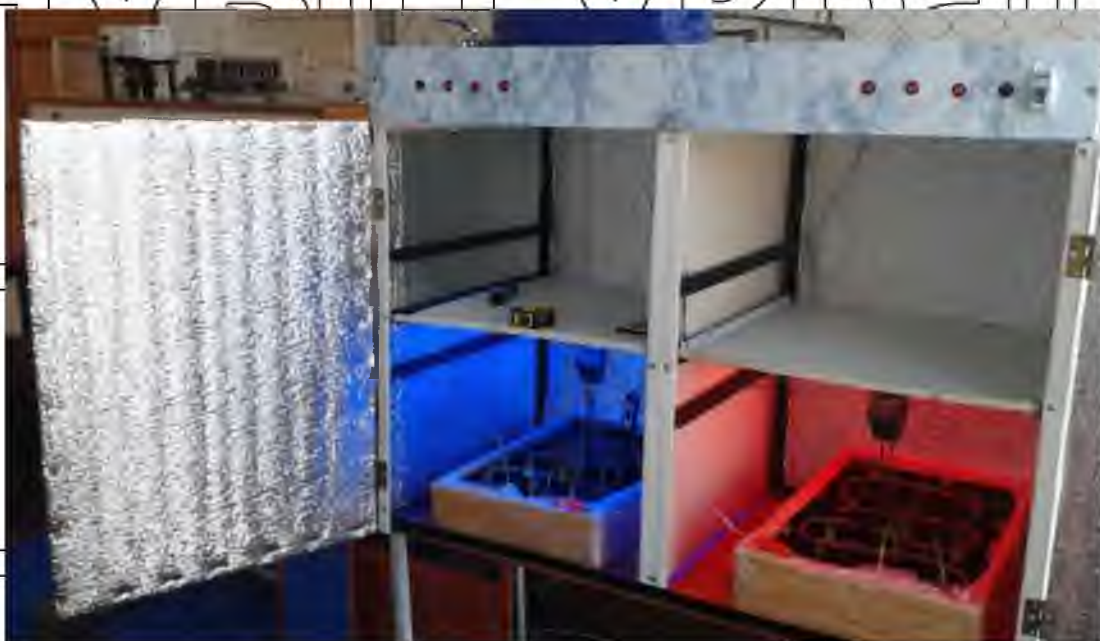
Рис. 1.1. Експериментальна установка – фітотрон.

Фітотрон складається із наступних складових елементів:

1. Шафа з термоізоляційним покриттям . 2. Панель керування роботою світлодіодних модулів. 3. Автоматичний вимикач. 4. Задня стінка з термоізоляційним покриттям. 5. Світлова панель із двох світлодіодних модулів. 6. Лоток для вирощування рослин. 7. Кнопки вибору спектру опромінення (комбінацій світлодіодів). 8. Полиці для регулювання висоти підвісу світлодіодних модулів. 9. Ємність для води (крапельного зрошення). 10. Край регулювання подачі води. 11/ Силіконові трубки ґрунтового поливу. 12. Мультиметр ЕТР-301 (вологомір ґрунту, люксметр, рН-метр)

Експериментальна установка- фітотрон побудована наступним чином:

- Габаритні розміри: (1010×820×560) мм
- Каркас корпусу виготовлений з металопрокатного кутового профілю 20×20мм.
- Бокові та середня стінки з листового металу 1мм і покриті зсередини термоізоляційним світло відбиваючим покриттям типу «Isover kt-40 AL».
- Низ (піддон) виготовлений дерево-клеєвої плити OSB, яка має хороші термо та гідроізоляційні параметри.
- Автоматичний вимикач АСКОУкрем С4 для захисту установки від коротких замикань.
- Задня стінка (звонна) виконана з картону 4мм.



НУБІП України

Рис.1.2. Зовнішній вигляд експериментальної установки – фітотрону для дослідження впливу оптичного випромінювання на зростання рослин.

В якості джерел оптичного випромінювання застосовуються світлодіодні модулі, набрані із світлодіодів з різним спектром випромінювання, які розміщені на гідвісному рухомому каркасі. Цей модуль має змогу змінювати висоту над рослинами в процесі їх зростання для підтримання заданого режиму опромінення.

Світлодіодний модуль змонтований на плиті з розмірами: $500 \times 500 \times 0,8$ мм, в наступній послідовності. (Рис.1.3.).

1 – RGB світлодіоди SMD 5050 (мультиспектровий).

2 – Сині світлодіоди CMD3528.

3 – Червоні світлодіоди CMD 3528.

4 – Білі світлодіоди CMD 3528.

Всередині корпусу розміщується лоток для вирощування рослин, $400 \times 400 \times 80$ мм.

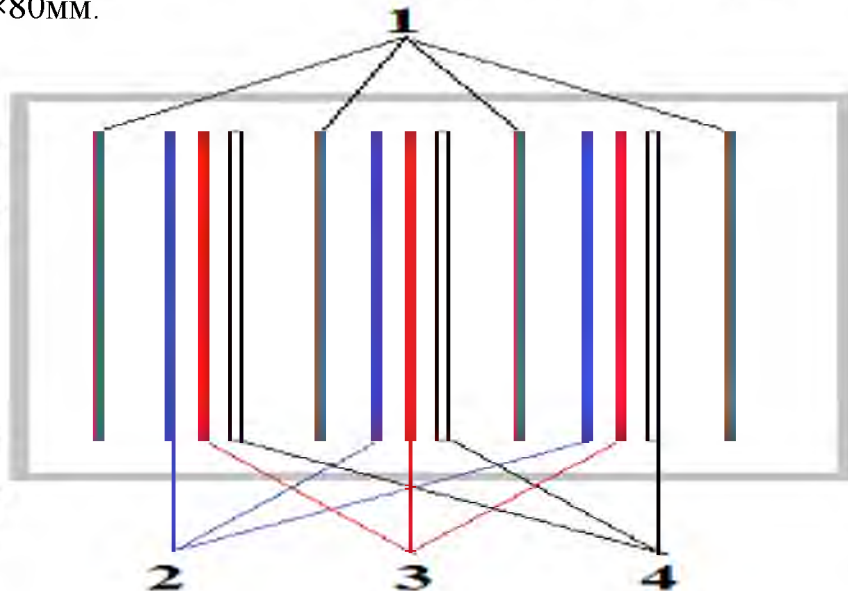


Рис.1.3. Послідовність розміщення різноспектральних світлодіодних лінійок на поверхні площини модульного світильника.

НУБІП України

На верхній зовнішній частині фасаду шафи розміщено кнопки контролю світлодіодних комбінацій 7.

Зверху корпусу фітотрена розміщено бачок з поливним розпилювачем – пластикова канистра 10 л, до якої підключено через регульований кран магістраль крапельного зрошення. Магістраль крапельного зрошення складається з водопровідного крану 25 мм, та силіконових трубок діаметром 4 мм з відповідною мережею мікроотворів для витікання води, розміщених на ґрунті. Контроль параметрів мікроклімату проводиться за допомогою мультиметру типу ETP-301, який дозволяє почергово вимірювати вологість, освітленість та рівень pH ґрунту (рис. 1.4.)



Рис. 1.4. Мультиметр ETP-301 для вимірювання освітленості, температури та вологості ґрунту.

Періодичний контроль рівня освітленості у видимому спектрі оптичного діапазону проводиться люксметром типу Licht 123.

Контроль температури ґрунту також періодично перевірявся агрономічним термометром TME 0264 із шупом 120 мм. Також періодично контролювалась вологість ґрунту з періодичним поливом.

Живлення всіх світлодіодних стрічок світлодіодного модуля опромінювальної установки виконано від спеціального стабілізованого джерела живлення АТХ-250PFR з постійним електричним струмом напругою 12 В.

Для управління інтенсивністю випромінювання світлодіодів RGB та послідовністю їх вмикання у світлодіодних модулях застосовано мікроконтролер МК-LED-RGB3×2А з інфрачервоним пультом дистанційного керування.

Принципова електрична схема живлення та керування роботою світлодіодних панелей приведена на рис. 3.5.

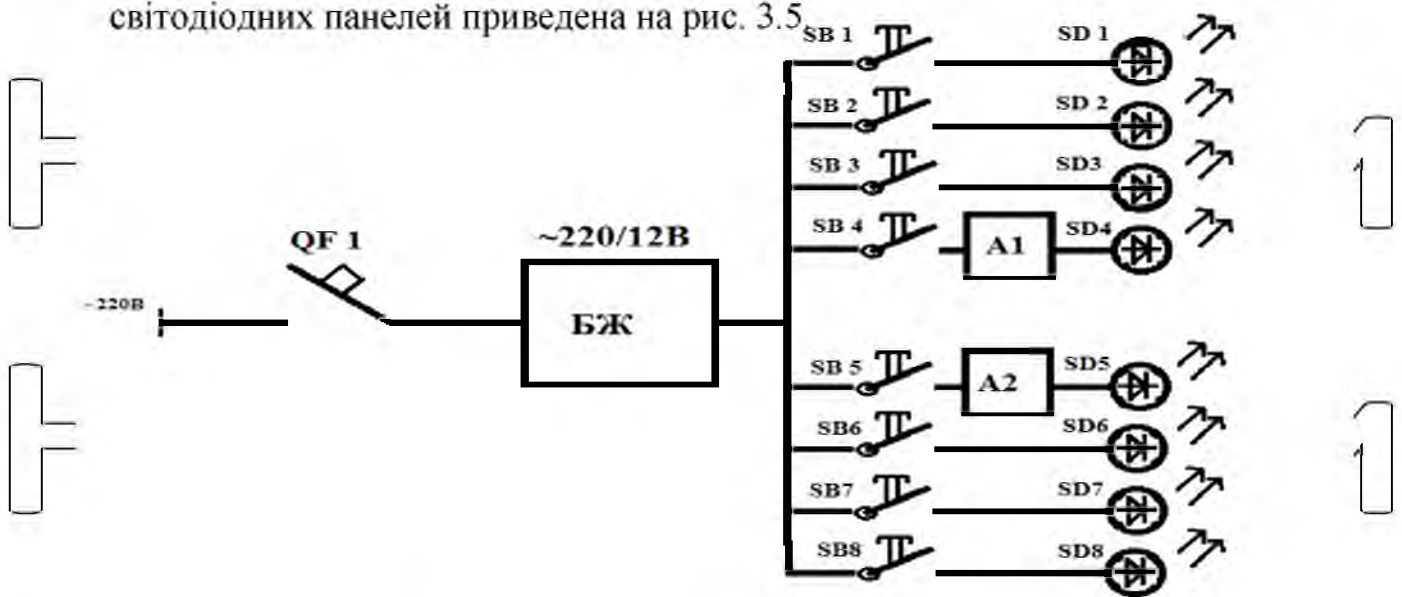


Рис. 3.1.5 Принципова електрична схема живлення та керування роботою світлодіодних панелей у фітогоні.

Умовні позначення в схемі:

QF – Автоматичний вимикач С 4.

БЖ – Блок живлення 220/12В, 250W.

SB1-8 – Кнопки контролю комбінацій світлодіодних стрічок.

A1,A2 – Мікроконтролери МК-LED-RGB3×2А, для управління мультисвітловими світлодіодними стрічками.

SD1,6 – Червоні світлодіоди.

SD2,7 – Сині світлодіоди.

SD3,8 – Білі світлодіоди.

SD4,5 – RGB-світлодіоди.

НУБІП України

За допомогою даної експериментальної установки - фітотрона були

проведені наступні дослідження:

- дослідження по впливу оптичного випромінювання різного спектрального складу на схожість і зростання цибулі та салату.

- дослідження впливу зміни інтенсивності та періодичності опромінювання на схожість та зростання різних цибулі і салату з метою визначення їх ефективних значень і впровадження їх в тепличне виробництво.

Дослідження проведено в п'ятикратній повторності на цибулі сорту та салатах.

1.2. Розробка методики досліджень по визначенню ефективного спектру та інтенсивності випромінювання світлодіодного світильника для теплиць

В якості досліджуваних рослин були взяті салат (сорті Айсберг, Ромен), цибуля- на перо (сорт Параде). Грунт, згідно рекомендацій, мав наступний склад - перегній, дернову землю і пісок в пропорції 2-2-1. Тепер, цей склад необхідно утрамбувати в готові для посадки салату ящики і трохи полити теплою водою з марганцівкою, дуже легким розчином. Після, робили канавки під посадку салату, глибиною 1-1,5 см і відстанню між ними близько 10-12 см.

Вологість в місці вирощування салату підтримували на рівні 60-80%, а температуру - +16-18°C. В іншому випадку, якщо температура піднімається, листя салату стають менш соковитими і гіркими, а самі рослини викидають квітконоси, що дуже псує врожайність.

При вирощування цибулі до моменту проростання зелені необхідно підтримувати температуру в межах +22 градусів, при появі пера, її знижують

НУБІП України

до 16 градусів. Рослини вирощували в ґрунтовій культурі при вологості повітря 75-80% при різній інтенсивності ФАР і світловому дні 16 год. Інтенсивність світла (опромінення) вимірювалася в Вт / м² ФАР. Екстракцію хлорофілів проводили сумісно з біологами із застосуванням охолодженого 85% -ного ацетону. Інтенсивність фотосинтезу визначали по зміні концентрації CO₂ в замкнутій системі, з'єднаній з інфрачервоним газоаналізатором («Linkalor»). Визначення проводили на листках, не відділених від рослин з використанням камери-кліщів. Площу листя визначали ваговим методом на геометричних вимірюваннях. Поглинання і відбивання фотосинтезноактивної радіації (ФАР) листом визначали на спектрофотометрі СФ-4 (СРСР).

Наприклад, починаючи з 7 дня після посадки 6 паростків цибулі зійшли на задалегідь заготовлених ділянках всередині фітокамер, розрахованих на дослідження впливу опромінення на ріст листя і біомаси. Сходи тривали з тижневим інтервалом і остаточно все паростки зійшли через 28 днів. Потім виміряли діаметр паростка, співвідношення поверхня / площа листя і масу наймолодшого листя на даному етапі росту рослини була виміряна специфічна площа листя, фотосинтез листя і його уст'їчна провідність.. Для порівняння ефективності фотосинтезу, в даних дослідженнях, була вирахована біомаса паростка. Експеримент повторювали 3-4 рази для кожного режиму опромінення. Для підрахунку середнього індексу площі листя (СПЛ) був використаний стандартний загальноприйнятий аналіз росту рослин. Також був встановлений рівень асиміляції (УА) та рівень росту рослини (РРР) за 7-денний інтервал часу, засновані на середніх показниках. Було прийнято 5% рівень значущості, потім дані були піддані дисперсійному аналізу, супроводжуваному застосуванням методу множинного порівняння Туки. У таблицях і на малюнках наведені середні арифметичні з 4-5 біологічних повторностей і їх стандартні помилки.

НУБІП України

1.3. Дослідження впливу зміни інтенсивності фотосинтезного випромінювання на ріст рослин.

Кількісну зміну досліджуваного показника впливу інтенсивності та спектру оптичного випромінювання, зокрема, зелену масу рослини, визначали за оптимізаційним виразом при відповідній повторності проведення кількості досліджень

$$N_1 = \frac{E}{a_0 + a_1 \cdot E + a_2 \cdot E^2}, \quad (1.1)$$

Де N_1 - оптимальне значення вимірюваного параметру рослини, кг/м²,

E - фотосинтез на впроміненість, фіт/м²; a_0, a_1, a_2 - показники, які визначаються із системи рівнянь

$$\begin{aligned} \sum_1 \left(\frac{Y_0}{X_0} \right) &= n_1 \cdot a_1^1 + a_2 \cdot \sum_1 N \\ \sum_2 \left(\frac{Y_0}{X_0} \right) &= n_2 \cdot a_1^1 + a_2 \cdot \sum_2 N \\ a_1^1 &= a_1 + X_1 \cdot a_2 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Де n_1, n_2 - число варіантів, що підсумовуються у відповідно, верхній і нижній половині першого стовпчика таблиці 1.1 впливу фотосинтезної опроміненості на ріст рослин.

НУБІП України

Табл. 1.1

Результати обчислень по визначенню рівняння залежності росту опромінюваних рослин від рівня фотосинтезної опроміненості

E, фгт/м ² (X)	N (Y)	X/Y	X _a x-12	Y _a x/y -0,231	Y _a /X _a	Y ₁
2	14,5	0,082	-10	-0,149	0,0149	20
7	40,0	0,175	-5	-0,056	0,0112	45
X ₁ =12	52,0	x/y=0,231	0	0	0	52
Σx ₁ =9	-	-	-	-	Σ(Y/X)=0,0261	-
16	55,0	0,273	3	0,042	0,014	53
20	50,0	0,400	8	0,169	0,21	62
Σx ₂ =35	-	-	-	-	Σ(y/x)=0,035	-
Σx=56	-	Σx/y=1,181				-

Обчисливши систему рівнянь 1.2/ визначаємо значення коефіцієнтів a₁ a₂, відповідно

a₁ = 0,00849; a₂ = 0,00034. Коефіцієнт a₀ визначаємо з рівняння вибірки

$$\Sigma \frac{x}{y} = q \cdot a_0 + a_1 \cdot \Sigma x + a_2 \cdot \Sigma x^2 \quad (1.3)$$

Де q - об'єм вибірки.

Маємо a₀ = 0,0812.

Тепер записуємо рівняння для визначення залежності виходу маси опромінюваної рослини від рівня опроміненості

$$N^1 = \frac{1000 \cdot E}{81,2 + 8,49 \cdot E + 0,34 \cdot E^2} \quad \text{кг/м}^2 \quad (1.4)$$

НУБІП України

Регресійна похибка при цьому становить

$$m_{x-y} = \sqrt{\frac{(N - N^1)^2}{q - 3}} = 2,2 \quad \text{кг/м}^2 \quad (1.5)$$

НУБІП України

Рівень ефективної опроміненості при якому продуктивність даних досліджень найбільша визначаємо з виразу

$$E_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} = 15,5 \quad \text{фВт/м}^2 \quad (1.6)$$

НУБІП України

Таким чином, з наших експериментальних пошукових дослідження встановлено, що при підтриманні заданих параметрів мікроклімату в

фітотроні максимальна продуктивність вирощування цибулі буде при

опроміненості в 15,5 фВт/м², а для салату інтенсивність опромінювання

залежить від сорту і має більше значення 40...60 Вт/м². Результати

досліджень, після математичної обробки приведено на рис.1.5..

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

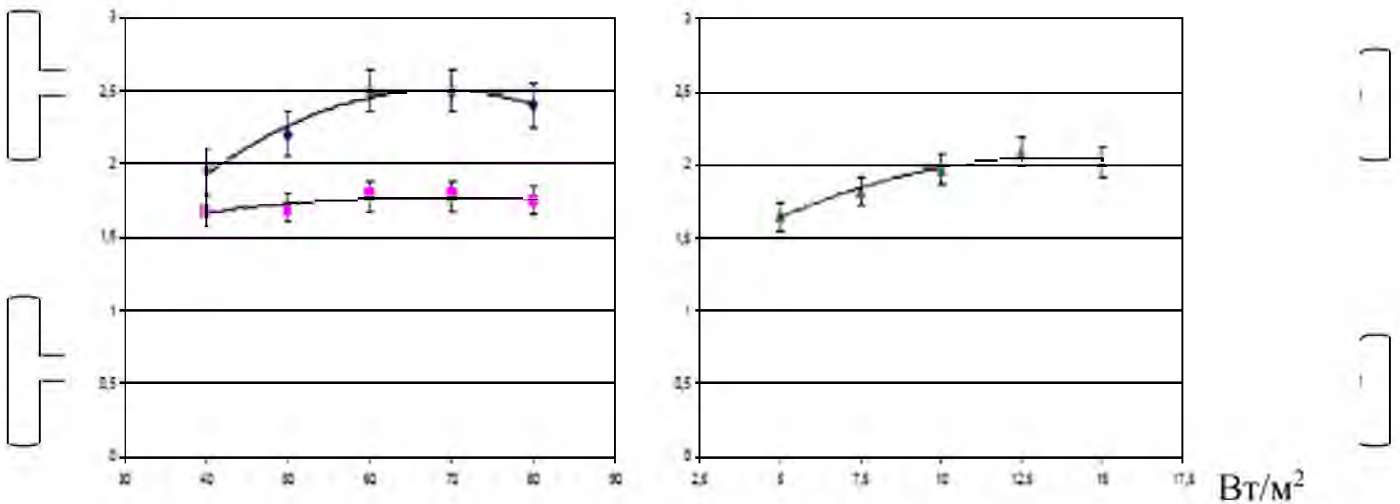


Рис. 1.5. Залежність продуктивності салату (сорт Айсберг, Ромен зліва) і цибулі (праворуч) від інтенсивності фотосинтезно активної радіації (ФАР) комбінованого світлодіодного випромінювання.

1.4.. Дослідження спектрального впливу фотосинтезного випромінювання на зростання рослин.

Яка ж реакція рослин на опромінення лу́тьрьома основними областями ФАР - синьою, червоною або зеленою? Це питання важливе для світлокультури рослин в зв'язку з розробкою нових світлодіодних рослинницьких джерел світла, вона представляє також і теоретичний інтерес, оскільки у всіх вищих рослин є різні фоторецептори, що забезпечують поглинання енергії по всій області ФАР. [15]. Дослідження дії світла різного спектрального складу на фотосинтез, ріст і продуктивність рослин ми проводили при тривалому вирощуванні рослин під випромінюванням червоних, синіх, зелених або комбіновану світлодіодів однакової інтенсивності.

При цьому дослідження проводились за п'ятьма варіантами вирощування під червоними світлодіодами, вирощування під синіми світлодіодами, вирощування під зеленими світлодіодами, вирощування під червоними, зеленими і синіми світлодіодами, у пропорції відповідно усередненому спектру фотосинтезної дії (червоний:зелений:синій = 10:4:5, а

також червоний та синій світлодіоди в пропорції (4:2). Результати досліджень показано частково на рис. 1.6, рис. 1.7, рис. 1.8, та узагальнено в табл. 1.2.

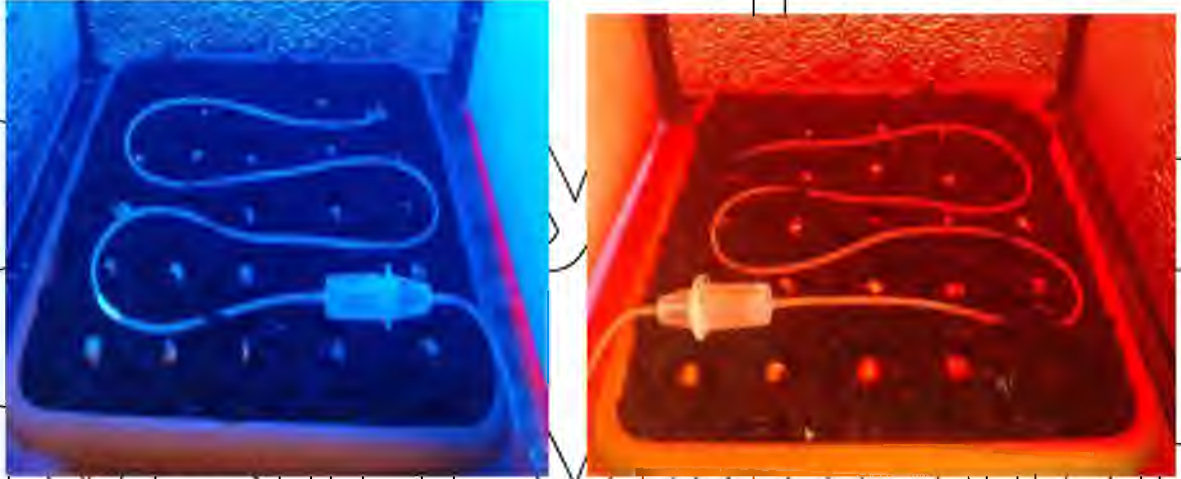


Рис. 1.6. Фотознімки дослідницьких камер фітотрону з опромінюванням синіми та червоними світло діодами з висадженою цибулею



Рис. 1.7. Фотознімки зростання цибулі під різним однорідним випромінюванням (синіми та червоними світлодіодами).

Нижче на рис. 1.8 приведено усереднені зразки проростків цибулі вирощених під однорідним випромінюванням синього або червоного кольору.



Рис. 1.8. Фотознімки зразків стебла та кореневої системи вирощуваної цибулі під синіми та червоними світлодіодами

З рисунка видно, що синє світло сприяє зростанню стебла, а червоне світло сприяє зростанню кореневої системи.

Узагальнюючі результати експериментальних досліджень зведено в таблиці нижче.

Табл. 1.2. Результати досліджень спектрального впливу оптичного випромінювання на зростання рослин

Колір світлодіодних джерел	Листя	Біомаса рослини		Загальна біомаса рослин г	Хлорофіл (a+b), мг*дм ⁻²	Поглинання CO ₂ , мг*дм ⁻² *год ⁻¹
		Стебло	Коренева система			
Синій	31,66±2,38	29,33±1,70	610,02±0,68	2204,33±3,34	18,078±0,31	24,5±1,36
Червоний	42,2±3,87	34,4±1,91	12,1±1,23	246,83±4,43	5,0±0,09	21,3±1,25
Зелений	39,66±1,07	31,66±1,70	8,3±0,37	178,95±8,15	5,01±0,06	18,2±1,45

Комбінований	48,0±1,36	40,66±1,365	18,0±0,682	322,6±4,778	5,78±0,2	22,4±1,01
Червоний	55,0±2,68	42,16±1,365	13,66±1,023	296,83±4,43	5,6±0,22	20,7±1,2
синій (4/2)						

Аналіз результатів, наведених в табл. 1, 2, показує, що найкращим у спектральному відношенні є комбінований світильник. Загальна маса рослини під таким опроміненням склала 322,6±4,778 г.

У цьому варіанті рослини були правильно сформовані і мали найбільшу масу. Хороший результат був отриманий також під випромінюванням червоних світлодіодів з додавкою синього світла, загальна маса рослин склала 296,83±4,43. Причому тут завжди спостерігався інтенсивний ріст площі листя, ніж під зеленим і синім світлом.

Найменший урожай був отриманий під зеленим світлом. Ці рослини мали тонкі листя з низькою питомою і оптичною щільністю, меншим вмістом Хлорофілу і гіршими показниками інтенсивності фотосинтезу в перерахунку на одиницю площі листа. У рослин на синьому світлі, навпаки, спостерігався загальмований ріст листя і осьових органів. Питома щільність листя, вміст у них пігментів, інтенсивність фотосинтезу мали при цьому максимальні показники, а площа листя була найменшою. За масою рослини значно поступалися варіанту на червоному світлі.

Отже, червоне світло з максимумом випромінювання 640-670 нм сприяє інтенсивному росту листя і осьових органів. На червоному світлі ми спостерігали найвищий ростовий ефект, стимульований, ймовірно, і фоторецептором червоного світла - фітохромом. Синє світло гальмує ріст стебла і площу листя, що призводить до формування рослин з низькою продуктивністю. У зеленій області спектра (максимум випромінювання 520-550 нм) формувалися тонкі листя з меншим числом клітин і мітохондрій та найнижчим фотосинтезом на одиницю площі листя, але найвищим

фотосинтезом в розрахунку на хлоропласт; продуктивність рослин була низькою.

Таким чином кожна з трьох основних областей ФАР (синя, зелена і червона), взята окремо, мало придатна для вирощування рослин і тільки випромінювання, взяте в певному співвідношенні енергії по всьому спектру,

може забезпечити вирощування повноцінних рослин. Сильне порушення цього співвідношення, наприклад, коли рослини отримують максимум випромінювання тільки в синій області спектра, призводить до формування

низькорослих рослин з високим фотосинтезом, але низькою продуктивністю. Сильний «перекіс» по спектру в червону область спектра,

навпаки, призводить до зайвого росту вегетативних органів на шкоду генеративних.

Спектральний склад світла, так само як і його інтенсивність, є сильним морфогенетическим фактором, що регулює як ростові, так і фотосинтетичні реакції в системі цілої рослини. При цьому бажано мати наступне співвідношення енергії по спектру ФАР в рослинницьких лампах

для багатьох сільськогосподарських рослин: 25-30% -у синьій області (380-490 нм), 20% в зеленій (490-590 нм) і 50% - в червоній області (600-700 нм).

Нижче наводяться максимальні показники продуктивності рослин, отримані в умовах фітотронах при оптимальних світлових режимах (з дотриманням комплексу інших факторів). У цих умовах фотосинтез підтримувався

протягом усього світлового дня без полуденних депресій, добове засвоєння CO₂ було значно вище, ніж при сонячному освітленні, фотосинтез і ріст були добре збалансовані.

На підставі результатів вищенаведених дослідів можна зробити висновок про те, що цибуля відноситься до числа рослин, для яких максимум випромінювання в джерелі повинен бути в червоній області спектра.

Інтенсивність світла впливає на швидкість фотосинтезу. При низькій інтенсивності світла переважають процеси дихання рослин (енергія для

життєдіяльності витягується за рахунок розпаду раніше синтезованих речовин). При підвищенні інтенсивності світла лінійно збільшується фотосинтез.



Рис.1.9. Фотознімки вирощування цибулі та розсади салату під однаковим спектром випромінювання

При низькій інтенсивності світла рослини виходять витягнуті. Фотосинтезне випромінювання великої інтенсивності дозволяє збільшити урожай, значно знизити терміни вегетації. Інтенсивне випромінювання дозволяє скоординувати фотосинтез, ріст і розвиток рослин [8].

Встановлена ефективну норму світлоїдного опромінення при рекомендованих параметрах мікроклімату в теплиці, для вирощування розсади - до 20 фіт/м² (40 Вт / м² ФАР) з фотоперіодом 14 годин, для вирощування на продукцію - до 50 фіт/м² (100 Вт / м² ФАР) з фотоперіодом 16 годин [7].

Мінімальний для росту рослин рівень інтенсивності світлового потоку повинен бути понад 2...5 фт/м². Мінімальні середньоденні рівні інтенсивності світлового потоку, при яких рослини можуть нормально розвиватися, цвісти і плодоносити, - 15 фт/м². Для вигонки розсади - 20 ... 25 фт/м². Для формування господарсько-корисної врожаю - 50...100 фт/ м². При потужності вище 200 фт/м² відбувається перенасичення фотосинтезу рослини[7].



Рис. М10. Вихід продукції цибулі «на перо» в кінці досліду.

Висновки до розділу.

Пошуковими експериментальними дослідженнями встановлено, що рослинам в різні періоди росту необхідні різні рівні інтенсивності світла і спектральний склад випромінювання, що доводить до них в умовах їх

екологічної ніші. Для правильного розвитку рослин важливо, щоб вони отримували випромінювання, добре збалансоване по спектру із випромінюванням Сонця (для природної пори року) у відповідні фази розвитку. Зокрема, після висадки в землю повинне переважати червоне світло для розвитку міцної кореневої системи. Потім потрібно збільшувати синій колір спектру для стимуляції ростків рослини.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОГО СВІТЛОДІОДНОГО СВИТИЛЬНИКА-ОПРОМІНЮВАЧА ТА СИСТЕМИ ЙОГО ЖИВЛЕННЯ.

2.1. Обґрунтування застосування світлодіодів для освітлення рослин в захищеному ґрунті

Початок історії світлодіодів видимого діапазону оптичного спектру датується 1962 р., коли Холоняк та Бевака у журналі Applied Physics Letters опублікували повідомлення про когерентне випромінювання видимого світла, що спостережене на р-n-переході GaAsP. Хоча це світіння було виявлено при низькій температурі, виявилось, що світлодіоди GaAsP працюють і при кімнатній температурі.

Нік Холоняк, який у 1962 р. працював у відділенні General Electric (GE) у Сиракузі (шт. Нью-Йорк), а потім переїхав до університету штату Іллінойс, застосував метод ГФЕ для вирощування шарів GaAsP на підкладках GaAs. Цей метод підходить для формування великих епітаксціальних шарів як на дослідницькому, так і на промисловому обладнанні. У своїй книжці Холоняк (Holonyak, 2000) згадував, що уже при виготовленні перших світлодіодів він добре представляв сфери їх застосування: у світлових табло, семисегментних цифрових дисплеях та

алфавітно-цифрових індикаторах. Але незважаючи на явні успіхи, групі дослідників під керівництвом Холоняка ніяк не вдалося виготовити напівпровідниковий лазер, що працював би при кімнатній температурі (Holonyak, 1963, 1964). Це було пов'язано з тим, що при вирощуванні на

підкладках GaAs епітаксціальних шарів GaAsP деякі властивості таких систем значно погіршувались. Так вони змогли отримати напівпровідникові р-n-переходи з відмінними електричними характеристиками (Holonyak 14 et al., 1963 a), але оптичні параметри структур при цьому сильно

постраждали. Було виявлено, що при концентрації фосфору у шарі GaAsP, яка сягала 45-50%, ймовірність випромінювальної рекомбінації значно знижувалась, що пояснюється зміною співвідношення прямих та непрямих міжзонних оптичних переходів у шарах GaAsP (Holonyak et al., 1963 b,

1966; Pilkuhn, Rupprecht, 1964, 1965). Також було встановлено, що при досягненні 44% концентрації фосфору к. к. д. GaAsP пристроїв при 300 °К падає до 0,005% та навіть нижче (Maruska, Pankove, 1967).

Випуск перших світлодіодів із GaAsP було розпочато корпорацією GE на початку 60-х років. Вони випромінювали світло у червоній області видимого оптичного спектру. Оскільки ціна діодів була дуже високою (260 доларів США за одну штуку), їх випустили зовсім мало та в основному використовували в аматорській радіоелектроніці (Rostky, 1997).

Серійний випуск таких світлодіодів було налагоджено фірмою Монсанто. У 1968 р. ця компанія побудувала завод, на якому стали виготовляти порівняно недорогі світлодіоди із GaAsP.

Світлодіод (англ. Light-emitting diode, LED) – напівпровідниковий прилад з електронно-дірковий переходом, що створює оптичне випромінювання при пропусненні через нього електричного струму в прямому напрямку [10].

Сучасний світлодіод складається з напівпровідникового кристала на підкладці, корпусу з контактними висновками і оптичної системи. світіння

виникає при рекомбінації електронів і дірок в області р-п переходу при пропусненні електричного струму (через перехід електронів з одного енергетичного рівня на інший).

Світлодіоди випромінюють світло лише у вузькому спектрі, який визначається напівпровідниковим матеріалом. Тому представлені в продажу в основному світлодіоди різних монокольорів - синій, блакитний, зелений, янтарний, червоно-оранжевий, червоний і т. д. Отримати «складний» колір можна, як один із способів, спільним використанням в одному освітлювальному приладі світлодіодів різних типів. [53]

Основні сучасні матеріали, які використовуються в кристалах світлодіодів [50,52] - InGaN - сині, зелені і ультрафіолетові світлодіоди високої яскравості;

- AlGaInP - жовті, помаранчеві і червоні світлодіоди високої яскравості;

- AlGaAs - червоні та інфрачервоні світлодіоди;
- GaP - жовті й зелені світлодіоди.

Отримати білий колір випромінювання можна наступними декількома способами [51,53]:

1/ Змішуванням кольорів за технологією RGB: за допомогою лінзи або іншої оптичної системи змішуються випромінювання трьох світлодіодів (червоний, блакитний і зелений), щільно розміщених на одній матриці.

Даний спосіб дозволяє як отримати білий колір, так і змінювати кольорову діаграму при зміні струму через різні світлодіоди. При цьому забезпечується високий сумарний світловий потік при великій кількості світлодіодів в матриці. Але через нерівномірне відведення тепла з країв матриці світлодіоди нагріваються по-різному і по-різному змінюється їх колір за час експлуатації, та строк служби

2/ Ультрафіолетовий світлодіод покривають трьома прошарками люмінофорів, що мають випромінювання в блакитному, зеленому та

червоному діапазонах. В цьому випадку спостерігається схожість з світінням люмінесцентної лампи.

3. Близький до білого колір отримують нанесенням жовто-зеленого або зеленого плюс червоний люмінофорів на блакитний світлодіод. (Див. рис.2.1)

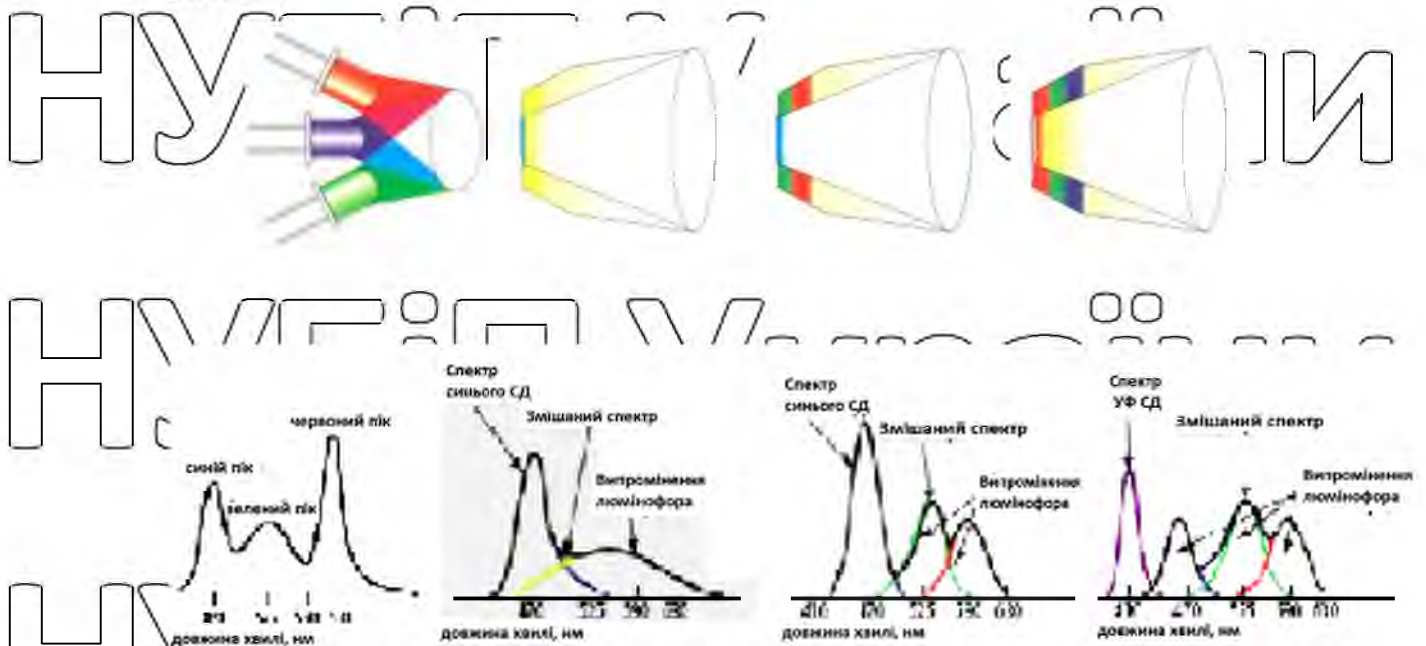


Рис. 2.1. Способи отримання білого кольору випромінювання світлодіода

Світлодіоди з люмінофорним покриттям дешевше RGB-матриць і дають хороший білий колір. Однак світловіддача через перетворення світла в шарі люмінофора менше, ніж у RGB-матриць. І до того ж рівномірне нанесення люмінофора є досить важким завданням в технологічному процесі. Також люмінофор старіє швидше, ніж сам світлодіод [1,9,50]

На відміну від ламп розжарювання, світлодіод керується величиною струму. Пов'язано це з тим, що падіння напруги на світлодіоді в прямому напрямку - характеристика непостійна, і розкид її значень для світлодіодів одного типу може становити до $\pm 10\%$ від середнього значення. Крім того, падіння напруги на світлодіоді буде змінюватися в залежності від умов експлуатації (температури навколишнього середовища, температури

кристала світлодіода і струму, що протікає через світлодіод, а також від часу роботи (внаслідок деградації кристала). Значення падіння напруги в прямому напрямку також буде різним для світлодіодів різного виконання.

Виходячи із цих міркувань, в електричних характеристиках прийнято вказувати робочий струм світлодіода, а характеристики світлового потоку і падіння напруги на світлодіоді даються при робочому струмі.

Як видно з рис.2.1., в робочих режимах світлодіода струм експоненціально залежить від напруги і незначні зміни напруги призводять

до великих змін струму. Оскільки світловий вихід прямо пропорційний

струму, то і яскравість світлодіода виявляється нестабільною. Тому струм необхідно стабілізувати. Крім того, якщо струм перевищить допустиму межу, то перегрів світлодіода може привести до його прискореного старіння [40,54].

Використовуючи світлодіоди різного кольору у різних пропорціях можна формувати світильники, які даватимуть потрібну кількість світла лише того діапазону, який активно споживають рослини. Це сприятиме швидкому і гармонійному розвитку рослини.

При правильному підборі світлового спектру, LED модулі на 85-100% ефективніші для процесу фотосинтезу ніж існуючі джерела фотосинтезного випромінювання, економічніші та мають значно більший термін безперервної роботи. [3]

2.2. Електричні, оптичні та теплові характеристики світлодіодів

Світлодіод являється низьковольтним приладом, який споживає від 2 до 4В постійної напруги при максимальному струмі до 50 мА. Світлодіоди,

які використовують для освітлення, споживають таку ж напругу але струм

може складати від сотень міліампер до 1 А. У модулі окремі світлодіоди

можуть бути включені послідовно та паралельно. Тоді сумарна напруга

може зрости до 12 та навіть до 24 В. При підключенні необхідно дотримуватися полярності, інакше вони можуть вийти з ладу.

Оптичні характеристики світлодіодів характеризуються світловим потоком, осьюовою силою світла та діаграмою спрямованості. Існуючі світлодіоди різних конструкцій та виробників здатні випромінювати в тілесному куті від 4 до 140 градусів. Колір визначається координатами кольоровості, колірною температурою та довжиною хвилі випромінювання. Для порівняння світлодіодів між собою та з іншими джерелами світла прийнято такий показник як світловіддача – величина світлового потоку на один ват електричної потужності. Так світловідатність ламп розжарювання становить 15 Лм/Вт, люмінесцентних — 60 Лм/Вт, металогалогенних — 85 Лм/Вт. В порівнянні з ними найсучасніший білий світлодіод досягає світловідатності до 100 Лм/Вт.

При розробці світлодіодних модулів слід також враховувати як світлодіод реагує на зміну температури. Слід враховувати два значення температури, по перше - це температура на поверхні кристала, і по друге - температура в зоні *pn*-переходу. Від першої залежить термін служби а від другої світловий вихід. В цілому з підвищенням температури яскравість падає із-за зменшення внутрішнього квантового виходу в зоні *pn*-переходу.

Тому при розробці світлодіодних світильників необхідно враховувати можливість відведення тепла. Слід також враховувати, що падіння яскравості у світлодіодів різних кольорів не однакове. Воно більше у червоних і жовтих і менше у зелених і синіх.

Яскравість світлодіодів можна регулювати за рахунок застосування методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Для цього необхідний керуючий блок, який можна поєднати із блоком живлення і конвертором. Метод ШІМ полягає в тому, що на світлодіод подається не постійний а імпульсно модульований струм. При цьому частота може складати сотні і

навіть тисячі герц, а ширина імпульсів і пауз між ними може змінюватись. Середня яскравість світлодіода стає керованою, а сам світлодіод не гасне

Таблиця 2.1

Характеристика світлодіодів для тепличних світильників

Колір	Довжина хвилі, (нм)	Напруга, В	Матеріал напівпровідника
Червоний	610-760	1,63 – 2,03	Галлія арсенід-фосфід
Синій	430-500	2,48 – 3,70	Карбід кремнію

2.3. Розрахунок параметрів підключення світлодіода до джерела живлення

Враховуючи діапазон напруги червоного та синього світлодіодів проведемо розрахунки електричних параметрів для їх підключення до джерел живлення. Головний електричний параметр, який забезпечує стабільну роботу світлодіода є струм I , який протікає через нього. Більшість сучасних світлодіодів розрахована на струм 20мА. Енергетичні характеристики серійних світлодіодів червоного спектру випромінювання, приведені в таблиці 2.2.

Але при підключенні світлодіода до джерела живлення слід враховувати, що він має виражену нелінійність вольт-амперної характеристики. Невеликі зміни напруги приводять до значних коливань струму.

На графіку (рис. 2.2.) відображено залежність сили струму від поданої напруги світлодіода типу АЛ307АМ, червоного спектра випромінювання.

Таблиця 2.3

Енергетичні характеристики світлодіодів червоного спектра випромінювання

Тип світлодіода	Колір	Постійна пряма напруга (Uпр.) В, більше при [Uпр.] мА	Максимальний постійний прямий струм (Iпр.), мА	Сила світла, мкд, не менше
АЛ307АМ	червоний	2,0 [10]	20	0,15
АЛ307БМ	червоний	2,0 [10]	60	0,9
АЛ336Б	червоний	2,0 [10]	600	20
АЛ336К	червоний	2,0 [10]	800	40

З таблиці 2.3 видно, що сила світла для світлодіодів із близькими енергетичними характеристиками відрізняється в рази.

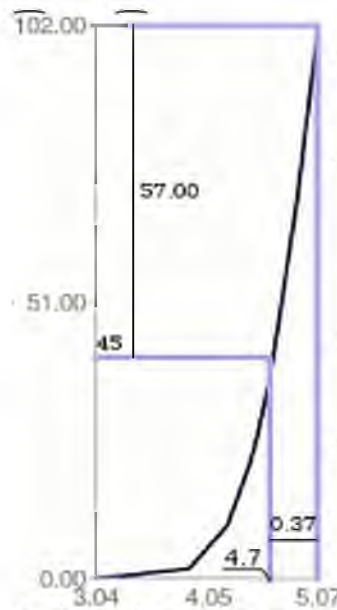


Рис. 2.2. Вольт-амперна характеристика світлодіода типу АЛ307АМ

Із графіка видно, що збільшення напруги живлення від 4.7 до 5.07

вольт, всього - на 0.37 вольт викликає зростання струму через світлодіод до 100 міліампер.

Найпростіше обмежити зростання струму за допомогою підключеного послідовно резистора (опору навантаження) рис. 2.3.

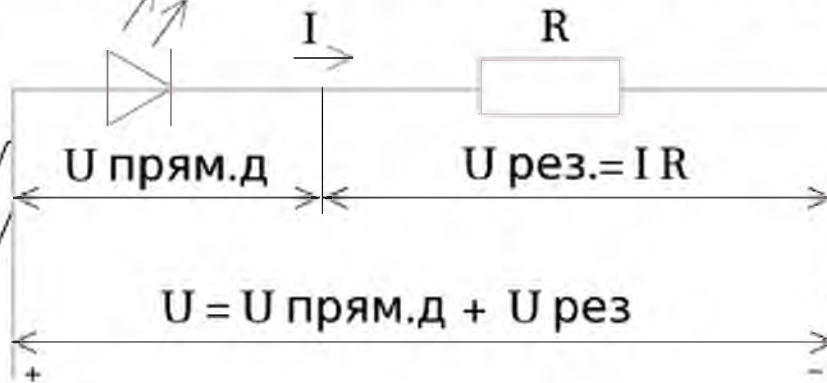


Рис. 2.3. Схема обмеження струму через світлодіод за допомогою опору навантаження

У відповідності з законом Ома падіння напруги на опорі навантаження

розраховуємо за формулою:

$$U_{рез} = I \cdot R \quad (2.1)$$

Звідси слідує, якщо прикласти до схеми більшу напругу то зросте струм, але більша частина напруги падатиме на опорі, внаслідок чого загальне збільшення струму через світлодіод буде значно меншим у порівнянні зі схемою без баластного резистора.

Номінальним струмом світлодіода типу АЛ307АМ $I = 30 \text{ мА}$, що відповідає напрузі на світлодіоді $U_{прям.д} = 4.5 \text{ В}$ при максимальній напрузі живлення 5 В , величина опору резистора буде:

$$U = U_{прям.д} + U_{рез} \quad (2.2)$$

Підставивши в формулу (2.2) значення отримаємо

$$5 = 4.5 + U_{рез}$$

$$U_{рез} = 5 - 4.5 = 0.5 \text{ В}$$

$$I = 30 \text{ mA} = 0,03 \text{ A}$$

НУБІП України (23)

$$U_{рез} = IR,$$

$$\text{звідки } R = U_{рез} / I = 0,5 / 0,03 = 16 \text{ Ом}$$

Отже, розрахований необхідний баластний опір складає 16 Ом

НУБІП України

Значення опору резистора саме для світлодіода даної марки, та аналогічних з близькими параметрами.

Якщо будемо використовувати світлодіод АЛ307ПМ, для якого згідно

НУБІП України

паспортних даних: $U_{прям.д} = 2,8 \text{ В}$, $I_{пр} = 20 \text{ mA}$, отримаємо розрахункове значення баластного опору

$$R = (U_{жив} - U_{прям.д}) / I_{пр} = (5 - 2,8) / 0,02 = 110 \text{ Ом}$$

При напрузі живлення 12 вольт опір резистора:

НУБІП України

$$R = (U_{жив} - U_{прям.д}) / I_{пр} = (12 - 2,8) / 0,02 = 460 \text{ Ом}$$

Але, необхідно враховувати, що баластний резистор, обмежуючи струм, сам нагрівається. Потужність, яка виділиться на резисторі у вигляді тепла складе:

НУБІП України

$$P = U_{рез} \cdot I_{пр} = (U_{жив} - U_{прям.д}) I_{пр} = (12 - 2,8) \cdot 0,02 = 0,184 \text{ Вт}$$

тобто, ставити потрібно резистор потужністю не менше 184 міліват, наприклад типу МЛТ 0,25.

НУБІП України

Таким чином в результаті розрахунків електричних параметрів підключення світлодіодів до джерела живлення необхідно враховувати

номінальні паспортні енергетичні параметри кожної марки світлодіодів, для

НУБІП України

їх використання при проектуванні світильників для теплиць.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗРОБКА ТЕПЛИЧНИХ СВІТЛОДІОДНИХ СВІТИЛЬНИКІВ-ОПРОМІНЮВАЧІВ І СХЕМИ КЕРУВАННЯ

3. Обґрунтування схеми з'єднань світлодіодів у матриці світильника-опромінювача

Комбінації світлодіодів у матриці світильника-опромінювача залежать від їх індивідуальних характеристик. Зокрема інтенсивності випромінювання та споживаної електричної потужності.

Є кілька способів підключення світлодіодів у світлову матрицю. Їх можна виділити як паралельне, послідовне і змішане вмикання.

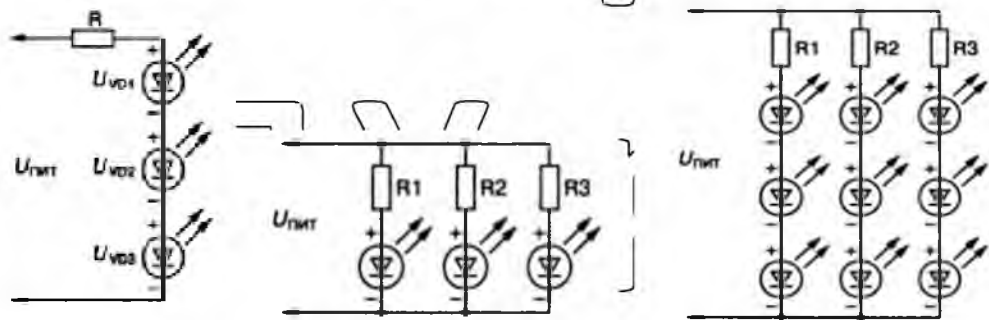


Рисунок 3.1. Способи електричного з'єднання світлодіодів у світлодіодній матриці опромінювача.

Для проектування світильника із світлодіодів необхідно провести розрахунки енергетичних параметрів для їх групи. Припускаємо, що світлодіоди для світильника однієї партії виготовлення і мають однакові енергетичні параметри. Тепер визначимося з підключенням декількох світлодіодів. Підключаємо послідовно 2 червоних світлодіоди. Енергетичні параметри вибираємо з таблиці 3. Живлення від джерела постійного струму напругою 12В.

Тоді сумарна напруга для двох червоних світлодіодів складе:

$$U = U_1 + U_2 = 2 + 2 = 4В$$

Напруга живлення – 12 В, отже різниця між напругою живлення і сумарною напругою складе – 8,0 В. Розраховуємо параметри резистора для включення в ланцюг із двох світлодіодів.

$$R = 8,0 / 0,02 = 400 \text{ Ом.}$$

$P = 8,0 * 0,02 = 0,16 \text{ Вт}$
 Якщо беремо 6 червоних світлодіодів і проведемо аналогічні розрахунки то отримаємо – 6. * 2,0 В = 12 В. Додатковий опір не потрібно.

Аналогічно для 3 синіх світлодіодів (3,0 В):

$$3 \times 3,0 \text{ В} = 9,0 \text{ В}; 12,0 - 9,0 = 3,0 \text{ В.}$$

$$R = 3,0 / 0,02 = 150 \text{ Ом. } P = 3,0 * 0,02 = 0,06 \text{ Вт}$$

Тепер розглянемо варіанти підключення світлодіодного модуля. Треба підключити до блоку живлення 12В 30 червоних світлодіодів по 2,0 В. На 12В можна підключити тільки 6 штук без опорів. З'єднавши 5 ланцюгів по 6 світлодіодів і підключивши їх паралельно до джерела живлення (рис 3.2.)

отримаємо ланцюги без додаткових опорів. При цьому через кожні 6 світлодіодів буде текти струм в 0,02 А. У нас вийде 5 ланцюжків з загальним струмом $5 * 0,02 \text{ А} = 0,1 \text{ А}$

Таким чином можна констатувати, що залежно від необхідної потужності і спектрального складу випромінювання комбінуючи наявні світло діоди можна створити матрицю-світильник для створення необхідного світлового режиму відповідно до виду вирощуваної рослинної продукції.

НУБІП України



Рис. 3.2. Підключення одноколірних світлодіодних ланцюгів до джерела живлення без опору навантаження.

Для підключення двоколірних світлодіодних стрічок необхідно брати два джерела живлення, як зображено на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Підключення матриці з двоколірних світлодіодів до джерел живлення.

3.2 Вибір драйвера живлення світлодіодного світильника

Спеціалізоване електричне живлення світлодіодів - одна з проблем, яка завжди стоїть на першому місці перед виробниками джерел світла [45].

До джерел живлення пред'являються такі вимоги:

1. Блок живлення світлодіодів повинен зберігати працездатність не менше 50000 годин, при цьому дотримуючись необхідні характеристики.
2. Живлення світлодіодів має подаватися стабілізованим за величиною робочого струму. Кращим вважається варіант, коли величина струму стабілізується по температурній залежності СІ кристала. Також, схема живлення має включати в себе захист від перенапруги і зворотної полярності.
3. Ціна такого джерела живлення повинна бути не набагато вища за ціну світлодіодного світильника.

Розробка світильників на основі потужних світлодіодів з появою нових надійних елементів стає все більш актуальною. Багато виробників радіокомпонентів пропонують свої рішення для створення джерел струму й різні мікросхеми драйверів для живлення світлодіодів. Наприклад фірма ST Microelectronics пропонує схемотехнічні рішення для реалізації живлення світлодіодів, приведені на рис.3.4.



Рис. 3.4. Приклад побудови блоку живлення модуля світлодіодного світильника.

По своїй суті блоки живлення (драйвери) представляють собою АС-DC перетворювачі, що стабілізують не тільки напругу, а й струм через світлодіоди. Структура драйвера залежить від діапазону вхідної напруги й від кількості світлодіодів, що можуть живитися від драйвера. Внутрішня структура може бути різною, але, як правило, він складається з наступних функціональних блоків:

- АС-DC-перетворювач;
- регульовані або навіть програмувальні лінійні джерела струму (один або кілька каналів);
- ШІМ-контролери для індивідуального або загального керування струмом через світлодіоди;
- інтерфейс керування;
- блок діагностики для виявлення обривів у колі підключення світлодіодів, коротких замикань та ін.

Сучасним технічним рішенням для світлодіодних світильників теплиць є драйвери LED7706, LED7707 від компанії ST Microelectronics. Мікросхеми призначено для живлення шести лінійок послідовно включених світлодіодів (до 10 світлодіодів у кожному ланцюжку) струмом 30 або 85 мА, відповідно.

Структура цих мікросхем однакова: до їхнього складу входить високоефективний підвищувальний перетворювач, який працює на частоті 660 кГц. Він має можливість зміни робочої частоти в межах від 200 кГц до 1 МГц за допомогою зовнішнього резистора й щісти генераторів струму.

Вихідна напруга підвищувального перетворювача змінюється адаптивно таким чином, щоб найменше спадання напруги на одному із

внутрішніх джерел струму було рівне їхній опорній напрузі (400 мВ).
Вихідна напруга може змінюватися в діапазоні від 4,5 В до 36 В.

Вихідний струм у кожному каналі може бути заданий одним зовнішнім резистором. Яскравість світіння світлодіодів може змінюватися, для цього мікросхема має спеціальний вхід для регулювання. Основні параметри мікросхем наведені у таблиці 1

Таблиця 3.3

- Основні параметри драйверів живлення світлодіодних модулів.

Найменування	Вхідна напруга, (В)	Вихідна напруга, (В)	Вихідний струм, (мА)	Число каналів	ККД, (%)	Робоча частота, (МГц)
LED7706	4,5 - 36	до 36	до 30	6	93	0,2...1
LED7707	4,5 - 36	до 36	до 83	6	93	0,2...1

Функціонування драйверів LED7706, LED7707 відбувається наступним чином. (Див. рис. 3.5) Підвищувальний перетворювач перетворює вхідну напругу до необхідного рівня на лінії *V_{BOST}*. Рівень напруги на цій лінії контролюється перетворювачем через вхід *O_{VSEL}*. Величина напруги на виході залежить від величини дільника виконаного на резисторах *R1, R2*.

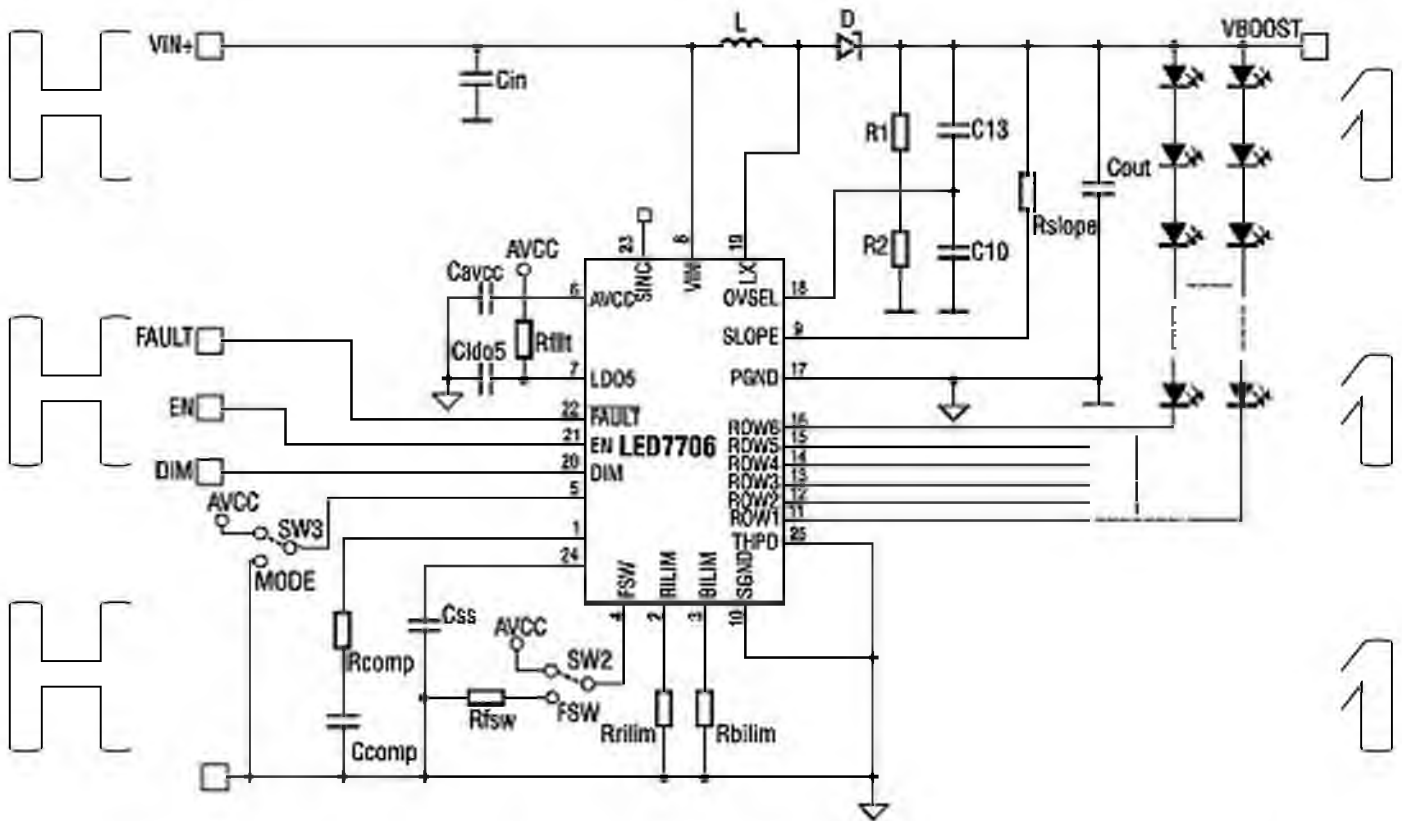


Рис. 3.5. Схема функціонування драйвера світлодіодного модуля.

Від величини конденсатора C_{ss} залежить тривалість "плавного" старту перетворювача. Конденсатор заряджається від інтегрованого в мікросхему джерела струму 5 мкА. При досягненні на ємності C_{ss} напруги 2.4В, перетворювач починає працювати в штатному режимі.

Робоча частота задається зовнішнім резистором R_{fsw} , що підключається до входу FSW . Частота може бути задана в діапазоні 250...1000 кГц. Якщо вивід FSW з'єднати з виводом $AVCC$ перетворювач буде працювати на частоті 660 кГц. Вивід FSW також може виступати в якості входу зовнішньої синхронізації. У такому випадку, одна мікросхема LED7706 є головною, а інші - підлеглими (сигнал синхронізації надходить на вхід FSW з виходу $SYNC$ попередньої мікросхеми).

Особливостями мікросхем є висока продуктивність, високий ККД, - ШІМ-диммування на частоті 20кГц, мінімальний розмір пристрою. Вони застосовуються для побудови світильників на чіп-світлодіодах.

Для живлення світлодіодів підходять мікросхеми звичайних AC-DC перетворювачів, необхідно тільки переробити схемотехнічне рішення таким чином, щоб на виході перетворювача стабілізувався струм, а не напруга.

Компанія STMicroelectronics рекомендує використовувати для цієї мети сімейство імпульсних понижувальних стабілізаторів L597х.

Ця серія перетворювачів може працювати з вихідною напругою до 36 В и забезпечувати струм виходу 1, 1,5 або 2 Ампера. Звідси випливає, що можна підключити на вихід стабілізатора до 10 послідовно включених світлодіодів і стабілізувати струм з робочими струмами 350 мА, 700 мА й 1400 мА.

При проектуванні джерела живлення світлодіодного світильника завжди постає питання яке джерело живлення використовувати - гальванічно розв'язане або гальванічно пов'язане з первинною мережею.

Прямої заборони на використання того або іншого немає. Безпечність світильників регулює нормативний документ ДСР МЭК 60598-1-2003 «Світильники. Загальні вимоги й методи випробування», відповідно до якого всі світильники діляться на три класи по захисту від ураження електричним струмом.

Клас I- захист від ураження електричним струмом забезпечується основною ізоляцією й приєднанням доступних для дотику провідних деталей до захисного (заземленого) проводу стаціонарної проводки таким чином, щоб доступні провідні деталі не могли стати струмоведучими у випадку ушкодження основної ізоляції;

Клас II- світильник, у якому захист від ураження електричним струмом забезпечується основною ізоляцією, застосуванням подвійної або посиленої ізоляції, і який не має пристрою для захисного заземлення або спеціальних засобів захисту в електричній установці;

Клас III - світильник, у якому захист від ураження електричним струмом забезпечується застосуванням безпечної наднизької напруги живлення (по даному документу до 50В включно).

Для кожного із цих класів установлені вимоги до електричної міцності ізоляції: Клас I - $2U+1000$ В; Клас II - $4U+2750$ В; Клас III - 500 В, де U - напруга живлення світильника, В.

При розробці самого світильника й джерела живлення до нього з використанням AC/DC-перетворювача важливо забезпечити необхідну електричну міцність виробу вибором матеріалів і конструктивних рішень.

Наприклад, виріб по класу I може мати гальванічний зв'язок з мережею, але при цьому необхідно, щоб доступні для дотику струмопровідні деталі мали захисне заземлення й комплектуючі й матеріали змогли забезпечити напругу пробою більш 1440 В між вхідною клемою й корпусом виробу. Як варіант, можна застосувати у виробі джерело живлення, гальванічно не пов'язане з мережею, а необхідне значення напруги пробою (1,44; 3,63 кВ) забезпечити міжшаровою ізоляцією в трансформаторі.

3.4. Розробка системи живлення світлодіодних опромінювачів для споруд захищеного ґрунту.

На основі вищенаведених рішень запропонована регульована система керування світлодіодними опромінювачами, яка складається із блоку управління побудованого на основі електронних генераторів синусоїдальних коливань, резонансних трансформаторів TV1, лінії електропередачі ЛЕП, ємностей C5, C6, C4, C7 або індуктивностей L1-L4, двухполуперіодних випрямлячів VD1 ... VD4 - VDm ..VDn, ланцюгів світлодіодних модулів-світильників VD11-VDn [9].

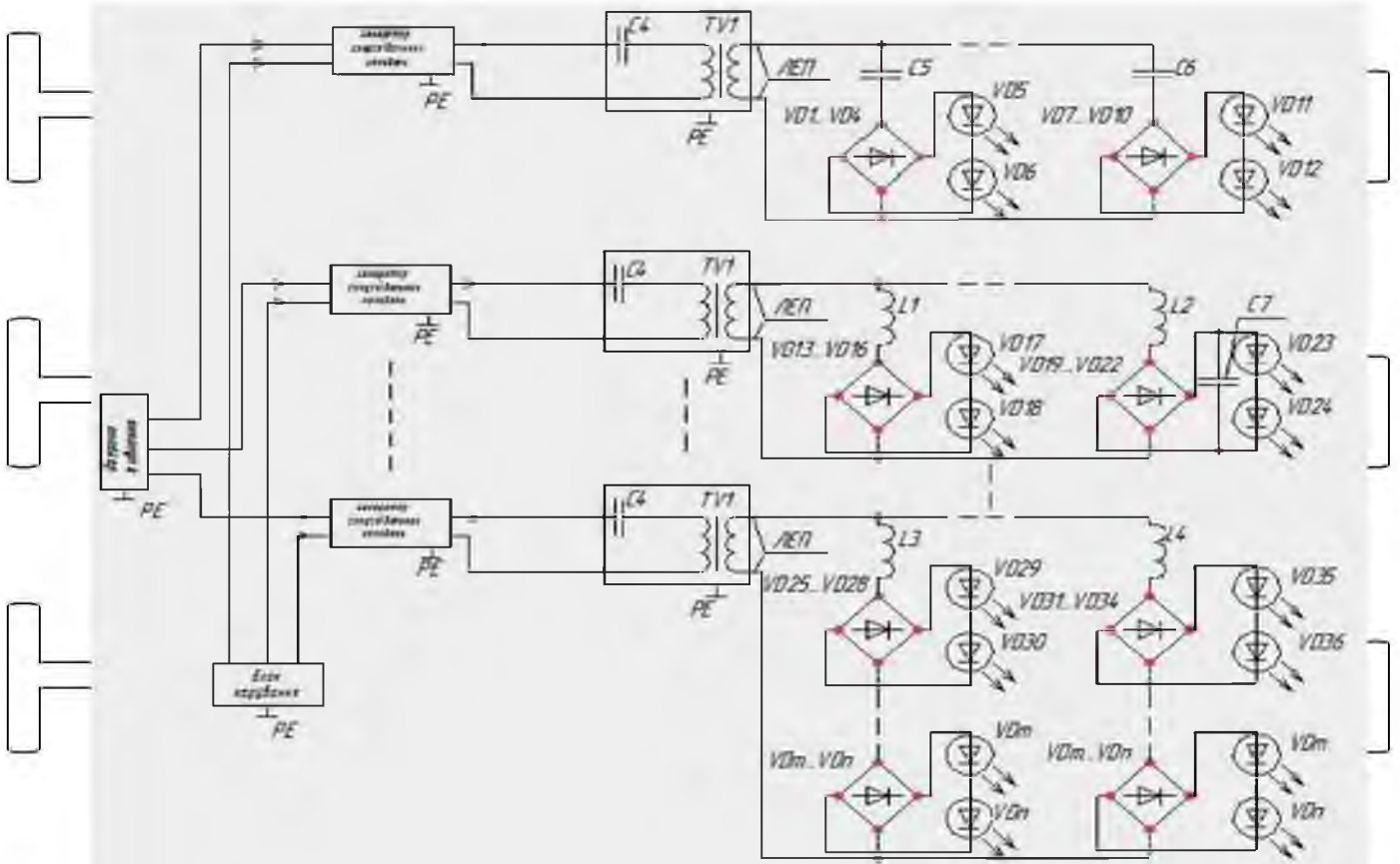


Рис.3.6.. – Принципова електрична схема керування світлодіодною системою освітлення в теплицях.

Розглянемо його роботу. Блок управління, підключений до декількох електронних генераторів синусоїдальних коливань, для кожного кольору світлодіодів окремо. При цьому до електронних генераторів через резонансний трансформатор TV1 підключені n ліній електропередачі ЛЕП ($n = 1, 2, 3 \dots k$), до яких присьднані паралельно через обмежувальні ємності C5, C6 або індуктивність L1-L4 m ланцюгів з двухполуперіодних випрямлячів VD1... VD4 - VDm ... VDn і світильників VD11-VDn ($m = 1, 2, 3 \dots p$). У кожному ланцюгу з'єднані послідовно від одного до декількох

світильників, що складаються з z світлодіодів ($z = 1, 2, 3 \dots x$). При цьому окремі різнокольорові світильники можуть бути об'єднані в один. Первинна

обмотка резонансного трансформатора TV1 приєднана до виходу електронного генератора синусоїдальних коливань через конденсатор C4. Додатково паралельно світлодіодним ланцюгам може бути приєднана ємність C7.

На рис. 3.7 зображена принципова схема електронного генератора синусоїдальних коливань на основі моста Віна [9].

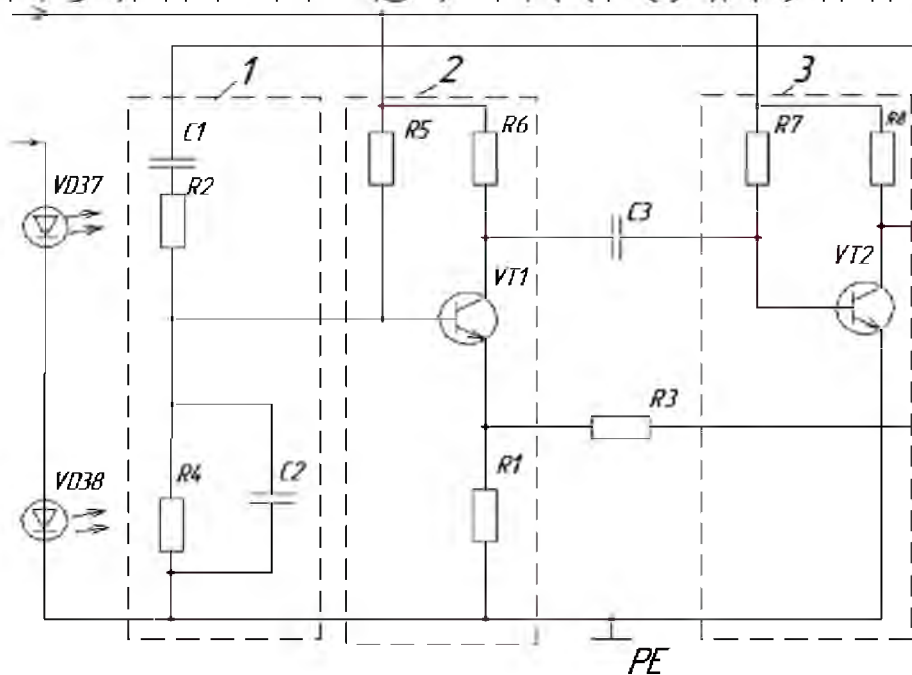


Рис. 3.7. Принципова електрична схема електронного генератора синусоїдальних коливань

Електронний генератор синусоїдальних коливань виконаний на RC-елементах C1, C2, R2, R4 з утворенням послідовної ланцюга з конденсатора C1 і фоторезисторів R2, R4. Паралельно фоторезистору R4 приєднаний конденсатор C2 на основі моста Віна. Виходом моста Віна, яким є спільна точка фоторезисторів R2, R4 через послідовно з'єднані перший підсилювач 2-на транзистор VT1 і другий підсилювач 3-на транзистор VT2 приєднано

до первинної обмотці резонансного трансформатора TV1 [9]. Колектор транзистора VT2 другого підсилювача 3 приєднаний до вільного висновку конденсатора C1 моста Вина 1 для освіти позитивного зворотного зв'язку.

Емітер транзистора VT1 першого підсилювача 2 через резисторний дільник напруги з резисторів R1, R3 приєднаний до колектора транзистора VT2

другого підсилювача 3 для освіти негативного зворотного зв'язку. Колектор транзистора VT1 першого підсилювача 2 через конденсатор зв'язку C3 приєднаний до бази транзистора VT2 підсилювача 3. Провідник джерела

живлення приєднаний через резистор R5 до бази транзистора VT1 і через

резистор R7 - до бази транзистора VT2, а через резистор R6 - до колектора транзистора VT1 і через резистор R8 - до колектора транзистора VT2

другого підсилювача 3, приєднаний через ємність C4 до первинної обмотці резонансного трансформатора TV1. Керуючий вхід електронного

генератора синусоїдальних коливань, утворений ланцюгом з двох

послідовно з'єднаних світлодіодів VD37, VD38 для опромінення послідовно з'єднаних фоторезисторів R2, R4 моста Вина 1, приєднаний до виходу блоку управління. Вільний вихід світлодіода VD38, конденсатора C2,

фоторезистора R4 і транзисторних підсилювачів 2,3 об'єднані спільною

шиною із захисним РЕ-провідником джерела живлення.

Пристрій працює наступним чином. Зміна величини напруги, що надходить від блоку управління на вхід моста Вина 1 електронного

генератора, викликає зміна частоти генерації синусоїдальних коливань на

виході. Вихідний сигнал першого підсилювача 2 з колектора транзистора VT1 через конденсатор зв'язку C3 надходить на базу транзистора VT2

другого підсилювача 3. Використання двохкаскадного підсилювача 2,3,

охоплених частотно залежної позитивним зворотним зв'язком через міст

Вина 1 на конденсаторах C1, C2, і фоторезисторах R2, R4, який надходить на базу транзистора VT1, дозволяє змінювати фазу вихідного сигналу на

360°, тобто не зраджувати фазу сигналу на частоті генерації. При подачі

напруги від блоку управління на вхід електронного генератора яскравість світлодіодів VD37, VD38 збільшується, а опір фоторезисторів R2, R4 моста Вина зменшується. Відповідно збільшується і частота генерації за формулою [9]

$$f = 1/2\pi RC, \quad (3.1)$$

где R – опір резисторів R2, R4; C – ємність конденсаторів C1, C2.

Збільшена частота f поступає через відповідний резонансний трансформатор TV1 на світильники VD11-VDn. При цьому ємнісний опір X_c по відомій формулі

$$X_c = 1/2\pi fC, \quad (3.2)$$

(C – ємність елементів C5, C6) зменшується, а індуктивний опір елементів L1-L4 за виразом

$$X_L = 2\pi fL, \quad (3.3)$$

(L – індуктивність елементів L1 ... L4), більшується.

Приєднання виходу моста Вина через послідовно з'єднані транзисторні підсилювачі 2,3 до первинної обмотки резонансного трансформатора TV1 забезпечує подачу регульованих височастотних коливань в лінію електропередачі. В результаті змінюється напруга, що надходить через випрямляч VD1 ... VD4 - VDm ... VDn на відповідні світильники VD11 ... VDn, що призводить до зміни їх яскравості і спектра, якщо світлодіоди входять в загальний світильник.

Емітер транзистора VT1 першого підсилювача 2 через резисторний дільник напруги з резисторів R1, R3 приєднаний до колектора транзистора VT2 другого підсилювача 3 для освіти негативного зворотного зв'язку, яка забезпечує заданий коефіцієнт посилення ($K_u \geq 3$) першого підсилювача 2.

Використання електронного генератора синусоїдальних коливань, виконаного на двох транзисторних підсилювачах з позитивним зворотним зв'язком через міст Віна [9], призводить до зменшення масогабаритних розмірів перетворювача напруги. Колекторний вихід другого підсилювача приєднаний до вільного висновку конденсатора моста Віна для освіти позитивного зворотного зв'язку, який забезпечує генерацію синусоїдальних коливань. Приєднання виходу моста Віна через послідовно з'єднані транзисторні підсилювачі до первинної обмотці резонансного трансформатора забезпечує подачу регульованих високочастотних коливань в лінію електропередачі світлодіодних світильників [9].

Створення негативного зворотного зв'язку шляхом приєднання емітера транзистора першого підсилювача через резисторний діляк напруги до виходу другого підсилювача забезпечує заданий коефіцієнт посилення. Приєднання виходу блоку управління до електронного генератора через ланцюг з двох послідовно з'єднаних світлодіодів для опромінення фоторезисторів моста Віна, призводить до керованого зміни їх опору і частоти синусоїдальних коливань [9].

Висновки до розділу.

Розроблена схема керування світлодіодними світильниками-опромінювачами дозволяє, змінюючи частоту окремих (групових) генераторів синусоїдальних коливань плавно регулювати вихідну напругу на окрему групу світлодіодів світлодіодного світильника. Тим самим надається можливість змінювати інтенсивність випромінювання окремих світлодіодів, що забезпечує можливість змінювати співвідношення спектрального складу випромінювання від даного світлодіодного світильника. Тобто отримується можливість створювати як необхідний спектральний склад випромінювання під світильником-опромінювачем

так і рекомендовану інтенсивність (рівень опроміненості під світильником на заданому рівні розрахункової поверхні тегилиці).

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВИСНОВКИ

1. Використання світлодіодних ітупиних джерел оптичного випромінювання для вирощування рослин у спорудах закритого ґрунту дозволяє здійснювати світлову стимуляцію росту рослин використовуючи виключно ефективну кольорову гамму та можливість контролювати всі параметри процесу досвічування значно знизивши затрати на електричну енергію при максимально збільшеній фотосинтезній ефективності застосованих джерел оптичного випромінювання.

2. В результаті експериментальних досліджень встановлено:

-- синє світло з довжинами хвиль 430-460 нм необхідне для вегетативної стадії зростання, в цілому сприяє зміцненню рослини, розвитку кореневої системи, стебла, листя. Для початку розвитку рослини, безумовно, синє світло має більше значення, ніж червоний. При нестачі в спектрі синього світла рослини починають рано витягуватися, мають слабе стебло з довгими міжвузлями.

-- червоне світло необхідне рослинам для цвітіння і плодоношення. Збільшення у спектрі із частки червоного випромінювання стає сигналом до прискореного розвитку і цвітіння.

Тобто, спектральне співвідношення синього і червоного кольорів залежить від виду рослини і фази її розвитку, що може забезпечуватись автоматичним керуванням режимом опромінення.

3. Встановлено, що при тепличному вирощуванні рослинної продукції ефективними є світлодіодні світильники із співвідношенням 4 червоних на 1 синій світлодіод, які працюють в наступних режимах:

якщо потрібно стимулювати вегетативний розвиток рослини, то співвідношення червоних і синіх, має бути збільшено відносно синіх, навіть до відношення 1:1.

якщо необхідно стимулювати цвітіння рослини, то співвідношення може бути 6:1 червоних і синіх світлодіодів.

4. Аналіз розподілу енергії в системі LED-опромінення тепличних рослин щодо підвищення енергетичного ККВ дозволив запропонувати удосконалену конструкцію LED-опромінювача та систему керування режимами роботи світлодіодів для підвищення ефективності опромінювання, що забезпечило підвищення продуктивності на 18 % у виробничих умовах.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрійчук В.А., Костик Л.М., Ріпецький Р.Й. Енергетична ефективність опромінювальних установок та її вплив на продуктивність фотобіологічного процесу // «Світлотехніка та електроенергетика», 2007. – № 1(9). – С.45-48.
2. Андрійчук В.А., Костик Л.М. Оптимізація спектру випромінювання опромінювальних пристроїв для світлокультури рослин // «Світлолюкс», 2007. – №2. – С.74-77.
3. Андрійчук В.А., Костик Л.М., Ріпецький Р.Й. Визначення фотосинтезної ефективності джерел випромінювання // «Світлолюкс», 2007. – №4. – С.74-77.
4. Червінський Л.С. Світлокультура рослин. Процес становлення. Енергетика і автоматика/ Червінський Л.С. Сторожук Л.О (Електронний ресурс)<http://www.nbuiv.gov.ua/e-journals/eia/2010-3/index.htm>.
5. Червінський Л.С. Результати пошукових досліджень комбінованого опромінювання насіння/ Червінський Л.С., Романенко О.І./ Науковий вісник НУБіП, №174, частина 2, 2012,с.206-209
6. Червінський Л.С. Оптичні методи підвищення посівних якостей насіння /Червінський Л.С., Романенко О.І./ Науково-практичний журнал «Світло-люкс»: - м. Київ, №4, 2013, С. 72-73.
7. Червінський Л.С. Використання світлодіодів у світлокультурі тепличних рослин./ Л.С. Червінський, Л.О. Сторожук, Я.М. Луцак / Науковий вісник НУБіП України, № 209, частина 2. С153-159, 2015, Київ
8. Червінський Л.С. Обґрунтування принципів керування енергетичною дією світлодіодного випромінювання на біологічні об'єкти / Червінський Л.С., Луцак Я.М., Шевченко Ю.В. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХНТУСГ ім.Петра Василенка, 2015. – Вип. 164. – С. 68–70

9. Червінський Л.С. Дослідження фотосинтезної ефективності різних джерел оптичного випромінювання / Червінський Л.С., Луцак Я.М. // Національний університет біоресурсів і природокористування України, науковий журнал «Енергетика і автоматика». – Київ: НУБіП, 2015. – №4(26). – С.156–160.
10. Червінський Л.С. Використання світлодіодів у світлокультурі тепличних рослин / Червінський Л.С., Сторожук Л.О., Луцак Я.М. // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – Київ: НУБіП, 2015. – вип.209, частина 2: Техніка та енергетика АПК. – С.153–159
11. Червінський Л.С. Особливості застосування світлодіодних джерел світла в світлотехнічних установках / Червінський Л.С., Луцак Я.М.// Науково-технічний журнал «Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК». – Харків: ХНТУСГ, 2015 – №1 (3). – С, 43–45.
12. Вплив спектру оптичного випромінювання на фотосинтез рослин /Луцак Я.М., Червінський Л.С.// Proceedings of the International Scientific-Technical Conference «Problems of modern power engineering and automation in the system nature management (theory, practice, history, education)».- Kiev, 10-14 of may, 2016. – С.15-16.
13. Розробка методики визначення просторової фотосинтезної опроміненості / Луцак Я.М., Червінський Л.С.// Proceedings of the International Scientific-Technical Conference «Problems of modern power engineering and automation in the system nature management (theory, practice, history, education)».- Kiev, 10-14 of may, 2016. – С.24-26.
14. Использование светодиодов в светокультуре тепличных растений / Луцак Я.М., Червинский Л.С.// Матеріали 11 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електротехнічні системи, електрифікація і автоматизація в агропромисловому комплексі» - м. Вінниця. 27-28 травня 2015р.- С.60-61.

15. Цугленок, Н.В. Методика регулювання характеристик облучательных установок в растениеводстве защищенного грунта / Н.В. Цугленок, Я.А. Кунгс, П.П. Долгих, В.Р. Завей-Борода // Вестн. КрасГАУ. Вып. 5. Красноярск, 2004. - С. 165-170.

16. Посудин Ю.И., Червинский Л.С. Применение оптических стимулов в биологических исследованиях.// Методы и средства повышения надежности силового электрооборудования в условиях с. х. производства / Сб.тр. УСХА.-Киев,1984.-С.62-70.

17. Chervinsky L.S. About the mechanism of photoreactivation of the biological objects.// Матер. міжнар. конф. The European Biomedical Optics Week, BIOS Europe'97, September 4-8,1997, Sanremo, Italy.[3198-30].

18. Berns M.W. et al. Laser microsurgery in cell and developmental biology. – Science, 1981, v.213, № 4507, p. 505-513

19. . Green D.E. Mechanism of energy transduction in Biological Systems.- Science.1973, № 181, p. 583-585. The science of Photobiology (Ed. Smith K.C. - N.Y.: Pl. Press, 1977. - 430 p.

20. The molecular mechanism of photoreception : report on the Dahlem Workshop on the Molecular Mechanism of Photoreception. Ed. H. Stieve .- Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1986.- 506 p. McCree K. J. The action spectrum, absorplance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agric. Meteoroi. 1972. V. 9. P. 192.

21. Сайт aeron [Електронне джерело]

<https://aeronsystems.com/why-do-solar-power-plants-need-weather-monitoring-station-wms/>

22. Сайт aeron [Електронне джерело]

<https://aeronsystems.com/rigel-pt-1000-module-temperature-sensor/>

23. Сайт hindawi [Електронне джерело]

<https://www.hindawi.com/journals/ise/2014/817078/>

24. Сайт [ieeexplore](http://ieeexplore.ieee.org) [Електронне джерело]

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7808309>

25. Сайт [resistorguide](http://www.resistorguide.com) [Електронне джерело]

<http://www.resistorguide.com/photoresistor/>

26. Сайт [arduino-diy](http://arduino-diy.com) [Електронне джерело]

<http://arduino-diy.com/arduino-fotorezistor>

27.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України