

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Пришко Роман Володимирович

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Обґрунтування установки для опромінення рослин на базі світлодіодного
світильника з регулюємим спектром випромінювання**

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

к.і.н., доцент

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Пришко Роман Володимирович. Обґрунтування установки для опромінення рослин на базі світлодіодного світильника з регулюємим спектром випромінювання. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В даному дипломному проєкті проведений аналіз наявних джерел оптичного випромінювання показав, що застосування світильників на основі світлодіодів дає змогу підвищити енергоефективність процесу опромінення на 30-40%, водночас можливість регулювання спектрального складу світлодіодного світильника відкриває нові шляхи вирішення щодо подальшого підвищення енергоефективності.

Розроблений спосіб управління ростом рослин дає змогу підібрати найсприятливіший спектральний склад випромінювання для рослин та енергозберігаючий режим опромінення. Так збільшення вагового коефіцієнта σ спектрального складу на 0,1 одиницю дасть змогу знизити енергоємність до 26,3%.

За рахунок регулювання спектрального складу створеного світлодіодний світильник загальною потужністю 162 Вт, що включає 72 червоних (630...660нм), 36 синіх (440...460нм), 48 білих (2700 °К) і 6 ультрафіолетових (380...400нм) світлодіодів, під час опромінення насінневої картоплі відбувається зниження диференціальної енергоємності на приріст біомаси у 3 рази, а інтегральна енергоємність знижується в 4 рази за однакової з контрольною посадкою загальної біомаси рослин. При цьому споживана електроенергія знижується більш ніж у 2 рази.

Ключові слова: опромінення, світлодіодний світильник, спектральний склад, біомаса.

ANNOTATION

Pryshko Roman Volodymyrovych. Rationale for a plant irradiation unit based on an LED lamp with an adjustable radiation spectrum. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for the bachelor's degree in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – Polissya National University, Zhytomyr, 2023.

In this thesis project, an analysis of existing sources of optical radiation showed that the use of LED-based lamps can increase the energy efficiency of the irradiation process by 30-40%, while the ability to adjust the spectral composition of the LED lamp opens up new ways to further improve energy efficiency.

The developed method of plant growth control allows us to select the most favourable spectral composition of radiation for plants and an energy-saving irradiation mode. Thus, an increase in the weighting factor ϖ of the spectral composition by 0.1 unit will reduce energy consumption by up to 26.3%.

By adjusting the spectral composition, an LED luminaire with a total power of 162 W was created, including 72 red (630...660nm), 36 blue (440...460nm), 48 white (2700°K) and 6 ultraviolet (380... 400 nm) LEDs, during the irradiation of seed potatoes, the differential energy intensity for biomass growth decreases by 3 times, and the integral energy intensity decreases by 4 times with the same total plant biomass as in the control planting. At the same time, electricity consumption is reduced by more than 2 times.

Keywords: irradiation, LED lamp, spectral composition, biomass.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ІСНУЮЧІ ОПРОМІНЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ СПОРУД ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ ТА ВПЛИВ СВІТЛОДІОДНОГО ОПРОМІНЕННЯ РІЗНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ НА НАСІННЄВУ КАРТОПЛЮ В УМОВАХ АЕРОПОНІКИ.....	9
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРОМІНЕННЯ РОСЛИН НА БАЗІ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА З РЕГУЛЬОВАНИМ СПЕКТРОМ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	22
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОПРОМІНЕННЯ НА КУЛЬТУРУ НАСІННЄВОЇ КАРТОПЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ СВІТЛОДІОДНОЇ ОПРОМІНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ.....	31
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Тепличне овочівництво у основному зосереджено по всій території України. У деяких тепличних комбінатах резерви зі збільшення врожайності овочів та зниження витрат на енергоресурси практично вичерпані у зв'язку з тим, що теплиці перебувають в експлуатації 30-35 років, моральне та фізичне зношування основних фондів становить понад 70%.

Порівняно з 2000 роком на сьогоднішній день ціна реалізації овочів зросла більш ніж у 3,5 рази, водночас тарифи на тепло, газ та електроенергію підвищилися майже у 6...7 разів. Такий диспаритет цін на тепличну продукцію та паливно-енергетичні ресурси призвели до низької рентабельності виробництва. Собівартість виробництва овочів у капітальних теплицях містить витрати на насіння 10%, поживні речовини – до 10%, фонд оплати праці та інші витрати – до 20%, а основну частку становлять витрати на придбання теплової та електричної енергії – понад 60%.

Площі капітальних тепличних споруд на даний час розподілені таким чином: 82% – застарілі, 13% – реконструйовані теплиці, 5% – нові інвестиційні проекти. Однак пріоритетним напрямом розвитку сільського господарства в Україні є забезпечення активного імпортозаміщення, особливо актуальним є заміщення в галузі виробництва овочів та зелені тепличного походження.

Так, у рамках Держпрограми "Розвиток сільського господарства та регулювання ринків сільськогосподарської продукції, сировини та продовольства на 2013–2024 роки" передбачено часткове (до 20%) відшкодування витрат на енергоносії, що забезпечить підвищення рентабельності тепличної продукції. Відповідно до цієї програми Міністерство сільського господарства України розраховує збільшити площі капітальних теплиць з нинішніх 1,0 до 2,7 тисяч гектарів до 2024 року. При цьому прогнозне збільшення виробництва овочів до 2024 року становитиме 1,4 млн. тонн та

приріст валового виробництва овочів, що сприяє імпортозаміщенню у позасезонний період до 768,6 тисячі тонн.

Держава надає велику підтримку задля забезпечення рентабельності тепличного виробництва. Незважаючи на це, головним завданням при реконструкції, модернізації та будівництві нових теплиць є зниження енерговитрат на виробництво тепличної продукції та створення сучасних енергозберігаючих електротехнологій, що знижують витрати на виробництво овочевої продукції в спорудах закритого ґрунту, в т.ч. розробка енергоефективних джерел світла та способів опромінення рослин.

Багаторічна практика вирощування рослин у теплицях показала, що в осінньо-зимовий та зимово-весняний періоди у світлопроникних теплицях, одним з основних лімітуючих зростання та розвиток факторів, є світло.

В останні роки переважна кількість теплиць обладнується світильниками на базі НЛВТ. При цьому спостерігається тенденція збільшення потужності натрієвих ламп, що використовуються, починаючи від 250 Вт до 400 Вт і 600 Вт. Налагоджено випуск ламп з дзеркальним відбивачем типу ДНаЗ, що мають перевагу по світловому потоку. Зазначається, що натрієві лампи високого тиску в технології світлокультури справді мають високі ресурсні показники та енергоефективність. Тому донедавна світильники з НЛВТ практично не мали конкурентів.

Розробка та виробництво у промислових масштабах потужних світлодіодів з початку 2000-х років забезпечила появу конкурента для НЛВТ. Світловіддача деяких типів потужних світлодіодів становить 100...120 лм/Вт, а для НЛВТ - 100...115 лм/Вт. При цьому, досвідчені лабораторні зразки досягають рівня світловіддачі в 150-180 лм. При цьому питома вартість світлодіодного випромінювання на сьогоднішній день становить 10...15 грн/лм, що у 2...3 рази вище, ніж для натрієвих ламп. Проте спостерігається тенденція зниження питомої вартості випромінювання світлодіодів, яка за прогнозами на 2024 рік має варіювати від 5 до 8 грн/лм, з урахуванням курсу долара.

Динаміка зниження ціни потужних СД, великий термін служби, можливість підстроювання спектральних характеристик під будь-які види та сорти плодоовочевих рослин та зелені, адаптованість під цифрове керування потужністю випромінювання забезпечують світильникам на основі світлодіодів незаперечні переваги перед традиційними джерелами випромінювання.

Важливим завданням технології світлокультури є оптимізація режимів опромінення рослин. Для вирішення цього завдання необхідно створювати світлодіодні світильники, що забезпечують необхідні характеристики випромінювання, а також локальні системи на базі мікропроцесорних контролерів. З іншого боку, необхідно досліджувати та розробляти методи та алгоритми оптимізації, як режимів опромінення рослин, так і формування врожаю в цілому. Застосування гнучких та динамічних в управлінні світлодіодних світильників, інтегрованих із сучасними цифровими технологіями, з можливостями мікропроцесорної техніки, може дати якісний стрибок у вирішенні стратегічного завдання енергозбереження.

Вченими у галузі електрифікації сільськогосподарського виробництва Л.К. Алфьорова, А.М. Башилов, І.Ф. Бородін, Р.Г. Бутенко, І.Р. Владикиним, Ф.Я. Ізаковим, В.М. Карповим, А.П. Коломійцем, Н.Ф. Кожевнікова, В.А. Козінським, О.А. Косіцин, Н.П. Кондратьєва, В.М. Леманом, А.К. Лямцова, В.В. Малишев, С.А. Овчукової, С.А. Поповий, А.П. Примаком, Л.Г. Прищепом, Н.М. Протасової, С.А. Растімішин, С.А. Ракутько, Г.С. Саричев, І.І. Свентицьким, Д.С. Стребковим, К.А. Тиміразєвим, А.А. Тихомировим, В.П. Шарупічем, С.М. Яковлєвим, R. McCree, B. Singh, P. Mekkel, J. Bonnet, P. Harris, M. Fischer та іншими доведено ефективність застосування штучного опромінення (досвічування) в управлінні процесом формування врожаю та підвищення врожайності рослин.

Опромінюючи рослини різними за спектром випромінювання джерелами ОВ, можна керувати процесом формування врожаю, подовжувати чи

скорочувати онтогенез рослин, підвищувати врожайність, що забезпечить зменшення споживання електричної енергії під час вирощування рослин.

Тому тема роботи, присвячена підвищенню ефективності опромінення рослин з використанням світлодіодних світильників у спорудах закритого ґрунту, є актуальною та має наукове та прикладне значення.

Об'єктом дослідження вважається установка на постійних магнітах барабанного типу зменшення втрат насінневої картоплі за умов тривалого зберігання у фермерських господарствах.

Метою роботи є підвищення ефективності опромінення рослин у спорудах закритого ґрунту шляхом регулювання спектрального складу випромінювання світлодіодних світильників та управління режимами досвітлення.

Об'єктом дослідження є процес опромінення рослин світлодіодними світильниками із регульованим спектральним складом випромінювання.

Предметом дослідження є взаємозв'язок енергоємності процесу опромінення рослин з енергетичними та спектральними характеристиками світлодіодного світильника, що впливає на рослини у процесі росту.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Савченко Л.Г., **Пришко Р.В.** Вплив світлодіодного опромінення різного спектрального складу на насінневу картоплю в умовах аеропоніки. Збірник тез IX-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. м. Житомир, 5 квітня 2023 року. Житомир : ЖАТФК, . С. 243-245.

2. Савченко Л.Г., **Пришко Р.В.** Експериментальна установка для опромінення рослин на базі світлодіодного світильника з регульованим спектром випромінювання. *Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науковопедагогічних працівників, докторантів,*

аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 19 квітня 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. С. 174-180.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи, а саме розроблена установка для опромінення рослин на базі світлодіодного світильника, можуть бути впровадженні в підприємствах агропромислового комплексу України.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 17 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 48 сторінок комп'ютерного тексту, містить 5 таблиць і 30 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ІСНУЮЧІ ОПРОМІНЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ СПОРУД ЗАКРИТОГО ГРУНТУ ТА ВПЛИВ СВІТЛОДІОДНОГО ОПРОМІНЕННЯ РІЗНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ НА НАСІННЄВУ КАРТОПЛЮ В УМОВАХ АЕРОПОНІКИ

Класифікація джерел світла застосовуваних у складі опромінювальних установок для споруд закритого ґрунту представлена на рис. 1.1.

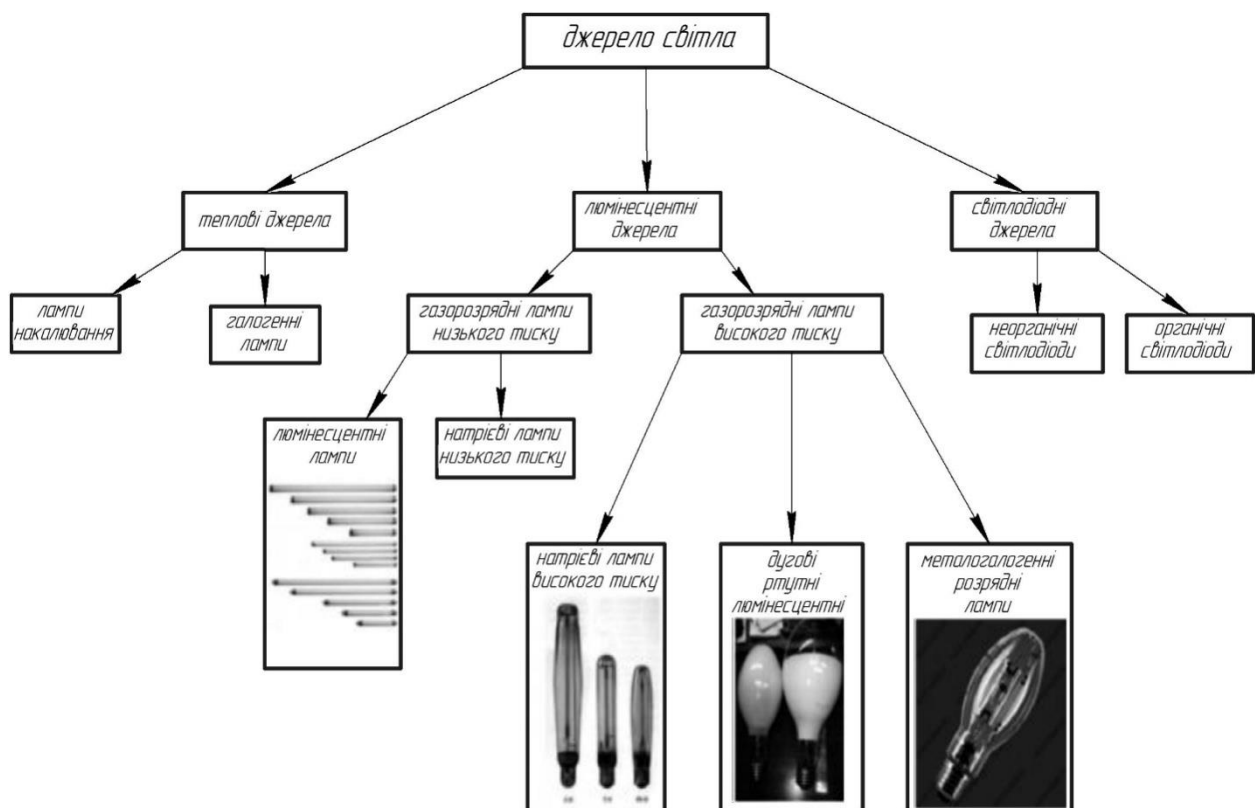


Рис. 1.1. Класифікація джерел світла для тепличних господарств

З початку 90-х років у тепличних господарствах України активно почали впроваджувати опромінювачі переважно з лампами МГЛ потужністю 400, 1000 і 2000 Вт, і з лампами НЛВТ потужністю 400 Вт та 600 Вт, які є порівняно важкими через особливості конструкції, що відбивається на вартості.

Більшість світильників з лампами НЛВТ та МГЛ запалюються за допомогою електромагнітного або електронного ПРА, вбудованого чи

незалежного виконання. У таблиці 1.1 наведено параметри найбільш поширених українських та імпортованих світильників для теплиць з лампами НЛВТ та МГЛ.

Таблиця 1.1 – Основні параметри українських та зарубіжних тепличних ОУ.

Тип світильника	Тип лампи	Тип кривої сили світла	Освітлювана площа, кв.м	Висота підвісу світильника, м	Число світильників на 1000 м ²	Питома потужність, Вт/м ²
ОТ-400	ДРЛФ 400	Д	5,0	0,8-1,0	384	153,6
ГСП-49-1000	ДРИ-10006	Л	5,0	1,5-2,0	104	96
ГСП- 302000	ДРИ-20006	Л	5,0	2,0-2,5	44	88
ЖСП-49400	ДнаТ-400	Л	5,0	1,5-2,0	208	83,2
ЖСП- 30-2Х 400	ДнаТ-400	Л	5,0	2,0-2,5	104	102,4
ЖСП- 30400	Reflux ДнаЗ 400	Ш	6,0	2,0-2,5	176	70,4
УОРТ 8-750	ДМ4 - 750	—	3,3	—	112	91
SGR 140 (Philips)	SON-T AGRO 400W	л-ш	10,8	1,6	344	137,6
SGR 160	НЛВД 600	л-ш	14,8	1,6	252	151,2
GAN 400AL (Gavita), Норвегія	SON-T 400 W	Л	15,0	2,5	313	125
68120 (Idman, Фінляндія)	NAV-T 400 HPI- T400	Ш	14,1	1-1,5	109	48
68140	SON-T 400	Л	12,9	1,5	351	144,6

У Європі та інших західних країнах поступово припиняється виробництво НЛВТ потужністю 400 Вт та випускаються модифіковані лампи потужністю 400-600 Вт. Дані лампи за рахунок підвищеного тиску ксенону мають частку випромінювання у синій області спектру понад 10%.

У таблиці 1.2 наведено характеристики газорозрядних ламп.

Таблиця 1.2 – Характеристики газорозрядних ламп.

Характеристика	Тип лампи			
	ЛЛ	ДРЛ	МГЛ	НЛВД
Світловіддача, лм/Вт	50.80	45.70	100.120	110.150
Термін служби, тис.год	10.15	10.15	6.10	16.24
Потужність, Вт	15.65	50.400	70.400	70.600
ККД ФАР, %	20.25	10.12	26.30	26.30

У таблиці 1.3 представлений спектральний склад джерел ОІ, що застосовуються для опромінення рослин. Спектральний склад даних джерел світла відрізняється від оптимального, зокрема і в сонячного світла.

Таблиця 1.3 – Спектральний склад джерел світла.

Тип джерела світла	ксин, %	кзел, %	кчер, %
ДРЛФ400	26	56	18
ДРВ750	24	46	28
ЛОР1000	43	14	43
ДРФ1000	33	50	17
ДНАТ400	7	56	37
ДРИ400-6	39	43	18
ДРОТ2000	42	33	25
ДКСТ	35	31	34
ЛН	14	34	52
ЛФ40-2	30	35	35
ЛФР150	20	17	63
ДМГФ-1000 Э	20	40	40
Плазмовий опромінювач	20	60	20
Сонячне Пряме	27	37	36
Сонячне розсіяне	43	33	24

Великі виробники ламп ТОВ «Рефлакс» разом із ВАТ «КЕТЗ» виробляють опромінювачі ЖСП-30-400 із дзеркальними лампами ДНаЗ-400. Застосування світильників з такими лампами є досить вигідним для тепличних комбінатів і нині використовуються більш ніж 50% капітальних зимових теплиць України та інших країн.

Основні аргументи на підтримку натрієвих ламп - це висока світловіддача (100...150лм/Вт), найбільш ефективний спектр випромінювання. Однак цьому типу ламп притаманні серйозні недоліки:

- приблизно до 6000 годин роботи відбувається спад випромінювання на 15-17% для НЛВТ потужністю 400 Вт, незалежно від виду ПРА, основна причина якого - потемніння приелектродних зон;
- до 6000 годин роботи виходять з ладу лампи з ЕПРА – до 10%, з ЕМПРА – до 30% ламп;
- глибина пульсацій випромінювання до 70%;
- велика маса дроселя ПРА;
- зі зростанням частоти включень швидкість деградації випромінювання та підвищення напруги на лампі збільшується, термін служби при цьому зменшується. При безперервному режимі роботи термін служби у 2 рази більший ніж у 10 годинному циклі.

Разом з тим, сучасні технології дозволяють створити світлодіоди, що випромінюють світло всіх довжин хвиль видимого діапазону оптичного спектру. На рис. 1.2 представлені спектри світлодіодів виготовлених із різних компонентів. Світлодіоди споживають малу електричну потужність, а також мають спрямоване випромінювання, механічно міцні. Термін служби становить близько 50 000 годин.

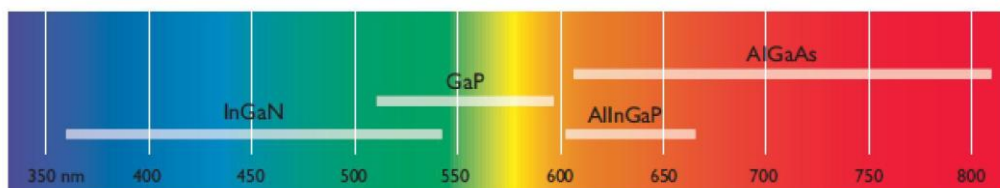


Рис. 1.2. Діапазони спектрів випромінювання потужних світлодіодів

Слід зазначити, що світлодіодні світильники в силу своєї фізичної природи надають великі можливості регулювання потужності опромінення і спектрального складу випромінювання. Це дає можливість зміни інтенсивності опромінення та спектрального складу з часом залежно від біологічної ефективності впливу на рослини того чи іншого складового опромінення.

Також перевагою освітлювальних установок на основі світлодіодів мають порівняно мале виділення тепла, тому їх можна розміщувати безпосередньо поблизу рослин без ризику опіку. Також важливу роль відіграє така характеристика світлодіодів як спрямованість випромінювання, так при застосуванні світлодіодів з кутом половинної яскравості 120-140° більш ефективно використовується інтенсивність джерела світла.

Лінійки світлодіодів у складі світлодіодного світильника живляться від спеціалізованих пристроїв, які називають драйверами. Драйвери є перетворювачами постійної напруги в стабільний струм. Для регулювання потужності світлового випромінювання драйверах передбачені спеціальні входи, тобто управління вихідним струмом. Управління драйверами здійснюється двома способами:

- за допомогою аналогового сигналу;
- широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) за допомогою мікропроцесорного контролера.

Світловіддача сучасних потужних світлодіодів становить від 20 до 110 лм/Вт, що залежить від кольору та технології виготовлення. Основною перевагою світильників на основі світлодіодів перед традиційними лампами є те, що надається можливість скласти таке спектральне співвідношення, при якому світлова енергія максимально ефективно засвоюватиметься рослинами без відображення в навколишнє середовище.

У таблиці 1.4 подано основні характеристики вітчизняних світлодіодних світильників.

Таблиця 1.4 – Характеристики вітчизняних світлодіодних світильників

Параметр	Світлодіодний світильник УСС-70БИО	Світлодіодний світильник L- ВЮ50
Світловий потік, лм	7200	6230
Споживана потужність, Вт	72	60
Світловіддача, лм/Вт	100	104
Маса, кг	8,5	4,2
Габаритні розміри, мм	Довжина - 820 Ширина - 185 Висота - 55	Довжина - 1027 Ширина - 107 Висота - 83
Корисний термін служби, год	100 000	100 000
Ціна, грн	18 500	24 000

Перша у світі діюча теплиця із застосуванням світлодіодних світильників створена у місті Умані. На Уманському тепличному комбінаті встановлено 1300 світлодіодних світильників Green Power LED, виробництва світового лідера в галузі світлових рішень компанії Royal Philips Electronics потужністю 150 Вт. На рис. 1.3 представлений аграрний світлодіодний світильник бічного випромінювання фірми Philips.

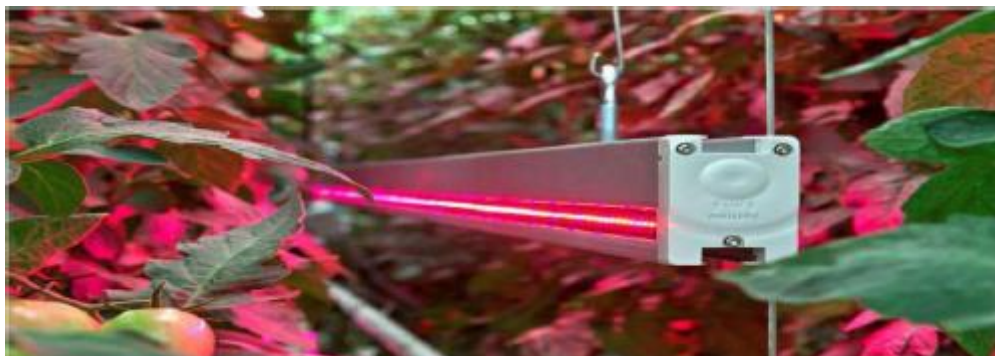


Рис. 1.3. Аграрний світлодіодний світильник бічного випромінювання Philips.

Встановлення світлодіодного освітлення на Уманському тепличному комбінаті здійснено у січні 2012 року, і на даний момент територія теплиці, освітлена світлодіодами, становить 6000 м². Результати використання світлодіодного освітлення показали, що збільшився приріст урожаю на 15%.

Також у ряді інших великих теплиць Голландії та США у штаті Мічиган впроваджено у виробництво промислові світлодіодні світильники, як показано на рис. 1.4. Енергоефективність при цьому підвищилася загалом на 30 %.



Рис. 1.4. Промислові світлодіодні світильники: а) теплиця в Голландії зі світлодіодними світильниками Green Power LED; б) теплиця в США штат Мічиган зі світлодіодними світильниками LumiGrow Pro325e.

Порівняльний аналіз СДС і НЛВТ можна зробити використовуючи функцію розподілу енергії в спектрі випромінювання джерела $\varphi(\lambda)$, за допомогою якої можна оцінити теоретичний ефективний потік ФАР:

$$\Phi = \int_{\lambda=380}^{\lambda=700} \sigma\{E(\lambda), A\} \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

де $\sigma\{E(\lambda), A\}$ – функція спектральної чутливості фітоценозу, $E(\lambda)$ - рівень опроміненості на довжині хвилі λ на багатьох всіх довжинах хвиль в діапазоні ФАР (380...700 нм).

Для оцінки ефективності ФАР прийнятий НЛВТ зі світловіддачею 115 лм/Вт та потужністю 400Вт у комплекті промислового світильника ЖСП 15-400 з ККД 60%. Для спрощення розрахунків вважається, що в зоні D-лінії натрію на довжині хвилі 589 нм сконцентровано 75% потужності випромінювання лампи. Потужність випромінювання джерела ОІ розраховується за формулою:

$$P = \frac{\Phi_v}{V(\lambda) \cdot 683}, \quad (1.2)$$

де Φ_v – світловий потік джерела,

$V(\lambda)$ – відносна спектральна ефективність (для довжини хвилі 589 нм становить 0,757).

Розрахована потужність випромінювання у сфері ФАР для НЛВТ становила 119Вт, і з урахуванням ККД лампи – 71Вт. Потужність, з урахуванням ККД ПРА (85%), склала - 470Вт.

При використанні світлодіодних кластерів потужністю 20Вт та спектральному розподілі інтенсивності випромінювання: червоний - 1330 лм/зелений -1050 лм/синій – 560 лм у співвідношенні 55/10/35%, з кожного кластера випромінюється потужність в області ФАР: червоний – 6,09 Вт; зелений – 2,0 Вт; синій – 11,7 Вт.

Для створення СД світильника з потужністю випромінювання 100 Вт і вказаним спектральним співвідношенням потрібно 9 червоних, 5 зелених та 3 синіх кластери.

Враховуючи спрямованість випромінювання СД та відсутність втрат на вторинній оптиці, ККД світильника наближається до 100%. Сумарна електрична потужність СД кластерів складає 312Вт, а потужність СД світильника з урахуванням ККД джерел живлення (90%) - 350Вт.

При розрахунках опроміненості необхідно враховувати коефіцієнт запасу потужності, як натрієвих ламп, так СД, що призводить до збільшення споживаної потужності світильників. При цьому, з урахуванням того, що коефіцієнт запасу дорівнює $k_z = 1,5$, НЛВТ протягом усього терміну експлуатації споживатиме в півтора рази більше електроенергії, а СДС, за рахунок регулювання інтенсивності опромінення значно менше. У міру деградації світловіддачі та забруднення СДС потужність споживання буде пропорційно збільшуватися. На рис. 1.5 показано, що з урахуванням зменшення потужності випромінювання СД світильника протягом циклу техобслуговування середнє енергозбереження становить 25%.

У цьому прикладі, враховуючи коефіцієнт запасу, розрахункова споживана потужність НЛВТ становить 705Вт, а споживана потужність СД світильника в циклі техобслуговування - 438Вт.

Завдяки стрімкому розвитку індустрії в галузі технологій потужних світлодіодів, на сьогоднішній день СДС має потужність випромінювання в області ФАР випромінювання 100 Вт/м^2 при споживаній потужності 180Вт, у той час як при споживаній потужності 470Вт світильник на основі НЛВТ має

потужність випромінювання 71 Вт/м^2 . Однак, з урахуванням того, що рослини різних культур і сортів мають індивідуальні потреби в дозі та спектральному співвідношенні опромінення, наявні на сьогоднішній день джерела ОІ для споруд закритого ґрунту не забезпечують необхідних показників.

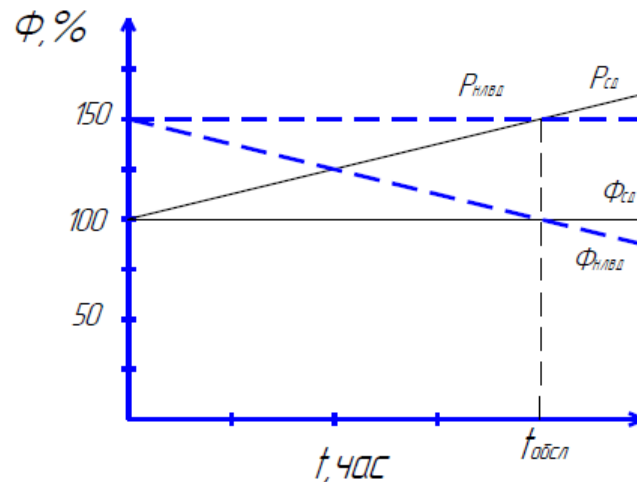


Рис. 1.5. Облік коефіцієнта запасу k_3 під час вибору потужності ламп

Аeropоніка – високотехнологічний спосіб вирощування рослин на спеціальних поживних розчинах, що дає змогу підвищити вихід оздоровленого посадкового матеріалу картоплі, а також багатьох інших культур.

Аeropонні установки використовуються для дорощування оздоровлених методом апікальних меристем пробіркових рослин. Технічний прогрес, мікропроцесорна техніка, енергозберігаючі світлодіодні джерела штучного опромінення зробили aeropонну технологію в рослинництві економічно вигідною і затребуваною.

Технологія aeropонного вирощування дає змогу розміщувати рослини компактно, водночас раціонально заповнюється об'єм приміщень завдяки додатковим ярусам, у такий спосіб заощаджується робоча площа і підвищується вихід продукції. Відсутність ґрунту унеможливорює необхідність стерилізації субстрату і боротьби з супутніми хворобами, а також спрощує догляд за рослинами.

Важливим прийомом вирощування рослин в aeropоніці є використання світлодіодних джерел опромінення рослин із заданими параметрами, що різко

скорочує енерговитрати завдяки високій світловіддачі, тривалому робочому ресурсу і можливості регуляції спектра випромінювання.

Ефективність будь-якої технології вирощування рослин визначається можливістю регуляції кожного етапу їхнього росту і розвитку. Аеропонний спосіб вирощування рослин дає змогу набагато тонше регулювати умови середовища, ніж традиційні способи і технології закритого ґрунту. Можливість оперативного регулювання факторів навколишнього середовища є однією з найважливіших переваг аеропонних технологій.

За допомогою оптимально підібраних чинників спектрального складу світла, мінерального живлення, температури (як навколо листової поверхні, так і в кореневій зоні рослин) можна управляти ростом рослин і багаторазово збільшити якість і кількість врожаю у вигляді міні-бульб.

У підсумку з одного куща, за дотримання всіх умов технології, можна зібрати близько 50 мініклубнів вагою по 5-30 грамів залежно від сорту. Усе залежить від тривалості вегетації, умов вирощування.

Наразі вартість однієї міні-бульби становить близько 8-15 рублів, ціна залежить від масштабу і ступеня автоматизації виробництва.

В багатьох роботах досліджували вплив світлодіодного світильника на меристемну картоплю і встановили, що найбільш сприятливим спектральним складом є синьо-біло-червоний. У світильнику використовували потужні сині, червоні та білі світлодіоди, що дало змогу заощадити електричну енергію на 40...50% за поліпшення якості меристемної картоплі сорту Вінницька на 10...15%.

У багатьох роботах зазначено, що розподіл сухої біомаси по органах рослин має неоднаковий характер і залежить від спектрального складу світла.

Під люмінесцентними лампами та світлодіодами білого світла нагромадженням сухої речовини було більшим у листках порівняно з корінням і стеблом. За опромінення світлодіодами червоного світла більше сухої біомаси нагромаджувалося в стеблі та коренях. Встановлено, що зміни в

нагромадженні сухої речовини за різних спектральних складів опромінення рослин пов'язані з вищою активністю фотосинтетичного апарату при вирощуванні під білими та синіми світлодіодами.

У багатьох дослідженнях проведено порівняльну оцінку застосування НЛВТ 600 Вт і СД з довжинами хвиль $\lambda=630+470$ нм і $\lambda=660+450$ нм. Результати дослідження засвідчили, що рослини, вирощені під НЛВТ 600 Вт, мали вищу швидкість накопичення біомаси і росту стебла у висоту і на третьому тижні становили $59,5\pm 4,2$ г/рослина і $35,0\pm 3,4$ см відповідно, а під СД з довжинами хвиль $\lambda=630+470$ нм і $\lambda=660+450$ нм біомаса становила $66,0\pm 2,4$ та $26,6\pm 1,5$, а висота стебла $20,2\pm 2,2$ см і $14,0\pm 1,3$ см відповідно. У кінцевому підсумку врожайність картоплі під СД 660 + 450нм була порівнянною з НЛВТ і становила 176,1 г з рослини проти 183,6 г з рослини. Що вказує на можливість застосування СД 660 + 450нм при вирощуванні картоплі в контрольованих умовах аеропоніки.³⁸

Були проведені постановочні однофакторні експерименти з використанням світильників ЖСП 10-400 з лампою типу ДНаЗ потужністю 400 Вт і світлодіодних світильників ES-120W-GP, як показано на рис 1.6.



а



б

Рис.1.6. Вирощування картоплі з використанням світильників: а – ЖСП 10-400; б – СДС ES-120W-GP

За результатами експериментів побудовано графіки росту рослин, які наведено на рис. 1.7, та оцінено врожайність.

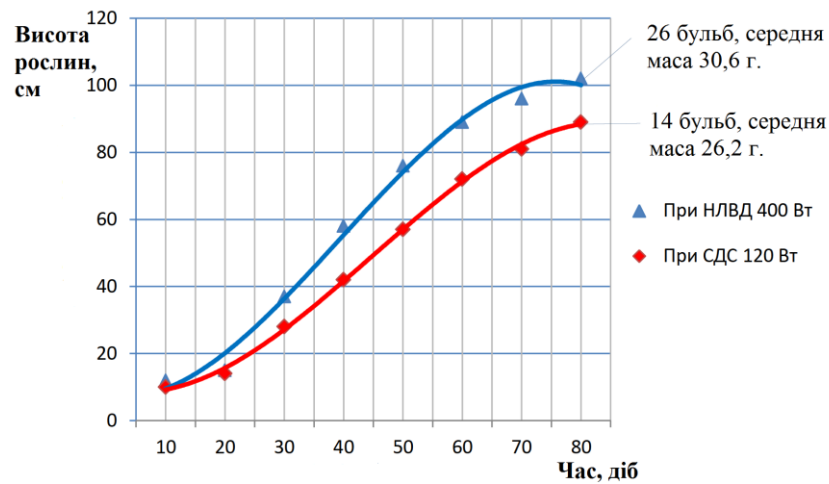


Рис. 1.7. Графіки росту картоплі сорту Ред Скарлетт

Аналіз графіків на рис. 1.7 показує, що рослини під лампами НЛВД росли інтенсивніше і, як наслідок, дали більший урожай, ніж під СДС.

Це можна пояснити малою інтенсивністю застосованих СДС, які становили $11,7 \text{ Вт/м}^2$ у червоній ділянці та $7,81 \text{ Вт/м}^2$ у синій ділянці спектра.

Висновки по розділу

Оптичне випромінювання має дуже важливий вплив на фотосинтез та інші біологічні процеси в рослинах, при цьому основне значення має спектральна опроміненість або спектральна інтенсивність опромінення у ФАР діапазоні з довжиною хвилі від 400 до 700 нм. Синє і червоне світло найефективніше поглинаються рослинами.

За допомогою оптимально підібраних факторів в аеропонних установках спектрального складу світла, мінерального живлення, температури (як навколо листової поверхні, так і в кореневій зоні рослин) можна керувати зростанням рослин і багаторазово збільшити якість і кількість врожаю у вигляді міні-бульб.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРОМІНЕННЯ РОСЛИН НА БАЗІ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА З РЕГУЛЬОВАНИМ СПЕКТРОМ ВИПРОМІНЮВАННЯ

На рис. 2.1 представлено класифікацію структурних схем живлення ыснуючих СДС.

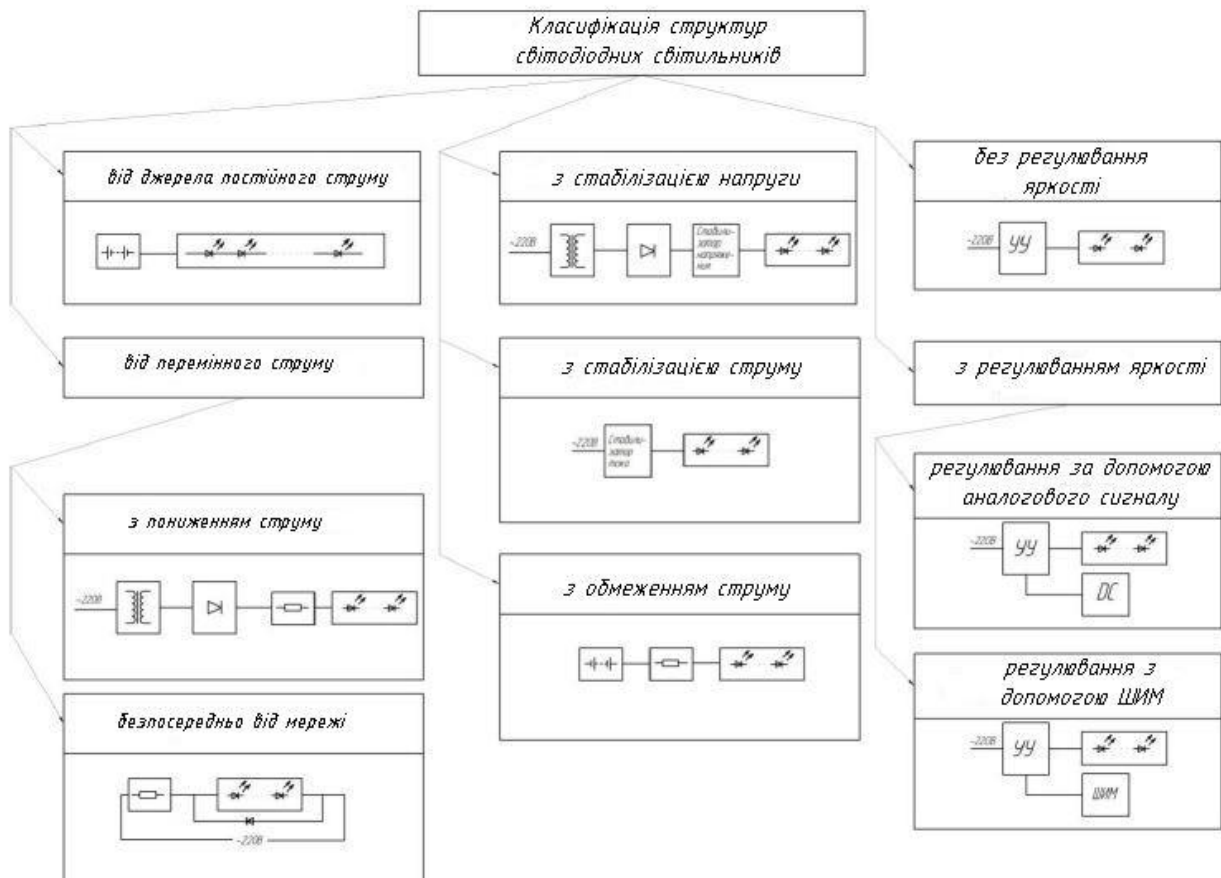


Рис. 2.1. Класифікація структурних схем світлодіодних світильників

Структурна схема пристрою живлення світлодіодного світильника (СДС) має бути універсальною, з можливістю використання в будь-якому тепличному господарстві, незалежно від виду і сорту плодоовочевих культур і зелені. У зв'язку з уніфікованістю схем живлення теплиць, а також з огляду на те, що використання зниженої напруги або джерел постійного струму призведе до додаткових втрат і зниження ККД, СДН, який розробляють, має працювати безпосередньо від промислової однофазної мережі 230В. Функціональні схеми

передбачають можливість зміни як спектрального складу, так і спектральної інтенсивності випромінювання. Також необхідно забезпечити гальванічну розв'язку використовуваного мікроконтролера від мережевої напруги 230В, 50Гц. Використання ШІМ-управління спрощує організацію гальванорозв'язки з огляду на те, що потрібна передача тільки двох рівнів сигналу, при цьому додатково розширюється динамічний діапазон регулювання потужності.

Виходячи з визначеної потужності СД, що дорівнює 1 Вт і наявності трьох змінних спектральних смуг, проводиться вибір джерела живлення світлодіодів - драйвера, особливістю якого є його струмовий вихід, що дає змогу виключити зі схеми обмежувальні резистори і живити СД безпосередньо.

Для забезпечення роздільного регулювання інтенсивності за трьома спектральними смугами, в одному світильнику застосовують три драйвери, кожен потужністю не менше 54 Вт, без урахування запасу за потужністю або з урахуванням 10 %-го запасу - потужністю від 60 Вт.

Обрано драйвер, що відповідає заданим вимогам, - HLG-60H-C700B (ARPL, UVDC = 50 ... 100V, $I_{out} = 0,7A$, ШІМ, DIM 1...10 V, 70 Вт, IP56), з 10% перевагою за запасом потужності. Діапазон вихідної напруги цього драйвера зміщений у сферу підвищених значень напруг, що має високе значення при послідовному з'єднанні більшої кількості СД. З огляду на проведений раніше вибір світлодіодів потужністю 1 Вт з номінальним струмом 0,35 А, виходить, що один спектральний канал має містити два паралельні ланцюжки СД із загальним струмом 0,7 А. З огляду на падіння напруги на одному СД близько 3 В і максимальне для обраного драйвера UVDC=100V виходить, що в одній СД лінійці має бути не більше 30 діодів.

Крім того, кількість СД в одній лінійці визначається обмеженнями габаритів корпусу світильника, радіатора-тепловідводу і друкованими платами для монтажу СД.

Відповідно до вищевикладеного, прийнято структурну схему СДС із мікроконтролерним керуванням, представлена на рис. 2.2.

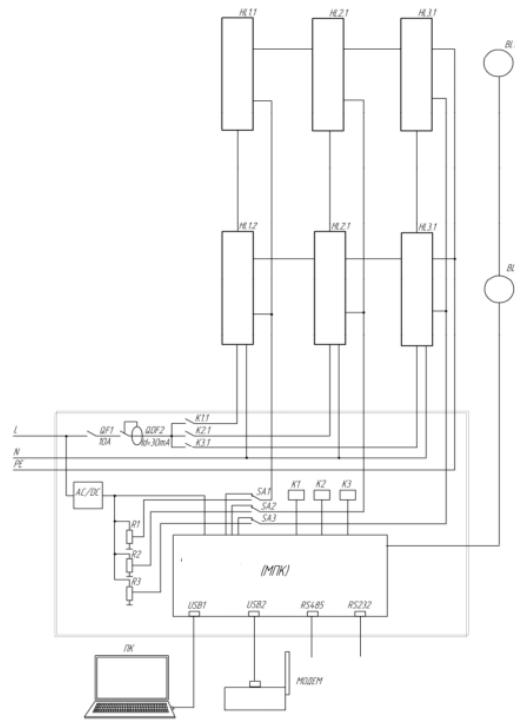


Рис. 2.2. Структурна схема системи опромінення на основі СДС із регульованим спектральним складом

Крім ступеневого релейного керування роботою світильників у системі реалізовано режим плавного регулювання потужності (димірування) за кожною спектральною смугою випромінювання. Димування можна здійснювати або вручну за допомогою потенціометрів R1,R2,R3, або автоматично за заданою програмою за допомогою МПК. Режим роботи "Ручний/автоматичний" вибирається за допомогою перемикачів SA1,SA2,SA3.

Для здійснення алгоритму комплементарного досвічування в МПК вводиться інформація про енергетичну освітленість усередині теплиці з датчиків BL1,BL2. При цьому датчик BL1 вимірює сумарну потужність ФАР, а датчик BL2 - потужності випромінювання окремо за спектральними смугами. Слід зазначити, що використання двох датчиків дає змогу оптимізувати як потужність досвічувального випромінювання, так і співвідношення між потужностями окремих спектральних складових випромінювання. МПК реалізовано на базі мікросхеми мікроконтролера Texas Instruments MSP430, що базується на 16-розрядному процесорі змішаних сигналів з RISC-архітектурою та спроектований спеціально для додатків із наднизьким споживанням.

Складальне креслення плати контролера показано на рис. 2.3.

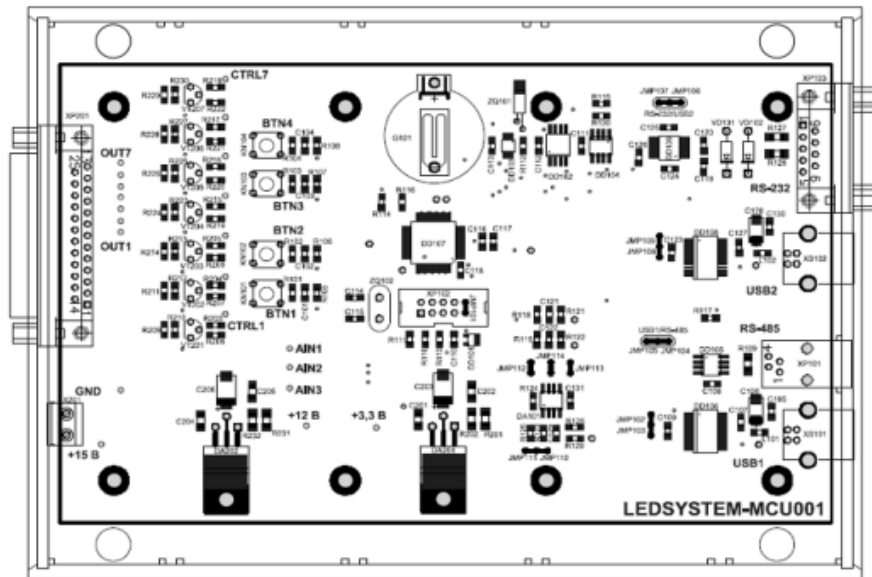


Рис. 2.3. Складальне креслення плати контролера.

Контролер від самого початку розроблявся з урахуванням перспективного розширення функціональних можливостей, зокрема, за рахунок розвинутого інтерфейсу. До його складу входять порти USB, COM-порт RS232, RS485. Це дає змогу підключати до контролера персональні комп'ютери, принтери, локальні мережі, модеми тощо. Контролер має у своєму складі годинник реального часу, який також включає календар дат, що дає змогу програмувати програми керування радіаційним режимом у реальному часі.

Контролер має сторожовий таймер, який у разі збоїв або зависання програми здатний перезавантажити процесор і з мінімальними спотвореннями циклограми продовжити виконання програми. Для зберігання заданих програм опромінення використовується FLASH-пам'ять об'ємом 4 МВ, що дає змогу формувати цілорічні програми регулювання потужності випромінювання з дискретністю до 30 хвилин.

Конкретні програми роботи задаються з персонального комп'ютера ПК, у якому встановлено ПЗ, що містить базу даних (БД) за добовими фотоперіодами вирощуваних рослин. Причому БД формується в процесі оптимізації графіка фотоперіоду за заданого нормованого фотоперіоду, графіка сонячної інсоляції та прийнятого тарифного плану оплати електроенергії.

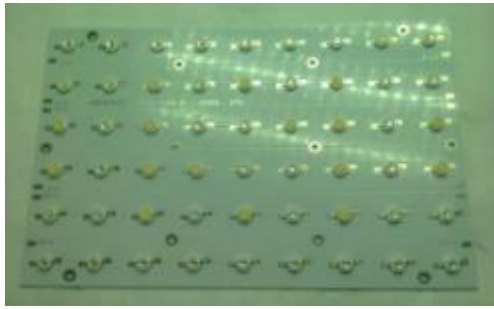
Після завантаження з ПК у МПК заданих добових графіків опромінення комп'ютер може бути відключений і МПК готовий автономно реалізовувати повну циклограму досвічування на весь період вирощування рослин. Для віддаленого моніторингу, а також коригування програми управління в системі передбачено радіомодем для віддаленого зв'язку між МПК і ПК.

Через інтерфейсний порт RS485 до МПК можна під'єднувати різні види віддалених пристроїв, наприклад, додаткові групи світильників зі своїми програмами керування.

Напруга живлення надходить на контакти К1.1, К2.1, К3.1 твердотільних реле К1, К2, К3, керованих мікропроцесорним контролером (МПК), і подається на СДС. Передбачено також режим ручного керування увімкненням/вимкненням групи світильників. Таким чином, є можливість реалізації імпульсного режиму опромінення із заданими часовими характеристиками, а також режим роздільного ввімкнення кожної групи світильників.

Після опрацювання різних варіантів було обрано таке компонування СД: світлодіоди розміщуються на трьох друкованих платах з алюмінієвою підкладкою товщиною 1,5 мм. На кожній платі розташовано 54 СД різного кольору, які згруповані в шість послідовних ланцюжків по 9 діодів у кожному. Ланцюжки попарно з'єднані в паралель для узгодження з вихідним струмом драйвера. Плати між собою з'єднані послідовно, водночас загальна довжина однієї послідовної лінійки СД дорівнює 27 діодам, у такий спосіб забезпечується загальне падіння напруги на всій лінійці близько 87...94 В.

Схему з'єднання СД на одній платі та зібраного світильника наведено на рис 2.4 і 2.5.



а)



б)

Рис. 2.4. а) Схема з'єднання СД на одній платі та б) спектральне компанування світлодіодів на одній платі

Таким чином, світлодіодний світильник складається з 162 1 Ватних світлодіодів з трьома спектральними смугами по дві лінійки, в кожній з яких 27 світлодіодів. За кожною зі спектральних смуг можна проводити регулювання потужності випромінювання. Світлодіодний світильник містить 24 червоних (630...640нм), 48 дальніх червоних (640...660нм), 36 синіх (440...460нм), 48 білих (2700 К), 6 ультрафіолетових (380...400нм) світлодіодів.

На рис. 2.6 представлено складальне креслення розробленого світлодіодного світильника.

У таблиці 2.1 наведено характеристики світлодіодів у складі СДС.



Рис. 2.5. Конструкція світлодіодного світильника

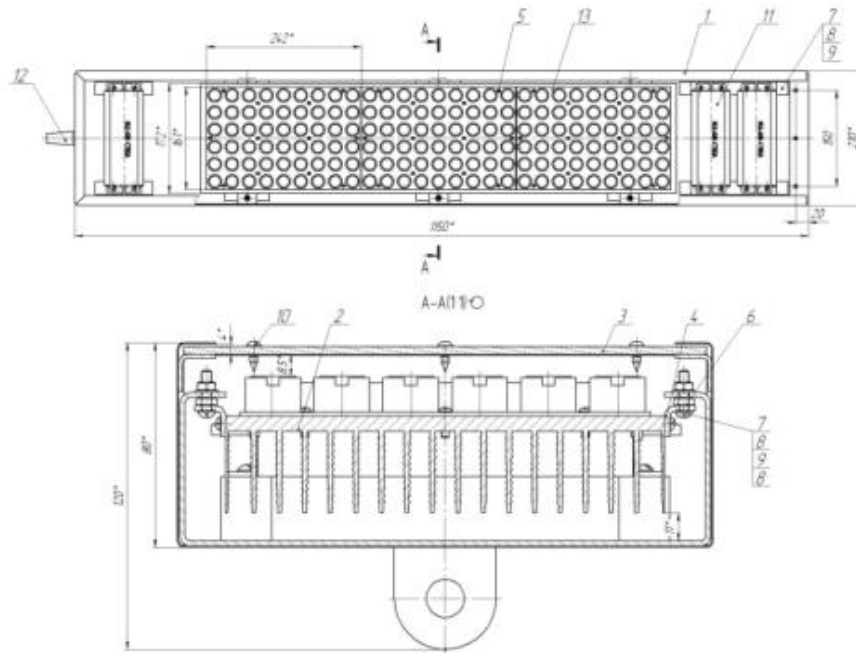


Рис. 2.6. Складальне креслення розробленого світлодіодного світильника: 1 - корпус, 2 - алюмінієвий радіатор, 3 - ПЕТ-скло, 4 - кріплення радіатора, 5 - алюмінієва плата, 6 - монтажне кріплення, 7,8,9,10 - гвинти, 11 - драйвер, 12 - кабельне введення, 13 - світлодіоди в комплекті з лінзою 60°.

Таблиця 2.1. Характеристики світлодіодів у складі СДС.

Колір СД (смуга спектра)	ККД СД	Кількість СД у світильнику	Електрична потужність розсіювання, Вт
Червоний (630 нм+670 нм)	0,55	72+(16 білих)	
Синій (450 нм)	0,45	36+(16 білих)	
Зелений (550 нм)	-		
УФ (380 нм)	0,2		
Всього			162

Для проведення досліджень зібрано установку, представлену на рис. 2.7 і 2.8, що складається зі світлодіодних світильників, блока керування, а також вимірювального комплексу на базі АЦП ZET-210, однофазного лічильника електроенергії Меркурій 206. Зчитування так званих "півгодин" з лічильника

проводиться через інтерфейс RS485 за протоколом Modbus RTU. Зростання рослин (висота) визначається вручну або за допомогою міні-комп'ютера ODROID-C1+, який обробляє кадри, зняті веб-камерою, водночас отримані дані уточнюються за допомогою лінійки, вимірами відстаней між зарубками на шпалері. Рівень опромінення регулюється за допомогою контролера і створеної комп'ютерної програми відповідно до представленого алгоритму та енергоощадної системи широтно-імпульсною модуляцією. Обробка отриманої інформації здійснюється сертифікованими програмами.

Комутацію ланцюга живлення світильників реалізовано на базі твердотільних реле SSR-1 240V 100A (R)D3 з керівною напругою 3-32 В. Сигнал на увімкнення надходить від контролера, який, у свою чергу, живиться від блока живлення MEAN WELL DR-30-24.

Для зняття ФАР характеристик світильника застосовували сертифікований прилад спектрофотометр ТКА-Спектр. Також з метою забезпечення комплементарного опромінення застосовано датчик освітленості APDS-9250, який був відкалібрований за допомогою спектрофотометра.



Рис. 2.7. Загальний вигляд експериментальної установки

Різні режими роботи розробленого СДС представлено на рис. 2.8, де показано роботу СДС на повній потужності, на половині споживаної потужності та розподіленої за спектральними смугами.

Температуру в приміщенні підтримували на рівні 23...25 °С за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції.



Рис. 2.8. Зміна спектрального складу та спектральної інтенсивності випромінювання СДС.



Рис. 2.9. Блок керування мікрокліматом

Висновок по розділу

Створено світлодіодні світильники потужністю 162 Вт та експериментальну установку, що забезпечує можливість зміни спектрального складу опромінення та вимірювання росту рослин. Світлодіодний світильник містить 24 червоних (630-640нм), 48 дальніх червоних (640-660нм), 36 синіх (440-460нм), 48 білих (2700 о К), 6 ультрафіолетових (380-400нм) світлодіодів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОПРОМІНЕННЯ НА КУЛЬТУРУ НАСІННЄВОЇ КАРТОПЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ СВІТЛОДІОДНОЇ ОПРОМІНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторну установку для отримання генетично однорідного безвірусного посадкового матеріалу картоплі сорту Ред Скарлетт клональним мікророзмноженням представлено на рис. 3.1.

При цьому значення спектральної опроміненості приймали відповідно до отриманих рекомендацій.



Рис. 3.1. Лабораторна установка для клонального мікророзмноження картоплі сорту Ред Скарлетт

Отриманий посадковий матеріал висаджували в аеропонну установку.

Для підтвердження математичної моделі, був проведений експеримент (рис. 3.2), у якому проводили вимірювання довжини та діаметра стебла, сформованого під створеним СДС за довільного спектрального складу протягом двох діб після висаджування на аеропонну установку. За формулою було розраховано ваговий коефіцієнт для даного спектрального складу, який склав $\varpi=0,925$. До кінця вегетації рослин спектральний склад не змінювався.

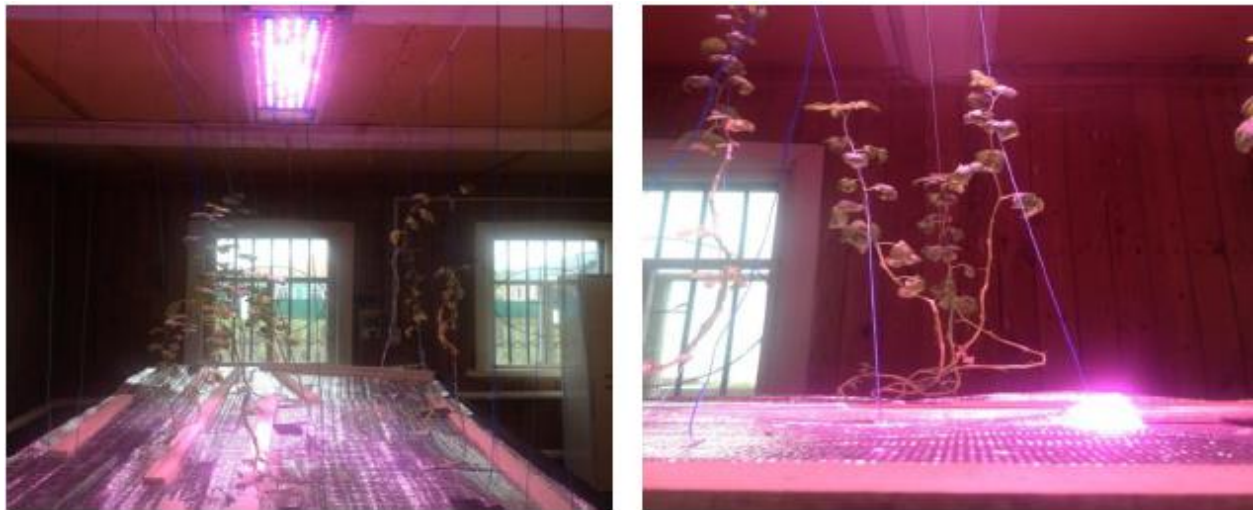


Рис. 3.2. Експериментальна аеропонна установка з СДС

Результати дослідження подано в таблиці 3.1 і на рис. 3.3.

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані.

Показники	Результати вимірювань за 2022 р.			
	07.03	28.03	19.04	09.05
Висота рослини, мм	74	394	647	739
Діаметр рослини, мм	6,3	6,9	8,4	8,6
Біомаса, г	9,80	55,97	92,69	106,00
Енергоємність, кВт·год/г	108,86	19,44	11,71	10,27

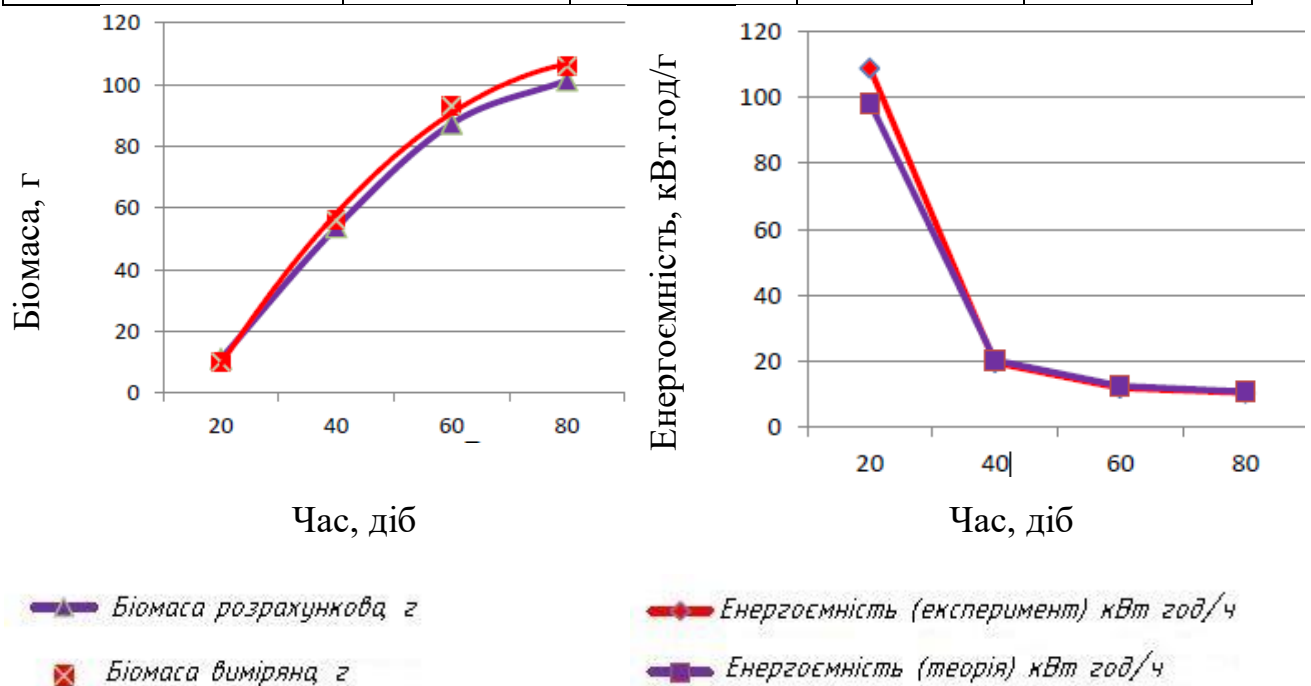


Рис. 3.3. Результати теоретичних та експериментальних досліджень з визначення біомаси та енергоємності процесу опромінення

Теоретичні та експериментальні дослідження значень біомаси рослин засвідчили їхній збіг у межах 5% похибки, що дає змогу зробити висновок про достовірність результатів, одержуваних за допомогою математичної моделі.

Далі було проведено багатофакторний експеримент із дослідження взаємозв'язку енергоємності процесу опромінення з енергетичними та спектральними характеристиками СДС, а також визначенням параметрів регулювання для алгоритму керування спектральним складом. Установка для проведення експериментів представлена на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Експериментальна аеропонна установка для багатофакторного експерименту

У таблиці 3.2 наведено значення рівнів та інтервалів варіювання факторів.

Таблиця 3.2 – Значення рівнів та інтервалів варіювання.

Найменування та позначення факторів	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	-1	0	1	
Інтенсивність червоного спектра, %	40	60	80	20
Інтенсивність синього спектра, %	40	60	80	20

Для скорочення перебору варіантів, підвищення ефективності досліджень, а також для зменшення витрат часу і коштів на експеримент використано матрицю планування, представлену в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Матриця планування в кодованих одиницях.

№ Досліду	X1	X2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1	0
6	+1	0
7	0	-1
8	0	+1
9	0	0

В експерименті керованим фактором X_1 була інтенсивність червоної області спектра, фактором X_2 - інтенсивність у синій області. За відгук було прийнято диференціальну енергоємність. Для спрощення подальших розрахунків коефіцієнтів рівняння регресії, проводили кодування факторів.

Для отримання рівняння регресії, що відображає взаємозв'язок відгуку від керованих чинників, застосовували програму "STATISTICA". У результаті обробки експериментальних даних на ПК отримано таке рівняння:

$$y=30,99-0,6167X_1+1,1967X_2+1,29X_1^2+0,055X_1X_2+1,75X_2^2 \quad (3.1)$$

Експериментальні дані подано в таблиці 3.4. Результати розрахунків коефіцієнтів регресії представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.4 – Отримані експериментальні дані.

№ експеримент	Рівень фактора				Значення відгуку
	Кодоване значення		Натуральне значення		
	X1	X2	Опроміненість у червоній ділянці спектра $E_{\text{чер.}}$, Вт/м ²	Опроміненість у синій ділянці спектра $E_{\text{син.}}$, Вт/м ²	Диференціальна енергоємність, Вт·год/г
1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	21,16	15,04	33,22
2	+1	-1	42,32	15,04	32,12
3	-1	+1	21,16	30,08	36,06
4	+1	+1	42,32	30,08	35,18
5	-1	0	21,16	22,56	32,91
6	+1	0	42,32	22,56	31,19
7	0	-1	31,74	15,04	31,87
8	0	+1	31,74	30,08	33,15
9	0	0	31,74	22,56	31,45
Контроль			20,3	2,71	39,52

Таблиця 3.5 – Результати аналізу рівняння регресії

	Regressn	Std.Err.	t(5)	p
b0	30,99000	0,416808	74,35085	0,000000
b1	-0,61667	0,230613	-2,67404	0,044134
b11	1,19667	0,230613	5,18908	0,003499
b2	1,29000	0,399433	3,22958	0,023217
b22	1,75000	0,399433	4,38121	0,007146

У таблиці 3.5 назви стовпців позначають таке: Regressn - коефіцієнт регресії; Std. Err. - величина стандартної помилки; t(5) - критерій Стьюдента; p - імовірність нульової гіпотези (рівень значущості).

Імовірність нульової гіпотези $p < 0,05$, що дає змогу її відкинути і свідчить про достовірність результату. Залишки регресійного рівняння нормально розподілені, помилка за рівнянням становить менше 5% середнього значення. Таким чином, отримане рівняння адекватно описує результати експерименту за 5%-го рівня значущості. Поверхня відгуку, побудована за рівнянням регресії, представлена на рис. 3.5.

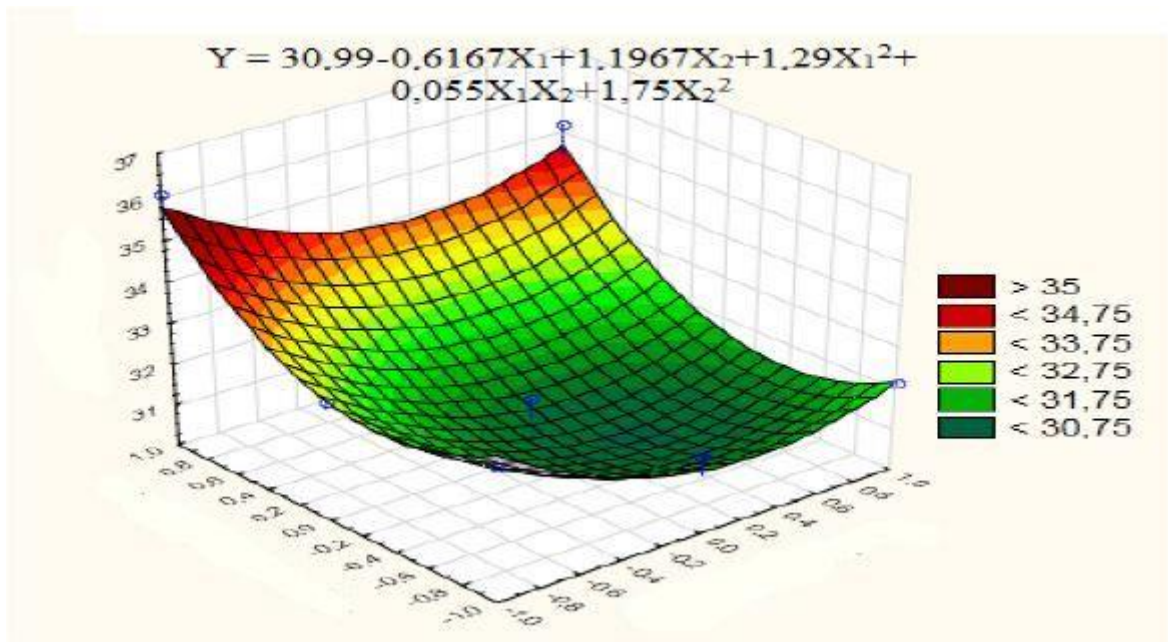


Рис. 3.5. Графік поверхні відгуку диференціальної енергоємності

На рис. 3.6 представлено фронтальні проєкції графіка відгуку диференціальної енергоємності за різних значень керованих факторів.

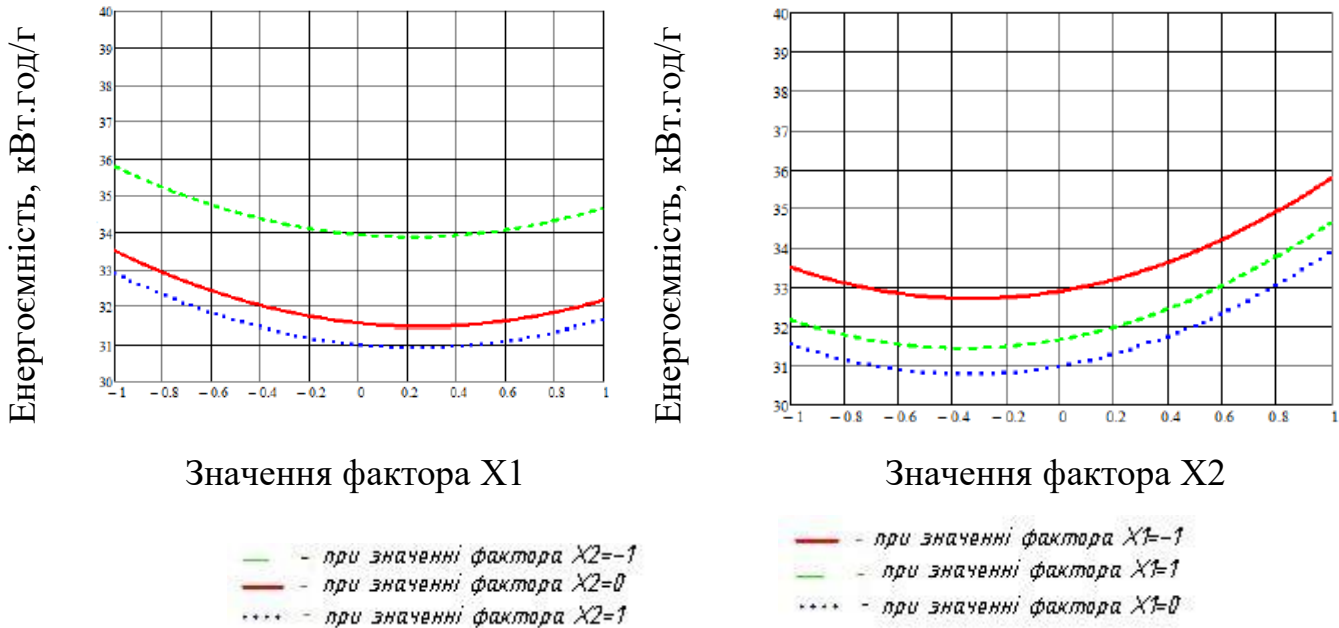


Рис. 3.6. Фронтальні проєкції графіка відгуку енергоємності за різних значень керованих факторів.

Значення факторів, за яких відгук мінімальний, у кодованому вигляді знаходили з використанням ПЗ MathCad. Точці мінімуму (мінімальне значення функції відгуку) відповідають значення факторів $X1 = 0,246$; $X2 = -0,346$. Значення відгуку в точці оптимуму $y(0,246; -0,346) = 30,707$ Вт·год/г.

У результаті опрацювання в ПЗ "MS Excel" отримали такі значення факторів у натуральному вигляді:

- інтенсивність червоної області спектра $X1 = 64,91$ %;
- інтенсивність синьої області спектра $X2 = 53,07$ %.

За таких значень чинників, енергоємність дорівнює $y = 30,707$ Вт·год/г, що на 28,7 % менше ніж середнє значення відгуку в контрольній посадці.

Для визначення параметрів регулювання, необхідних під час керування спектральним складом, було отримано рівняння регресії за відгуками довжини та діаметра стебла рослини. Рівняння регресії для приросту довжини стебла має вигляд:

$$L=3,6222+0,1667X_1-0,1X_2+0,1667X_1^2-0,075X_1X_2+0,3667X_2^2. \quad (2.2)$$

Графік відгуку приросту довжини стебла представлений на рис. 3.7.

$$L(X_1, X_2) = 3,6222 + 0,1667X_1 - 0,1X_2 + 0,1667X_1^2 - 0,075X_1X_2 + 0,3667X_2^2$$

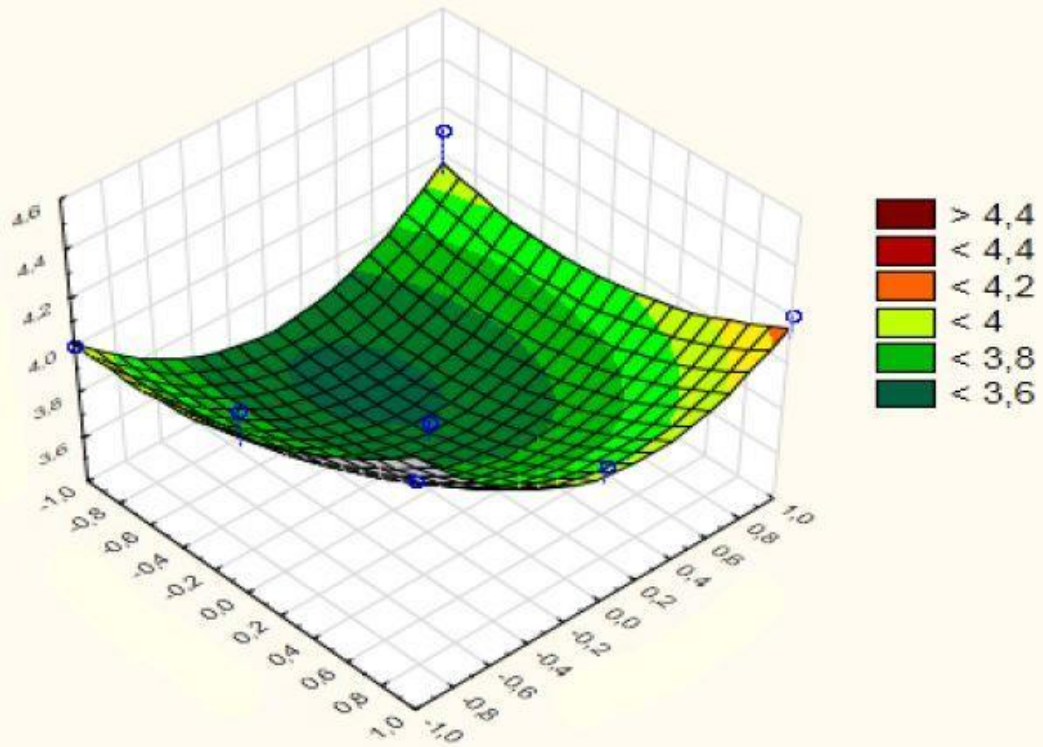


Рис. 3.7. Графік відгуку приросту довжини стебла

Рівняння регресії для діаметра стебла має вигляд:

$$d = 0,6089 - 0,0067X_1 - 0,0033X_2 - 0,023X_1^2 + 0,005X_1X_2 - 0,043X_2^2. \quad (2.3)$$

На рис. 3.8 представлено графік відгуку діаметра стебла.

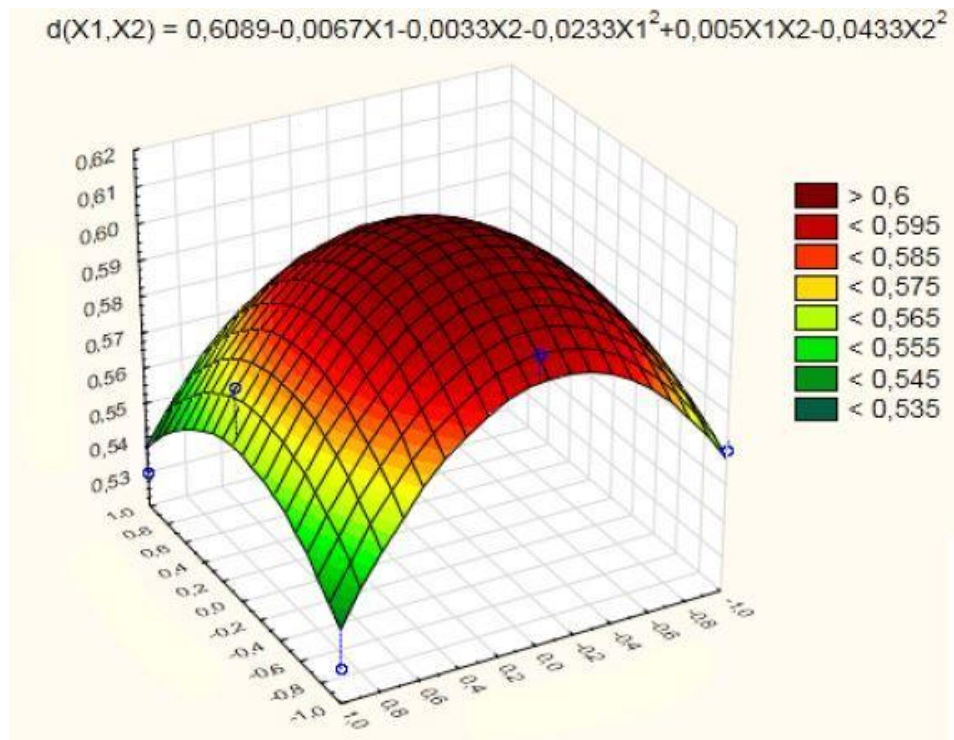
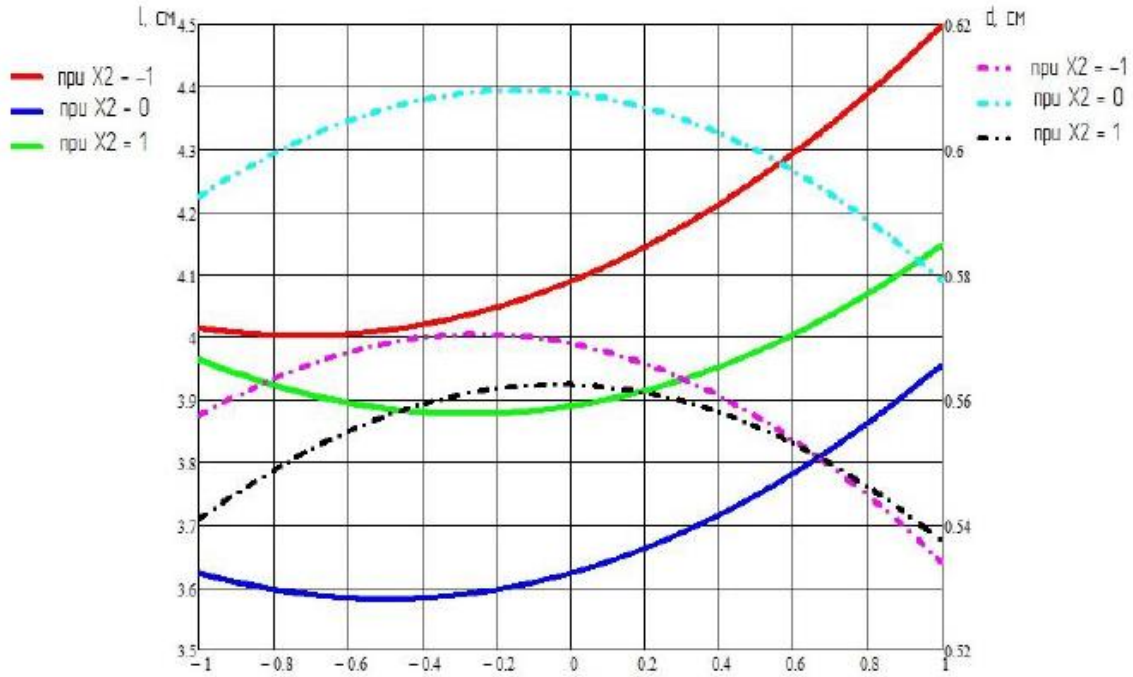


Рис. 3.8. Графік відгуку діаметра стебла

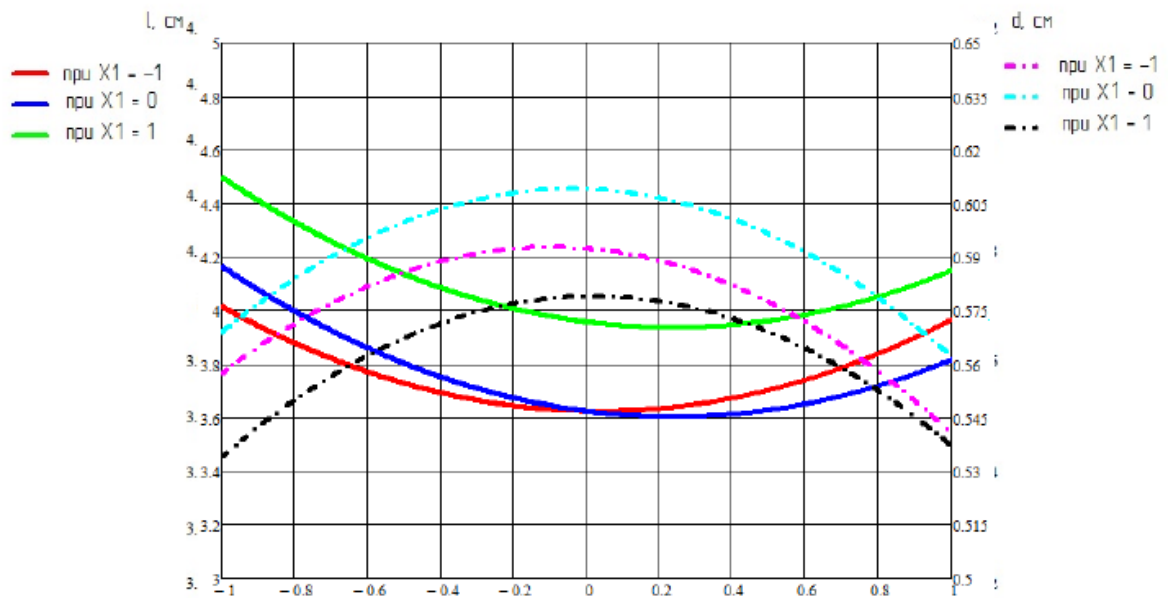
Фронтальні проєкції відгуків приростів приросту довжини та діаметра стебла представлені на рис. 3.9.

а)



Значення фактору X_1 в закованому вигляді

б)



Значення фактору X_2 в закованому вигляді

Рис. 3.9. Фронтальні проєкції відгуків приросту довжини та діаметра стебла

На рис. 3.10 представлено залежність приросту довжини стебла від спектрального складу і потужності випромінювання СДС.

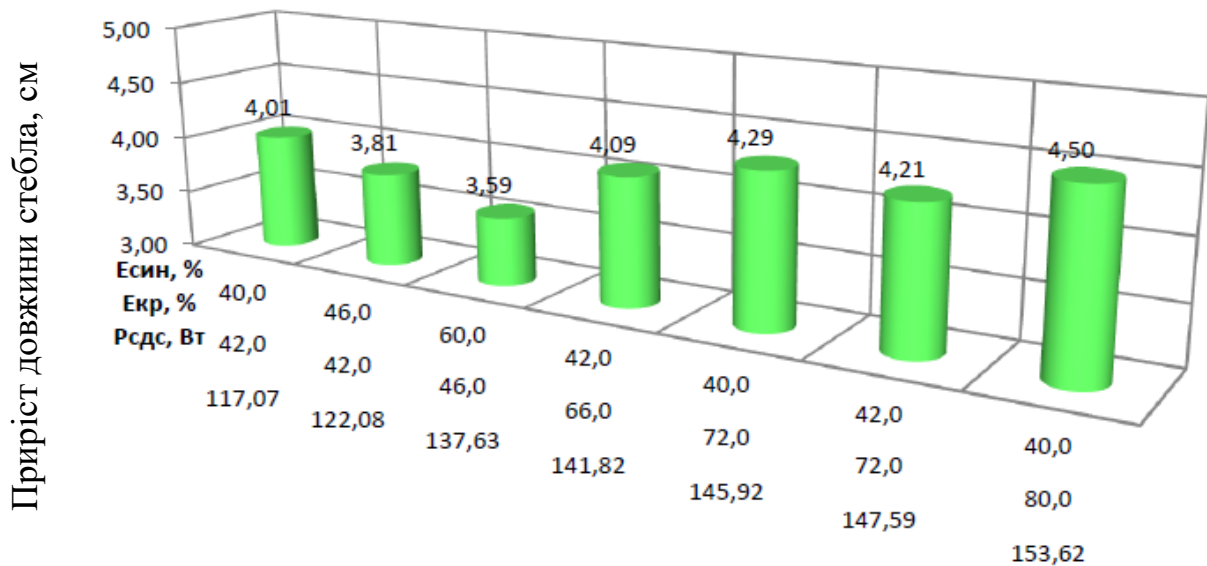


Рис. 3.10. Графік залежності приросту довжини стебла від спектрального складу та потужності випромінювання СДС

Фронтальна проекція графічних залежностей приросту довжини нових ділянок стебла та величини діаметру цих ділянок (рис. 3.9 а) залежно від зміни величини червоної складової спектра X_1 за фіксованих значень синього спектра $X_2 = [-1;0;+1]$, відповідно до плану експерименту (табл. 3.3), виявляє такі особливості. Криві довжини стебла мають мінімальні значення, які зміщуються з від'ємних параметрів осі X_1 до центру експерименту, що відповідає: для $X_2 = -1$ маємо $X_1 = -0,7$, для $X_2 = +1$ маємо $X_1 = -0,3$, для $X_2 = 0$ маємо $X_1 = -0,5$. Що цікаво, максимальна довжина приросту помічена для пари $X_2 = -1$ і $X_1 = +1$, тобто що менше синього спектра, то більше витягується рослина. Звідси можна зробити висновок про те, що червоний спектр сприяє прискоренню росту, а синій має пригнічувати здатність до витягування, однак, мінімальної довжини досягнуто при зовсім іншій парі $X_2 = +1$ і $X_1 = var$, крива ж $X_2 = +1$ і $X_1 = var$ розташовується між характеристиками. Робимо припущення, що синій спектр у досвічуванні потрібен і він має бути більшим за центральну точку експерименту $X_2 = 0$, що відповідає 60%, і меншим за максимальну точку

експерименту $X_2 = +1$, що відповідає 80%, тобто це золота середина графічної інтерпретації за довжиною стебла.

Щодо графічних залежностей розвитку діаметра приросту стебла, то криві мають максимальні точки екстремумів, причому максимальний діаметр досягається за $X_2 = 0$ та $X_1 = -0,18$. У середині розташовується крива з максимумом $X_2 = -1$, $X_1 = -0,3$. І нарешті, крива залежності діаметра від червоного спектра з найменшими значеннями максимуму відповідає парі $X_2 = +1$, $X_1 = -0,1$. Оптимуми другого сімейства кривих також укладаються в негативній частині експерименту за віссю X_1 і далі зі збільшенням X_1 діаметри за довжиною стають дедалі меншими та меншими, а отже, збільшення червоного спектра стоншує стебло. Звідси випливає, що якщо слідувати золотій середині, то необхідно обирати пару із середнього графіка сімейства кривих, тобто пару $X_2 = -1$ і $X_1 = \text{var}$, у підсумку отримуємо конфліктну ситуацію, з одного боку, для довжини стебла маємо $X_2 = +1$, $X_1 = \text{var}$, з іншого боку, для діаметра $X_2 = -1$ і $X_1 = \text{var}$. Не можна скористатися методом прямого компромісу, тобто не можна вибрати на осі $X_2 = [-1, 0, +1]$ точку $X_2 = 0$, відповідну центру експерименту, тому що за цього значення X_2 маємо максимальний діаметр і мінімальну довжину стебла, а це погана геометрія стебла, не оптимальна кількість закладених бульб насінневої картоплі.

Розглянемо ще одне сімейство характеристик фронтальних проекцій приросту довжини стебла та величини діаметра (рис. 3.9 б) залежно від зміни вже кількості синьої складової спектра X_2 за фіксованих значень червоного $X_1 = [-1, 0, +1]$ відповідно до плану експерименту (Таблиця 3.3). І тут, як і на рисунку 3.9 а, сімейство кривих приросту довжини має вигляд увігнутих парабол з мінімальними точками, причому мінімум характеристик змістився в позитивний бік осі експерименту X_2 . І в цьому сімействі кривих спостерігається максимальна довжина приросту в парі значень факторів $X_1 = +1$, $X_2 = -1$. А дві інші характеристики практично збігаються, мають спільну точку в перетині при синьому спектрі $X_2 = 0$ (центр експерименту). Що

стосується сімейства характеристик для діаметра стебла, то вигнуті криві мають максимуми за $X_1 = 0$, $X_2 = -0,08$ (верхня характеристика), за $X_1 = -1$, $X_2 = -0,1$ (середня характеристика) та за $X_1 = +1$ і $X_2 = 0$ (нижня характеристика). І в цьому випадку розподіл кривих не має регуляторного характеру. Це означає, що і в цьому випадку не можна скористатися простим визначенням середніх складових, тому метод прямого компромісу також не застосовується. Якщо взяти пару $X_1 = -1$, $X_2 = \text{var}$, що відповідає середньому графіку сімейства кривих, то за $X_1 = -1$ буде мінімальний приріст довжини, а це є порушенням правильної геометрії стебла. То яку ж пару чинників слід обирати для оптимізації геометрії стебла?

З використанням отриманих рівнянь регресії за відгуками приросту довжини та діаметру стебла, у ПЗ Mathcad розраховано значення відгуків для безлічі різних сполучень керованих чинників X_1 (інтенсивність червоного випромінювання) і X_2 (інтенсивність синього випромінювання). Отримані результати можна використовувати як параметри регулювання для алгоритму керування спектральним складом СДС у процесі росту рослин.

Для оцінки енергетичної ефективності регулювання спектрального складу СДС проведено експеримент з використанням отриманих даних. Суть експерименту полягає у визначенні спектрального складу СДС, необхідного для забезпечення та підтримання заданих (оптимальних) значень параметрів росту рослин і врожайності, з подальшим розрахунком диференціальної та інтегральної енергоємності. Як задані (оптимальні) параметри рослин прийнято дані, отримані під час опромінення рослин світильником на базі НЛВТ потужністю 400 Вт, за якого досягався найвищий урожай. Отриманий графік зростання при регулюванні спектрального складу зображено на малюнку 3.11.

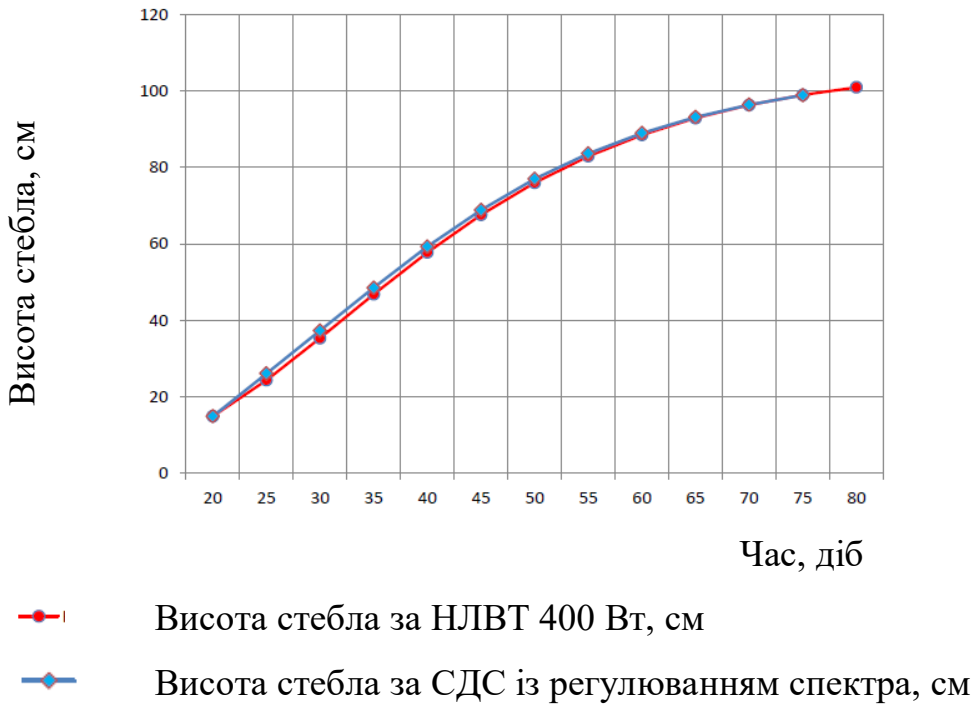


Рис. 3.11. Графіки росту рослин під час опромінення світильником з НЛВТ 400 Вт і СДС 162 Вт із регулюванням спектрального складу

З рис. 3.11 видно, що графіки практично збіглися, це свідчить про досягнення заданих параметрів за допомогою СДС під час регулювання спектрального складу випромінювання.

На рис. 3.12 представлено графіки інтенсивності випромінювання за спектрами, які було прийнято для досягнення заданих параметрів росту.

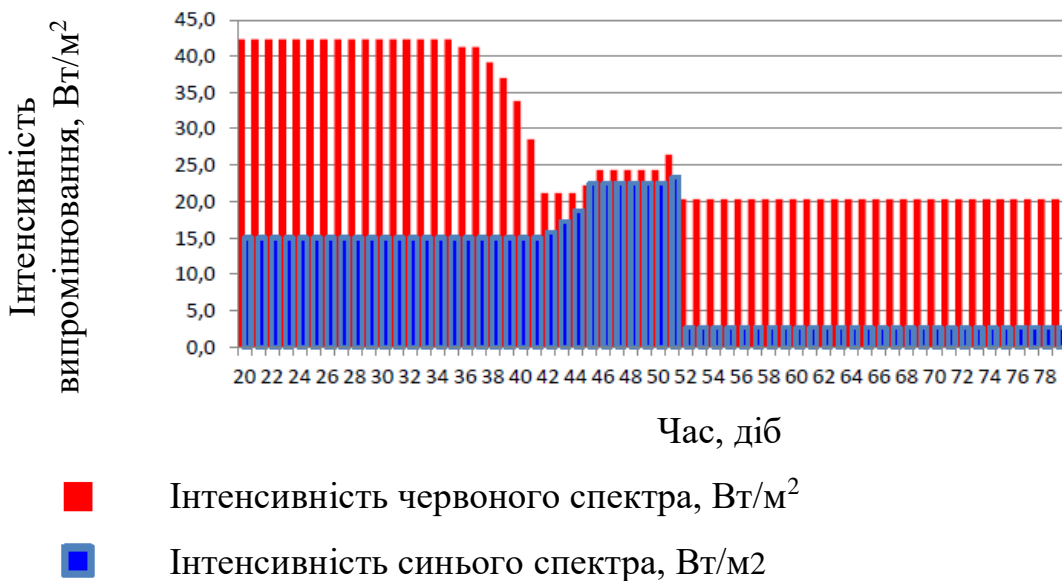


Рис. 3.12. Графіки розподілу інтенсивності випромінювання під час регулювання спектрального складу випромінювання СДС

Аналіз розподілу інтенсивності випромінювання за спектрами показує, що за час вирощування рослин картоплі з моменту висаджування посадкового матеріалу в аеропонну установку до отримання врожаю потрібне регулювання спектрального складу випромінювання СДС з метою забезпечення енергозбереження. При цьому весь період вирощування можна розділити на три етапи. На першому етапі очікується інтенсивний ріст рослин, що характеризується швидким витягуванням стебла, спектральний склад необхідно підтримувати незмінним і оптимальним, з точки зору зниження енергоємності. При цьому інтенсивність випромінювання в червоній ділянці спектра рекомендується приймати рівною 42 Вт/м^2 , а в синій ділянці - 15 Вт/м^2 . Цей період триває з 20 по 35 добу.

Другий етап вирощування настає на 36-ту добу, коли параметр диференціальної енергоємності, введеної в другому розділі, набуває мінімального значення. При цьому на даному етапі, тривалістю до 52 діб, спостерігається зростання показника диференціальної енергоємності, оскільки швидкість росту рослин сповільнюється за тієї ж інтенсивності опромінення. Для стабілізації диференціальної енергоємності на колишньому рівні пропонується змінювати інтенсивність випромінювання червоного і синього спектрів, використовуючи критерій мінімуму споживаної потужності випромінюваних спектрів.

Третій етап настає, коли спостерігається мінімум інтегральної енергоємності (53 доба), як показано на рис. 3.12. На цьому етапі спостерігається стійке зростання енергоємності, оскільки відбувається перехід на генеративну фазу, а ріст рослин сильно сповільнюється. При цьому рекомендується підтримувати інтенсивність в обох досліджуваних спектрах червоного - 20 Вт/м^2 і синього - 3 Вт/м^2 .

На рис. 3.13 наведено залежності зміни диференціальної та інтегральної енергоємності СДС із регулюванням спектрального складу випромінювання

для порівняльної оцінки з опромінювачем на базі НЛВТ з нерегульованим спектром.

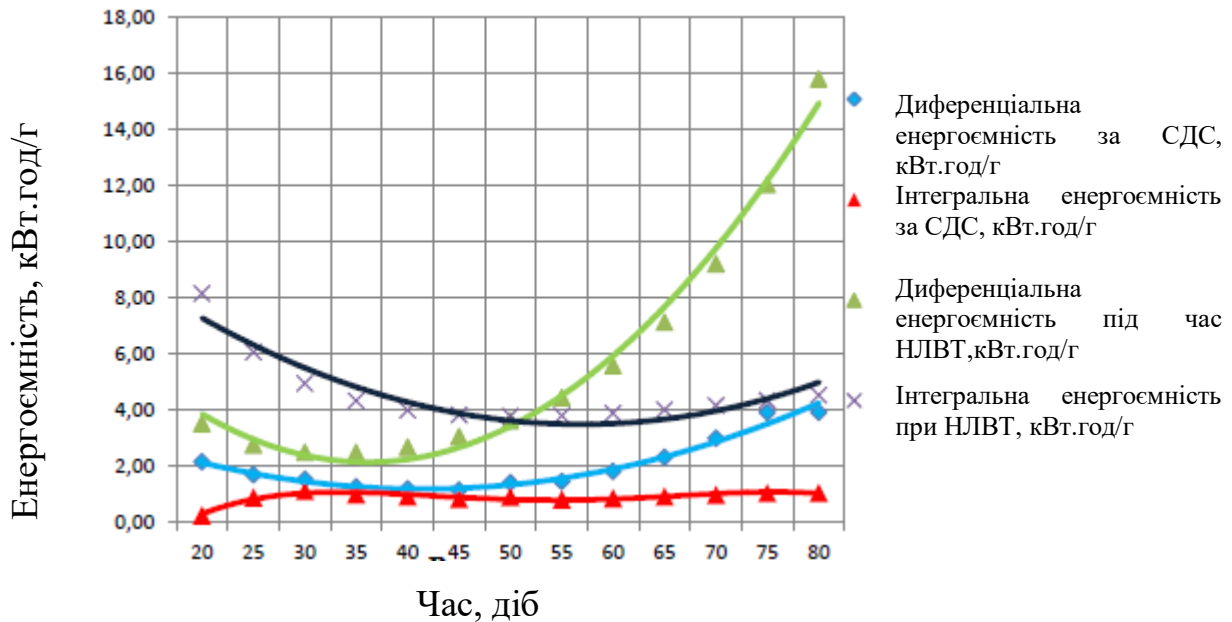


Рис. 3.13. Графіки диференціальної та інтегральної енергоємності під час НЛВТ і СДС із регулюванням спектрального складу випромінювання

На рис. 3.14 представлено графіки споживаної енергії світильника з НЛВТ потужністю 400 Вт і СДС 162 Вт з регульованим спектром, отримані за період вегетації рослин.

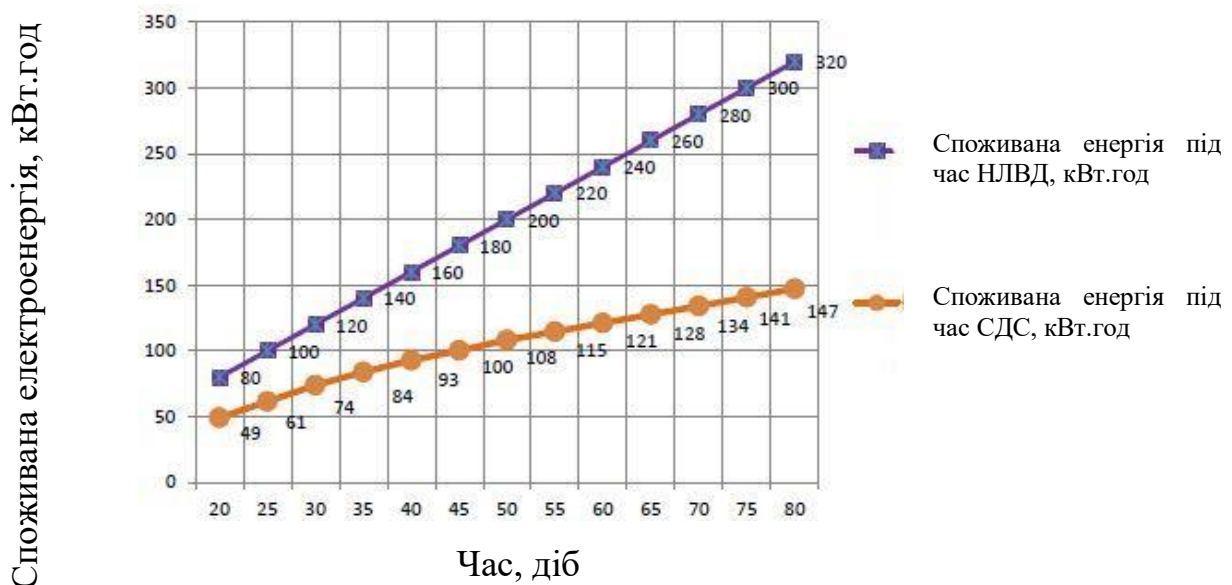


Рис. 3.14. Графіки споживаної електроенергії за вегетаційний цикл за НЛВТ і СДС із регульованим спектром

Аналіз наведених залежностей показує, що диференціальна та інтегральна енергоємність для СДС знижується завдяки регулюванню спектрального складу випромінювання та інтенсивності. З графіків видно, що зниження диференціальної енергоємності за СДС відбувається до 3-х разів порівняно з НЛВТ, а інтегральна енергоємність також знижується приблизно в 4-6 разів. При цьому споживана електроенергія знижується більш ніж у 2 рази.

Висновки по розділу

Визначено спектральні характеристики СДС 162Вт і світильника з лампою НЛВД 400Вт, загальне ФАР опромінення світильників на висоті підвісу 2 м становить 109,93 Вт/м², 45,54 Вт/м² відповідно.

У період експлуатації відзначено стійку роботу світлодіодної опромінювальної установки, а опромінення рослин за оптимізаційним сценарієм забезпечило зниження енерговитрат на 21%.

ВИСНОВОК

Аналіз наявних джерел оптичного випромінювання показав, що застосування світильників на основі світлодіодів дає змогу підвищити енергоефективність процесу опромінення на 30-40%, водночас можливість регулювання спектрального складу світлодіодного світильника відкриває нові шляхи вирішення щодо подальшого підвищення енергоефективності.

Розроблений спосіб управління ростом рослин дає змогу підібрати найсприятливіший спектральний склад випромінювання для рослин та енергозберігаючий режим опромінення. Так збільшення вагового коефіцієнта σ спектрального складу на 0,1 одиницю дасть змогу знизити енергоємність до 26,3%.

За рахунок регулювання спектрального складу створеного світлодіодний світильник загальною потужністю 162 Вт, що включає 72 червоних (630...660нм), 36 синіх (440...460нм), 48 білих (2700 °К) і 6 ультрафіолетових (380...400нм) світлодіодів, під час опромінення насінневої картоплі відбувається зниження диференціальної енергоємності на приріст біомаси у 3 рази, а інтегральна енергоємність знижується в 4 рази за однакової з контрольною посадкою загальної біомаси рослин. При цьому споживана електроенергія знижується більш ніж у 2 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білоконь Т. М. Економічні аспекти впровадження енергозберігаючих технологій на підприємствах закритого ґрунту / Т. М. Білоконь // Збірник наукових праць ВНАУ. 2012. №1 (56). Т 2. С.146–151.
2. Бражевська Г. М. Економіко-енергетична оцінка виробничих процесів у рослинництві. *Економіка АПК*. 2011. №1. С. 65–70.
3. Варава Л. М. Обґрунтування оцінки впливу організаційно-технічного рівня виробництва на величину питомих енерговитрат. *Вісник КТУ*. 2010. Вип. 26. С. 316–319.
4. Вітвіцький В. В. Методологічні аспекти енергетичного аналізу механізованих процесів у рослинництві. *Продуктивність агропромислового виробництва*. 2008. № 11. С.73–79.
5. Віхрова Л. Г. Математичне і комп'ютерне моделювання розподілу температур в теплиці для створення системи управління. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. №24(II). С.174–180.
6. Гіль Л. С. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Ч.1. Закритий ґрунт: навч. посіб. Вінниця: Нова книга, 2008 368 с.
7. Гнідий М. В. Методологія визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на різних рівнях управління економікою. *Проблеми загальної енергетики*. 2007. №15. С. 17–21.
8. Грабак Н. Х. Проблема енергозаощадження в АПК України та шляхи її розв'язання. *Наукові праці: наук.-метод. журн., Чорномор. держ. ун-т ім. Петра Могили*. 2011. Вип. 138. Т. 150. С. 83–89.
9. Гришко В. В. Енергозбереження в сільському господарстві (економіка, організація, управління. Полтава, 1996. 280 с.
10. Джеджула В. В. Оцінка ефективності впровадження організаційно-економічного механізму забезпечення енергозбереження

машинобудівного підприємства. Наука й економіка. 2013. № 4 (32). Т. 1. – С. 188–195.

11. Запухляк І. Б. Оцінка ефективності функціонування механізму енергозбереження підприємства. Теоретичні та прикладні питання економіки. 2011. Вип. 25. С. 179–184.

12. Зеркалов Д. В. Енергозбереження в Україні: моногр. Київ : Основа, 2012. 582 с.

13. Іваненко В. Ф. Особливості формування енерговитрат на виробництво продукції овочівництва закритого ґрунту. *Наук. вісн. ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького*. 2011. Т. 13 №2 (48). Ч. 3. С. 71–78.

14. Іваненко В. Ф. Ефективність впровадження енергозберігаючих технологій в овочівництві закритого ґрунту. Продуктивність агропромислового виробництва. 2011. №18. С. 101–107.

15. Кепко О. І. Енергозберігаючі режими роботи замкнутої системи опалення та вентиляції теплиць: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». Київ 2005. 23 с.

16. Корчагіна І. Досконалість новітніх голландських технологій. *Агроексперт*. 2013. №1(54). С.118–119.

17. Левкіна Р. В. Підвищення ефективності енерговикористання в овочівництві : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: спец. 08.07.02. – «Економіка сільського господарства і АПК» / Р. В. Левкіна – Харків 2003. 21 с.