

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)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Імпульсні опромінювальні установки для тепличних господарств

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи ЕЕМ
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка

та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Мочернюк І.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Андрійчук В.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Вакуленко О.О.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Тарасенко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Габрусєв Г.В.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2020

РЕФЕРАТ

Мочернюк І. П. Імпульсні опромінювальні установки для тепличних господарств. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕм-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2020.

Стор. - 72; рис. - 20; табл. - 2; креслень - 6; джерел - 28; додатків - - .

Метою роботи є аналіз опромінювальних установок та їх проектування для тепличних господарств, які будуть працювати в режимі імпульсного освітлення.

Об'єктом дослідження процеси та технічні засоби імпульсного опромінення рослин закритого ґрунту.

Предметом дослідження є опромінювальні установки закритого ґрунту, що працюють в імпульсному режимі.

У роботі проведено розрахунок максимального часу роботи при різних частотах імпульсу, проведено аналіз світлодіодних драйверів та обрати схему драйвера для роботи імпульсних світлодіодів, представлено розподіл спектральної інтенсивності світлодіодів, проведено аналіз вимог щодо опромінення рослин, спроектовано три опромінювальні пристрої.

Ключові слова: опромінювальний пристрій, імпульсне освітлення, тепличне господарство, активне фотосинтетичне випромінювання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Аналіз опромінення тепличних господарств.....	8
1.2 Методологія проектування тепличних господарств.....	10
1.3 Аналіз управління освітленням.....	12
1.3.1 Вимоги до світла рослин.....	12
1.3.2 Штучне світло.....	13
1.4 Екрани для управління світлом та енергозбереження.....	15
1.5 Закрита теплиця.....	15
1.6 Вибір ділянки для тепличних господарств.....	16
1.7 Висновки до розділу.....	19
2 РОЗРАХУНКОВО–ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	20
2.1 Робота світлодіодів в імпульсному режимі.....	20
2.2 Характеристики світлодіодів в імпульсному режимі роботи...	21
2.3 Видимі світлодіоди	28
2.4 Робочий цикл світлодіодів в імпульсному режимі.....	33
2.5 Аналіз світлодіодних драйверів.....	36
2.6 Висновки до розділу.....	40
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	41
3.1 Електромагнітне випромінювання і світловий спектр.....	41
3.2 Перетворення світлового випромінювання в енергію для росту рослин.....	42
3.3 Фактори оцінки світла.....	46
3.4 Результати аналізу світлодіодної системи освітлення.....	47
3.5 Висновки до розділу.....	55
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.1 Особливості випромінювання оптичного діапазону.....	57
4.2 Організація охорони праці на підприємстві.....	60

4.3 Вплив електричного струму на організм людини. Причини електротравматизму.....	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Правильний ріст рослин залежить від балансу довжин хвиль світла. В обмежувальних умовах для будівництва теплиць (наприклад, у міських районах, поблизу супермаркетів або продовольчих товарів), відсутність сонячного світла може успішно компенсуватись системою штучного освітлення. На ринку є різні лампи для вирощування, що забезпечують синє світло для росту листя та червоне світло для цвітіння та плодоношення, але вони вимірюються лише якісно, а не кількісно щодо активного фотосинтетичного випромінювання. На основі програмного забезпечення представлено аналіз щодо стандартного світлодіодного модуля освітлення для двох видів рослин. Результати оцінювалися за факторами, пов'язаними з абсолютною кількістю фотонів, оскільки регулюється система росту світла відповідно до його здатності стимулювати фотосинтез певної рослини.

Мета і завдання дослідження. Основною метою дипломної роботи є створення імпульсних опромінювальних пристроїв для тепличних господарств .

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз роботи світлодіодів в імпульсному режимі ;
- провести розрахунок максимального часу роботи при різних частотах імпульсу;
- провести аналіз світлодіодних драйверів та обрати схему драйвера для роботи імпульсних світлодіодів;
- представити розподіл спектральної інтенсивності світлодіодів
- провести аналіз вимог щодо опромінення рослин.

Об'єкт дослідження – процеси та технічні засоби імпульсного опромінення рослин закритого ґрунту.

Предмет дослідження – техніко-енергетичні характеристики опромінювальних пристроїв для світло культури рослин.

Наукова новизна отриманих результатів.

- представлено три опромінювальні пристрої, які найбільше підходять за спектром випромінювання для салату та шпинату.

- показано, що для вирощування рослин в приміщеннях кращі результати можна отримати при регулюванні системи росту світла. В обраних ламп для вирощування відомий спектр, значення ФАР були обраховані для конкретних довжин хвиль. Для урожаю шпинату, який має лише вегетативні процеси, синє світло (460-470 нм) виявилось вдвічі ефективнішим, ніж червоне світло (620-635 нм).

Практичне значення отриманих результатів.

Представлені опромінювальні пристрої з використанням імпульсного опромінення показують кращі показники росту та розвитку рослин.

Апробація. Результати досліджень за темою дипломної роботи: І.П.Мочернюк, М.І.Котик, В.А.Андрійчук Імпульсні опромінювальні установки для тепличних господарств ІХ Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 25-26 листопада 2020, Том 2, С.121.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (28 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 72 сторінки, 2 таблиці, 20 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз опромінення тепличних господарств

Наша мета полягає у вирощуванні екологічно чистої виробничої системи з низьким споживанням енергії. Розглядається можливість використання сонячної енергії. Ідеальна теплиця повинна мати високий урожай врожаю і в той же час забезпечувати високу якість продукції та безпеку харчових продуктів. Більше того, запропонована теплиця повинна бути економічно вигідною. На дизайн теплиці впливає багато факторів. У цьому дослідженні основна увага приділяється кліматичним умовам, джерелам енергії.

Мета дослідження – створити енергоощадну теплицю для середніх виробників з обмеженим простором для інвестицій.

Ми використали систематичну процедуру проектування, щоб зробити дизайн теплиці. У цьому підході всі підфункції у тепличній системі наносяться на карту та визначаються можливі рішення.

Закрита теплиця забезпечує оптимальні умови вирощування культури, що призводить до дуже високих урожаїв. На жаль, інвестиційні витрати цих теплиць високі (потрібне дороге тепличне та охолоджувальне обладнання). Також навички виробника, щоб повною мірою використовувати переваги технології, повинні бути дуже добре розвиненими. Концепція закритих теплиць більше підходить як демонстраційний та дослідницький проект, ніж використовувати для комерційного виробництва овочів.

Захищені системи вирощування використовуються у всьому світі для рослинництва. Кількість ділянок із захищеним вирощуванням досі зростає. Рушійні сили варіюються від поліпшення виробництва продуктів харчування з вищими рівнями виробництва, тривалого періоду вегетації, зменшення використання води порівняно з видобуванням на відкритих полях та

зменшення ризиків неврожаю, наприклад, дощем або градом, шкідниками або хворобами, для покращення якості та безпечності харчових продуктів та зростаючого попиту на продовольчі товари, квіти та рослини в горщиках.

Сканування систем, що використовуються у всьому світі, показує, що це розвинуло широкий спектр захищених систем вирощування, які відповідають місцевим обставинам. Ці рішення варіюються від низькотехнологічних недорогих пластикових тунелів до високотехнологічних дорогих теплиць, які використовуються в Західній Європі та Північній Америці. Теплиці відрізняються за розмірами, формою та використовуваними матеріалами, починаючи від одиночних рядкових конструкцій, покритих пластиком, до багаторядкових теплиць зі скляними кришками. Контрольно-вимірвальні прилади варіюються від неопалюваних теплиць з природною вентиляцією до виробничих систем з комп'ютером, керованим опаленням, охолодженням, зволоженням та осушенням, подачею CO₂ та штучним освітленням. Зазвичай використовується ручна праця у всьому світі, але у високотехнологічних теплицях нещодавно були представлені перші роботи, які замінюють людську працю.

Дизайн захищених систем вирощування є багатофакторною проблемою проектування та оптимізації, тому для пошуку оптимального дизайну необхідно враховувати безліч факторів. Наша мета – це реалізувати екологічно чисту виробничу систему з низьким рівнем споживання енергії, з високою якістю продукції, безпечністю харчових продуктів та хорошим співвідношенням вигоди та витрат виробничої системи.

Одним з найважливіших факторів, що впливає на оптимальний дизайн теплиць, є клімат місця. Ханан (1998) та Ван Херн та Ван дер Пост (2004) визначили деякі інші фактори, що визначають особливість вибору використовуваної захищеної системи вирощування. Поєднання та розширення їх переліків факторів:

1. Розмір ринку та регіональна фізична та соціальна інфраструктура, що визначає можливість також продавати продукцію і витрати, пов'язані з транспортуванням.

2. Місцевий клімат, який визначає виробництво рослинництва і, отже, потребу в кліматичних умовах та пов'язаних із цим витратах на обладнання та енергію. Він також визначає конструкцію теплиці, залежно, наприклад, від сил вітру та снігу чи граду.

3. Наявність, тип та вартість палива та електроенергії, що використовуються для експлуатації та кондиціонування клімату в теплиці.

4. Наявність та якість води.

5. Якість ґрунту з точки зору дренажу, рівня води, ризику затоплення та рельєфу.

6. Наявність та вартість землі, теперішня та майбутня урбанізація району, наявність (забруднюючих) галузей та зонування обмежень.

7. Наявність капіталу.

8. Наявність та вартість робочої сили, а також рівень освіти.

9. Наявність матеріалів, обладнання та рівень обслуговування, що визначає конструкції та контрольно-вимірювальні прилади захищеної системи вирощування.

10. Законодавство щодо безпечності харчових продуктів, залишків хімічних речовин, використання та викидів хімічних речовин у ґрунт, воду та повітря.

1.2 Методологія проектування тепличних господарств

Розробка захищених систем вирощування є багатофакторною проблемою оптимізації. Під час процесу проектування, вибір повинен бути зроблений щодо конструкції, облицювального матеріалу, кліматичного обладнання, джерела енергії, управління енергією, управління світлом. Всі ці

варіанти взаємовпливають один на одного. Вибір також сильно впливає на економічний результат.

Процедура проектування приблизно містить такі етапи:

0. Визначення цілі проектування.

1. У короткому описі вимог викладені технічні умови та цілі проектування (наприклад, низька енергоємність, використання енергії, висока ефективність використання води, висока якість виробництва та якості продукції та передбачуваність виробництва, висока безпечність харчових продуктів завдяки низькому використанню пестицидів, високому співвідношенню вигоди та витрат виробничої системи).

2. Системний аналіз виявлення необхідних функцій.

3. Виведення альтернативних принципів роботи для кожної функції, що дає так звану морфологічну діаграму.

4. Етап розробки концепції. На цьому етапі різні функції, а точніше принципи роботи поєднуються в концептуальний проект, який повинен принаймні відповідати функціональним вимогам зазначених в технічних характеристиках конструкції. На цьому етапі розроблено кілька різних концепцій.

5. Оцінка дизайну та оцінка горловини. На цьому етапі оцінюються різні концептуальні проекти, подання вимог до дизайну. Оцінка проекту базується на експертній оцінці та кількісній оцінці моделювання з використанням математичних моделей.

6. Для обраних концептуальних проектів кожен принцип роботи повинен бути детальніше розроблений, наприклад контрольні показники клімату теплиці та стратегії обробітку.

7. Прототип проекту побудований і випробуваний з урахуванням вимог до конструкції.

Переваги такої процедури проектування можна узагальнити наступним чином. Це запобігає занадто швидкому переходу до рішення не розглядаючи загальну проблему дизайну серйозно. Він пропонує можливість

мультидисциплінарного підходу до проектування систем. Це запобігає спробам і помилкам. Це дає хороший огляд вимог до дизайну і зменшує шанс пропустити деякі суттєві вимоги до дизайну. Він пропонує розуміння альтернативних варіантів та економічних перспектив. Він створює розуміння, зацікавлені сторони та особи, які приймають рішення, можуть зробити свій внесок до процесу і легше переконатись у правильності конструкції. Зрозуміло, що такий метод проектування направляє інженерів в процесі проектування, але це не гарантує успіху. Поглиблена оцінка перспективних концепцій адекватних моделей та системи підтримки прийняття рішень сприяють зростанню рівню успіху.

1.3 Аналіз управління освітленням

Нестача світла стає обмежуючим фактором у найпохмуріші місяці. Виробники повинні вибирати між перериванням їх роботи під час таких умов або використанням додаткового освітлення.

1.3.1 Вимоги до світла рослин

Кількість фотосинтетично активного випромінювання (ФАР) зазвичай визначається як від 400 до 700 нм і вимірюється квантовими датчиками, які виражають рівень ФАР у $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$, де моль тут відноситься до одного моля фотонів. Для природного освітлення – 1 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$ дорівнює 56 люкс або $0,217 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ФАР. Видиме світло містить більшу смугу хвиль між 380 і 770 нм.

Рослини потребують світла в трьох різних спектральних діапазонах для адекватного розвитку, викликаного фотосинтезом, фототропізмом та фотоморфогенезом. Найважливіші фотосинтетичні пігменти – це хлорофіли *a* та *b* з піками при 662 та 642 нм відповідно. Фототропізм, який регулює контроль за органами рослин і впливає на орієнтацію рослин у відповідь до світла, спрацьовує від світла між 400 і 500 нм. Морфогенез, який відповідає

за здоровий розвиток рослин і такі процеси, як синтез пігменту, потребують набагато червоніших кольорів випромінювання приблизно на 730-735 нм. Інші дослідження вчених вважають, що рослинам також потрібна радіація в діапазоні 700-1000 нм для морфогенезу.

Загалом розвиток рослин залежить як від кількості, так і від спектральної якості світла, що доступне. Добовий інтеграл світла визначається як кількість перехоплених фотонів на квадратний метр на добу і являє собою сукупний рівень освітленості, що впливає на урожай на день. Використання штучного світла $100 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ 16 годин на день додає $5,8 \text{ моль/м}^2\text{д}$. Оскільки добовий інтеграл світла протягом усього дня може коливатися від 1 до $35 \text{ моль/м}^2\text{д}$ року, то постає необхідність додаткового освітлення для підтримання більш рівномірного розвитку рослин цілий рік.

1.3.2 Штучне світло

Найчастіше в теплицях використовувались штучні джерела світла – натрій високого тиску лампи. Лампи HPS випромінюють широкий пік на зелено-жовтих довжинах хвиль, але випромінюють дуже мало синього та фіолетового світла. Вони мають високий ККД для перетворення електроенергії в ФАР приблизно 26-30%. Галогенідні лампи мають ширший спектр, але ефективність перетворення на 25% нижча до ФАР і скорочений термін служби.

На даний час все частіше використовуються світло діоди. Вони мають багато переваг перед звичайними HPS-лампами, такими як підвищена енергоефективність та довговічність. Висока вартість світлодіодів дещо обмежила їх використання, як засобів росту і розвитку рослин, але зараз їх вартість суттєво знижується, що робить використання світлодіодів у теплицях цілком доступним. Рослини, вирощені під вдосконаленими потужними світлодіодами AlGaInP демонструють кращу активність фотосинтезу та морфологію, ніж рослини, вирощені за допомогою звичайних HPS-ламп.

Хоча штучне освітлення, очевидно, збільшує споживання електроенергії теплицями, воно також зменшує їх потреби в опаленні. Було підраховано, що додаткове освітлення може забезпечити 25-41% потреб у опаленні подвійної пластикової теплиці. Інтенсивність освітлення слід адаптувати для кожної культури. 12 моль/м²д або вище, як правило, потрібні для виробництва салату і отримуються з додатковим освітленням 50-100 мкмоль/м²с. Для огірків було підраховано, що максимальний дохід відбудеться при використанні додаткового світла 120-150 мкмоль/м²с. Помідори мають вищі вимоги до світла: часто повідомляється про 30 мкмоль/м²д або більше. Коли піддається до того самого добового світлого інтегралу редька та хризантема показали вищу суху речовину накопичення при 18-годинному режимі освітлення, ніж під 12 та 24 годинами. Однак кукурудза та огірок демонстрували однакове накопичення сухої речовини протягом фотоперіоду 12, 18 та 24 години, тоді як для всіх чотирьох видів розвиток сухої речовини був найнижчим із 8 годин фотоперіоду.

Встановлена освітлювальна потужність зазвичай становить 100-200 Вт/м². Лампи зазвичай вимикається, коли рівень досягає 240-300 Вт/м² і коли добове світло становить 55 мкмоль/м²д. Часто застосовуються фотоперіоди 12-18 годин, залежно від посіву. Як правило, краще мати нижчий рівень освітлення під час тривалого проміжку часу до 18-20 годин, при цьому слід уникати постійного освітлення через виявлення аномалій росту, що спостерігаються у деяких видів.

Використання штучного освітлення в теплицях може суттєво збільшити врожайність, але це енергія і капіталозатрати. Тому високий урожай повинен підтримуватися, щоб виправдати його використання. Всі параметри теплиці повинні бути ретельно контрольовані, включаючи рівні CO₂, температуру та вологість.

1.4 Екрани для управління світлом та енергозбереження

Екрани застосовуються в теплицях з різних причин: затінення та зменшення витрат енергії сонячного випромінювання влітку, економія енергії за рахунок зменшення втрат теплової енергії взимку або в поєднанні з обома.

Оскільки інтенсивність випромінювання досить висока влітку, деякі затінення можуть бути корисними для врожаю. Звичайно, обмеження рівня освітленості трохи зменшить потенційне виробництво, проте затінення дійсно підвищує якість врожаю та зменшує ризик пошкодження врожаю. У теплицях зазвичай використовують два типи екранів; внутрішні екрани та зовнішні. Внутрішні екрани дешевші і можуть використовуватися як для затінення, так і для утеплення вночі. Їх основним недоліком є обмежувальний вплив на вентиляцію, оскільки вони блокують повітрообмін між теплицею і вікнами в даху. Зовнішні екрани також обмежують вентиляцію, проте меншою мірою.

У всіх випадках внутрішній екран закривається, коли зовнішнє випромінювання перевищує 500 Вт/м^2 . Екрани з більшим затіненням знижують температуру теплиці та врожаю, однак і потенційна продукція рослинництва зменшується.

Існує цілий ряд факторів, які є неоптимальними в традиційних теплицях. Оптимізація цих умов збільшить рівень виробництва. Коли всі параметри в теплиці є оптимальними (температура, відносна вологість, рівень CO_2), кількість світла визначає виробництво.

1.5 Закрита теплиця

Закрита теплиця використовує механічне охолодження для контролю температури та вологості всередині теплиці. Це робить клімат всередині

теплиці абсолютно незалежним від клімату зовні, а це означає, що рослини вирощувати в найкращих можливих умовах. Таким чином, виробництво заводу залежить лише від наявного сонячного випромінювання, що є досить високим. Звичайно, закрита теплиця має не тільки переваги; це вимагає великих інвестицій: вартість і висока експлуатаційна вартість (теплиця потребує великих витрат енергії для забезпечення охолодження).

Урожай висаджують у грудні та вирощують цілий рік. Протягом усього року тепличний клімат контролюється для створення сприятливих умов вирощування; нагрівальний набір, точка (температура, при якій система опалення починає працювати) встановлюється на 20°C вдень та 17°C на ніч. Коли сонячне світло підвищує температуру в теплиці більше ніж на 4°C вище заданого значення, охолоджувальне обладнання запускається для відведення надлишку тепла. Вікна ніколи не відчиняються. Окрім контролю температури, охолоджувальне обладнання також використовується для контролю відносної вологості. Коли вологість тепличного повітря перевищує 85% (вдень) або 90% (вночі), охолоджувачі використовуються для зневоднення повітря всередині.

1.6 Вибір ділянки для тепличних господарств

За останні десятиліття площа теплиць збільшилася у всьому світі, головним чином завдяки збільшенню використання теплиць для вирощування овочевих культур. Вибір місця є ключовим фактором прибуткового та стійкого тепличного виробництва. Головні фактори, що визначають місце розташування та вибір ділянки тепличного виробництва це: собівартість продукції, якість виробленого врожаю та транспортні витрати до ринків. Очевидно, вартість і якість продукції залежать від місцевого клімату та умов вирощування теплиць. Рівень інвестиції в технології (прості або складні теплиці та обладнання), як і управління, в першу чергу залежить від місцевого клімату.

Сьогодні перевезення на великі відстані означають, що виробничі площі можуть бути розташовані далеко від основних центрів споживання, що дозволяє розвивати парникові галузі в багатьох кліматично сприятливих районах світу. На додаток до транспорту, маркетинг (стандартизація, упаковка тощо) також впливає на загальну вартість продукції; вони, як правило, схожі для різних товарів, що надходять з різного географічного походження, але які конкурують на однакових ринках.

З історичної точки зору початковою метою тепличного вирощування було вирощування вимогливих до тепла видів протягом зимового сезону в країнах помірної клімату. Всередині теплиці більш сприятливі температури можуть бути досягнуті в холодну пору року, завдяки ефекту вітрозахисту та парниковому ефекту. Під час теплого сезону, де є високе сонячне випромінювання і температура перевищує рекомендований максимальний пороговий рівень, парниковий ефект має негативний вплив на мікроклімат та продуктивність врожаю.

Однак ці негативні наслідки є для деяких ступенях, компенсовані затіненням і можуть регулюватися до певного ступеня належної вентиляції та охолодження теплиці.

Парниковий ефект є результатом двох різних ефектів:

- ефект обмеження, що виникає внаслідок зменшення обміну повітря з зовнішнім середовищем;
- ефект, спричинений існуванням покриву, що характеризується його низьким рівнем прозорості для інфрачервоного випромінювання (що випромінюється врожаєм, ґрунтом та внутрішніми парниковими елементами), але його високою прозорістю для сонячного світла.

Використання облицювання теплиць екранами (сітками) протягом року, замість пластикових плівок, стала звичною практикою в останні роки в районах дуже м'якої температури (низькі широти) і в районах, де є температури дуже помірні у вибрані періоди (середні широти навесні та влітку). У цих «Екранів», парниковий ефект мінімальний, як і ефект

утримання дуже обмежений і сонячне світло зменшується (оскільки прозорість екранів для сонячного світла є, як правило, нижче, ніж у звичайних тепличних пластикових плівках для облицювання). Цей мінімальний парниковий ефект варіюється залежно від характеристик екранів (проникність для повітрообміну із зовнішнім середовищем та прозорість для сонячного світла), тоді як переважають ефекти затінення та вітрозахисту. Екранні будинки не захищають посіви від опадів, оскільки їх покрив проникний, але вони можуть зменшити збитки, спричинені сильним дощем та градом.

В даний час існує великий попит споживачів на цілорічну якісну продукцію, що обумовлює виробничі стратегії в тепличній промисловості. Тепличні культури в зимовому кліматі не можна вирощувати цілий рік з високою якістю. Проблему постачання овочів високої якості цілий рік можна задовольнити, прийнявши одну з двох основних стратегій:

- Вирощування у високотехнологічних теплицях, уникаючи сильної залежності від клімату на відкритому повітрі.
- Вирощування в двох або більше місцях з додатковими періодами збору врожаю, забезпечення постійного та скоординованого цілорічного постачання на ринки.

Друга альтернатива (використання різних місць, як правило, з різними парникових технологічних рівнів) - стратегія, яка дедалі більше приймається.

Сьогодні, глобалізація ринку призвела до більшої конкурентоспроможності; тому необхідно підвищити якість тепличної продукції завдяки кращому клімат-контролю.

Найчастіше вирощувані види в теплицях – це овочі з середнім рівнем теплових вимог (помідор, перець, огірок, диня, кавун, зелена квасоля, баклажани).

1.7 Висновки до розділу

Проаналізовано різні види опромінення рослин закритого ґрунту.

Представлено методології проектування тепличних господарств та вибір ділянки для них.

Розглянуто вимоги щодо опромінення рослин.

2 РОЗРАХУНКОВО–ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Робота світлодіодів в імпульсному режимі

Тоді як попередні покоління світлодіодів в основному використовувались як показники в повсякденній електроніці, останні події призвели до масового виробництва пристроїв, світловіддача яких конкурує з звичайними джерелами світла. Вони знаходять спектр застосувань в діапазоні від архітектурного освітлення до проекційної системи та тепличних господарств. В рамках діагностики потоку світло діоди обіцяють низку привабливих переваг і тому заслуговують більш пильного дослідження. Крім того, що ціна закупівель з кожним роком знижується, в них значно довший термін служби, світлодіод забезпечує некогерентне світло на досить широкий діапазон довжин хвиль. Якщо працює в імпульсному режимі, сигнал світимості світлодіода надзвичайно стабільний, як з точки зору інтенсивності, так і як просторовий розподіл інтенсивності.

Ще одна цікава характеристика та основний акцент цієї роботи полягає в тому, що світлодіоди можуть експлуатуватися з використанням сильного струму, змінюючи тривалість імпульсів. У цьому випадку температура переходу залишається нижче пошкодженого порогу, тоді як генерація фотона за одиницю часу становить приблизно зростає пропорційно поточному збільшенню. Це робить світлодіод особливо цікавим для використання, як імпульсне джерело світла в діагностиці на основі зображень.

У таблиці 2.1 наведено характеристики декількох типових світлодіодів перевірених в ході техніко-економічного обґрунтування.

Світлодіоди були досліджені, частково, завдяки сучасній візуалізації датчики демонструють пікову квантову ефективність в жовтому / зеленому діапазонах (550 - 530 нм). Перераховані пристрої представляють два різні типи світлодіодів:

Перші три, доступні від Philips, розроблені для загального освітлення і містять досить малі дози світлового випромінювання, які вкладені в об'єктив у формі прозорого куполу. Інші два пристрої доступні від Luminus, спеціально розроблені для проектування систем. На відміну від більшості загальнодоступних світлодіодів, ці пристрої, по суті, є поверхневими випромінювачами з майже постійним розподілом інтенсивності на одиницю площі. Це досягається фотонною решіткою, прикріпленою до поверхні випромінювача, який направляє світло через мікрони, поверхнево-нормальні отвори.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики вибраних світлодіодів

Випромінювач	I_f , A	Φ_v , lm	λ_o , nm	$I_{f,max}$ A	A_{lum} , mm ²
LXHL-PD09	1,4	140	627	1,54	1,5*1,5
LXHL-PL09	1,4	110	590	1,54	1,5*1,5
LXHL-PM02	0,7	160	530	1	2*2
CBT40	5,9	625	528	12	2,09*1,87
CBT120	18	2100	528	36	4,6*2,6

2.2 Характеристики світлодіодів в імпульсному режимі роботи

Центральним аспектом поточного дослідження була імпульсна робота світлодіодів з великим струмом протягом короткого часу. Це було досягнуто за допомогою електронних схем, які є схематично представлено на рисунку 2.1. Робота струму імпульсного діода дуже проста: банк конденсаторів (C1, C2) з низьким внутрішнім опором (ESR) спочатку заряджається джерело живлення VS (тип. 20–50 В). Транзистор (T1) спрацьовує через схему драйвера, який має вхід, сумісний з TTL. Світлодіодний (LD1) катод підключений до стоку силового транзистора, джерелом якого є підключений до землі через резистор з низьким опором (R2, тип. 0,01 –0,1). У цій конфігурації схема діє як імпульсне джерело постійного струму для

навантаження, тобто це світлодіод. Використовується падіння напруги на цьому резисторі VR2 для оцінки струму, що протікає через світлодіод. Діод D1 захищає світлодіод від потенційно пошкоджуючих зворотних струмів, які виникають під час швидкого переключення перехідних процесів схеми.

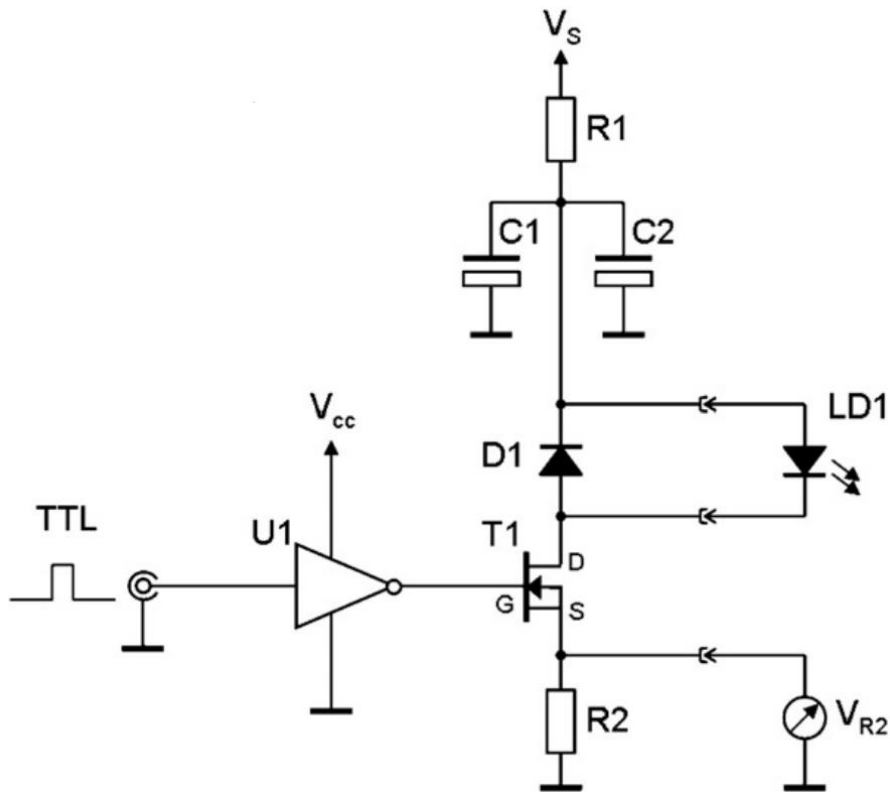


Рисунок 2.1 – Приклад схеми драйвера, що використовується для роботи імпульсних світлодіодів

Призначення резистора R1 полягає в обмеженні струму зарядки конденсаторної батареї між імпульсами струму та ним виступає в якості елементарного методу захисту від надмірного струму, якщо світлодіод випадково працює в безперервному режимі.

Короткі довжини свинцю з великими перерізами між конденсаторами C1, C2, транзистор T1, діод D1, світлодіод LD1 і заземлення необхідні для отримання хороших показників. Через високі імпульсні струми і час наростання в мікросекундному діапазоні навіть короткі з'єднувальні дроти

призводять до значних перепадів напруги між електронними компонентами, а також непотрібного індуктивного навантаження ланцюга.

Представлені вимірювання роботи імпульсних світлодіодів були виконані як із власноруч розробленими, так і з наявними в продажу імпульсниками струму. Для імпульсної роботи діодів взято пристрій, що здатний подавати імпульси струму до $I_f = 50$ А при тривалості до $t_r = 10$ мкс з відповідним часом підйому 4 нс. Через обмежену ємність, доступну на стороні живлення блоку виставляються довші імпульси $t_r > 1$ мкс, помітним експоненціальним спадом струму світлодіодного приладу і призвело до відповідного експоненціального зменшення світлодіодного світла під час імпульсу. Цю проблему було вирішено за допомогою драйвера, у якого повільніший час підйому (типове τ підйом ≈ 100 нс), враховуючи те, що вивчений спектр застосувань робить використання імпульсів в діапазоні 1 мкс $< t_r < 20$ мкс. Ця схема є здатною подавати імпульсні струми, що перевищують 200 А, використовуючи частини, зазначені на рисунку 2.1.

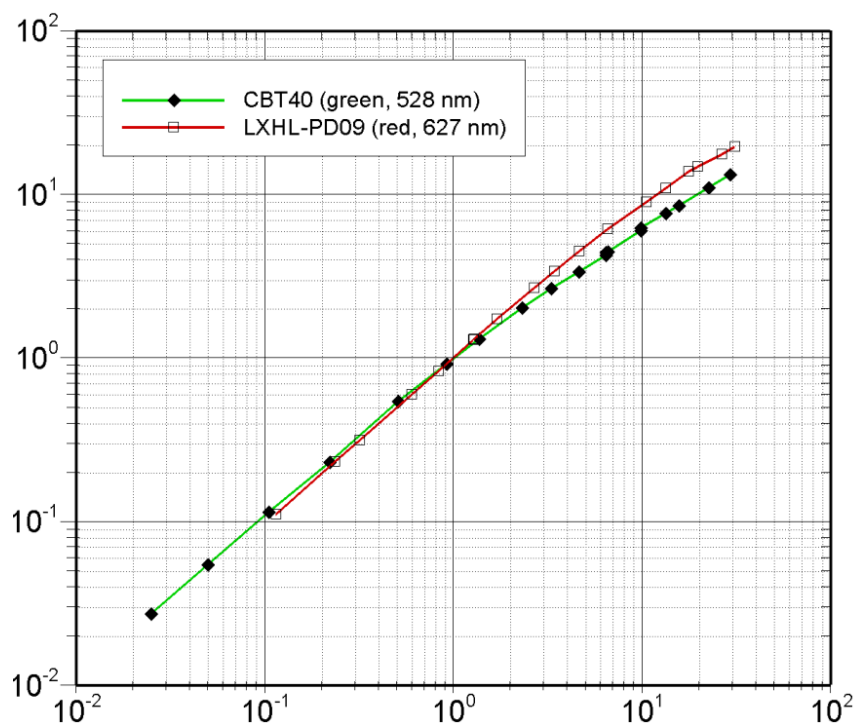


Рисунок 2.2 – Світність світлодіодів великої потужності, з імпульсом

1 мкс

Рисунок 2.2 ілюструє підвищену світність двох потужних світлодіодів, що керуються короткочасними імпульсами струму (тут 1 мкс при 1 кГц). В обох випадках до світлодіодів підводяться максимальні струми в діапазоні 30А, що перевищує коефіцієнт номінального струму I_f для червоного світлодіода. Для зеленого світлодіода номінальний струм перевищується в 5 разів пропонуючи подальше збільшення без пошкодження пристрою. Жоден з перевірених пристроїв не зазнав помітних пошкоджень при роботі в імпульсному режимі при таких рівнях струму та низькому робочому циклі (менше 1: 100).

Дані, показані на рис.2.2, підтверджують відоме збільшення світлового потоку Φ_v зі збільшенням струму. При більш високих струмах ККД або пропорційність зменшується приблизно до 0,4. Зелений світлодіод (СВТ-40) демонструє подібну поведінку при слабкому струмі, але зменшується приблизно до 0,35 при струмах понад 10А. Це вказує на зменшення пропорційності зі збільшенням належних струмів до ефектів насичення. Не показано дані для зеленого світлодіода потужністю 5 Вт (LXHL-PM02), для яких пропорційність зменшується до 20% при струмах понад 30А. Для порівняння пристрій великої потужності СВТ-120, який має в 3 рази більшу люмінесцентну площу, ніж СВТ-40 демонструє пропорційність 40% при 40А, що вказує значні запаси для роботи при ще більших струмах.

Чим менший високий струм, тим пристрої LXHL-PD09 (червоний) та LXHL-PM02 (зелений) можуть рухатися при імпульсних струмах 50А без негайного пошкодження, що перевищує номінальний струм в 30 і 70 разів, відповідно. Це говорить про те, що сильніші пристрої СВТ-40 і СВТ-120 можуть рухатися при значно більших струмах в діапазоні 100-200А. Імпульсна потужність СВТ-120 близько 60 Вт при $I_f = 200\text{А}$. Це відповідає енергії імпульсу 60 мкДж для імпульсу 1 мкс. Цього достатньо для надійної високошвидкісної роботи.

Побічним ефектом імпульсної роботи світлодіодів є те, що довжина хвилі випромінювання може суттєво зсуватися в міру струму збільшення. Цей ефект показано на рисунку 2.3 для двох світлодіодних випромінювачів. Приблизно вибрано імпульси аналогічні інтегральній вхідній потужності для підтримки середнього переходу температури. Поки відображається жовтий світлодіод (LXHL-PL09) лише незначний зсув частоти приблизно $\Delta\lambda = 2$ нм у бік більшої довжини хвилі, зелений пристрій зміщується більш ніж на $\Delta\lambda = 30$ нм у напрямку до блакитного кольору. Взагалі зелений пристрій має більш широкий спектр випромінювання, який також приписується переходу матеріалу (так зване розширення сплаву).

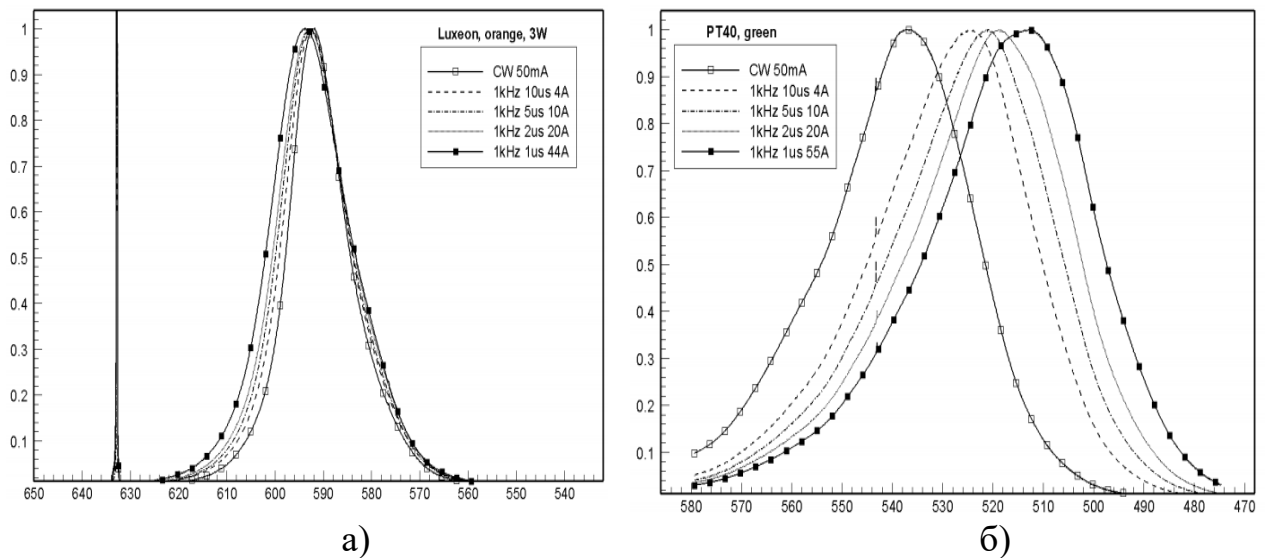


Рисунок 2.3 – Розподіл спектральної інтенсивності світлодіодів, що працюють в безперервному (а) та імпульсному (б) режимах.

Недовге ввімкнення світлодіодів на високих струмах збільшує температуру стику, яка напружує кристал, спричиняючи дефекти у своїй решітці, які потім більше не сприяють до генерації світла.

Зелений світлодіод (LXHL-PM02) імпульсував при $I_f = 2$ А протягом 20 мкс.

Світлодіодний пристрій, що використовує імпульси 30А тривалістю 2 мкс. Затримка імпульсу становила $\tau = 15$ мкс.

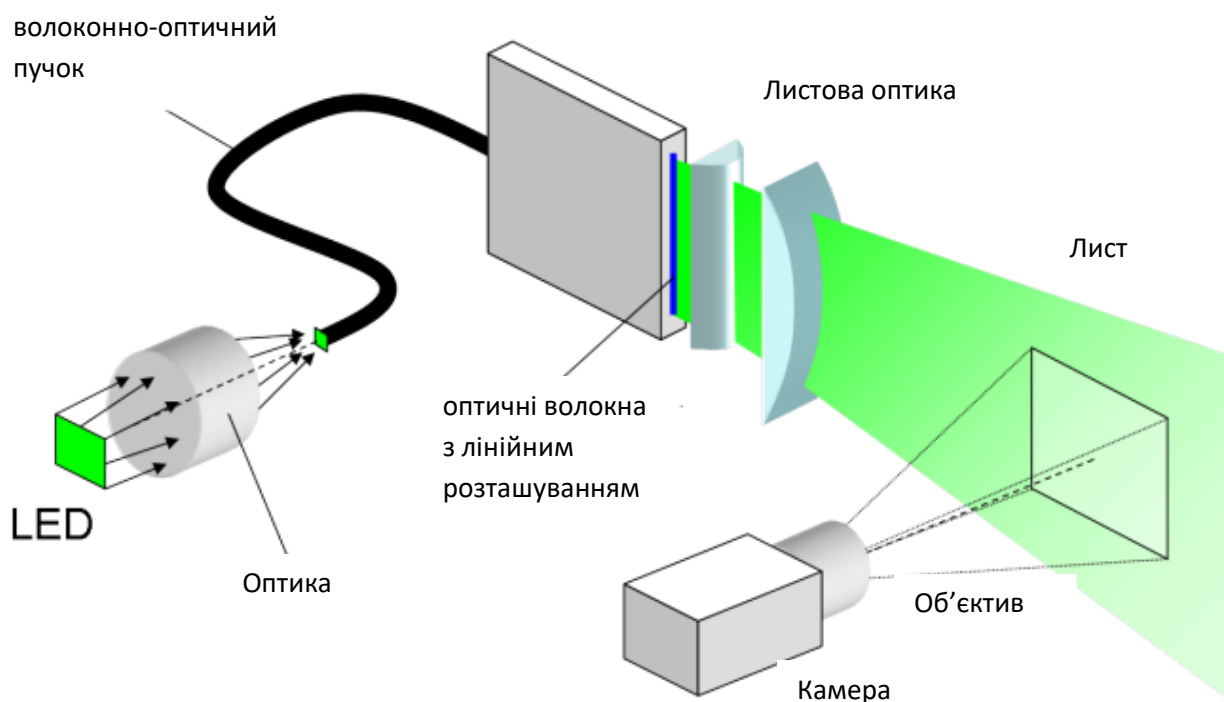


Рисунок 2.4 – Освітлення світлового аркуша на основі світлодіодів

Найбільш перспективні експерименти були проведені, коли світлодіодне світло було укомплектоване у світловий лист за допомогою волоконно-оптичної система освітлення, також відоме як лінійне світло.

Як видно з рисунка 2.4 вхідна сторона пучка волокон кругла, тоді як волокна розташовані вздовж лінії на дистальному кінці. Це лінія колімована, щоб сформувати легкий аркуш з використанням короткої фокусної відстані циліндричної лінзи.

Вище описані експерименти наочно демонструють доцільність використання імпульсних світлодіодів високої потужності. Світлодіоди життєздатні для забезпечення гучності освітлення, такі методи візуалізації, як томографічний або тривимірний частинка відстеження. З точки зору керування, незрівнянне світло світлодіодів є менш небезпечним, але не обов'язково безпечним для очей.

На сьогодні доступні світлодіоди високої потужності особливо добре підходять для застосувань, що вимагають такого рівня освітленості.

Розглянуті світлодіоди, як джерела світла, можна збирати за значно знижених витрат.

Імпульсне світло при значному рівні інтенсивності можна отримати за допомогою пристроїв ненадовго навантаживши їх сильними струмами. Проблеми, які ще потрібно вирішити, пов'язані з досить ширококутною картиною світла видаючи зі світлової поверхні світлодіода.

Сукупна вартість світлодіодних джерел світла, компоненти драйвера та волоконна оптика, що використовуються в високошвидкісній установці зображення складає приблизно 500,00 євро.

Світлодіоди можна «спрацьовувати» з незначною затримкою, тобто всередині кілька наносекунд, залежно від електроніки.

Час наростання світлодіодів знаходиться в діапазоні 100 нс. Частоту повторення можна вільно змінювати, оскільки світлодіоди цього не роблять, потрібно працювати на певних імпульсних частотах.

Подальший розвиток, безсумнівно, призведе до світлодіодів з ще більшою світловіддачею на площу поверхні. Висока потужність пристроїв, що використовуються для цього дослідження, мали світловий вихід порядку 175 лм на квадратний міліметр матриці зі світловою ефективністю близько 20–30 лм на ват вхідної потужності. Перевищення світлової ефективності потужністю 100 лм Вт – вже продемонстровано для потужних світлодіодів білого світла. Сучасні технологічні тенденції ймовірно це призведуть до світлодіодних пристроїв, які є відповідними джерелами світла для діагностики потоку, зокрема для площинних методів, а також нещодавно запроваджених методів вимірювання об'єму, що базуються на частинках. Використання імпульсного світлодіодного освітлення є привабливим для тепличних господарств.

2.3 Видимі світлодіоди

Видимі світлодіоди (HBLED) з високою яскравістю здобули репутацію високої ефективності та тривалого терміну служби, що призвело до їх більшпоширеного використання, у тому числі для внутрішнього освітлення, а також і для тепличних господарств. Широкі дослідження та виробників світлодіодів призвели до створення світлодіодів з вищим світловим потоком, довшим терміном служби, більшою кольоровістю, що зумовило попит. Точне і економічне випробування має вирішальне значення для забезпечення надійності та якості цих пристроїв.

Через високу робочу потужність цих пристроїв, напівпровідниковий перехід світлодіода буде прагнути нагріватися. У міру нагрівання переходу пряма напруга впаде або струм витoku збільшиться протягом постійної напруги. Ці ефекти можуть вплинути на точність або, що більш важливо, потенційно пошкодити пристрій. Тому важливо скорочувати кожен час якомога більше, не жертвуючи точністю вимірювань або стабільністю.

Пряма напруга HBLED падає в міру нагрівання його з'єднання.

Вбудований імпульсний прилад SMU 2461 SourceMeter та швидкий цифровий перетворювач дозволяють скоротити час тестування. Прилад здатний пульсувати до 10А, 100В з мінімальною шириною імпульсу 150 мкс. Ці можливості дозволяють мінімізувати самонагрівання та пошкодження HBLED та одержати більш надійну роботу. Широка потужність 1 кВт і точна синхронізація імпульсів дозволяють йому безпечно працювати на дуже великих потужностях, не боячись пошкодження. Імпульси можна налаштувати безпосередньо на передній панелі приладу або через віддалену шину зв'язку.

Рисунок 2.5 демонструє дві розгортки HBLED, виконані за допомогою приладу. Зелена крива показує розгортку, виконану за допомогою його вбудованих пульсуючих можливостей. Синя крива показує те саме, але без пульсації.

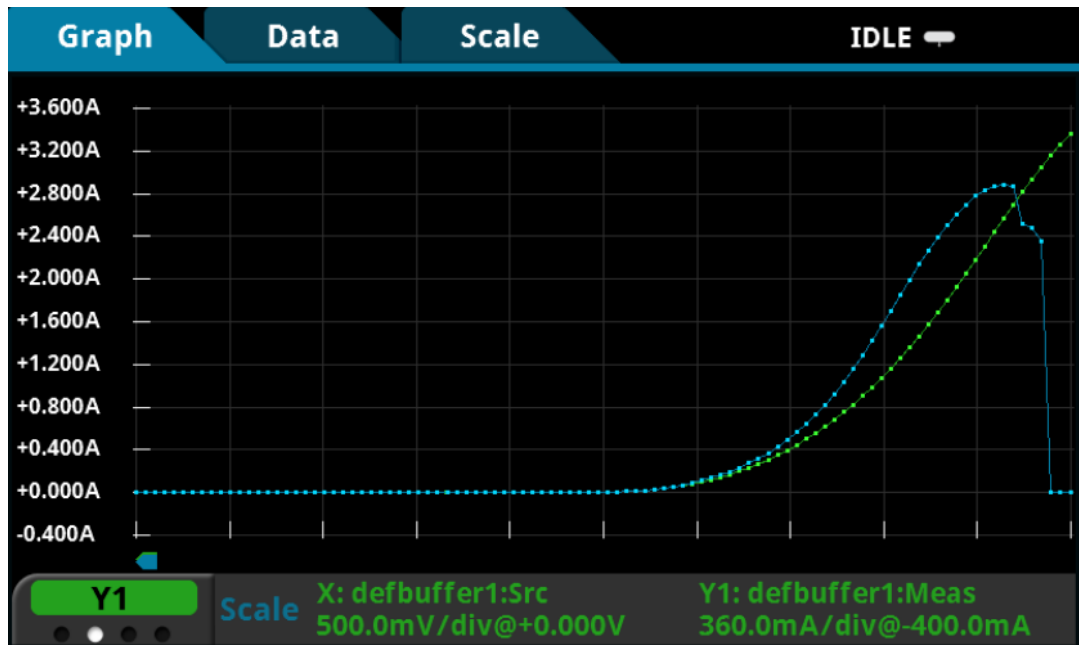


Рисунок 2.5 – Дві розгортки працюють на одному HBLED. Зелена крива - це імпульс. Синя крива - це традиційна розгортка

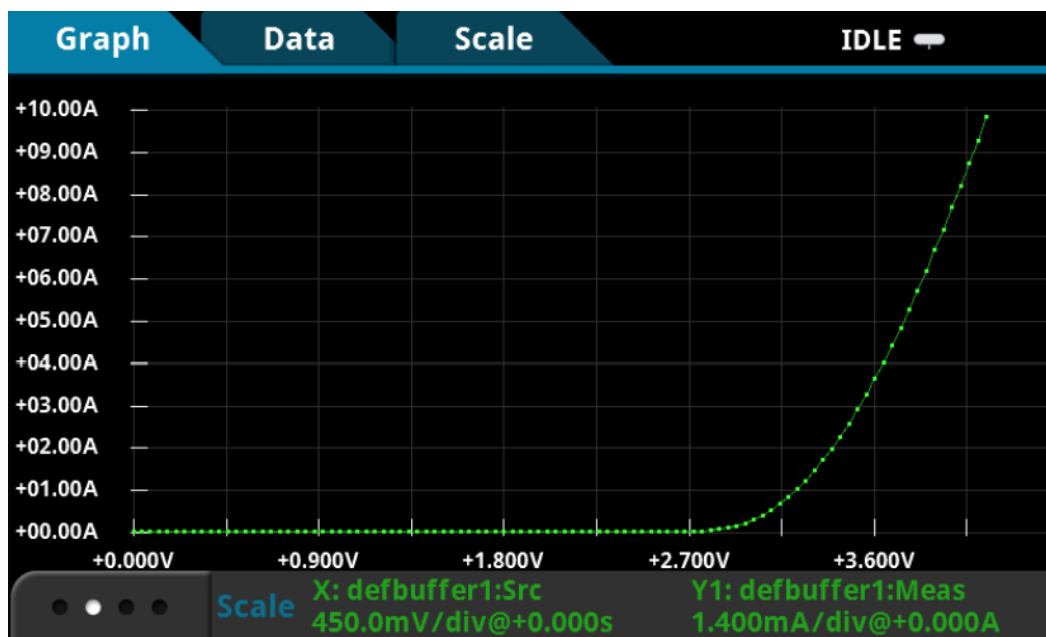


Рисунок 2.6 – Отриманий графік імпульсного розгортки ВАХ на передній панелі

Зелена імпульсна крива не проявляє ефектів самонагрівання, а синя крива демонструє самонагрівання та катастрофічний збій.

Прилад можна легко запрограмувати на виконання імпульсного вводу-виводу випробування кривої, імпульсного випробування прямої напруги, імпульсного витоку та зворотного пробою. Прилад може бути налаштований на джерело напруги або струму, а також може виміряти кожен із цих типів сигналів.

Прилад налаштований на розгортку від 0 до 4,15 В імпульсів протягом 100, 1 мс. Коли прилад працює на рисунку 2.6 є відображення на передній панелі. На рисунку 2.7 показано зразок імпульсу, захопленого цифровим перетворювачем в короткій тривалості імпульсу.

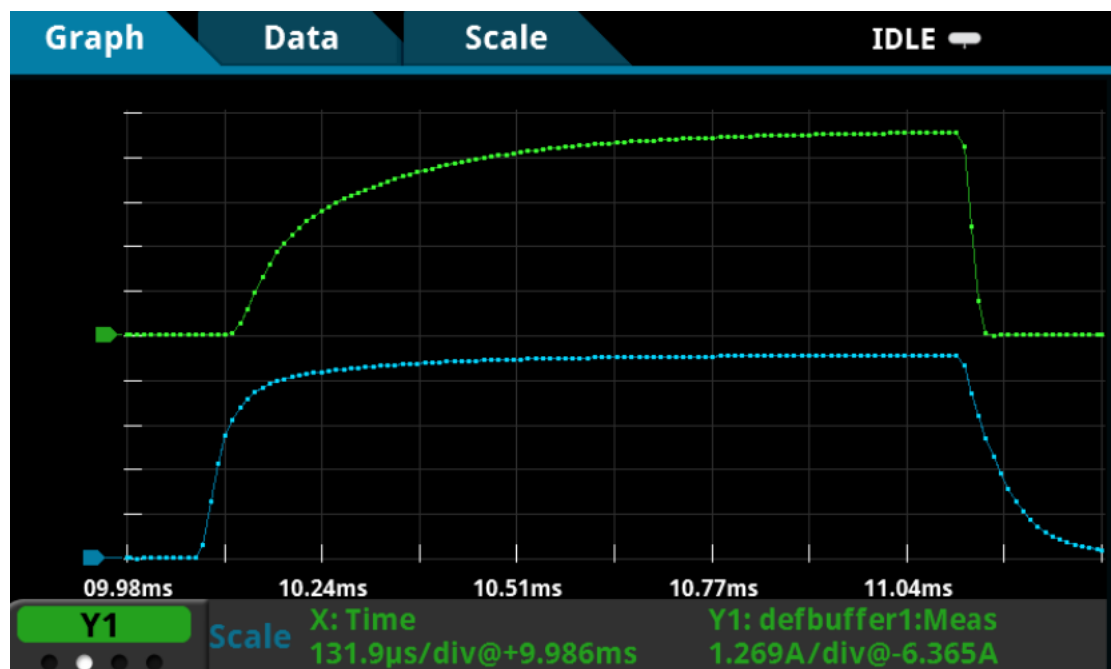


Рисунок 2.7 – Імпульс, захоплений цифровим перетворювачем в короткій тривалості імпульсу. Форма сигналу вимушеної напруги відображається синім кольором і форма сигналу струму відображається зеленим кольором

На діод подається прямий струм. Під час початкових значень джерела низького струму, падіння напруги на діоді швидко зростає, але нахил починає вирівнюватися в міру збільшення струму. Діод зазвичай працює в цій області відносно постійної напруги.

Для випробування прямої напруги потрібне джерело відомого струму та вимірювання результуючої напруги падіння через діод. Типові струми коливаються від десятків міліампера до ампер, в той час як отримане вимірювання напруги зазвичай знаходиться в межах декількох вольт.

Зсув прямого струму також використовується для оптичних випробувань, оскільки потік електричного струму тісно пов'язаний з величиною випромінювання світла. Вимірювання оптичної потужності може проводитись, коли розміщення фотодіода або інтегруючої сфери є близько до пристрою для захоплення випромінюваних фотонів. Тоді це світло перетворюється на струм, який можна виміряти амперметром.

Також світловіддачу діода можна вимірювати одночасно за допомогою фіксованого джерела. Крім того, такі деталі, як спектральний вихід можна отримати, використовуючи одне і те ж значення струму на спектрометрі.

Імпульс від декількох сотень мікросекунд до п'яти мілісекунд і від 5 до 20 мілісекунд. За допомогою цих коротких пульсових імпульсів в рази зменшуються помилки через нагрів переходу. Крім того, характеристики нагріву переходу можуть бути визначені змінюючи лише час тестування.

Зазвичай помірний рівень напруги (вольт до десятків вольт) використовується для вимірювання струму витоку. Струм витоку вимірює струм низького рівня, який протікає через світло діод, коли застосовується зворотна напруга менше пробою.

Застосування струму зміщення до світлодіода дозволить зондування для так званої зворотної напруги пробою. Струм повинен бути встановлений на рівень, де вимірюється напруга, значення не значно зростає, коли сила струму збільшується. На рівнях, що перевищують цю напругу, великі збільшення поточного зворотного зміщення призводить до незначних змін у зворотній напрузі. Специфікація цього параметра зазвичай мінімальне значення. Струм зворотного зміщення низького рівня протягом заданого часу

вимірювання це падіння напруги на світлодіоді. Результат вимірювання зазвичай знаходиться в межах десятків вольт.

Три кроки для створення та побудови графіків коливання напруги, а потім дані можна зберегти на USB-накопичувач:

Крок 1. Створення та виконання розгортки з графічного інтерфейсу користувача

Крок 2. Перегляд графіку. Щоб переглянути дані графічно, натисніть клавішу MENU, а потім кнопку Графічна кнопка. Графік розгортки буде автоматично відображатись. Щоб повторити тест, просто натисніть клавішу TRIGGER.

Крок 3. Збереження даних на USB-накопичувачі

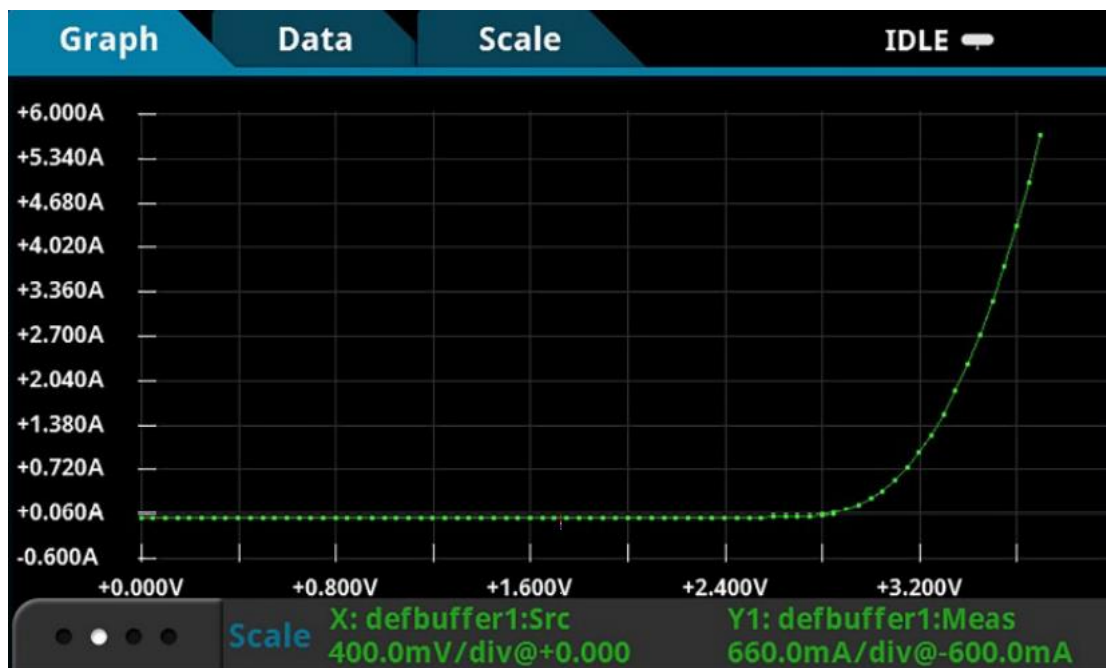


Рисунок 2.8 – Розгортка сформована на графічному екрані.

На рисунку 2.8 показана крива HBLED, що генерується. Рисунок 2.9 ілюструє, наскільки яскравим може бути HBLED при високому рівні струму.

Щоб зберегти дані на USB-накопичувачі, просто вставте USB-накопичувач, натисніть клавішу MENU, виберіть Reading Buffers, а потім натисніть ЗБЕРЕГТИ НА USB. Введіть ім'я файлу. Дані будуть збережені у

форматі .csv, щоб згодом їх можна було завантажити в електронну таблицю та проаналізувати.

Оцифровка цифрового зображення дозволяє фіксувати напругу та струм хвильових форм одночасно зі швидкістю 1 млн. зразків в секунду.



Рисунок 2.9 – HBLED світиться при 4,1 вольт та 4,8 ампера.

Цілу форму імпульсного сигналу можна оцифрувати та переглянути на передній панель приладу або збережену на флеш-накопичувачі USB з переглядом на комп'ютері. Цей захоплений сигнал може бути використаний для перегляду імпульсної реакції та як екран для тиристорних ефектів у виробництві.

2.4 Робочий цикл світлодіодів в імпульсному режимі

Світлодіоди можна використовувати для отримання постійного світла, підтримуючи постійний струм, що протікає через пристрій.

З іншого боку, світлодіодами можна легко управляти в імпульсному (ввімкненому/вимкненому) режимі і їх можна вмикати і вимикати послідовно, включаючи їх лише за необхідності.

Використання світлодіодів в імпульсному режимі має багато переваг:

- Подовження тривалості їхнього життя.
- Зменшення розсіювання потужності.
- Зменшення генеруючого опалення.

Якщо для струму (або напруги) світлодіода встановлено номінальне значення, заявлене виробником світлодіода протягом певного періоду, а потім скидається до нуля, ми говоримо про імпульсний режим: світлодіод просто вмикається і вимикається.

Світлодіоди також можуть рухатися з більшою інтенсивністю (тобто перевантаженою), ніж номінальні, таким чином виробляючи більше світла, але лише протягом обмеженого періоду часу: в цьому випадку ми говоримо, що світлодіод працює в стробоскопічному режимі.

Строббінг необхідний, коли нам потрібна збільшена кількість світла, щоб заморозити рух предметів, які швидко рухаються, щоб усунути вплив навколишнього світла, зберегти тривалість життя світлодіода та синхронізувати час увімкнення світла (t_{on}).

Для правильної стробоскопії світлодіодного світла необхідно враховувати кілька параметрів (рисунок 1):

Максимальна ширина імпульсу або час увімкнення (t_{on}): максимальна кількість часу, протягом якого світлодіодне світло може бути ввімкнене при максимальному прямому струмі.

Робочий цикл D визначається як (зазвичай виражається у %):

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

де t_{off} - це час, протягом якого світлодіодне світло вимикається, а $T = t_{on} + t_{off}$ - період циклу. Робочий цикл дає частку у % від часу циклу,

протягом якого світлодіоди можуть вмикатись. Період T також можна вказати як частоту циклу $f = 1/T$, виражену в герцах (Гц).

Визначення максимального часу роботи при різних частотах імпульсу.

Ключовим моментом керування світлодіодом в імпульсному режимі є не подолання максимальної потужності світлодіода. Потужність, що розсіюється пристроєм, виражається наступним рівнянням:

$$P = V * I$$

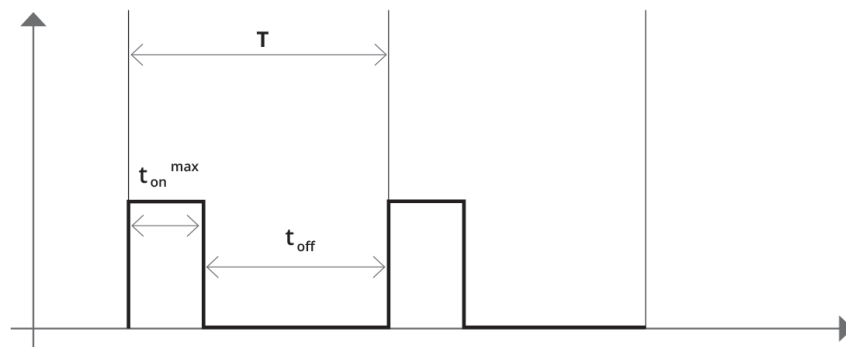


Рисунок 2.10 – Параметри імпульсного світлодіода

Це рівняння легко обчислюване при роботі з постійним освітленням світла. З іншого боку, при імпульсі світлодіода слід враховувати час увімкнення та вимкнення. Зазвичай опромінювачі постачаються з усіма світлодіодними імпульсними характеристиками.

Наприклад, беручи до уваги опромінювач LTRV, максимальний рушійний струм становить 1,8 А, а максимальний час роботи дорівнює 1 мс при імпульсі при 15 Гц. У цьому випадку максимальний середній струм світлодіода дорівнює:

$$I_{smax} = I_{max} * \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Пам'ятаючи, що частота імпульсу:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$$

струм можна обчислити як:

$$I_{smax} = I_{max} * t_{on} * f$$

Або, по-іншому, використовуючи визначення робочого циклу D:

$$I_{smax} = I_{max} * D$$

Підставляючи максимальний струм руху, час включення та частоту імпульсу, отримуємо:

$$I_{smax} = 27mA$$

Цей струм не повинен перевищувати струм при використанні даного опромінювача.

Якщо, наприклад, ми хочемо імпульс з частотою 30 Гц (подвоєний відносно попередньої частоти), обов'язково зменшити час включення до 0,5 мс (половина попереднього часу включення), щоб добуток максимальний струм руху (1,8 А) з новими двома даними (30 Гц та 0,5 мс) не перевищує значення 27 мА.

Підводячи підсумок, переваги та недоліки імпульсних світлодіодних джерел такі:

Переваги:

- За короткий проміжок часу можна отримати велику кількість світла (обов'язково для швидкого нанесення).
- Збільшена тривалість життя світлодіода.
- Може зменшити розсіювання потужності.

Недоліки:

Для належного освітлення світлодіодного джерела необхідний контролер світла

2.5 Аналіз світлодіодних драйверів

Драйвер mD-1c



Світлодіодний драйвер mD-1c Minidriver mD-1c призначений для роботи в напівнеперервному режимі (в режимі генерації симетричного однополярного меандра). Квазінеперервний режим забезпечує максимальну середню оптичну потужність від світлодіода. Дані сигналу (такі як амплітуда, частота повторення та тривалість імпульсу) залишаються стабільними, тоді як вхідна напруга може коливатися від 5 до 6 В. Minidriver mD-1c виготовляється без упаковки і являє собою друковану плату з виходами для підключення.

Драйвер mD-1p



Світлодіодний драйвер mD-1p Minidriver mD-1p призначений для роботи в імпульсному режимі (в режимі генерації одного імпульсу). Імпульсний режим забезпечує максимальну середню оптичну потужність від світлодіода. Дані сигналу (такі як амплітуда, частота повторення та тривалість імпульсу) залишаються стабільними, тоді як вхідна напруга може коливатися від 5 до 6 В. Minidriver mD-1p виготовляється без упаковки і являє собою друковану плату з виходами для підключення.

Драйвер DmD-ср



Драйвер світлодіодів dmD-ср Драйвер DmD-ср призначений для імпульсної потужності двоелементних світлодіодів. Драйвер DmD-ср дозволяє підключити два різних світлодіоди або один двоелементний

світлодіод. Він працює в двох режимах: квазінеперервному та імпульсному. Максимальна середня оптична сила випромінювання світлодіода досягається в квазінеперервному режимі (в режимі генерації симетричного монополярного меандра). Період повторення імпульсу 1000 мікросекунд, ширина імпульсу 500 мікросекунд, частота повторення 1 кГц. Пікова потужність струму окремого елемента світлодіода не перевищує 150 мА.

Максимальна пікова оптична сила джерела випромінювання досягається в імпульсному режимі. Період повторення імпульсу становить 500 мкс, ширина імпульсу - 5 мкс, частота повторення - 2 кГц. Піковий струм живлення окремого елемента світлодіода не перевищує 2 А. Параметри сигналу (амплітуда, частота та тривалість імпульсу), генеровані драйвером, не залежать від величини вхідної напруги. Вхідна напруга може знаходитися в діапазоні 5 ... 6 В. Драйвер має пакет і два виходи синхросигналу від різних каналів живлення світлодіодів.

Драйвер Д-31М



Світлодіодний драйвер D-31М Драйвер D-31М забезпечує два режими роботи:

- Mode Режим квазібезперервної хвилі (квазістаціонарний). Цей режим забезпечує максимальну середню оптичну потужність від світлодіода. Струм можна змінювати в діапазоні 25-250 мА. Можна вибрати одну з чотирьох частот (0,5 кГц, 2 кГц, 8 кГц та 16 кГц).
- Імпульсний режим: Цей режим забезпечує максимальну пікову оптичну потужність від світлодіода. У цьому режимі, крім регулювання частоти, тривалість імпульсу також може бути вибрана в діапазоні 0,6-20 мкс. Піковий струм можна змінювати в діапазоні 0-2 А. Будь ласка, не

використовуйте комбінацію частоти та тривалості імпульсу, що дає робочий цикл > 10%. Ми рекомендуємо використовувати струм імпульсу 2 А лише при тривалості імпульсу < 1 мкс.

Драйвер DLT-27M



Світлодіодний драйвер DLT-27M Драйвер DLT-27M призначений для живлення всіх моделей із вбудованими термоохолоджувачами.

Драйвер забезпечує два режими роботи:

1. Режим квазібезперервної хвилі (квазістаціонарний). Такий режим забезпечує максимальну середню оптичну потужність від світлодіода. Струм в цьому режимі можна змінювати в діапазоні 20-250 мА. Частота модуляції становить 16 кГц.

2. Імпульсний режим. Такий режим забезпечує максимальну пікову оптичну потужність від світлодіода. Піковий струм в імпульсному режимі можна змінювати в діапазоні 0-2 А. Тривалість імпульсу становить 1 мкс. Вбудований в DLT-27M регулятор температури забезпечує вибір та стабілізацію температури на мікросхемі світлодіода в широкому діапазоні. Це дає можливість налаштувати довжину хвилі або оптичну силу.

Драйвер DLT-37M



Світлодіодний драйвер DLT-37M Драйвер DLT-37M призначений для живлення всіх моделей із вбудованими термоохолоджувачами. Драйвер забезпечує два режими роботи:

1. Квазібезперервний хвильовий (квазістаціонарний) режим. Такий режим забезпечує максимальну середню оптичну потужність від світлодіода. Струм в цьому режимі можна змінювати в діапазоні 20-250 мА. Можна вибрати одну з чотирьох частот (2 кГц, 4 кГц, 8 кГц і 16 кГц).

2. Імпульсний режим. Такий режим забезпечує максимальну пікову оптичну потужність від світлодіода. У цьому режимі, окрім зміни частоти, тривалість імпульсу також може бути вибрана в діапазоні 0,6-20 мкс. Піковий струм в імпульсному режимі можна змінювати в діапазоні 0-2 А.

Не використовуйте комбінацію частоти та тривалості імпульсу, яка дає робочий цикл >10%. Ми рекомендуємо використовувати струм імпульсу 2 А лише при тривалості імпульсу <1 мкс. Тривалість імпульсу становить 1 мкс. Вбудований в DLT-37M терморегулятор забезпечує вибір та стабілізацію температури на мікросхемі світлодіода в широкому діапазоні. Це дає можливість налаштувати довжину хвилі або оптичну силу.

2.6 Висновки до розділу

Розглянуто роботу світлодіодних джерел світла в імпульсному режимі.

Наведено характеристики вибраних світлодіодів.

Подано схему драйвера, що використали для роботи імпульсних світлодіодів.

Представлено розподіл спектральної інтенсивності світлодіодів під час роботи в постійному та імпульсному режимах.

Розраховано робочий цикл та максимальний час роботи при різних частотах імпульсу.

Представлено різні типи світлодіодних драйверів.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Електромагнітне випромінювання і світловий спектр

Випромінювання світла є результатом квантових переходів, здійснених з атомів, молекул або інших атомних систем вищої енергії для зниження енергетичних станів. Так зване теплове випромінювання не відрізняється від інших видів випромінювання (люмінесценції), ніж за допомогою методу збудження випромінюючих систем.

Явища, що виникають при радіаційному тепловому збудженні молекул є результатом зіткнень внаслідок термічного збудження. Властивості рівноважного випромінювання: енергія щільності, розподіл частот напрямків поширення.

Як і у випадку поляризації, вони не залежать від форми порожнини (чорне тіло) або фізичної природи його стінок. Так як і у випадку газу, що міститься в камері, ці властивості залежать лише від температури, при якій є стінки порожнини. Випромінювання однорідне, ізотропне, неполяризоване, і всі напрямки його поширення є неймовірними. Характерними розмірами хвиль є довжина хвилі, частота і період. Що стосується хвилеподібних характеристик, спектр електромагнітного випромінювання для діапазонів росту рослин від довгих радіохвиль, що характеризуються низькою частотою і високою довжиною хвиль до гамма-променів високої енергії, високої частоти та меншої довжини хвиль (рисунок 3.1).

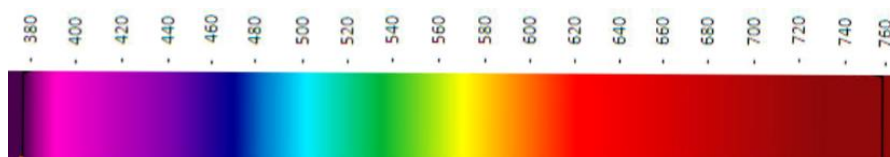


Рисунок 3.1 – Спектральний діапазон видимого світла

Можна здійснити взаємодію випромінювання з речовиною через три механізми:

- передача енергії електромагнітних хвиль молекули;
- передача енергії електромагнітних хвиль периферійних електронів атомів і молекул;
- передача енергії електромагнітних хвиль молекули, що призводить до їх підвищеної хімічної реакційної здатності, або у виробництві фотохімічних реакцій. Ці фотохімічні реакції є частиною фотосенсибілізації.

3.2 Перетворення світлового випромінювання в енергію для росту рослин

Зелені рослини – це форми життя, здатні до фотосинтезу або до перетворення води та вуглекислого гаузу у корисний кисень і енергію, у вигляді цукрів. Для цього процесу потрібно світло, тобто забезпечення необхідною енергією. Різні наукові дослідження та експерименти, пов'язані з фотосинтезом, для виведення кореляція між освітленням в різних частинах спектру електромагнітного випромінювання та еволюція рослин. Довжини хвиль, що мають головне значення в фотобіології - це ультрафіолет (УФ), видиме світло і інфрачервоне випромінювання (ІЧ). Рослини по-різному реагують на світло різних кольорів. Загалом, червоне світло підсилює ріст у висоту, в той час як синє світло, використовуючи поодинокі, може спричинити невелике збільшення. Правильний енергетичний баланс червоного та синього спектра допомагає рослинам мати нормальний ріст і форму.

Фахівці використовують ці знання майже 150 років, оскільки технології освітлення рослин суворо наслідували в застосовуванні для людського освітлення, яке пройшло три загальних шляхи розробки: лампа розжарювання, відкрите дугове освітлення та закриті газорозрядні лампи. Недавнє досягнення високої ефективності, світло діоди, відкрили нові

можливості для застосування в інтенсивному рослинництві та ефективному вирощуванні кімнатних рослин.

Хлорофіл, пігмент, життєво важливий для фотосинтезу, є сумішшю двох сполук, хлорофіл "а" і хлорофіл "b", який дає зелений колір в органічних розчинах. У природному хлорофілі є відношення $a:b=3:1$, з двох компонентів. В межах реакції фотосинтезу, хлорофіл поглинає світлову енергію та електрони від хлорофілу збуджуються, рухаючись від нижчої енергії стану у вищий енергетичний стан, переходячи в іншу молекулу. Ланцюг етапів передачі електронів закінчується перенесенням електрона в молекулу вуглекислого газу. Тим часом, хлорофіл, який відмовився від електрона, може прийняти електрон від іншої молекули. Це кінець процесу, що веде до видалення електрона з води. Таким чином, хлорофіл є в центрі реакції окислення – відновлення між вуглекислим газом і водою, в результаті чого з'являється кисень.

Існує кілька типів хлорофілу, лише різні незначно, у складі однобічного хімічного ланцюга:

- Хлорофіл "а": абсолютно присутній у всіх рослинах (поглинає світло з довжинами хвиль від 430 до 662 нм, що відповідає синьо-фіолетовому та червоному спектру);
- Хлорофіл "b" присутній у більшості рослин (поглинає світло з довжини хвиль від 453 до 642 нм, синій та оранжевий спектр);
- Хлорофіл "c1" і "c2", присутній у різних видів водоростей;
- Хлорофіл "d", присутній у ціанобактеріях.

Каротиноїди, інший ключовий компонент у розвитку. Рослиною споживаються червоні, жовті або оранжеві пігменти. Вони є серед найважливіших антиоксидантів і служать для збалансування згубного впливу вільних радикалів. Серед найбільш важливих каротиноїдів є лікопін, каротиноїди, альфакаротин, бета-каротин та лютеїн. Вони синтезуються за допомогою світлових хвиль між 449 - 475 нм, характерні для зеленого та синього кольорів спектру.

Червоне світло дуже важливе в селекції рослин. Фітохромні пігменти поглинають червоне випромінювання периферійної частини спектру червоного світла. Вони регулюють проростання насіння, розвиток коренів, формування бульб і цибулин, так званий період "спокою", цвітіння та виробництва плодів.

Тому червоне світло є важливим для стимуляції цвітіння та формування плодів. Для акваріумних рослин червоне світло стимулює розвиток висоти рослини, визначає деформацію та енергію стебла та сприяє формуванню коренів. Червоні довжини хвиль, що переважно поглинаються рослинами, становлять від 650 до 680 нм (червоний та оранжевий). Мінімальне поглинання відбувається при довжині хвиль 500 - 580 нм (червоний довгохвильовий спектр), які на жаль сприяють також зростанню фітопланктону.

Синє світло більше стимулює вироблення хлорофілу, ніж будь-який інший колір. Він визначає склад і щільність консистенції стебла листя, допомагає сформувати компактну вегетативну систему (щільне листя та гілки). Червоні рослини використовують переважно синє світло. Довжини хвиль синього кольору поглинаються рослинами між 400 - 480 нм (синій і фіолетовий). У надлишку переважно синій спектр світла (>10000K), сприяє цвітінню водоростей. Молоді рослини люблять синє світло більше, ніж зрілі рослини.

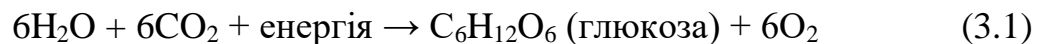
Помаранчеве світло стимулює утворення каротиноїдів. Зелений і жовтий спектри дають дуже мало або взагалі не приносять користі для вирощування рослин. Зелений зовсім не використовується і не поглинається, але відбивається, саме тому більшість рослин виглядають зеленими на сонячному світлі.

На додаток до аспектів росту рослин завдяки фотосинтезу, важливо розробити систему освітлення враховуючи спектральні вимоги фотоморфогенезу. Фотоморфогенез – індуковані світлом морфологічні зміни в рослині – регулюється головним чином типом фоторецепторів: фітохром,

криптохром і фототропін. Якщо при фотосинтезі представлені рецептори асимілюючі пігменти, у фотоморфогенезі рецептори представлені фітохромом.

Досягнення правильної освітленості, що відповідає фотоморфогенезу рослин називається фотоморфогенною достатністю. Відповідно до цього, впринципі, використовується лише потік на певних довжинах хвиль, що здатний викликати цільові результати. Морфогенетично активне випромінювання має спектральний діапазон між 200 і 800 нм. Біологічні системи зазвичай є морфогенетично вразливі при випромінюванні довжини хвиль від 280 нм до 320 нм. Тому фотосинтез відбувається всередині невеликої клітини рослини (хлоропласти) та їх ефективність (від 0,1% для зелених рослин і 8% для цукрової тростини) задається часткою світлової енергії, перетвореної в хімічну енергію під час фотосинтезу.

Наприклад, для синтезу молекули $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ потрібні 8-10 фотонів. Фотосинтез може бути описаний спрощеною хімічною реакцією:



Значення ефективності фотосинтезу залежить від того, як визначено світлову енергію (тобто чи буде розглядатися лише поглинуте світло), а також про те, яке саме світло використовується. Якщо проаналізувати падіння сонячного спектра на лист, то:

- 47% світлової енергії втрачається завдяки фотонам поза діапазоном 400-700 нм – фотонні відходи не є біодоступними;
- 30% внутрішньосмугових фотонів втрачаються через неповноту поглинання або через потрапляння, крім хлоропластів в рослинні біоструктури;
- 24% поглиненої світлової енергії втрачається внаслідок деградації короткохвильової енергії фотона при 700 нм;
- 68% використаної енергії втрачається при перетворенні в глюкозу;
- 35-45% глюкози споживає лист у темний час доби та фото дихання.

3.3 Фактори оцінки світла

Одиниці виміру, що використовуються в освітленні пов'язані з сприйняттям людського ока. Натомість садові системи освітлення найкраще оцінюються за параметрами, що показують використання світла або потужність системи освітлення для стимулювання фотосинтезу. Отже, значення відносяться до абсолютної кількості фотонів. Розуміння, знання та правильне застосування цих параметрів у розмірності штучного освітлення необхідне для досягнення врожаю рослин, подібного до вирощеного в умовах природного освітлення.

Фотосинтетичне активне випромінювання (ФАР) визначається як повне опромінення фотонами в смузі сонячного випромінювання від 400 до 700 нм, де енергія поглинається фотосинтетичними пігментами. ФАР виражається в кількості фотонів в секунду (не як прямий показник енергії), як фотосинтетичний процес, що відбувається, коли фотон поглинається рослиною, незалежно від довжини хвилі фотона.

Перетворення між ФАР на основі енергії та фотоном ФАР залежить від спектру джерела освітлення (Таблиця 3.1).

ФАР зазвичай можна виміряти за допомогою датчиків кванту, спектро радіометра або розрахувати, залежно від прямого випромінювання (I_m) та дифузне випромінювання (I_d):

$$\text{ФАР} = 0,43I_m + 0,56I_d \quad (3.2)$$

Вихід потоку фотонів ($\mu\text{моль м}^{-2}\text{с}^{-1}$) використовується для ефективності використання фотонів у фотосинтезі. Навіть якщо 90% блакитних фотонів поглинаються, близько 20% з них захоплені неактивними пігментами рослини, будучи загубленими теплом. Оскільки червоне світло використовується більш ефективно для індукції реакції фотосинтезу, вихід потоку фотонів надає червоному більше значення фотонів і базується на кривій чутливості рослин між 360 і 760 нм.

Таблиця 3.1 – Фактори конверсії фотосинтетичних параметрів джерел світла

Т (К)	η_v (лм/Вт*)	$\eta_{\text{фотон}}$ ($\mu\text{кмоль/Дж}^*$ або $\text{кмоль s}^{-1}\text{W}^{*-1}$)	$\eta_{\text{фотон}}$ (моль $\text{д}^{-1}\text{Вт}^{*-1}$)	$\eta_{\text{ФАР}}$ (Вт*/Вт)
3000 (теплий білий)	269	4,98	0,43	0,0809
4000	277	4,78	0,413	0,208
5800 (денне світло)	265	4,56	0,394	0,368

Вт* і Дж* позначає Вт ФАР і Дж ФАР (400–700 нм).

Кількісно визначено щільність потоку фотосинтетичних фотонів в $\mu\text{кмоль фотонів m}^{-2}\text{s}^{-1}$ або в одиницях Ейнштейна - $\mu\text{Е m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ще один параметр, який характеризує садівниче освітлення системи, використовувани більше біологами. Це значення являє собою загальну кількість фотонів в діапазоні активної довжини хвилі для фотосинтезу, який припадає на квадратний метр за секунду. Це еквівалентно освітленню.

Щільність потоку фотонів/Вт – це показник ефективності системи освітлення. Це значення представляє загальну кількість фотонів в діапазоні активної довжини хвилі для фотосинтезу, що досягають крони рослини, генерованої одним Джоулем.

3.4 Результати аналізу світлодіодної системи освітлення

Метою є відтворення найбільш підходящих умов для росту та розвитку сільськогосподарських культур з показниками незалежними від зовнішнього середовища. Найбільш відповідними екологічними факторами, що контролюються в теплиці, є температура, відносна вологість, освітлення,

CO₂, електрична провідність і рН поживних речовин при зрошенні системи. Навіть для заміни сонячного світла, доповнення сонячного світла або для стимулювання зростання використовується штучне освітлення в теплиці, яке розроблене відповідно до фотоперіодичності врожаю, природна тривалість дня, середні години сонячного світла, сонячна радіація, кут та інтенсивність, кількість структурованого затінення.

Оскільки менше 8% загальної світлової енергії, яку отримує рослина, використовується для фотосинтезу, то важливо визначити, що ФАР необхідна для тепличної рослини.

Подальші дослідження проводились на двох різних видах рослин, кожен з яких освітлений світлодіодним модулем для вирощування 14 Вт, зі 160 червоними світлодіодами (довжина хвилі 630 нм) і 65 синіми світлодіодами (довжина хвилі 465 нм). Загальний вигляд опромінювального пристрою представлений на рисунку 3.2.

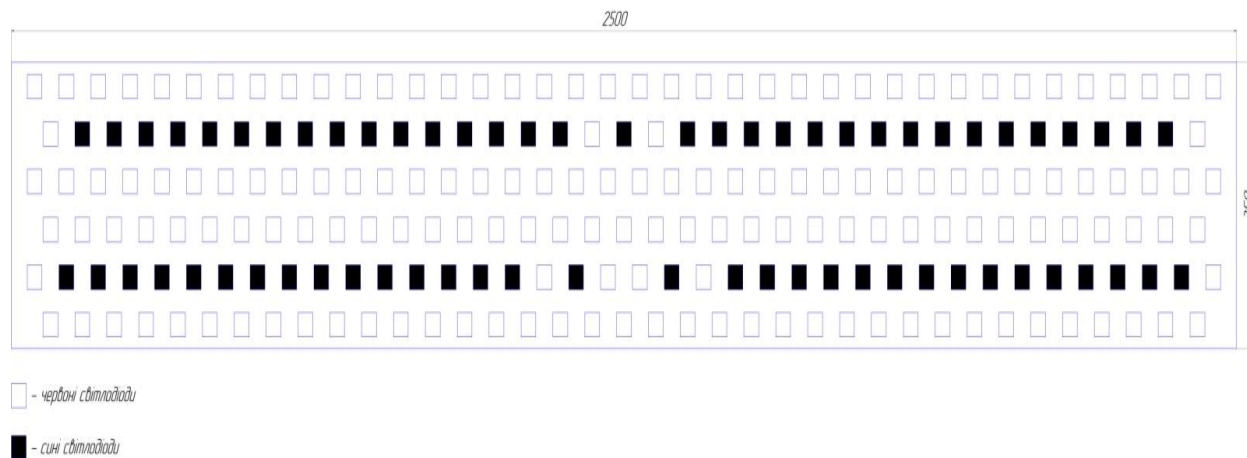


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд опромінювального пристрою (160 червоних СД і 65 синіх СД)

Спочатку було висаджено насіння салату. Це рослина тривалого дня, на яке можна постійно впливати підсвічуванням (це не має негативних наслідків, просто скорочує цикл генерації і призводить до накопичення великої кількості сухої речовини). Потреба у світлі для салату становить 4000

лк. З цього випливає, що для посадкової площі (35см x 250см) необхідний потік:

$$\Phi = E * S = 4000\text{лк} * 0.875\text{м}^2 = 3500\text{лм} \quad (3.3)$$

Беручи до уваги коефіцієнти перерахунку з таблиці 3.1, фотосинтетичне активне випромінювання від джерела світлодіодів спочатку визначали (3.4), потім обчислюється фотосинтетичний потік фотонів (3.5). Ці два параметри притаманні лише зростанню джерела світла, оскільки жоден не виявляє кількість фотонів, які досягають листка рослини.

$$3500\text{лм}/265 = 13,2 \text{ Вт ФАР} \quad (3.4)$$

$$13,2 \cdot 4,56 = 60,2 \text{ мкмоль/с} \quad (3.5)$$

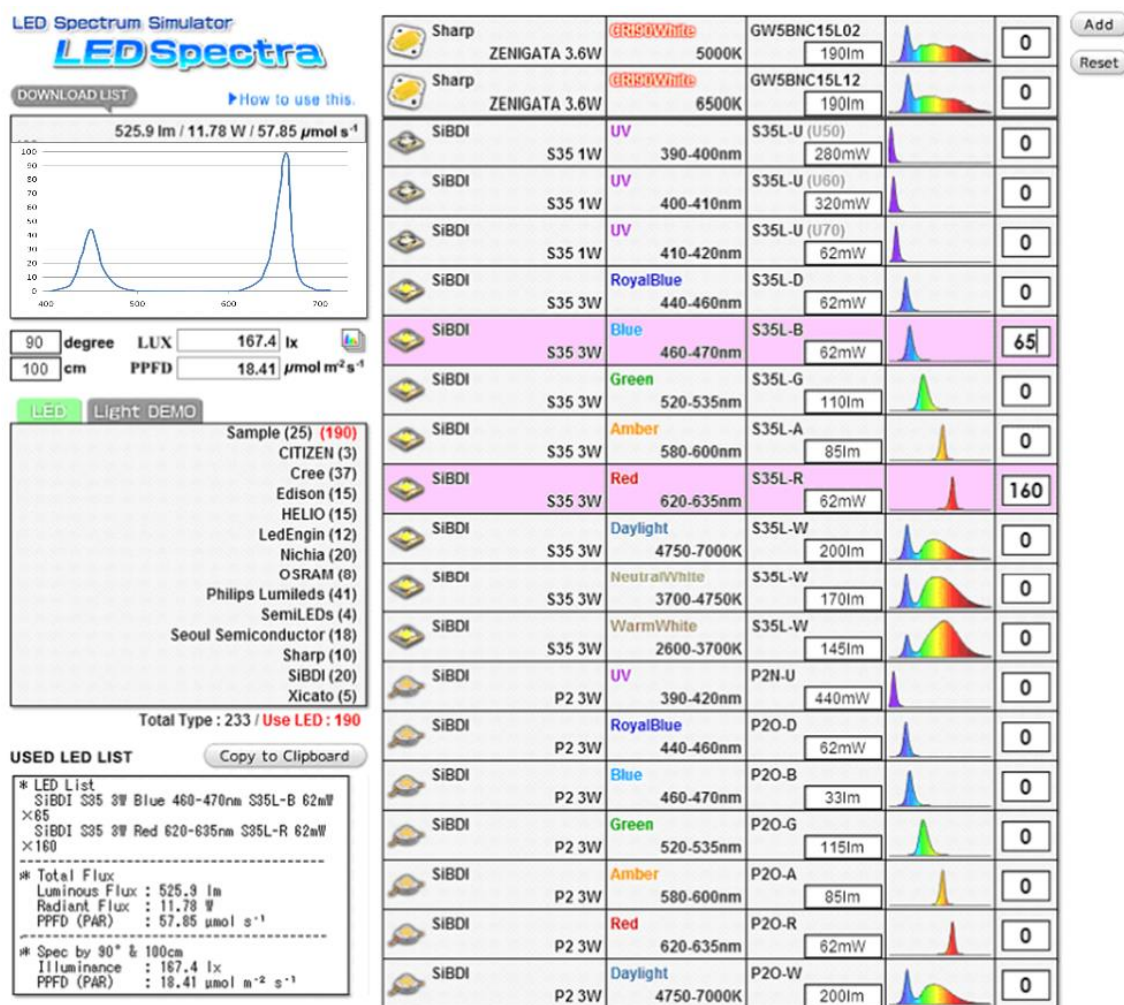


Рис. 3.3 – Розрахунок ФАР та ЩПФФ для світлодіодного модуля, що складається, з 65 синіх світлодіодів та 160 червоних, однакової активної потужності.

Використовуючи спеціальне обчислювальне програмне забезпечення (Spectra), світлодіодний зростаючий модуль було перевірено, чи надає він необхідний потік та щільність потоку фотосинтетичних фотонів для врожаю салату (рис.3.3). Отже, вихід потоку фотонів, використовуючи коефіцієнт перетворення для світлодіодних світильників щільність потоку фотосинтетичних фотонів (ЩПФФ)/виходу потоку фотонів(ВПФ)=1,12:

$$\text{ВПФ} = \frac{18,41 \text{ ммоль} * \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}}{1,12} * 0,875\text{м}^2 = 14,38 \text{ ммоль/с} \quad (3.6)$$

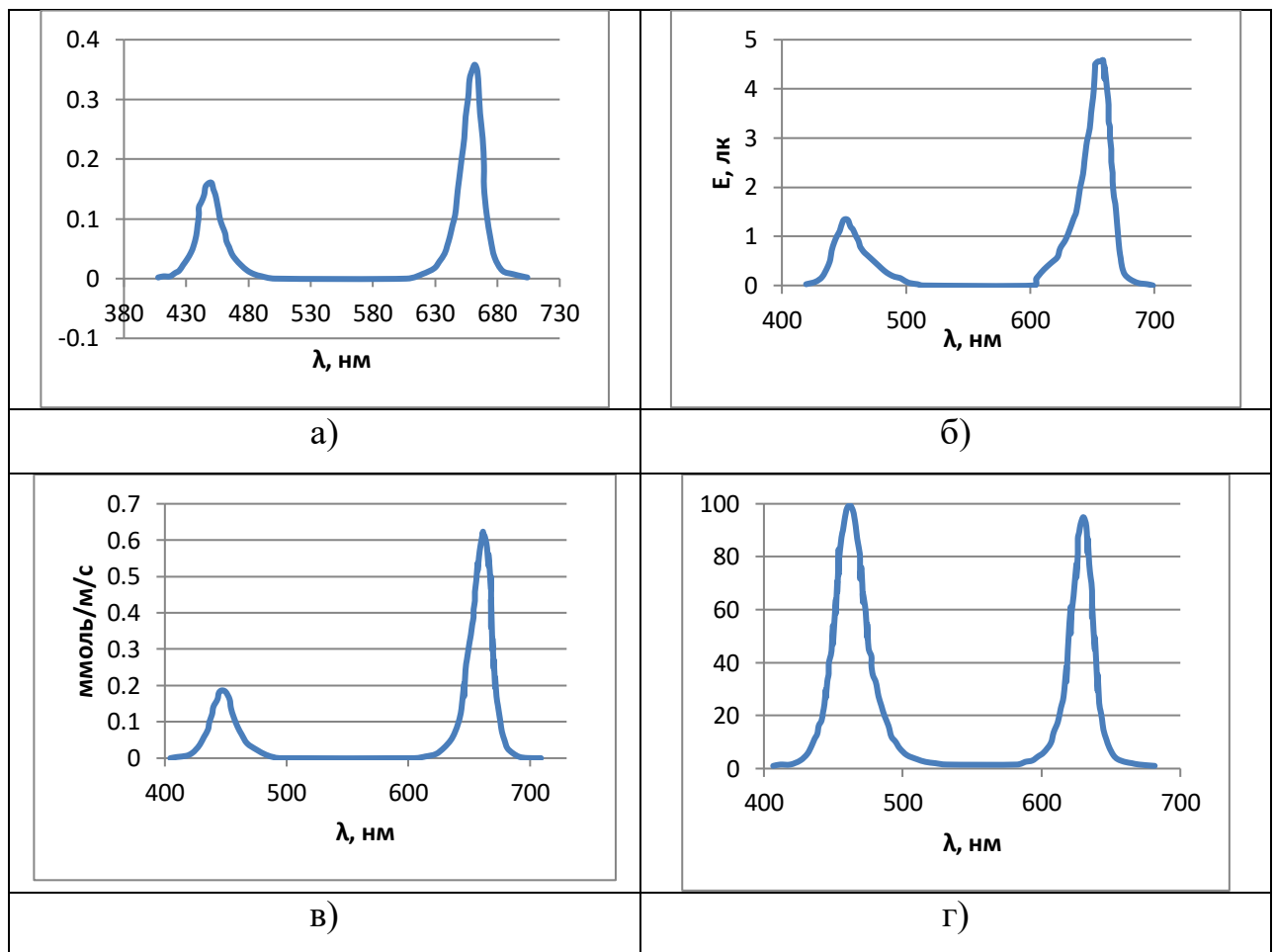


Рис. 3.4 – Результати спектрів моделювання: а) опромінення (Вт/нм); б) освітленість (лк/нм); в) щільність потоку фотосинтетичних фотонів ФАР (ммоль/с/нм); г) спектр використаних світлодіодів.

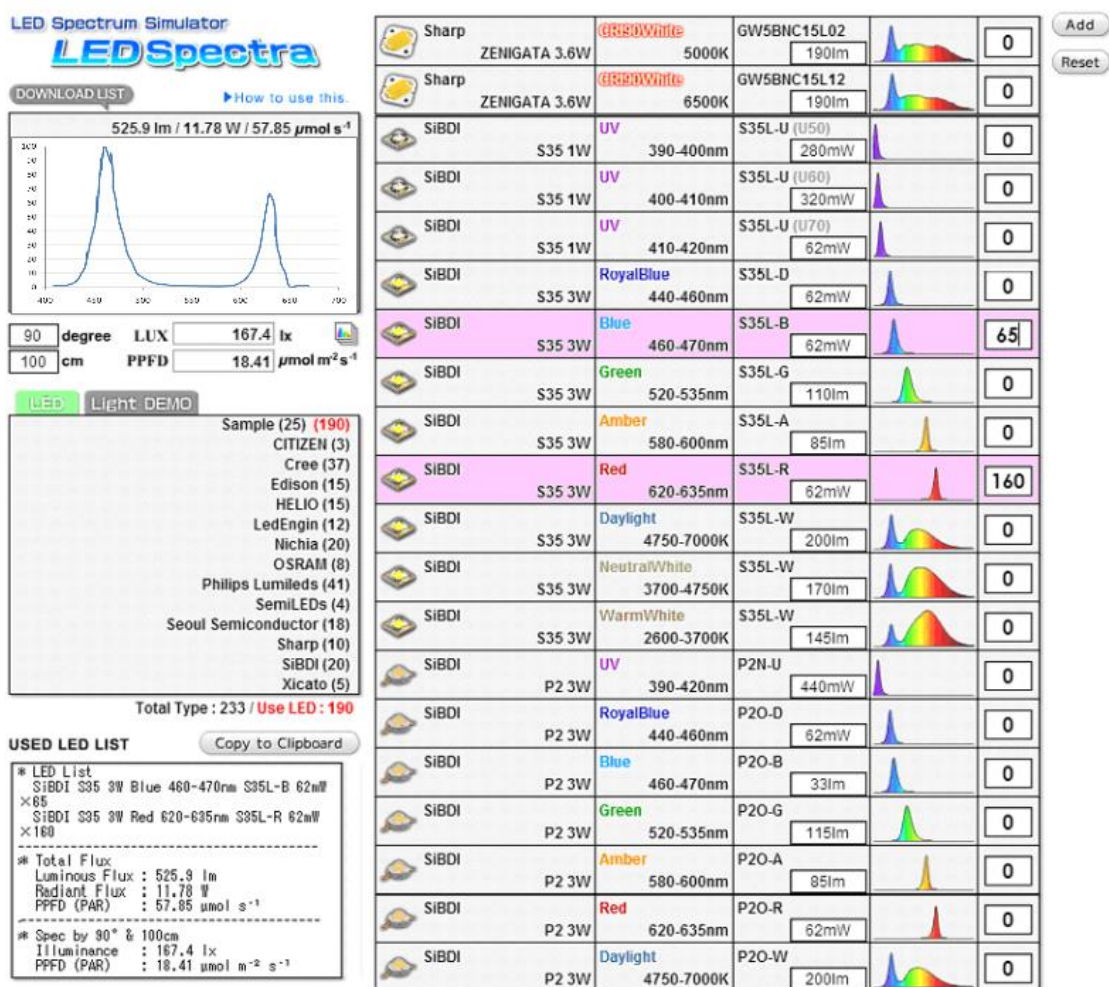


Рис. 3.5 – Результати, пов'язані з оптимальною кількістю світлодіодів для врожаю салату.

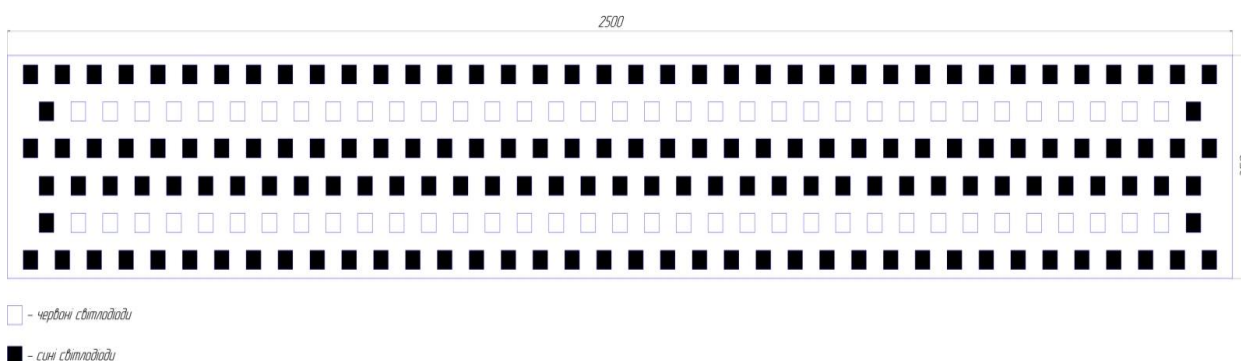


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд опромінювального пристрою (70 червоних СД і 155 синіх СД)

Це було результатом моделювання менших значень для ФАР та потоку, відповідно 4% і 85%. Біологічно надмірне червоне світло

виявляється при подовженні стебла, пожовтінні та аномальному розвитку після зростання першого справжнього листа – день 27. Оптимальний баланс світла для врожаю салату (рис. 3.5) дорівнює 155 синіх та 70 червоних світлодіодів, отже 90 з них необхідно замінити. Загальний вигляд опромінювального пристрою представлений на рисунку 3.6.

На другому етапі були висаджені насіння шпинату, що мають більшу фотоперіодичність, ніж салат. Потрібний рівень опромінення цієї установки становить 5000лк. Розрахунок такий самий для фотометричних параметрів системи, один отримує потік 4375 лм, 16,509 Вт ФАР і 75,28 мкмоль/с. Моделювання відновлено для врожаю шпинату враховуючи той самий модуль для вирощування світлодіодів та результати представлені на рис.3.7. Це дає оптимальну кількість 85 червоних світлодіодів та 185 синіх для світильників, тому модуль було скориговано відповідно. Загальний вигляд опромінювального пристрою представлений на рисунку 3.8.

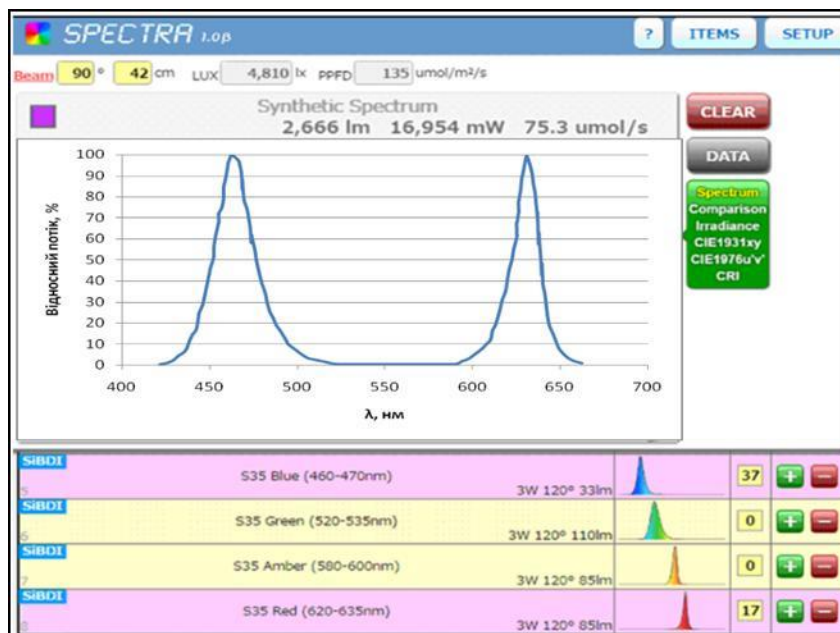


Рисунок 3.7 – Визначення синього + червоного світлодіодного числа для вирощування врожаю шпинату

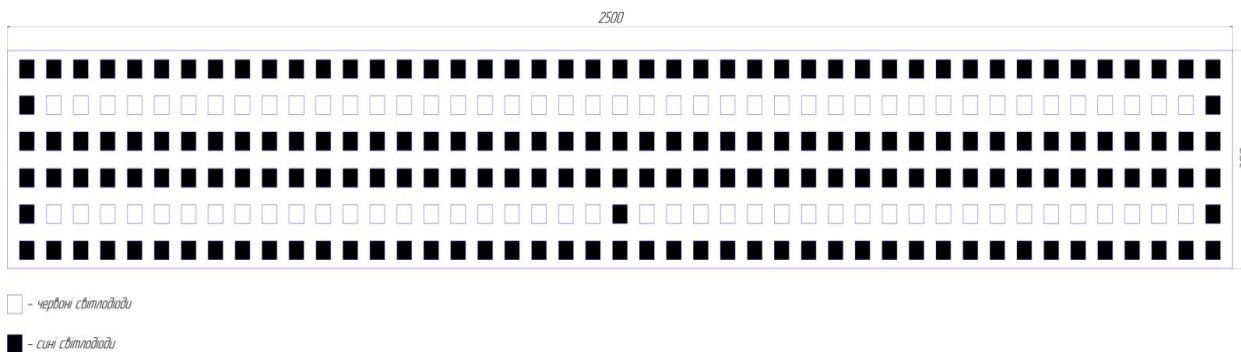


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд опромінювального пристрою (85 червоних СД і 185 синіх СД)

Програмне забезпечення також забезпечує повне опромінення фотонами діаграми кольоровості кольорового простору з довжинами хвиль в нанометрах, як посилення перемикає до захоплення з "сприйняття" спостерігачем врожаю шпинату, освітленого світлодіодним модулем для вирощування.

Міра ФАР корисна для визначення кількості світла, але не якості світла, яке отримує рослина. Зрештою, питомі довжини хвиль, які надходять у мезофільний шар є остаточним визначальним фактором того, наскільки корисним або ні буде світло.

Те саме фотосинтетичне активне випромінювання і фотосинтетична щільність потоку фотонів можуть бути досягнуті з інших джерела світла, а не лише від опромінення світлодіодами. Враховуючи урожай шпинату освітлений флуоресцентними джерелами, тими ж 75 мкмоль/с і 135 мкмоль/м²/с може бути досягнуто за допомогою 3 ламп Toshiba T8 FL40SB (широкосиній, кожен по 40 Вт, 600 лм). Спектр отриманий в результаті моделювання (рис.3.9) показує, що джерела повторюють більшу частину сонячного спектру, ніж світлодіоди, як вони доставляють від 500 до 600 нм, жовтий та зелений. Але це 1/3 спектра непридатна для запуску вегетативного зростання, отже, люмінесцентні лампи для росту не мають переваги перед світлодіодами, ніж у фінансовому плані.



Рисунок 3.9 – Спектральний показник для росту врожаю шпинату з флуоресцентним освітленням

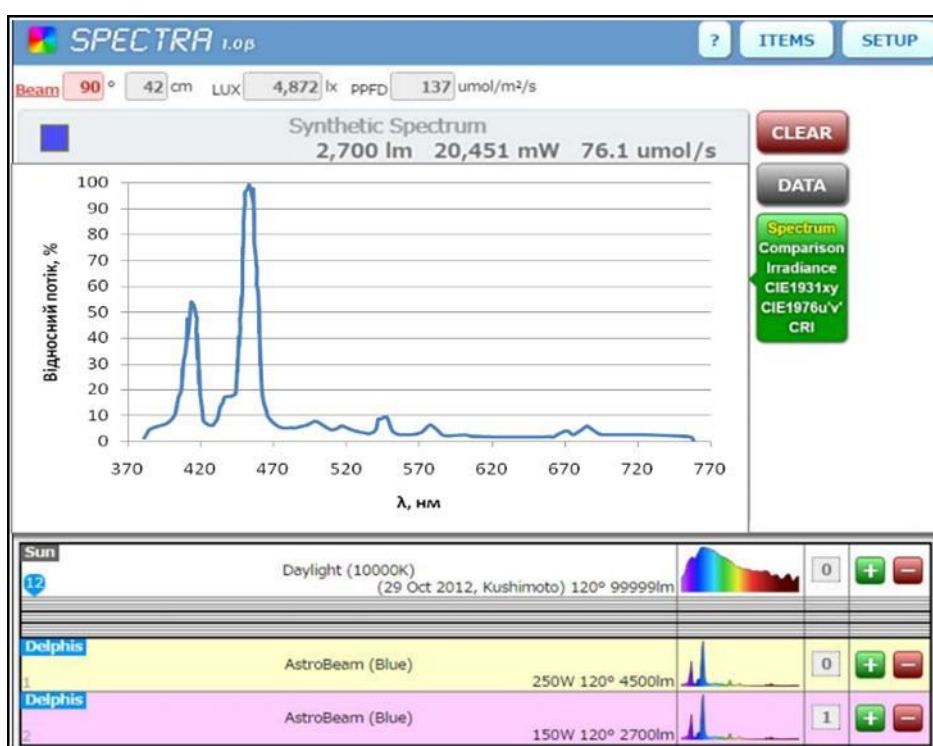


Рисунок 3.10 – Спектральний вихід для росту врожаю шпинату з галогенідним освітленням.

Якщо урожай шпинату буде освітлено галогенідом, то спектр лампи повинен бути подібним до спектру, отриманого від моделювання (рис.3.10). Лампа Delphis AstroBeam (150 Вт, 2700 лм). У цьому випадку переважає синє

світло, що в якісному відношенні є перевагою, оскільки мають лише вегетативні процеси.

Недоліком вирощування за допомогою галогенідних ламп є те, що вони виробляють повний світловий потік і необхідний світлий колір при досягненні стійкого стану. У садівничому плані вихід потоку фотонів досяжний лише через кілька хвилин від запалювання лампи. Це призводить до збільшення циклу, що не підходить у разі підвищення виробництва врожаю. Теоретично, обчислення виходу потоку фотонів (ВПФ) (мкмоль/с) як в (3.6) це призводить до того, що галогеніди металів дещо більш здатні рівномірним прощтовхуванням фотонів углиб навісу ніж флуоресцентні або світлодіоди:

$$\text{ВПФ}_{\text{СД}} = 105,46; \text{ВПФ}_{\text{ФЛ}} = 106,25; \text{ВПФ}_{\text{ГМ}} = 107,03 \quad (3.7)$$

Порівнюючи світлодіоди, флуоресцентні лампи та галогеніди металів простори кольоровості, отримані шляхом моделювання, один підтверджує, що світлодіоди підходять для вирощування рослин для вегетативних, квіткових та плодоносних процесів, не лише за низьким енергоспоживанням, але і з точки зору належного освітлення балансу – синього і червоного.

3.5 Висновки до розділу

Існує кілька світильників для внутрішнього та тепличного господарства комерційного розвитку, яке може забезпечити цільовий спектр, але переваги та досягнення світлодіодних технологій рекомендують саме їх для більшості галузей рослинництва. Садівничі системи освітлення найкраще оцінювати за параметрами, що відображають здатність ламп стимулювати і сприяти фотосинтезу. Отже, значення відносяться до абсолютної кількості фотонів: ФАР і щільності потоку фотосинтетичних фотонів. Перший розкриває доставлене випромінювання, яке буде використано для фотосинтезу, друге виявляє фотони, які насправді досягають цілі.

Оскільки поглинається лише частка світлової енергії фотосинтезу, реакція рослин на різну довжину хвилі, тому існує оптимальний спектр для кожного типу рослин відповідно до його фотобіологічних характеристик.

Дослідження показує, що для вирощування рослин в приміщеннях кращі результати можна отримати при регулюванні системи росту світла. В обраних ламп для вирощування відомий спектр, значення ФАР були обраховані для конкретних довжин хвиль. Для урожаю шпинату, який має лише вегетативні процеси, синє світло (460-470 нм) виявилось вдвічі ефективнішим, ніж червоне світло (620-635 нм).

Представлено три опромінювальні пристрої, які найбільше підходять за спектром випромінювання для салату та шпинату.

Для більш точної оцінки фотосинтезу, фотосинтетична реакція може бути розглянута, як та що призводить до порівняння щільності потоку фотонів. Проте, невеликі відмінності виходу потоку фотонів для світлодіодів, 1,5%, переважають над якістю опромінювального середовища, як червоного, так і синього світла є незамінним для росту рослин.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Особливості випромінювання оптичного діапазону

Цим терміном позначається випромінювання видимого діапазону хвиль (0,4—0,77 мкм), а також межуючих з ним діапазонів — інфрачервоного (ІЧ) з довжиною хвилі 0,77—0,1 мкм та ультрафіолетового (УФ) з довжиною хвилі 0,4—0,05 мкм.

Таким чином, з боку довгих хвиль між оптичним діапазоном та НВЧ лежить маловивчений та поки що маловикористовуваний діапазон субміліметрових хвиль (0—0,1 мм), а з боку коротких хвиль — перехід до рентгенівського випромінювання.

Радіоелектронні прилади, як і будь-які інші, мають ККД менше 100 %, і частина енергії джерел живлення витрачається на покриття втраті та в кінцевому рахунку переходить у тепло, тобто, в ІЧ випромінювання.

Джерелами ІЧ випромінювання є багато елементів та вузлів радіоапаратури — електровакуумні, напівпровідникові та квантові прилади, індуктивності, резистори, трансформатори, з'єднувальні проводи тощо. Аналогічним чином електровакуумні прилади у скляних балонах дають випромінювання у видимій області спектра. Але такого роду випромінювання порівняно малої інтенсивності не викликає помітного екологічного впливу. Це ж стосується і некогерентного УФ випромінювання, яке використовується у технологічному процесі фотолітографії при виробництві мікросхем.

Лазерне випромінювання має ряд особливостей. Воно характеризується великою часовою та просторовою когерентністю — кореляцією (сумісністю) фаз коливань у деякій точці простору на певну величину моменту часу, а також кореляцією фаз коливань у різних точках простору в один і той же момент часу.

Часова когерентність зумовлює монохроматичність (одно-частотність) випромінювання, що впливає із самого принципу дії лазера як квантового приладу. У реальних умовах з ряду причин ширина спектра лазерного випромінювання обмежена, хоча й досить немала.

Просторова когерентність зумовлює високу скерованість лазерного випромінювання, тобто малу кутову розбіжність променя на великих відстанях. У зв'язку із малою довжиною хвилі лазерне випромінювання може бути сфокусоване оптичними системами (лінзами та дзеркалами) невеликих геометричних розмірів, обмежених дифракцією, завдяки чому на малій площі досягається велика густина випромінювання.

Вказані властивості та їх поєднання є основою для широкого використання лазерів. За їх допомогою здійснюється багатоканальний зв'язок на великих відстанях (причому кількість каналів тут у десятки тисяч разів може перевищувати можливості НВЧ діапазону), лазерна локація, дальнометрія, швидке опрацювання інформації.

Вплив лазерного випромінювання на біологічні тканини може призвести до теплової, ударної дії світлового тиску, електрострикції (механічні коливання під дією електричної складової ЕМП), перебудови внутріклітинних структур. Залежно від різних обставин прояв кожного ефекту зокрема чи їх сумарна дія можуть відрізнятися.

При великій інтенсивності і дуже малій тривалості імпульсів спостерігається ударна дія лазерного випромінювання, яка розповсюджується з великою швидкістю та призводить до пошкодження внутрішніх тканин за відсутності зовнішніх проявів.

Найважливішим фактором дії потужного лазерного випромінювання на біологічне середовище є тепловий ефект, який проявляється у вигляді опіку, іноді з глибинним руйнуванням — деформацією і навіть випаровуванням клітинних структур. При менш інтенсивному випромінюванні на шкірі можуть спостерігатися видимі зміни (порушення пігментації, почервоніння) з досить чіткими межами ураженої ділянки.

Шкірний покрив, який сприймає більшу частину енергії лазерного випромінювання, значною мірою захищає організм від серйозних внутрішніх ушкоджень. Але є відомості, що опромінення окремих ділянок шкіри викликає порушення у різних системах організму, особливо нервової та серцево-судинної.

У зв'язку з різною поглинальною здатністю живих тканин при відносно слабких ушкодженнях шкіри можуть виникати серйозні ураження внутрішніх тканин — набряки, крововиливи, змертвіння, згортання крові. Результатом навіть дуже малих доз лазерного випромінювання можуть бути такі явища, як майже при НВЧ опроміненні — нестійкість артеріального тиску, порушення серцевого ритму, втома, роздратування. Звичайно, такі порушення зворотні і зникають після відпочинку.

Найсильніше впливає лазерне випромінювання на очі. Тут найсерйознішу небезпеку становить випромінювання УФ діапазону, яке може призвести до коагуляції білка, рогівки та опіку слизової оболонки, що викликає повну сліпоту. Випромінювання видимого діапазону впливає на клітини сітківки, внаслідок чого настає тимчасова сліпота або втрата зору від опіку з наступною появою рубцевих ран. Випромінювання ІЧ діапазону, яке поглинається райдужною оболонкою, кришталиком та скловидним тілом, більш-менш безпечно, але також може спричинити сліпоту.

Таким чином, лазерне випромінювання ушкоджує (часом безповоротно) усі структури ока.

Внаслідок лазерного опромінення у біологічних тканинах можуть виникати вільні радикали, які активно взаємодіють з молекулами та порушують нормальний хід процесів обміну на клітинному рівні. Наслідком цього є загальне погіршення стану здоров'я, (як і при впливі іонізаційних випромінювань).

4.2 Організація охорони праці на підприємстві

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Дія закону “Про охорону праці” поширюється на всі підприємства не залежно від форм властивості та видів їх діяльності, а також на всіх громадян, які працюють на цих підприємствах.

Організацією охорони праці на підприємстві займається власник (керівник). Для цього він забезпечує функціонування систем управління охороною праці:

- 1) створює відповідні служби і призначає посадових осіб, відповідальних за вирішення питань з охорони праці;
- 2) забезпечує усунення причин, що призводять до нещасних випадків і профзахворювань;
- 3) здійснює постійний контроль за дотриманням працівниками правил експлуатації машин, механізмів, обладнання;
- 4) здійснює контроль за користуванням та індивідуальними засобами захисту;
- 5) при виникненні надзвичайних ситуацій і нещасних випадків, власник зобов'язаний вжити термінових засобів для допомоги потерпілим.

Служба охорони праці підпорядковується безпосередньо директору підприємства і виконує наступні функції:

- проводить керівництво роботою з охорони праці;
- забезпечує інструкціями, стандартами та іншими нормативними документами;
- веде облік і аналіз нещасних випадків і профзахворювань;
- бере участь у розслідуванні нещасних випадків;

- забезпечує колективними та індивідуальними засобами захисту працюючих;
- забезпечує проведення навчання та інструктажів з охорони праці, своєчасне проведення атестацій і переатестацій робітників, які виконують роботи підвищеної небезпеки.

Навчання та інструктаж працівників з питань охорони праці проводиться з працівниками, які поступають на роботу, та в процесі їх трудової діяльності.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Вступний інструктаж проводиться з усіма щойно прийнятими на роботу працівниками, з учнями та студентами, які проходять практику.

Первинний інструктаж проводиться на робочому місці з новоприйнятими працівниками, або з групою осіб однієї спеціальності.

Повторний інструктаж проводиться з усіма працівниками на робочому місці через певні проміжки часу.

Позаплановий інструктаж проводиться у випадках введення в дію нових актів про охорону праці, заміні або модернізації устаткування, при порушенні працівником вимог охорони праці.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками при виконанні разових робіт, які пов'язані з обов'язками за фахом.. Цільовий інструктаж фіксується наряд-допуском, що дозволяє проведення робіт.

Усі інструктажі проводяться керівником робіт (начальником дільниці, майстром).

Про проведення інструктажів, стажуванню та допуск до роботи особа, яка проводила інструктаж, робить запис у журнал. При цьому обов'язкові підписи того, хто проводить інструктаж, і того, хто інструктував. Журнали інструктажів повинні бути пронумерованими, прошнурованими і скріплені печаткою.

Керівник підприємства зобов'язаний видати працівникові примірник інструкції з охорони праці за його професією, або вивісити її на робочому місці.

Робоче місце – це зона обслуговування окремим робітником відповідно визначеного місця технологічного процесу. Розмір зони залежить від особливостей технологічного процесу.

З метою економії сил і часу робітника, підвищення його працездатності необхідно раціонально облаштувати робоче місце: раціонально розмістити засоби управління контролю виробничим процесом, забезпечити механізацією та автоматизацією праці.

4.3 Вплив електричного струму на організм людини. Причини електротравматизму

Електробезпека — це система організаційних і технічних заходів та засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого й небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики.

Сучасна електрифікація всіх сфер людської діяльності ставить на перший план питання про захист персоналу, що обслуговує електроустаткування, а також інших осіб, які можуть підпадати під небезпеку ураження струмом. Практика свідчить про те, що майже у всіх галузях, де використовується електричний струм, безперечно бувають випадки ураження людей.

Ураження електричним струмом є найрозповсюдженішим небезпечним і несподіваним для потерпілого видом виробничого травматизму. Організм людини не наділений здатністю виявляти наявність електричного струму.

Дія електричного струму на організм людини супроводжується зовнішнім ураженням тканин та органів у вигляді механічних ушкоджень, електричних знаків, електрометалізації шкіри, опіків.

Електротравма може виникнути без безпосереднього контакту з провідниками, що проводять струм (ураження через електричну дугу, крокову напругу тощо). Проходячи через тіло людини, електричний струм діє не тільки в місцях контактів і на шляху проходження через організм, але й на центральну нервову систему, що спричиняє до ураження внутрішніх органів (серця, легенів тощо).

Електричний струм, проходячи через організм людини, призводить до термічної, електролітичної та біологічної дій (електротравматизм).

Термічна дія струму виявляється в опіках окремих ділянок тіла, нагріванні до високої температури кровонесних судин, нервів, серця, мозку, що стає причиною серйозних функціональних розладів.

Електролітична дія струму виявляється в розкладанні органічної речовини та крові, що призводить до істотних змін їх фізико-хімічного складу.

Біологічна дія струму виявляється у подразненні збудливих тканин організму, яке супроводжується мимовільним скороченням м'язів.

Тривалість проходження струму через організм впливає на кінцевий результат ураження: чим довше проходить струм, тим більша можливість тяжкого і смертельного наслідку. Електричні травми – це ураження тканин і органів внаслідок проходження струму чи впливу променів електричної дуги на людину.

Електротравми умовно поділяють на місцеві та електричні удари. Місцева електротравма – це локальне ушкодження цілісності тканин тіла, кісток під впливом електричного струму, електричної дуги. Наслідком місцевих електротравм є електричні опіки, електричні знаки, електрометалізація шкіри, електроофтальмія, механічні пошкодження.

Електричні опіки можуть бути поверхневими (ураження шкіри) та внутрішніми. Внутрішні опіки призводять до ураження внутрішніх органів і тканин тіла. Електричні опіки виникають внаслідок нагрівання тканин тіла людини струмом величиною більше 1 А.

Електричні знаки – це плями сірого або блідо-жовтого кольору у вигляді мозолів на поверхні шкіри в місці контакту із струмопровідними елементами. Електричні знаки безболісні і через деякий час зникають.

Електрометалізація шкіри – це просочування поверхні шкіри частинками металу під час його випаровування чи розбризкування під впливом електричного струму. Уражена ділянка жорстка на дотик і має забарвлення, характерне для кольору металу, що потрапив до шкіри. Електрометалізація шкіри є безпечною (за винятком очей) і з часом зникає.

Електроофтальмія – це ураження при горінні електричної дуги зовнішніх оболонок очей потужним ультрафіолетовим випромінюванням, яке енергійно поглинається клітинами організму і викликає в них хімічні зміни. Потерпілий відчуває різкий біль в очах, осліплення, світлобоязнь, слезотечу. Запобігання електроофтальмії при обслуговуванні електроустановок забезпечується шляхом використання захисних окулярів, які майже не пропускають ультрафіолетових променів і захищають очі від дії розплавленого металу при виникненні електричної. Внаслідок цього порушується цілісність (рветься) шкіри, кровоносних судин, нервової тканини, можливі вивихи суглобів і навіть переломи кісток.

Електричний удар – це збуджуюча дія електричного струму на живі тканини організму, яка проявляється у вигляді судорожних скорочень м'язів. Електроудари – це найнебезпечніший вид ураження організму електричним струмом, при якому порушується функціонування серцевої, дихальної і мозкової системи людини.

Залежно від наслідків ураження електричні удари умовно можуть бути поділені на 4 ступеня: I – судомні скорочення м'язів без втрати свідомості; II – судомні скорочення м'язів втратою свідомості, але із

збереженим ритмом серцево-судинної системи та диханням; III – втрата свідомості і порушення дихання, або роботи серцево-судинної системи; IV – клінічна смерть. Небезпека ураження електричним струмом може бути пов'язана з чинниками електричного характеру (напруга, величина струму, вид і частота струму, опір електричного кола, заземлення, занулення) і неелектричного характеру – індивідуальні особливості людини, її увага, шлях проходження струму через тіло людини, тривалість дії струму.

Ураження організму людини електричним струмом частіше залежить від сили струму, що проходить через тіло людини, тривалості його дії та шляху проходження через тіло. Окрім того важливе значення мають індивідуальні особливості організму людини, стан приміщення, в якому експлуатується електроустановка та площа контакту людини із струмоведучими частинами. Опір тіла людини не постійний, він залежить від багатьох причин і коливається в дуже широких межах. Так, опір сухої шкіри коливається від 3000 до 100000 Ом, а вологої – знижується до 1000 Ом і менше. Підвищення напруги, прикладеної до тіла людини, в багато разів зменшує опір шкіри. Отже, чим вища прикладена напруга, тим більша небезпека ураження. Але саме по собі значення напруги не може служити критерієм небезпеки ураження. Величина струму по-різному впливає на організм людини.

Виділяють такі порогові значення струму: порогово відчутний струм, порогово невідпускаючий струм, порогово фібриляційний струм. Порогово відчутний струм – найменше значення того струму, який під час проходження через організм людини викликає відчуття подразнення (0,6-1,3 мА при змінному струмі частотою 50 Гц та 5-7 мА -при постійному струмі). При струмі до 10 мА і частоті 50 Гц відчувається неприємна подразлива дія струму, яка супроводжується судорожними скороченнями м'язів. Порогово невідпускаючий струм – найменша величина електричного струму, при проходженні через організм людини яка викликає судорожні скорочення м'язів руки, в якій затиснений провідник (10-18 мА при змінному струмі

частотою 50 Гц і 50-80 мА – при постійному струмі). При струмі 25- 50 мА утруднюється дихання, при струмі більше 50 мА і до 100 мА порушується робота серця з одночасним паралічем дихання. Струм в 100 мА при 50 Гц і вище вважають смертельним для людини. Порогово фібриляційний струм – найменше значення електричного струму, проходження якого через організм людини спричиняє фібриляцію серця (100 мА при змінному струмі частотою 50 Гц і 300 мА – при постійному струмі).

Різні тканини людини по-різному проводять струм. Найбільший електричний опір має шкіра людини і, особливо, верхня ороговіла її частина, в якій немає кровоносних судин. На результат ураження тіла (травми) виявляє вплив як сила, так і шлях струму через тіло людини. Велика небезпека виникає тоді, коли струм проходить через найбільш життєво важливі органи: серце, головний мозок, легені. Результат ураження електрострумом в значній мірі залежить від індивідуальних (психологічних і фізичних) особливостей людини. Характер впливу струму однієї і тієї ж величини залежить від маси тіла людини, її фізичного розвитку, віку, самопочуття.

Тривалість проходження струму через організм суттєво впливає на результат ураження: чим триваліша дія струму, тим більша ймовірність тяжкого і смертельного результату. Настання фібриляції і зупинка серця відбуваються при тривалості дії струму більше 0,8 с або при співпадати часу проходження струму з фазою кардіологічного циклу. Небезпека ураження від змінного струму досягає максимуму при частотах 50-200 Гц. Струм від 200 000 Гц і вище безпечний. Постійний струм у 4-6 раз безпечніший змінного з частотою 50 Гц. Постійний струм, у порівнянні зі змінним того ж значення, коли проходить через тіло людини, викликає слабкіші скорочення м'язів і менш несприятливі відчуття. Але це справедливо тільки щодо напруги до 600 В. При більш високій нарузі постійний струм стає небезпечнішим від змінного з частотою 50 Гц. Умовно безпечною є напруга 12 В. Але залежно від сили струму, опору організму людини, її віку, статі та інших

індивідуальних особливостей, терміну дії, умов виробництва та стану навколишнього середовища (температура, вологість повітря тощо) напруга у 12 В може стати небезпечною.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведений аналіз імпульсних опромінювальних пристроїв для тепличних господарств.

Отримані такі результати:

1. Проаналізовано різні види опромінення рослин закритого ґрунту.
2. Представлено методології проектування тепличних господарств та вибір ділянки для них.
3. Розглянуто вимоги щодо опромінення рослин.
4. Розглянуто роботу світлодіодних джерел світла в імпульсному режимі.
5. Наведено характеристики вибраних світлодіодів.
6. Подано схему драйвера, що використали для роботи імпульсних світлодіодів.
7. Представлено розподіл спектральної інтенсивності світлодіодів під час роботи в постійному та імпульсному режимах.
8. Розраховано робочий цикл та максимальний час роботи при різних частотах імпульсу.
9. Представлено різні типи світлодіодних драйверів.
10. Представлено три опромінювальні пристрої, які найбільше підходять за спектром випромінювання для салату та шпинату.

Існує кілька світильників для внутрішнього та тепличного господарства комерційного розвитку, яке може забезпечити цільовий спектр, але переваги та досягнення світлодіодних технологій рекомендують саме їх для більшості галузей рослинництва. Садівничі системи освітлення найкраще оцінювати за параметрами, що відображають здатність ламп стимулювати і сприяти фотосинтезу. Отже, значення відносяться до абсолютної кількості фотонів: ФАР і щільності потоку фотосинтетичних фотонів. Перший розкриває доставлене випромінювання, яке буде використано для фотосинтезу, друге виявляє фотони, які насправді досягають цілі.

Оскільки поглинається лише частка світлової енергії фотосинтезу, реакція рослин на різну довжину хвилі, тому існує оптимальний спектр для кожного типу рослин відповідно до його фотобіологічних характеристик.

Дослідження показує, що для вирощування рослин в приміщеннях кращі результати можна отримати при регулюванні системи росту світла. В обраних ламп для вирощування відомий спектр, значення ФАР були обраховані для конкретних довжин хвиль. Для урожаю шпинату, який має лише вегетативні процеси, синє світло (460-470 нм) виявилось вдвічі ефективнішим, ніж червоне світло (620-635 нм).

Для більш точної оцінки фотосинтезу, фотосинтетична реакція може бути розглянута, як та що призводить до порівняння щільності потоку фотонів. Проте, невеликі відмінності виходу потоку фотонів для світлодіодів, 1,5%, переважають над якістю опромінювального середовища, як червоного, так і синього світла є незамінним для росту рослин.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Никифоров, С.Г. Стабильность и надежность светодиодов закладывается на производстве / Никифоров С.Г. // Компоненты и технологии. 2007. №5.– С. 59–66.
 2. . Большина, Н.П. Результаты опытов по светокультуре гвоздики ремонтантной / Большина Н.П., Фомин Е.М. // Межвуз. Сборник научных трудов «Электрификация технологических процессов животноводства и растениеводства и их энергообеспеченность». Горький: Горьк. СХИ, 1990.
 3. Большина, Н.П. Исследование ламп ДРЛФ400 в комбинированном режиме / Большина Н.П., Живописцев Е.Н. // Сб. научных трудов МИИСП «Автоматизация процессов с.-х. производства». .:МИИСП,1983.
 4. . Бородин, И.Ф. Технические средства автоматики / Бородин И.Ф. - М.: Колос, 1982.–С.303.
 5. Ермаков, О.Н. Светоизлучающие диоды зеленого цвета свечения с повышенной температурной стабильностью потока излучения / Ермаков О.Н., Аксёнов В.Ф., Игнаткина Р.С. // Тез. докл. на 4 Всесоюз. конф. «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». М.: 1982. – 103 с.
 6. Шевелуха, В.С. / Шевелуха В.С., Свентицкий И.И. Изд.Высшая школа, 2008, С.710.
 7. Дзино, В.Н. Автоматизация процессов сборки полупроводниковых индикаторов / Дзино В.Н., Кононок Н.Л., Скарин В.К., Щербаков Н.В. // Электронная промышленность, 1982, Т. 5–6. – С. 57–58.
 8. Былов, В.Н. Управляемая культура ремонтантной гвоздики. / Былов В.Н., Райков Н.И., Агаджанян И.В. // Цветоводство, 1983, № 4.– С. 14–16.
- Буторин, В.А. Разработка испытательного стенда для проведения ресурсных испытаний прожектора светодиодного (светильника) XLight

XLD-FL12-AGRO-220-115-01/ Буторин В.А., Вовденко К.П. // Ползуновский вестник, Барнаул, 2011. №2/1. – С. 62–65.

9. Большина, Н.П. К использованию импульсного облучения растений / Большина Н.П., Рязанова Т.В. // Сборник научных трудов МИИСП «Рациональная электрификация с. х.». М.: МИИСП, 1984.

10. Калва, Л.Э. Маточкики из меристемных черенков / Калва Л.Э. // Цветоводство.- 1976, № 9.

11. Воронцов, В.В. Научно-производственное объединение / Воронцов В.В. // Цветоводство. -1977.- №3, – С.1.

12. Елисеев, В.И. Исследование схем импульсных облучательных установок с емкостно-диодными преобразователями и влияние их на сельскохозяйственные электрические сети / Елисеев, В.И. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Л., Пушкино, 1976.

13. Зуев, Л.К. Экономичный преобразователь для питания люминесцентной лампы от аккумуляторной батареи / Зуев Л.К. // Радио.- 2001.- № 2,-С. 34-35.

14. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. М., Колос, Комиздат, 1989.

15. . Именков, А.Н. Свойства светодиодов на основе GaSb с сетчатыми омическими контактами / Именков А.Н., Гребенщикова Е.А., Журтанов Б.Е., Данилова Т.Н., Сиповская М.А., Власенко Н.В., Яковлев Ю.П. // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, вып. 2. – С.1399–1407.

16. Джордж, Мао Срок службы светодиодов и их надежность – ключ к успешной реализации светотехнических проектов / Джордж Мао, Маршалл Майлс // Современная светотехника. 2010. № 6. – С. 29–31.

17. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Основы применения / В. П. Дьяконов. - М.: Солон-Пресс, 2005. - 800 с.

18. Гультаев, А. В. Визуальное моделирование в среде MATLAB : учебный курс / А. В. Гультаев. – СПб. : Питер, 2000. – 432 с.
19. Пригарин, С. М. Методы численного моделирования [случайных процессов](#) и полей / С. М. Пригарин. – Новосибирск : Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2005. – 259 с.
20. Тихонов, А. Н. Вводные лекции по прикладной математике : учебное пособие / А. Н. Тихонов, Д. П. Костомаров. – М. : Наука, 1984. – 190 с.
21. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М. : Мир, 1978. – 418 с.
22. Ермаков, С. М. Статистическое моделирование : учебное пособие / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – М. : Наука, 1982. – 296 с.
23. Шалыгин, А. С. Прикладные методы статистического моделирования / А. С. Шалыгин, Ю. И. Палагин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 320 с.
24. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро; пер. с англ. Е. Г. Коваленко, под ред. В. В. Налимова. – М. : Мир, 1969. – 396 с.
25. Васильев, К. К. Методы обработки сигналов: учебное пособие / К. К. Васильев. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 78 с/
26. Тихонов, В. И. Статистический синтез и анализ радиотехнических систем и устройств / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с.
27. Мешков В.В. Основы светотехники: ч. 1. — М.: Энергия, 1979. — 368 с.
28. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 528 с.