



Вінницький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних систем та автоматики
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки

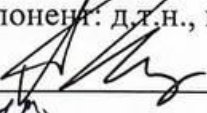
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Оптико-електронний метод та засіб для контролю
вмісту хлорофілу рослин»


Виконав: студент 2-го курсу, групи ЛТО-20м
спеціальності 152 – метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
за освітньою програмою
«Лазерна техніка та оптоінформатика»
 Купренюк В.С.

Керівник: к.т.н., проф., каф.ЛОТ
 Лисенко Г.Л.
« 15 » 12 2021 р.

Опонент: д.т.н., проф. каф. МПА
 Кулаков П.І.
« 16 » 12 2021 р.

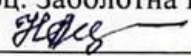
Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЛОТ

 д.т.н., проф. Заболотна Н. І.
« 11 » 12 2021 р.

Вінниця ВНТУ – 2021 рік

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет комп'ютерних систем і автоматики
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
Освітня програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЛОТ
д.т.н., доц. Заболотна Н.І.

«24» 09 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Купренюку В. С.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Оптико-електронний метод та засіб для контролю вмісту хлорофілу рослин
керівник роботи Лисенко Геннадій Леонідович, д.т.н, професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затвержені наказом ВНТУ від «24» 09 2021 року, № 277.

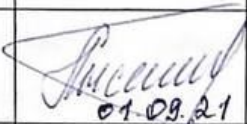
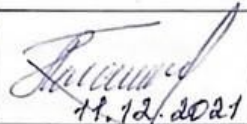
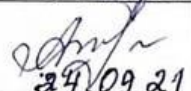
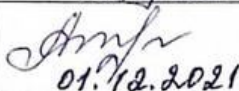
2. Строк подання студентом магістерської дипломної роботи: 10.12.2021

3. Вихідні дані до магістерської дипломної роботи:

1. Функціональне призначення пристрою: система для адаптивного керування потоками освітлення із застосуванням оптичних методів вимірювання флуоресценції для контролю вмісту хлорофілу рослин.
 2. Тип приладу - портативний;
 3. Довжина хвилі – спектральна лінія збудження флуоресценції хлорофілу;
 4. Спектральний діапазон чутливості – від 360 до 1000 нм;
 5. Форма представлення результатів вимірювання – символічно-графічна.
4. Зміст текстової частини: Вступ, аналіз актуальності розробки системи, математичні моделі адаптивного контролю освітленості з використанням обробки зображень та обрахунки площі листя рослини, аналіз можливих підходів до побудови засобу, розробка структурної схеми пристрою контролю; розробка схеми електричної функціональної пристрою вимірювання; розробка схеми оптичної функціональної, економічний розділ, висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Загальна структурна схема оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу. 2. Електрична функціональна схема оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу. 3. Схема ходу променів через об'єктив та коліматор. 4. Оптична функціональна схема оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу. 5 Система

адаптивного керування освітленням. Функціональна схема 6. Алгоритм сегментації листя рослин для обрахунку його площі. Блок схема

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Лисенко Г.Л., д.т.н., проф. каф. ЛОТ	 01.09.21	 11.12.2021
Економічна частина	Адлер О.О., к.т.н., доц.	 29.09.21	 01.12.2021

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2021 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Формування та затвердження ТЗ	14.09.2021	викон.
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	09.10.2021	викон.
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль МКР	09.11.2021	викон.
4	Виконання «Економічної частини»	01.12.2021	викон.
5	Попередній захист МКР	07.12.2021	викон.
6	Нормконтроль МКР	11.12.2021	викон.
7	Рецензування МКР	11.12.2021	викон.
8	Захист МКР	20.12.2021	викон.

Студент

Керівник роботи


(підпис)

(підпис)

Купренюк В. С.

Лисенко Г.Л.

АНОТАЦІЯ

УДК 53.08, 535.16

Купренюк В. С. Оптико-електронний метод та засіб для контролю вмісту хлорофілу рослин. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, освітня програма – лазерна техніка та оптоінформатика. Вінниця: ВНТУ, 2021. 108 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 46 назв; рис.: 11; табл. 8.

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено проектування оптико-електронний пристрою для контролю вмісту хлорофілу рослин. Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробці нового підходу до інформаційних систем контролю вмісту хлорофілу рослин, де за рахунок введення пристрою зворотнього зв'язку покращується загальнодобова освітленість рослин на протязі року. Розроблено електричні та оптичні схеми засобу. Проведено розрахунок і проектування оптичних елементів засобу.

Графічна частина складається з 6 плакатів із результатами дослідження.

Ключові слова: вимірювальний контроль, хлорофіл, метод вимірювання флуорисценції, оптичні пристрої.

ABSTRACT

Kuprenyuk VS Optoelectronic method and means for control of chlorophyll content of plants. Master's thesis in the specialty 152 - metrology and information-measuring technology, educational program - laser technology and opto-informatics. Vinnytsia: VNTU, 2021. 108 p.

In Ukrainian language. Bibliogr .: 46 titles; fig .: 11; table 8.

An optoelectronic device was designed in the master's qualification work. to control the chlorophyll content of plants. The master's thesis is devoted to the development of a new approach to information systems for the control of chlorophyll content of plants, where the introduction of a feedback device improves the total daily illumination of plants throughout the year. Electrical and optical circuits of the tool have been developed. The calculation and design of optical elements of the tool.

The graphic part consists of 6 posters with the results of the study.

Key words: measuring control, chlorophyll, fluorescence measurement method, optical devices.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ	16
1.1 Вплив поглинання оптичного випромінювання на розвиток рослин	16
1.2 Загальні біологічні концепції процесу фотосинтезу	18
1.3 Огляд систем контролю та вимірювання флуоресценції хлорофілу.....	25
1.4 Основні підходи для створення системи розподілених датчиків флуоресценції хлорофілу	26
2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ	30
2.1 Модель фотолюмінесценції хлорофілу	30
2.2 Порівняння відомих методів визначення флуоресценції	33
2.3 Розробка моделі для розрахунку площі поверхні листя	35
2.4 Можливі підходів до побудови засобу для контролю вмісту хлорофілу	40
3 РОЗРОБЛЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЗАСОБУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ	47
3.1 Вибір та обґрунтування аналогів	47
3.2 Розробка структурної схеми системи	53
4 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ	56
4.1 Вибір елементної бази	56
4.2 Розробка схеми електричної функціональної	68
4.3 Алгоритм управління із зворотним зв'язком	73
4.4 Моніторинг на основі оптичних методів контролю стану рослин.....	77
5 РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ	79
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	89
6.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи	89
6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	91

6.3 Відрахування на соціальні заходи.....	93
6.4 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	95
6.5 Амортизація обладнання	97
6.6 Витрати на електроенергію для науково-виробничих цілей	98
6.7 Інші витрати	98
6.8 Витрати на проведення науково-дослідної роботи	99
6.9 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором	100
ВИСНОВКИ.....	105
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	107
Додаток А(обов’язковий)_Загальна структурна схема оптико- електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу	111
Додаток Б(обов’язковий)_Електрична функціональна схема оптико- електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу	112
Додаток В_(обов’язковий)_Оптична функціональна схема оптико- електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу	113
Додаток Г_(обов’язковий)_Система адаптивного керування освітленням. Функціональна схема	114
Додаток Д_(обов’язковий) Алгоритм сегментації листя рослин для обрахунку його площі. Блок-схема алгоритму	115
Додаток Е_(обов’язковий) Схема ходу променів через об’єкти та коліматор.....	116

ВСТУП

Масовий моніторинг є складним завданням для традиційних методів і засобів флуорометрії. Через нездатність правильно визначати та враховувати забруднення навколишнього середовища виникають фактори, які сприяють значним економічним втратам та проблемам, пов'язаним зі здоров'ям. Крім шкідливого впливу на здоров'я людини, дослідження впливу забруднюючих речовин, в Україні, Європі, Азії та Сполучених Штатах продемонстрували, що пошкодження рослин викликає підвищену сприйнятливість до хвороб, зниження росту, і зниження врожайності сільськогосподарських культур і лісів. Отже, екологічні зміни призводять до щорічних втрат у десятки мільярдів доларів.

Підвищення якості та ефективності вирощування рослинної сільськогосподарської продукції при оптимальному використанні господарських та природних ресурсів вимагає постійного аналізу фізіологічного стану посівів сільськогосподарських культур. Достовірність та ефективність методів такого аналізу впливає на відповідність та оперативність проведення різноманітних заходів, спрямованих на збагачення поживними речовинами ґрунтів, боротьбу з хворобами, усунення негативних наслідків природних факторів та погодних умов.

Актуальність теми

Актуальність магістерської кваліфікаційної роботи полягає у необхідності створення засобів для швидкого і зручного контролю вмісту хлорофілу рослин для адаптивного керування параметрами освітленості рослин з метою підвищення енергоефективності та збільшення врожайності рослин.

Інформацію про погіршення умов, необхідних для нормального розвитку рослинних організмів, принципово важливо отримувати задовго до того, як результати такого погіршення проявляться у видимих ознаках, таких,

як зміна форми або затримка росту клітин, зменшення кількості клітинної популяції і загальної біомаси [1].

З цієї причини прототип датчика за своєю суттю були розроблені для бездротових сенсорних мереж (WSN). Це дозволяє швидко відрізнити стресову групу від контрольної групи, а також та задовго до того, як будь-які видимі пошкодження проявляються на листках.

Тому у теперішній час поряд з візуальними та хімічними набувають поширення інші методи, які дозволяють завчасно виявляти порушення у фізіологічному розвитку рослин. Перш за все, це оптичні методи, засновані на вибіркового поглинанні світла рослинами.

Широке застосування спектральних методів дослідження життєдіяльності рослин пов'язано з тим, що спектри поглинання листя несуть інформацію про структуру і біохімічні складові всередині рослинних тканин і можуть бути безпосередньо пов'язані з фізіологічними процесами рослин і, отже, з виробництвом біомаси, прогнозами врожаю і станом рослин. Оптичні параметри листя не тільки характеризують кількість поглиненої і переробленої рослиною енергії світла, а й корелюють з іншими біомолекулярні змінами [2].

Тобто можливо не тільки виявити стрес рослин за допомогою недорогих методів, але й робити це автоматично та в режимі реального часу, що дозволить раннє виявлення забруднення та дати достатньо часу для вирішення проблем, перш ніж вони стають незворотними і занадто дорогими.

Так, наприклад, фотометричні методи, які засновані на вимірюванні відбитого від рослин сонячного або штучно наведеного світла, у результаті чого визначається залежність вмісту зеленого пігменту хлорофілу або його флуоресценції від рівня забезпеченості рослин мінеральним живленням, зокрема азотним.

Мета і завдання магістерської роботи

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є розширення

функціональних можливостей систем контролю стану рослин за рахунок удосконалення існуючих методів вимірювання хлорофілу за оптичними характеристиками та введенням засобів зворотного зв'язку, що дозволить адаптивно змінювати параметри системи освітлення.

Поставлена мета досягається вирішенням таких задач:

1. Провести аналіз оптичних методів дослідження фізіологічного стану рослини.
2. Розробити підходи до побудови оптоелектронних засобів для оцінювання фізіологічного стану рослини.
3. Визначити структурну побудову оптоелектронного засобу для проведення діагностики рослин з покращеними функціональними можливостями.
4. Визначити оптимальні характеристики перетворювання світлової енергії та вибір основних методів моніторингу системи.
5. Розробити функціональну схему контролю вмісту хлорофілу рослин.
6. Виконати економічні розрахунки доцільності розробки.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання флуоресценції хлорофілу

Предмет дослідження - методи та засоби діагностики стану рослин, заснованих на контролі вмісту хлорофілу за його оптичними характеристиками.

Наукова новизна отриманих результатів.

Набув подальший розвиток метод люмінесцентного контролю стану рослин для отримання інформації про кінетику уповільненої флуоресценції хлорофілу, за рахунок визначення основних параметрів спектрального складу освітлення та їх впливу на процеси фотосинтезу у рослинах, що дозволяє оперативно контролювати процеси зростання та розвитку рослин.

Практичне значення магістерської роботи

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних положень розроблено технологія адаптивного керування освітленням рослин, що може збільшити ефективність їх вирощування.

Особистий внесок здобувача

Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. Проведено розробку схем, обраховані конструктивні параметри, проведено моделювання сегментації для уточненого обрахунку вмісту хлорофілу.

Публікації

За тематикою дослідження опубліковано тези на Науково-технічній конференції ВНТУ, факультет комп'ютерних систем і автоматики, березень 2021.

Обсяг та структура магістерської роботи

Магістерська робота містить вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг роботи – 112 сторінки, з яких основний зміст викладено на 70 сторінках друкованого тексту, містить 11 рисунків, 8 таблиць. Список використаних джерел містить 46 найменувань.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ

1.1 Вплив поглинання оптичного випромінювання на розвиток рослин

Для розвитку та плідного росту рослин однією з головних задач є створення прийнятних умов в будь-якому регіоні та в будь-який час року. Основними їх завданнями є: підвищення продуктивності і врожайності та зниження споживання електроенергії. Для вирішення таких проблем необхідно впроваджувати нові технології виробництва сільськогосподарської продукції. Таким чином, засоби управління процесами фотосинтезу є одними з найефективніших способів впливу на ріст і врожайність рослин. Це можна реалізувати шляхом розробки та впровадження адаптивної системи освітлення на основі світлодіодних випромінювачів [5].

Для побудова такої системи необхідно оптимізувати якість випромінювання для рослини в різні періоди розвитку. При чому необхідно врахувати динаміку падаючої сонячної радіації. Недостатню кількість сонячної радіації необхідно компенсувати штучним світлодіодним освітленням. Це дасть можливість освітлювати рослини тільки в тій кількості, яка необхідна рослині саме в даний момент. Така система буде не тільки енергоефективною, але й дозволить визначити необхідні параметри освітлення. Опромінення рослини необхідною кількістю світла забезпечує найвищу продуктивність при вирощуванні різних культур у теплицях.

Забруднення серйозно впливає на всі живі організми, а також на економіку, яка прямо чи опосередковано залежить від природних ресурсів. Моніторинг навколишнього середовища на наявність стресів у рослинах, спричинених забруднювачами, необхідний для того, щоб передбачити та протидіяти несприятливим впливам до того, як вони виявляться у видимих пошкодженнях. Відмова від постійного моніторингу

рослин призводить до зниження росту врожаю, шкоди екосистемам, проблем, пов'язаних зі здоров'ям, і, зрештою, до економічних втрат.

Це особливо важливо для постраждалих територій, таких як поклади відходів, гірничодобувна діяльність і фабрики, а також у міських районах та навколо них, важливо визнати потенційні екологічні проблеми, які можуть виникнути в результаті діяльності людини. Серед наслідків можуть бути такі: кислотні дощі, забруднення важкими металами, поверхневий озон, зміни температури та посуху, що сприяють змінам у фізіології рослин, зокрема вмісту хлорофілу та ефективності фотосинтезу. Вимірювання за допомогою комерційних флуорометрів, таких як пристрої IAM (імпульсно-амплітудної модуляції), є важким завданням, оскільки вартість, складність і методи вимірювання роблять моніторинг у реальному часі складним [6].

Хоча такі пристрої це високоточні інструменти, вони здатні лише надавати «знімки» невеликих ділянок. Це ускладнює розуміння здоров'я рослин на великих площах і протягом тривалого періоду часу, що часто призводить до дій, що вживаються лише після значних змін рослин і продуктивності. Одним із рішень проблеми було б спрощення приладів для вимірювання та використання та їх використання у великій кількості. Вирішенням цієї проблеми є зменшення витрати, а також усунення потреби в участі людини в процесі вимірювання за рахунок використання системи недорогих датчиків флуоресценції хлорофілу, здатних контролювати велику кількість окремих рослин одночасно та бездротовим способом. Запропоновані датчики були забезпечують належну точність і здатність розрізняти рослини, що піддаються стресу, від рослин без стресу. В сенсорній системі ВФХ (вихід флуоресценції хлорофілу), не вистачає точності, але це компенсується безліччю потенційних одночасних вимірювань від низки датчиків у мережі.

Вартість, мала кількість датчиків та вимірювання не в реальному часі – це фактори, які сприяють труднощі для зрозуміння зміни факторів стресу у часі. Особливо в районах, які як відомо, схильні до забруднення від

промисловості або видобутку корисних копалин, важливо контролювати та розуміти регіональні та тимчасові коливання. Використання комерційних флуорометрів робить таку задачу складною, оскільки вони не можуть забезпечити моніторинг в режимі реального часу. Існують інші рішення, але вони менш поширені, експериментальні або передові, що робить їх більш вартісними [7].

1.2 Загальні біологічні концепції процесу фотосинтезу

Усі рослини використовують світло для виробництва енергії за допомогою фотосинтезу.

Життєдіяльність вищих рослинних організмів пов'язана з процесом фотосинтезу, який є ключовою ланкою складної системи метаболізму, що забезпечує у підсумку їх ріст і розвиток.



Рисунок 1.1 - Особливості анатомії, морфології та фізіології листка

У фотосинтезі відбувається перетворення енергії світла в енергію хімічних зв'язків продуктів фотосинтезу. Результати біофізичних досліджень фотосинтезу створюють наукову основу методів автоматичного керування ростом фотосинтезуючих організмів у фотобіотехнології і методів експрес діагностики стану рослинних організмів у рослинництві та екологічному моніторингу [4].

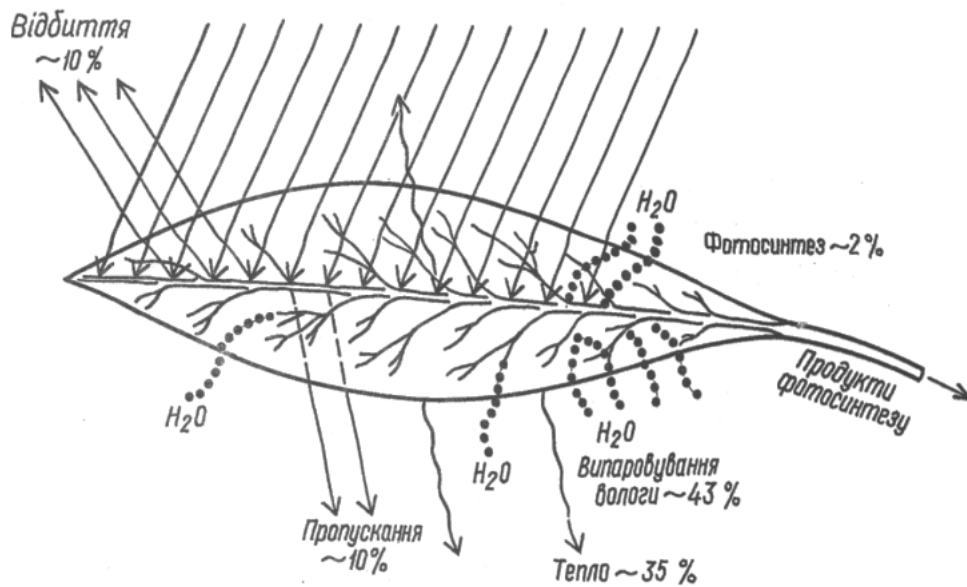


Рисунок 1.2 - Схема відбиття та поглинання падаючих променів на лист рослини

Світлова енергія вловлюється в пігментах хлорофілу в листках, де в фотохімічних реакціях використовуються електрони, попередньо підведені фотонами до збудженого стану. ФХ представляє невеликий відсоток загальної використаної або розсіяної енергії, але може бути дуже корисним для вимірювання фотосинтетичної активності рослини. Загальне рівняння фотосинтезу:



У той час як листя потребує сонячного світла для виробництва, надлишок світла може завдати шкоди організму, якого можна уникнути за рахунок розсіювання надлишкової енергії за допомогою кількох вимірюваних процесів. Серед них ми знаходимо флуоресценцію хлорофілу (ФХ), яка є повторним випромінюванням енергії у верхньому спектрі червоного світла, близько 690-735 нм [3-4].

Каутський і Хірч були першою командою, яка виявила феномен підвищення рівня ФХ у рослинах під час стресу. Команда використовувала світловий стрес, щоб помітити, що активність рослини можна кількісно оцінити *in vivo*, коли вона швидко переходить з темряви на світло.

До цього рослини вимірювали *in vitro*, використовуючи деструктивні засоби, наприклад хімічні, для виявлення проблем, таких як забруднення.

Відкриття 1931 року призвело до того, що називають ефектом Каутського, який ефективно описує основне співвідношення між вимірним квантовим виходом флуоресценції (тобто ефективністю перетворення світла в енергію) і швидкістю транспорту електронів. Використовуючи сучасне обладнання, можна виміряти цей квантовий вихід, збуджуючи листок штучним світлом і вимірюючи рівні ФХ [5]. Таке обладнання зазвичай вимірює (з використанням червоного або синього світла) верхню (адаксіальну) сторону листя, де пігменти хлорофілу знаходяться у високій концентрації. У роботі розв'язуються проблеми використовуючи декілька нових підходів. Особливий інтерес представляє здатність датчика не тільки вимірювати ФХ, а й розрізняти ФХ, що випромінюється нормально функціонуючими рослинами, і рослинами, які страждають від впливу забруднення.

Таким чином, однією із задач розробки був недорогий моніторинг забруднення навколишнього середовища, який може бути корисним у низці ситуацій. Існують більш традиційні рішення, такі як добре зарекомендували себе флуорометри РАМ (амплітудно-імпульсна модуляція). Це приклади

технологій, які використовуються для фільтрації фонового випромінювання від сигналу ФХ листа. Необхідно практичне рішення для цього, щоб уникнути необхідності конкурувати з фоновим випромінюванням, уникаючи потреби в точних інструментах і замість цього зосереджуючись на вимірюваннях в реальному часі. Крім того, існують новітні технології, подібні до запропонованого рішення. Бездротові сенсорні мережі (WSNs) для «інтелектуальних методів управління» використовують різні типи датчиків і вимірювальні методи, починаючи від рентгенівського випромінювання і закінчуючи тепловізійними. Це доводить важливість WSN в сучасних системах моніторингу.

1.2 Аналіз сучасних підходів до контролю фізіологічного стану рослин

Як було зазначено вище, порушення фізіологічного стану вищих рослинних організмів вже на початковому етапі задовго до видимих ознак викликає зміни у первинних стадіях фотосинтезу, що відображається змінами оптичних властивостей хлорофілу. Відповідно до цього ці зміни можуть бути виявлені оптичними методами. Так, наприклад, за коефіцієнтом пропускання або відбивання квазімонохроматичного пучка світла можна судити про концентрації хлорофілу, каротиноїдів і антоціанів у листах; спектральні характеристики плодів використовують для оцінювання стиглості та якості [8], [9].

Основними оптичними методами для дослідження стану рослинних організмів є спектральні (фотометричні) та люмінесцентні (флуорометричні) методи [11]. У фотометричних методах використовується вибіркоче поглинання світла хлорофілом. В залежності від використовуваної апаратури у фотометричному аналізі розрізняють [12] спектрофотометричний метод, заснований на аналізі поглинання монохроматичного світла, та

фотоколориметричний, в основі якого лежить аналіз поглинання поліхроматичного світла. Обидва методи засновані на пропорційній залежності між світлопоглинанням та концентрацією речовини, що поглинає світло.

За допомогою фотометричного методу визначається середня кількість хлорофілу, що приходить на одиницю площі зеленого листа. Класичний метод визначення цього параметра полягає в тому, що з листів рослини пустотілою трубочкою стандартного діаметра роблять "висічки" фіксованої площі, розтирають їх, готують спиртову витяжку хлорофілу, заливають її в кювети і спектрофотометричним методом визначають концентрацію хлорофілу в розчині. Отримане значення перераховують у поверхневу щільність з урахуванням відомої площі висічки [13]. Така методика є достатньо трудомісткою і вимагає значних витрат часу для оцінювання стану рослин на великій площі.

Іншим підходом є спосіб, при якому поверхнева щільність хлорофілу вимірюється за поглинанням світлового потоку у листі. Оскільки зменшення інтенсивності оптичного випромінювання при його проходженні через лист обумовлене не лише поглинанням хлорофілом, а й розсіюванням при відбиванні та поглинанням іншими компонентами тканини листа, вимірювання проводяться на двох довжинах хвиль. Одна довжина хвилі вибирається в червоній області спектру (640 нм), на якій хлорофіл має найбільше поглинання, інша – в ближній інфрачервоній області, де поглинання хлорофілу є слабим. Вимірюючи інтенсивність червоного та інфрачервоного світла, після проходження їх через лист, оцінюють поверхневу щільність хлорофілу [13].

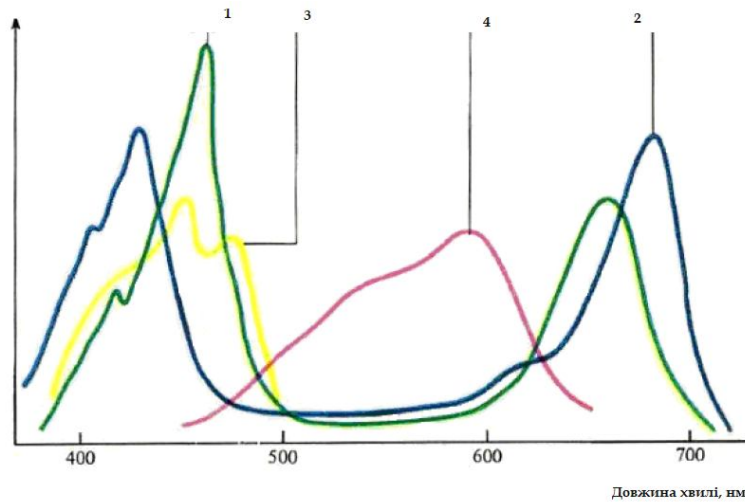


Рисунок 1.3 – Спектральні характеристики різних видів хлорофілу

Методи флуориметричного аналізу засновані на вимірюванні випромінювання, що виникає у результаті виділення енергії збудженими молекулами аналізованої речовини [12]. Можливість їх застосування для оцінювання стану рослини обумовлена тим [1, 13], що поглинання кванта світла переводить молекулу хлорофілу в електронний збуджений стан, енергія якого в розчині при відсутності фотосинтезу переходить або в тепло, або у флуоресценцію. У апараті фотосинтезу енергія електронного збудження хлорофілу використовується в основному на фотосинтез і лише в незначному ступені на флуоресценцію. Тому інтенсивність флуоресценції хлорофілу в клітині набагато нижче, ніж у розчині.

В нормальних умовах не більше 3% енергії електронного збудження хлорофілу переходить в енергію світла флуоресценції у вигляді так званої фонові флуоресценції F_0 [4], [9]. Мале значення фонові флуоресценції F_0 говорить про активне використання клітинами енергії поглиненого світла. Цей рівень флуоресценції відповідає умовам, коли усі реакційні центри фотосистеми перебувають у так званому "відкритому" робочому стані, при якому вони ненасичені. При насиченні реакційних центрів фотосистеми поглинена світлова енергія вже не використовується на фотосинтез і флуоресценція хлорофілу зростає, досягаючи максимального значення F_m .

Насичення реакційних центрів може відбуватися при збільшенні інтенсивності світлового потоку. Тому на інтенсивність спектральних ліній флуоресценції хлорофілу впливають не лише умови в яких перебуває рослина, а й інтенсивність та тривалість світлового потоку збудження. У зв'язку з цим для оцінювання фізіологічного стану рослини краще використовувати такий параметр, як відносний вихід змінної флуоресценції [14], що визначається відношенням $(F_m - F_0)/F_m$. Різниця енергій флуоресценції хлорофілу $F_v = F_m - F_0$ називається змінною флуоресценцією. Вона відповідає тій частині енергії світла, що використовується у фотосинтезі, тобто характеризує активність початкових стадій фотосинтезу. У відповідності до цього відносний вихід змінної флуоресценції найбільш точно характеризує ефективність первинних процесів фотосинтезу. Для спостереження фонові флуоресценції F_0 використовується світловий потік збудження малої інтенсивності, який спрямовують на рослину, адаптовану до темряви [14] - [16]. Насичення реакційних центрів фотосистеми досягають освітленням спалахом інтенсивного світла.

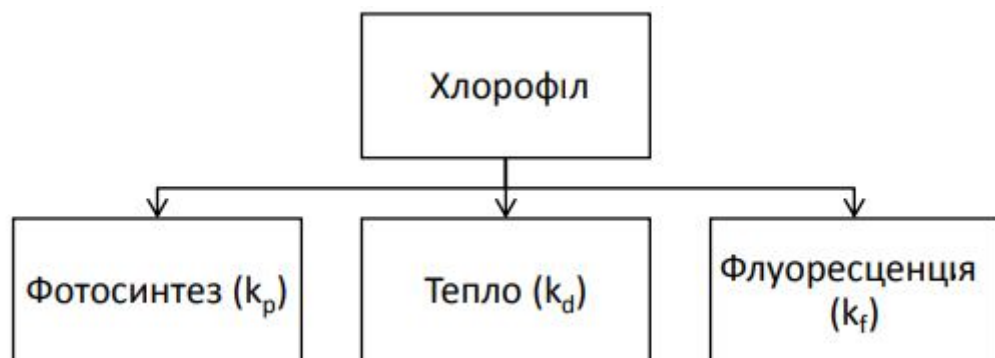


Рисунок 1.4 - Функціонування апарату фотосинтезу

Іншим джерелом інформації о характері функціонування апарату фотосинтезу (рис. 1.4) є процес уповільненої флуоресценції [6], [17]. Це явище полягає у тому, що після світлового збудження у клітинах, в яких відбувається фотосинтез, спостерігається слабе, довго згасаюче світіння, що

випромінюється хлорофілом. Це світіння виникає вже після припинення флуоресценції F_0 за рахунок енергії, що виділяється в ході темрявих реакцій первинних продуктів фотосинтезу. При дії руйнівних факторів на апарат фотосинтезу концентрація первинних продуктів фотосинтезу змінюється, що впливає на інтенсивність уповільненої флуоресценції.

1.3 Огляд систем контролю та вимірювання флуоресценції хлорофілу

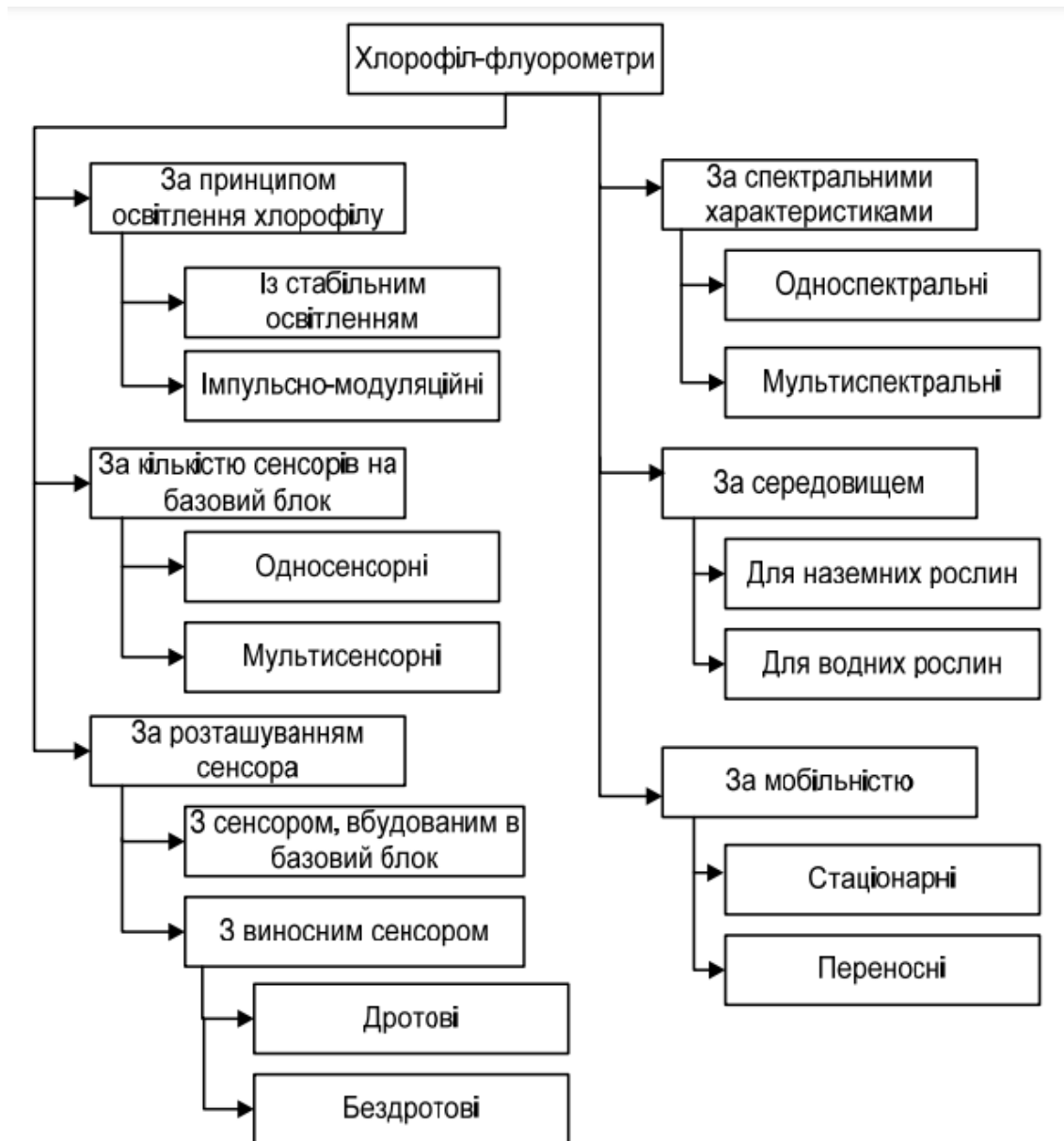
По суті, проблеми, пов'язані з використанням неспеціалізованих деталей, створили проблеми, які потрібно було вирішити та перевірити, використовуючи засоби, які не відповідали рекомендованим або традиційним методологіям. Однією з основних проблем вимірювання ФХ завжди будуть перешкоди від інших джерел світла. Оскільки ФХ, що випромінюється листом, значно нижчий за інтенсивністю, ніж, наприклад, сонячне світло, важливі методи фільтрації зовнішніх перешкод. Рішення, яке пропонується для вирішення проблем інтерференції, було вперше перевірено із використанням вимірювань абаксіального зчитування [5]. До цього використовували ряд інших методів, наприклад, розміщували світло збудження та датчик на різних сторонах листа. Датчик був здатний розпізнавати два різних стани рослини, які називаються адаптованим до темряви та адаптованим до світла станом, в якому рослина демонструє різний ступінь ФХ залежно від умов освітлення. Рослини, які страждають від світлового стресу, явно демонстрували більш високу флуоресценцію у своїй максимальній адаптованій до темряви (DA) флуоресценції (F_m') через знижену фотохімічну активність, що призвело до більшої частки енергії, що випромінюється у зворотному напрямку.

Розглянуто класифікацію хлорофіл-флуорометрів. Аналіз сучасних хлорофіл-флуорометри показує їх напрям розвитку в інтеграції їх у складні

системи. Такі системи містять сенсори вимірювання параметрів навколишнього середовища, а саме: температури, вологості, інтенсивності освітлення тощо. Сучасні системи хлорофіл-вимірювань можна класифікувати за такими ознаками як: кількість сенсорів, спектральні характеристики, тип освітлення хлорофілу, мобільність, розташування сенсорів та інші. Класифікація флуорометрів за переліченими ознаками наведена на рис. 1.4.

1.4 Основні підходи для створення системи розподілених датчиків флуоресценції хлорофілу

Концепція сенсорних систем, спрямована на перевірку когерентності та загальної можливості забезпечення простих і надійних вимірювань забезпечує повну бездротову автономність, використовуючи компоненти з дуже низьким енергоспоживанням, здатні працювати тижнями від акумулятора. Основним завданням такої системи є створення та перевірка повного сенсорного вузла, придатного для простого розгортання в польових умовах, укомплектованого програмним забезпеченням для керування даними для користувача [5]. Через складність така сенсорна система, по суті, розділена на дві частини: сам датчик і вузол обробки даних і бездротового Інтернету речей. Найкращим підходом є використання дуже легкого та маленького датчика, при цьому всі інші комунікаційні та силові модулі залишалися подалі від листа рослини.



Таким чином датчик вимірювання хлорофілу (ДВХ), прив'язаний до модуля IoT через послідовний зв'язок для стабільного з'єднання. Це також означає, що користувач може вільно вибрати власну комунікаційну платформу для використання з ДВХ. Ще одним важливим аспектом є впровадження вимірювань абаксіальної поверхні. Абаксіальна поверхня листя – це нижня частина листя, тобто сторона листя, звернена від сонячного світла (на відміну від адаксіальних поверхонь листя, звернених до сонця), і природно захищена від прямих сонячних променів. На додаток до послаблення цього випромінювання, абаксіальні зміни в ФХ, особливо в

більш товстих листках, будуть реагувати швидше на зміни ефективності фотосинтезу, ніж у абаксіальних поверхнях.

Оскільки такий датчик найкраще працює з більш товстим листям, можливість вимірювання біля продихів гарантує, що можливо більш уважно відстежувати здатність рослини засвоювати вуглець [16], що є прямою реакцією на неефективний фотосинтез і стрес. Оскільки основна увага зосереджена на здатності виявляти стрес до візуальних симптомів, безсумнівно, додаткова цінність має можливість вимірювати негайну реакцію рослин, а не чекати, поки вплив змін CO₂ досягне всіх частин листка.

Незважаючи на те, що ДВХ отримує нижчий сигнал ФХ із властиво меншим вмістом хлорофілу в абаксіальних поверхнях такий компроміс виправданий. Результати показують, що навіть при відносно легкому стресу можна спостерігати чітку різницю з обома датчиками. На додаток до цього спостерігається відновлення на всіх стресових рослинах, які виміряні за допомогою обох датчиків.

Для аналізу експерименту потрібні статистично відповідні дані, тобто проводити експеримент на кількох рослинах із повтореннями. Для отриманих даних необхідно провести тест Кокрена та Бартлетта на однорідність дисперсії, тест нормальності Лілліфорса, тест Тьюкі та регресійно-кореляційний аналіз. Порівняння статистичної значущості між двома датчиками також підтверджує, що обидва вимірювання є подібними варіації з однаковою значущістю при порівнянні та контролю. Регресійний та кореляційний аналіз виявив зв'язок між даними, зібраними Mini-PAM та CFY Sensor. Побудова та аналіз даних з різною ефективністю фотосинтезу показує, що в більшості випадків стресова рослина демонструвала нижчий квантовий вихід (ефективність).

Порушення фізіологічного стану вищих рослинних організмів вже на початковому етапі викликає зміни у первинних стадіях фотосинтезу, що супроводжується певними змінами кількісної складової хлорофілу та його

оптичних властивостей. Тому оптичні ефекти, які супроводжують процес фотосинтезу, дозволяють ефективно проводити діагностику фізіологічного стану вищих рослинних організмів, виявляючи порушення у їх розвитку та життєдіяльності на самих ранніх стадіях.

Найбільшу точність та достовірність у діагностиці та оцінюванні стану може надати флюорометричний аналіз, спрямований на дослідження параметрів флуоресценції, яка напряму пов'язана з процесами фотосинтезу.

Для вимірювання інтенсивності спектральних ліній флуоресценції найбільш доцільно здійснювати просторове розкладання випромінювання по спектральним лініям за допомогою увігнутої дифракційної ґратки. Реєстрацію інтенсивностей спектральних ліній найбільш доцільно здійснювати з використанням лінійки фотоприймачів. Для забезпечення нормальної дифракції перед ґраткою треба створити потік паралельних променів, що вимагає використання коліматора.

2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ

2.1 Модель фотолюмінесценції хлорофілу

Поглинена світлова енергія в рослинах розподіляється по трьом основних каналах [11]. Це температурна флуоресценція, дезактивація а також фотохімічні реакції. Це пов'язано із визначення збудженого стану хлорофілу.

Шляхи дезактивації хлорофілу можна описати схемою:

- Внутрішньо молекулярні безвипромінювальні процеси.
- Флуоресценція.
- Фосфоресценція.
- Міграція енергії від однієї молекули пігменту до іншої.
- Фотохімічна реакція.

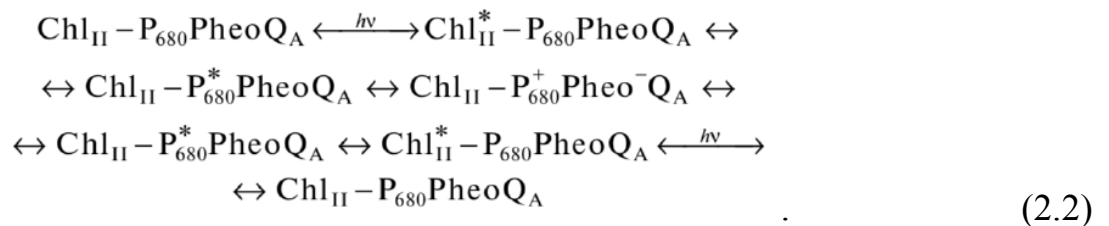
Квантовий вихід флуоресценції можна визначити, як:

$$qF = \frac{k_F}{k_F + k_P + k_D + k_T} \quad (2.1)$$

де k_F k_P k_D k_T – константи відповідно швидкості флуоресценції, фотохімічної реакції; теплової дезактивації та перенесення енергії.

Квантовий вихід ФХ в листі становить до 2–8%. Середній час життя складає близько 300 пс.

Схема процесів, що призводять до випромінювання флуоресценції:



Існують такі методи вимірювання флюоресценції [18, 28]. Перший – це прямий спосіб.

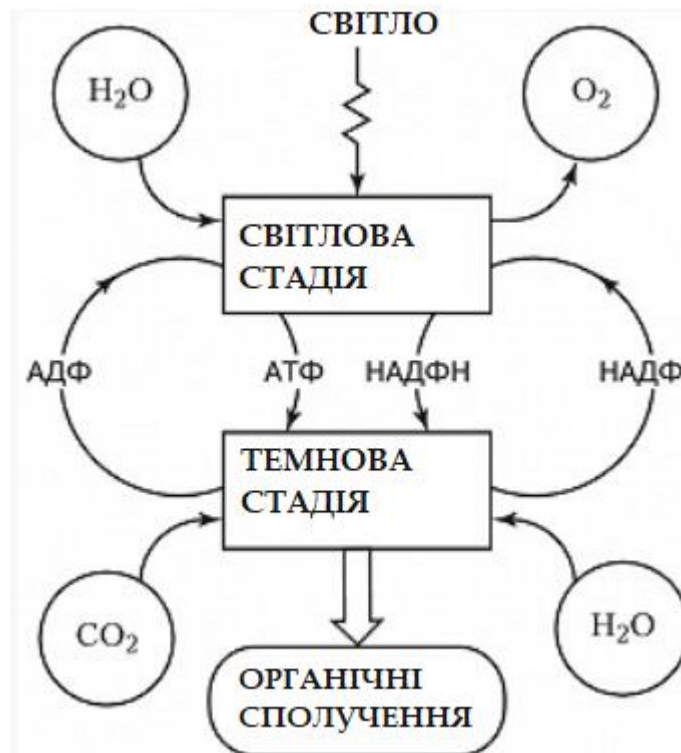


Рисунок 2.1 – Методи флюоресценції

Для вимірювання люмінесценції рослини в темряві має адаптуватися (20-30 хв). Після цього її опромінюють прямокутним імпульсом який має дуже короткий фронт. Імпульс довжиною хвилі < 670 нм триває декілька хвилин. За характером кривої індукції флуоресценції можна отримати значення про деякі характеристики фотосинтезу і його динаміку [23].

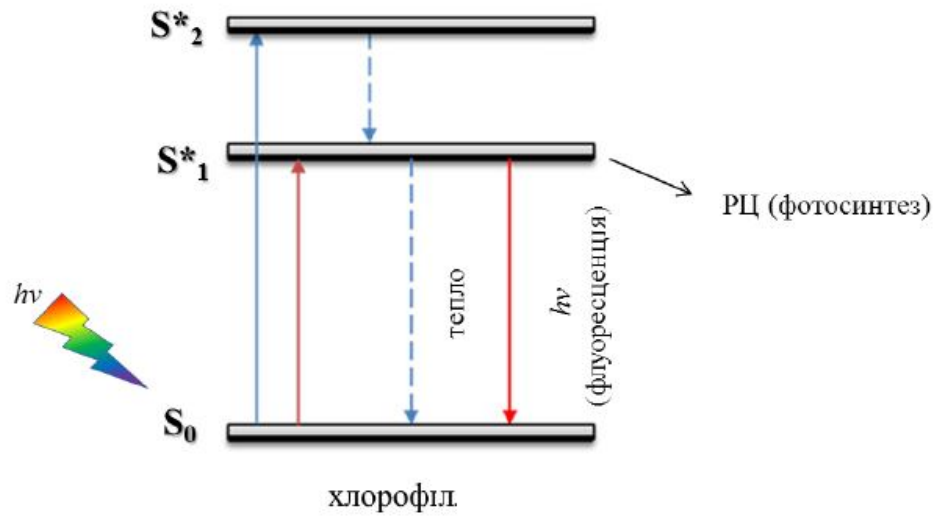


Рисунок 2.2 - Участь хлорофілу у фотосинтезі рослин

За цією методикою вимірюють:

- F_0 – початкова (нульова) флуоресценція.
- F_M – максимальна флуоресценція.
- $F_V = F_M - F_0$ змінна флуоресценція.
- FV/FM – максимальна квантова ефективність.
- t_{FM} – час для досягнення F_M .

P_I – індекс продуктивності фотосинтетичного апарату.

A_M - площа поверхні над індукційною кривою.

Таким чином, вимірювання параметрів ФХ дає можливість оцінити стан фотосинтетичного апарату рослини.

Інший спосіб отримання інформації про фотосинтез це технологія РАМ (Pulse Amplitude Modulation) амплітудно-імпульсної модуляції.

Виміряна типова крива РАМ методом, наведена на рис.2.3.

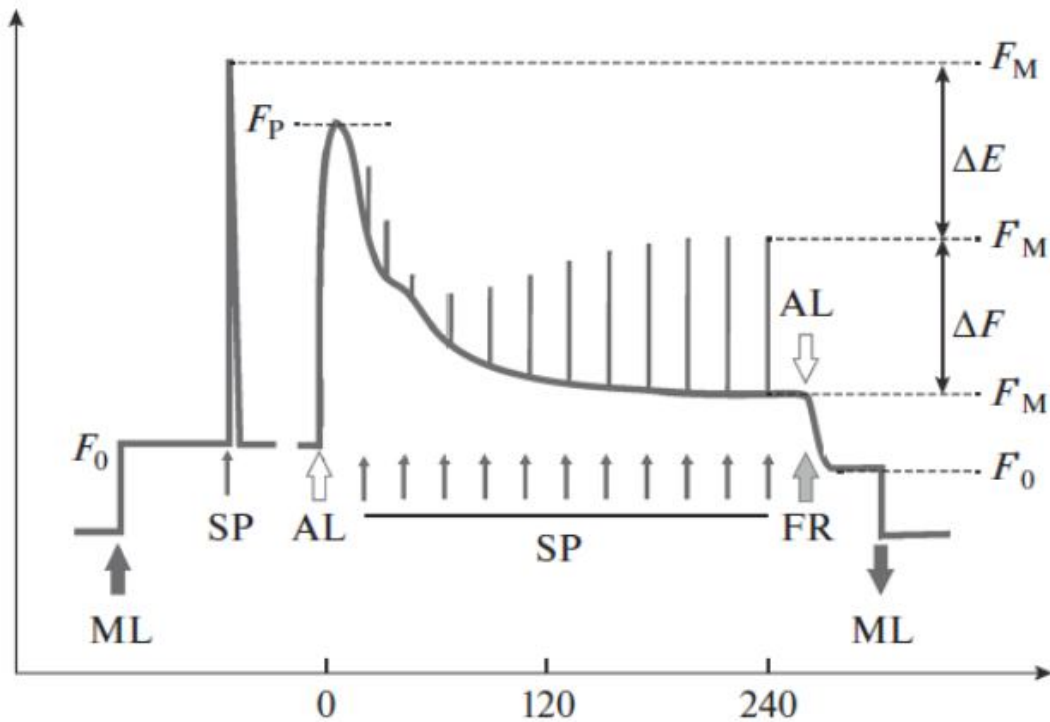


Рисунок 2.3 - Модульована флуоресценція та фотосинтетична ефективність

На основі такої технології вимірювальний засіб визначає відносний вихід флуоресценції (F_t). Це відбувається шляхом модуляції амплітуди вимірюваного світла в діапазоні мікросекундних імпульсів. Це може дозволити виявляти індуковану флуоресценцію, навіть в умовах розсіяного світла.

2.2 Порівняння відомих методів визначення флуоресценції

Як було зазначено вище, перевагою люмінесцентних методів є те, що вони дозволяють отримати відомості про негативні зміни в біологічних об'єктах на самій ранній стадії, коли вони ще не прийняли незворотній характер, мають високу чутливість та можуть бути застосовані до широкого кола об'єктів [15], [18].

Крім того, люмінесцентні методи дозволяють проводити дослідження

дистанційно, оцінюючи середній функціональний стан рослин на значній площі. За порівнянням з іншими люмінесцентні методи дозволяють зафіксувати зміни у апараті фотосинтезу на самих початкових етапах. Як показують різноманітні дослідження, саме характеристики флуоресценції хлорофілу на пряму пов'язані зі змінами у первинних стадіях фотосинтезу [1], [5].

Однією з видів флуоресценції є лазерна флуорометрія. Лазерний промінь завдяки високій спектральній яскравості, спрямованості, монохроматичності, поляризації, просторовій та часовій когерентності є надзвичайно зручним інструментом для створення різноманітних багатофункціональних вимірювальних пристроїв [19], [20]. Це підтверджується стрімким розвитком ринку лазерної діагностичної та дослідної апаратури [21].

Метод лазерної флуорометрії полягає у збудженні спектрів флуоресценції лазерним випромінюванням з наступним виміром характеристик лазерно-індукованої флуоресценції.

Вважається, що при взаємодії лазерного пучка з рослинною тканиною її оптичні властивості залишаються стабільними. А якщо будь-які зміни і відбуваються, то досить повільно, і вони стають помітними лише через час, що значно перевершує тривалість вимірів [22].

Методика лазерно-індукованої флуоресценції успішно використовується для виміру вмісту хлорофілу та інших пігментів у клітинах рослин. Крім того, ця методика дозволяє вимірити швидкість електронного транспорту фотосистем, змінну та уповільнену флуоресценцію, що подають інформацію про квантовий вихід флуоресценції і про те, яка частина енергії іде безпосередньо на реакцію фотосинтезу. В остаточному підсумку, це дозволяє визначати стан фотосинтезуючих систем і оцінювати негативний вплив зовнішніх факторів на функціонування і розвиток рослинних клітин [17], [23].

Відомо, що форма індукційних кривих флуоресценції, які характеризують інтенсивність флуоресценції після початку освітлення, є сукупним результатом процесів фотосинтезу. У популяції, як правило, можуть бути присутні індивідуальні клітини, які знаходяться у різних фізіологічних станах, які пов'язані з різним рівнем фотосинтезу.

Це проявляється в різних рівнях флуоресценції, а також в різних формах кривих флуоресценції. Набір таких кривих може бути показником гетерогенного стану популяції у цілому. За допомогою статистичних методів обробки таких кривих можна побудувати діаграми стану популяції і прослідкувати динаміку його зміни.

Результати діагностики стану популяції рослинних організмів, що характеризуються кривими з підвищеним рівнем флуоресценції, свідчать про низьку ефективність використання світла у фотосинтезі, а значить і про порушення фізіологічного стану такої популяції.

З проведеного аналізу витікає, що ефективна рання експрес-діагностика фізіологічного стану рослини у природних умовах може бути проведена оптичними методами. Найбільш перспективним серед них є метод лазерно-індукованої флуоресценції, що характеризується високою ефективністю збудження спектрів флуоресценції, має високу точність та дозволяє проводити вимірювання на рослинних об'єктах в природних умовах.

2.3 Розробка моделі для розрахунку площі поверхні листя

Більшість рослин мають листя, які функціонують як фотосинтезуючі органи. Загалом, чим більше площа листя, тим більше фотосинтетична здатність рослини; однак збільшення площі листя призводить до більшого збільшення сухостімаса на одиницю площі листя (). Взагалі рослині вигідно мати меншу кількість більших стулок, що створює простішу надземну архітектуру, оскільки складна надземна архітектура (наприскільки має багато

дрібних листків) може спричинити труднощі в транспортуванні води та поживних речовин між листям і стеблом Küppers, 1989 Крім того, на площу листя також впливають умови навколишнього середовища, особливо температура та опади (Райт та ін., 2017 . Можливість точного вимірювання площі листя може допомогти дослідникам кількісно оцінити просторову площу листя, характеристики поширення та досліджувати пристосованість рослин у популяції чи спільноті до середовища. Багато досліджень мають спробував знайти найкращу математичну модель для точного розрахунку площі листя. Більшість із них порівнюють потужність-закономірність взаємозв'язків між поверхнею листя і одновимірними (1-D) вимірюваннями (тобто довжиною або шириною листя). Монтгомері у 1911 р. запропонував рівняння, яке передбачає пряму пропорційну залежність площі поверхні від добутку листа довжина і ширина кукурудзи.

Перш ніж визначити площу листя необхідно його відображення за допомогою автоматичної моделі, знаходження його розташування та сегментування області листя. Сегментація листків включає дві основні процедури: (1) сегментування переднього плану і ділянки листка від природного фону та (2) сегментування кожного окремого листка та кожного закритого або накладання (тобто об'єкт на об'єкт) окремо від зображення. На рис. 2.2 показано ці дві процедури процесу сегментації листя на прикладі вхідного зображення. Виявлення листя від комплексуприродний фон і відокремлення кожного закритого листя одного кольору і текстури створюють листпроблема сегментації складна. Отже, нині сегментація листя від зображення є площеюзростаючий дослідницький інтерес із значними застосуваннями.



Рисунок 2.2 - Процесу сегментації листя рослини

Методи сегментації включають граничні, кластерні, регіональні та глибокого навчання та інші методи. Існуючі моделі в поєднанні з різними методами сегментації добре працюють у разі сегментація як одиночних, так і листів що перекриваються. Але є ще невирішені проблеми. Деякі моделі, як [15], працюють лише з одним видом листка, що не забезпечує продуктивність модель для листя різних видів, зроблених за різних обставин.

Запропонована модель працює для сегментації кожного окремого, а також накладаних листів окремо. На рис. 2.3 показана запропонована робоча модель із прикладом зображення, яке візуально показує вплив кожного кроку на вхідне зображення. На вхідному зображенні спочатку виконуємо деяку попередню обробку. Зображення можуть бути різних типів, наприклад зображення з дійсно складним фоном із кількома листям або зображення з простим фоном з одним листом тощо. Отже, виконується два різних типи обробки. Далі виявляється два набори контурів з обох цих оброблених зображень і вибирається один найкращий контурний набір. Нарешті, сегментуються ці найкращі контури як окремі ділянки листя від оригінального вхідного зображення.

Етапи попередньої обробки моделі в основному працюють для підготовки зображення для виявлення країв. Це робиться шляхом виділення граничних країв і видалення непотрібних внутрішніх та зовнішніх країв листя. Спочатку вхідне зображення зчитується у кольоровому форматі BGR (синій,

зелений, червоний). Оскільки використовується Python та бібліотеки OpenCV для реалізації моделі, вхідне зображення зчитується в BGR колірний формат замість RGB. Оригінальна версія вхідного зображення зберігається як основне зображення і копія цього зображення використовується для подальшої обробки. Обробка вхідного зображення великого розміру вимагає непотрібної енергії та часу на обчислення. Він також іноді перешкоджає точності сегментації. Отже, вибираємо оптимальний розмір зображення, 800×700 пікселів, для вхідного зображення. Коли вхідне зображення перевищує цей оптимальний розмір, модель змінює його розмір до оптимального розміру, а потім змінене зображення зберігається як основне зображення. В іншому випадку цей крок ігнорується.

Кожен лист має деякі внутрішні текстури. Ці текстури створюють так багато непотрібних країв, які можуть маніпулювати цільовою зоною сегментації. У моделі для сегментації необхідно видалити всі непотрібні краї зображення та зберігають лише граничні краї.

Наступним кроком є перетворення зображення у форматі BGR (3 канали) у зображення у відтінках сірого (1 канал) використовуючи рівняння (1). У відтінках сірого потрібно обробити лише одну третину даних зображення порівняно з зображенням BGR, що значно зменшує обсяг обчислень і пам'яті:

$$G_g(i,j) = 0.114I_B(i,j) + 0.587I_G(i,j) + 0.299I_R(i,j) \quad (2.3)$$

У рівнянні (2.3) G представляє сіре зображення, а B, G, R представляють синій, зелений і червоний канал відповідно зображення і, j - являють собою значення координат у напрямках x і y відповідно.

Далі необхідно виконати розмиття фонові області. Але листя найчастіше зустрічається в групах, і така модель працює для сегментації кількох листків окремо. Модель не використовує жодних алгоритмів прямого усунення фону, оскільки більшість із них націлені на центр зображення як

передній план, який може усунути деякі листки переднього плану, які не в центрі зображення. У моделі застосовується фільтр Гаусса для розмиття зображення фону. Гауссове ядро визначається в 2D за допомогою рівняння (2.4). Це нелінійний фільтр посилює ефект пікселів переднього плану та поступово зменшує вплив пікселів, які далі від центру [14]. Таким чином, отримується зображення з сильно розмитим фоном і більш гладка область переднього плану.

$$G_{\text{au-2D}}(i, j; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}} \quad (2.4)$$

Тут $G_{\text{au-2D}}(i, j, \sigma)$ представляє функцію ядра Гауса, де i, j представляє значення координату напрямках x і y відповідно, а σ задовольняє ширині гауссового ядра. У моделі ядро 9×9 зі значенням σ 1,5 в обох напрямках x і y .

Для цієї бінаризації ми застосовується двійкове порогове значення з порогом Оцу. Оскільки порогове значення Оцу автоматично визначає порогове значення що найкраще описує зображення, застосовують його безпосередньо для видалення фону.

Для виявлення листя як зв'язаних контурів із зображення після поділу фону визначаються границі регіону. Модель витягує межі шляхом віднімання результату розширення в результаті ерозії. Розширення та ерозія в основному впливають на наявні пікселі між переднім планом і фоном, а також пікселями, які існують поблизу границь. Це визначення границь виконується за допомогою рівняння (2.5) послідовно

$$\begin{aligned} D_a(i, j) &= I(i, j) \oplus \text{kernel} \\ E_r(i, j) &= D_a(i, j) \ominus \text{kernel} \\ B_o(i, j) &= D_a(i, j) \setminus E_r(i, j) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Виявлення контурів і сегментація. На цьому кроці виконується визначення контуру. Отже, це визначення контуру виконується на вихідних зображеннях, знайдених після обробки першого типу та обробки другого типу. Обробка зображення першого та другого типу призводить до видалення фону, непотрібні краї видалені, а границі отримані на зображенні. Це цільове зображення моделі для яких виконується вся вищезгадана обробка. На цьому зображенні отримують взаємозв'язані області, виявляючи їх контури. Метод виявляє контури з двійкового зображення за допомогою алгоритму топологічного структурного аналізу [21]. Метод `findContours()` знаходить підключення регіонів і зберігає їх як окремі контури, дотримуючись межі об'єкта або контуру зображення. Порушені або тісно пов'язані контури не дозволяють `findContours()` виявляти декілька регіонів об'єкта окремо. Крім того, якщо краї об'єкта, що перекриваються, раніше не розділені як краї окремих об'єктів `findContours()` виявить один контур, що містить усі предмети в ньому. В кінцевому підсумку отримують вхідне зображення з видаленим фоном і чіткими контурами кожного окремого об'єкта. Реалізація такої моделі представлена в Додатку Г.

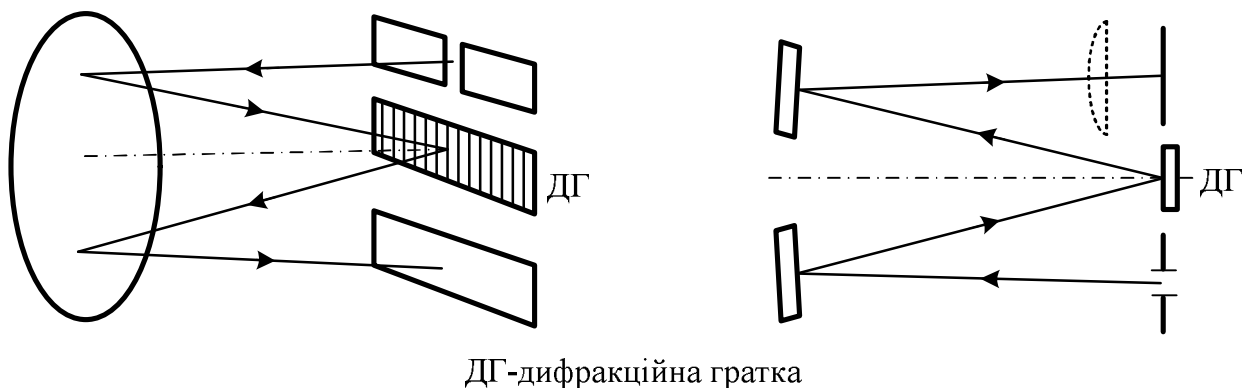
2.4 Можливі підходів до побудови засобу для контролю вмісту хлорофілу

Одним з основних завдань, що повинні розв'язуватися у розроблюваному засобі для контролю вмісту хлорофілу, є вимірювання інтенсивності спектральних ліній флюоресценції хлорофілу. Ці завдання можуть бути вирішені за рахунок оптичної фільтрації прийнятого випромінювання, просторового розкладання випромінювання у спектр або використання приймачів, що мають вибірккову спектральну чутливість.

Найкращим з цих -методів з точки зору отримання високої точності у визначенні спектрального складу випромінювання та можливості проведення досліджень в автоматичному режимі є метод просторового розкладання випромінювання по довжинах хвиль. Цей метод покладений в основу роботи спектрометрів – приладів, призначених для спектрального аналізу випромінювання.

Центральним елементом спектрометра є модуль, у якому відбувається розкладання аналізованого випромінювання в спектр. Якщо на вихід пристрою подається весь спектр або значна його ділянка, то модуль називається спектрографом, або поліхроматором. Якщо на вихід пристрою подається лише вузька, спеціально виділена зі спектра смуга, то модуль називається монохроматором. Основним вузлом поліхроматора та монохроматора є диспергуючий елемент – пристрій, що розкладає світлове випромінювання у спектр.

Найбільше поширення при використанні плоских дифракційних ґраток одержала схема Еберта (Черні-Тернера). Коліматорним і фокусуєчим об'єктивом в ній служать різні частини того самого увігнутого дзеркала. У таких приладах спектр звичайно не міститься цілком на фотодетекторі, що розташовується в фокальній площині. Для охоплення всієї робочої області спектра передбачений поворот ґратки. Розрізняють вертикальну і горизонтальну схеми Еберта [29] (рис. 2.4).



а

б

Рисунок 2.4 – схема Еберта: вертикальна (а) та горизонтальна (б)

Для розкладання світла в спектр застосовуються скляні та кварцові призми, а також дифракційні ґратки [28]. Призми мають досить велику дисперсію і велику світлосилу. Кварцові призми дають можливість працювати в ультрафіолетовій області спектра. Основною перевагою використання призми є низька вартість. До недоліків призмених спектрометрів варто віднести нелінійність дисперсії, збільшену вагу та малий відносний отвір, і як наслідок цього - малу світлосилу спектрометра. Крім того, область довжин хвиль, для якої можуть застосовуватися призми, обмежена матеріалом самої призми

На відміну від призми дифракційні ґратки забезпечують лінійну дисперсію світла у всьому діапазоні видимого та ультрафіолетового спектрів. Існує два типи дифракційних ґраток [28], [29]: плоскі й увігнуті. Для використання плоских ґраток необхідний коліматорний і фокусуєчий об'єктив.

У вертикальній схемі Еберта вхідна щілина, середина спектра, центр ґратки і оптична вісь загального коліматорно-фокусуєчого дзеркала лежать в одній площині, паралельній штрихам ґратки (рис. 2.4 а). Щілина, паралельна штрихам ґратки, розташована над ґраткою, спектр - симетрично під нею. У горизонтальній схемі (рис 2.4 б) щілина та спектр розташовуються по різні боки ґратки у горизонтальній площині.

Фокальною поверхнею у даній схемі є циліндр із радіусом, близьким до фокусної поверхні дзеркал. Тому при необхідності отримання плоского спектра використовується лінза (на рис. 2.4 вона показана пунктиром).

Схеми з плоскими дифракційними ґратками мають такі основні недоліки:

- для одержання широкої області спектра гарної якості необхідно

використовувати дзеркальні об'єктиви з великою фокусною відстанню;

- малий відносний отвір системи, пов'язаний з технологічними труднощами виготовлення плоских дифракційні ґраток великих розмірів;

- значний дрейф спектральних ліній щодо системи реєстрації, пов'язаний з температурними деформаціями несущої конструкції.

Для реєстрації інтенсивності спектральних ліній може використовуватися або один фотодетектор або лінійка фотодетекторів. У першому випадку у фокальній площині фокусуєчого дзеркала перед фотодетектором розташовується вихідна щілина, що вирізає певну ділянку спектра. Сканування по всіх лініях спектра здійснюється поворотом дифракційної ґратки, у результаті чого через вихідну щілину проходить випромінювання певної довжини хвилі, що залежить від положення ґратки. Такий підхід вимагає використання крокових двигунів, як наприклад в спектрофотометрі, що описаний в [30], та складної системи керування.

Більш ефективним підходом до вимірювання інтенсивностей спектральних ліній є використання лінійки фотодетекторів. У цьому випадку кожний елемент лінійки реєструє випромінювання певної довжини хвилі. Недоліком такого підходу є те, що відбите від поверхні лінійки фотодетекторів випромінювання попадає на вихідне дзеркало і, відбивши від нього, повертається і реєструється лінійкою, вносячи внесок у рівень фонового випромінювання. Знизити фонове випромінювання можна, нахиливши лінійку у вертикальній площині так, щоб відбите від неї випромінювання проходило під або над вихідним дзеркалом. Іншим підходом є використання безкорпусних фотодетекторів, що зменшує рівень перевідбивань.

Увігнуті дифракційні ґратки поєднують у собі властивості як диспергуючого, так і фокусуєчого елементів. Увігнуті ґрати можуть бути єдиною оптичною деталлю приладу, а це особливо коштовно для роботи в короткохвильовій частині ультрафіолетової області спектра, для якої

коефіцієнти відбивання металевих покриттів невеликі, а прозорих матеріалів не існує. Крім того, це спрощує сам прилад. Такі системи характеризуються мінімумом розсіяного світла і викривленням спектра.

Увігнуті ґратки по методу виготовлення поділяються на нарізні і голограмні [31]. Нарізні ґратки різуться за допомогою різця, а голограмні виготовляються за допомогою експозиції дифракційної картини на фоточутливий шар підкладки. Після відповідної обробки експонованого шару виходить рельєфна структура, що утворює ґратку і яку для підвищення відбиття покриваються шаром металу. Профіль нарізних ґраток – трикутний, а голограмних – синусоподібний. Саме тому нарізні ґратки мають більшу світлосилу, ніж голограмні.

Одна з особливостей голографічного методу виготовлення полягає у тому, що шляхом підбору форми і напрямків фронтів інтерференціюючих хвиль можна в широких межах змінювати форму штрихів ґратки і закономірність розташування їх на поверхні. Це відкриває нові можливості для корекції аберацій у різних схемах спектральних приладів. Іншою позитивною особливістю голограмних дифракційних ґраток є повна відсутність періодичних помилок і значно більш низький рівень розсіяного світла. Голограмні дифракційні ґратки не мають явно виражену здатність концентрувати випромінювання у вузькій спектральній області, але цей недолік в деякій мірі компенсується можливістю істотного збільшення апертури і цілком усувається при додатковій обробці поверхні ґратки.

При використанні увігнутих ґраток найбільше поширення отримала схема Роуланда [30]. У цій схемі вершина ґратки, щілина і всі її монохроматичні зображення знаходяться на поверхні кругового циліндра радіусом, рівним половині радіуса кривизни ґратки. Вхідна щілина є нерухомою. Ґратка та фотодетектор, які жорстко закріплені на протилежних кінцях стрижня, можуть рухатися уздовж взаємно перпендикулярних прямих, залишаючись на кінцях діаметра кола Роуланда, що є нормаллю до ґрат.

Таким чином, центр спектрограми завжди знаходиться на нормалі, по обидва боки від якої реєструються довжини хвиль, що відповідають кутам дифракції до 10° . Дана конструкція є простою та зручною, оскільки при переході від однієї області спектра до іншій положення щілини і напрям осі пучка, що падає на ґратку, залишаються незмінними.

Іншим варіантом є схема Ебнея, яка відрізняється від попередньої тим, що ґратка та фотодетектор нерухомі, а щілина може рухатися по колу Роуланда, обертаючись навколо осі, що проходить через його центр. При переході до іншої області довжин хвиль змінюється кут падіння, а кути дифракції залишаються незмінними. При цьому площина щілини не залишається перпендикулярною до осі пучка, оскільки кут повороту щілини вдвічі більший зміни кута падіння при цьому повороті. Ця конструкція незручна і тим, що разом із щілиною повинно переміщатися і джерело випромінювання.

Ще однією схемою використання увігнутих ґраток є схема Пашена-Рунге. В приладах, побудованих за цією схемою [29], вхідна щілина, увігнута ґратка і фокальна поверхня розташовані на колі Роуланда і закріплені на одній несучій поверхні. Іноді встановлюється кілька вхідних щілин або кілька фотодетекторів, або ж фотодетектор має можливість переміщення по колу Роуланда. Можна помістити на одному колі дві або навіть три ґратки з однаковими радіусами кривизни, але з різними кількостями штрихів на мм або з концентрацією енергії в різних областях спектра. Кути падіння і дифракції можуть змінюватися в широких межах.

Оскільки дана оптична схема містить лише один елемент, вона характеризується мінімумом розсіяного світла і мінімальними викривленнями спектра. Ця схема, завдяки своїй гнучкості, дозволяє вирішувати різноманітні задачі: реєструвати одночасно широку область спектра, одержувати спектри з високим розрізненням або з високою концентрацією енергії в заданій області довжин хвиль.

Підводячи підсумки можна зробити такі висновки щодо підходів до побудови приймальної частини розроблюваного засобу для контролю вмісту хлорофілу:

1. Для вимірювання інтенсивності спектральних ліній флюоресценції найбільш доцільно здійснювати просторове розкладання випромінювання по спектральним лініям;
2. Для розкладання випромінювання флюоресценції у спектр найбільш доцільно використовувати увігнуту дифракційну ґратку;
3. Для забезпечення нормальної дифракції перед ґраткою треба створити потік паралельних променів, що вимагає використання коліматора;
4. З врахуванням малої інтенсивності випромінювання флюоресценції замість входної щілини, що розміщується у передньому фокусі коліматора, найбільш доцільно використовувати об'єktiv, що буде збирати випромінювання флюоресценції у передньому фокусі коліматора;
5. Для реєстрації інтенсивності спектральних ліній найбільш доцільно використовувати лінійку фотоприймачів.

З врахуванням малої інтенсивності випромінювання флюоресценції замість входної щілини, що розміщується у передньому фокусі коліматора, найбільш доцільно використовувати об'єktiv, що буде збирати випромінювання флюоресценції у передньому фокусі коліматора.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЗАСОБУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ

3.1 Вибір та обґрунтування аналогів

Одним з аналогів розроблюваного засобу є портативний вимірювач вмісту хлорофілу ССМ 200plus [24] (США). Прилад ССМ 200plus забезпечує швидкий та точний вимір відносного вмісту хлорофілу у листах без їх ушкодження з автоматичним усередненням результатів. Прилад є простим у користуванні і призначається для використання дослідниками та агрономами для збору та оцінки даних щодо недостатчі поживних речовин або впливу екологічного факторів.

Датчик ССМ 200plus має порівняно велику площу, що забезпечує більш надійне зчитування, що враховує невеликі варіації структури, які можуть впливати на відтворюваність та достовірність результатів вимірювання. ССМ 200plus має великий об'єм вбудованої пам'яті, що дозволяє зберігати результати понад 94000 вимірів разом з GPS-даними. Користувач може зазначати місця, де проводяться виміри, а також записувати свої власні коментарії. Прилад обладнаний інтерфейсом USB 1.1 для передачі накопичених даних в комп'ютер. Основні технічні параметри та характеристики вимірювача ССМ 200plus [24]:

- | | |
|-----------------------------|--|
| – вимірювальний параметр | – оптичне поглинання на довжинах хвиль 653 нм та 931 нм; |
| – розбіжність результатів | – $\pm 1\%$; |
| – джерело випромінювання | – двоххвильовий світлодіодний модуль; |
| – фотодетектор | – кремнієвий фотодіод; |
| – об'єм внутрішньої пам'яті | – 8 Мбайт; |
| – інтерфейс користувача | – графічний дисплей з роздільною |

- | | |
|-----------------------|--|
| | здатністю 128 x 32 пікселів та 4-ох
кнопочна клавіатура ; |
| – зовнішні інтерфейси | – USB 1.1 та RS-232; |
| – джерело живлення | – 9В акумуляторна батарея; |
| – робочі температури | – від 0 до 50 °С; |
| – габаритні розміри | – 152 x 82 x 25мм. |

Перевагами вимірювача ССМ 200plus є простота використання та неруйнівний метод вимірювання, який не потребує подрібнення зразка та приготування розчину. Це зменшує трудомісткість процесу вимірювання та не вимагає використання дорогих хімічних реактивів. До основних недоліків можна віднести чутливість результатів вимірювання до структури рослинної тканини та висока вартість, що складає 1300 у.о.

Ще одним з аналогів є флуоресцентний спектрофотометр USB4000-FL (США), що є мініатюрним приладом нового покоління призначений для проведення флуоресцентної спектроскопії у спектральному діапазоні 360-1000 нм [25]. Прилад має покращений об'єктив, що характеризується покращеним світлозбиранням та низьким рівнем розсіювання світла. До складу USB4000-FL входить джерело синього світла, що являє собою світлодіодний модуль, який підключається безпосередньо до спектрометру та призначається для збудження флуоресценції в імпульсному або безперервному режимі на довжині хвилі 470 нм.

Крім того, спектрофотометр USB4000-FL обладнаний програмованим мікроконтролером, що дозволяє корегувати робочі параметри програмного забезпечення для адаптування до режиму роботи світлодіода. Фоточутливим елементом спектрофотометр USB4000-FL є лінійний ПЗЗ детектор, що складається з 3648 елементів зі спектральною чутливістю в діапазоні від 200 до 1100 нм. Для підключення до комп'ютера або інших цифрових пристроїв USB4000-FL має інтерфейси USB 2.0 та RS-232. Основні технічні параметри та характеристики вимірювача USB4000-FL [25]:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| – вимірюваний оптичний діапазон | – від 360 нм до 1000 нм; |
| – оптичне розрізнення | – 10 нм; |
| – відношення сигнал/шум | – 300:1; |
| – фотодетектор | – ПЗЗ лінійка з 3648 елементів; |
| – зовнішні інтерфейси | – USB 2.0 та RS-232; |
| – напруга живлення | – 5В; |
| – споживаний струм | – 250 мА; |
| – габаритні розміри | – 89,1 x 63,3 x 34,4 мм. |

Перевагами флуоресцентного спектрофотометра є широкий вимірюваний оптичний діапазон та високе оптичне розрізнення, велика оптична чутливість та функціональна гнучкість. Як основні недоліки можна відзначити відсутність інтерфейсу користувача, що вимагає застосування додаткового обладнання, зокрема комп'ютера, та висока вартість, що становить 5300 у.о.

Іншим аналогом розробленого флуорометра є флуорометр «Фотон-10» (РФ), що призначений для реєстрації у різних рослинних об'єктів (хлоропласти, лишайники, водорості, хвоя і листи рослин) декількох параметрів уповільненої та варіабельної флуоресценції хлорофілу [26]. У приладі реалізований запатентований розроблювачами метод оперативної оцінки фітотоксичної дії хімічних сполук на основі реєстрації відносного показника уповільненої флуоресценції хлорофілу. Даний показник не залежить від прозорості проб води, кількості тест - організму, розмірів досліджуваного рослинного зразка і дозволяє виділяти до 100 градацій його фізіологічного стану. Час виміру всіх показників для одного заправлення приладу складає хвилини.

Області застосування флуорометра «Фотон-10»:

- оцінка ступеня впливу техногенних викидів в атмосферу на рослинність поблизу промислових центрів;

- інтегральна оцінка рівня забруднення атмосфери міст і приміських зон;
- експрес-біотестування природних і стічних вод;
- оперативне спостереження за технологічним режимом роботи споруджень очисних і якістю очищення стічних вод;
- експрес-аналіз змісту найбільш речовин фітотоксичних (напр. ціаніди, , активний хлор, важкі метали пестициди й ін.) у різних середовищах;
- оцінка екологічної небезпеки (токсичності) хімічних спойлук перед їхнім використанням у виробництві, побуті;
- оперативний контроль біологічної активності деяких лікарських препаратів (напр., прополіс, пантокрин, та ін.) за допомогою біот естів.

Основні технічні параметри та характеристики вимірювача «Фотон-10» [26]:

– кількість кювет у приладі	– 20 шт;
– об'єм кювети	– 4 мл;
– об'єм/діаметр аналізованої проби	– 1-3 мл/2мм;
– тривалість циклу вимірювання (20 кювет)	– 5-7 хв;
– зовнішні інтерфейси	– RS-232;
– вага приладу	– 7 кг;
– живлення	– 220 В.

Основні недоліки: неможливість проводити в польових умовах дослідження, вартість проведення та висока трудомісткість дослідів, що обумовлено необхідністю розчинів приготування та використання реактивів, необхідність використання комп'ютера.

Найбільш близьким до розроблюваного флуорометра є портативний флуорометр Multiplex 3 [27]. Флуорометр Multiplex 3 є інноваційним, приладом багатофункціональним, що здатний точно та у режимі реального часу вимірювати кількість хлорофілу і поліфенолів і не ушкодити рослину. В

основі функціонування апарата лежить ефект флуоресценції рослин, а також властивість хлорофілу абсорбувати ультрафіолетові та світлові промені, а поліфенолів епідерми – затримувати проходження ультрафіолетового випромінювання. Кількісний аналіз поліфенолів включає в себе аналіз абсорбції хлорофілу. Для цього через рослину пропускається інфрачервоне випромінювання, яке не затримуються епідермою рослин. Після цього вимірюється флуоресценція хлорофілу в інфрачервоному випромінюванні. Потім рослина опромінюється ультрафіолетовим світлом для якого поліфеноли є природними фільтрами, що затримують частину ультрафіолетових променів. У результаті кількість такого випромінювання, що отримується хлорофілом зменшується, а значить зменшується і його флуоресценція. За різницею флуоресценції хлорофілу у першому та другому випадках оцінюється кількісний та якісний вміст поліфенолів.

Результати вимірювань відображаються на дисплей приладу та зберігаються на CD карті разом GPS-даними. Основні технічні параметри та характеристики вимірювача Multiplex 3 [27]:

- | | |
|-----------------------------|---|
| – вимірювальні параметри | – абсорбція в епідермі в УФ променях; |
| | – абсорбція в епідермі у видимому світлі; |
| | – флуоресценція хлорофілу, збуджена УФ світлом; |
| – відстань вимірювання | – 10 см; |
| – поверхня, що аналізується | – коло діаметра 4, 6 або 8 см; |
| – джерело випромінювання | – світлодіодний модуль з червоним, зеленим, синім та ультрафіолетовим каналами збудження; |
| – фотодетектор | – 3 кремнієвих фотодіода; |
| – пам'ять | – CD карта на 512 Мбайт; |
| – інтерфейс користувача | – графічний 3,2" сенсорний дисплей та 2 кнопки керування; |
| – зовнішні інтерфейси | – USB 2.0; |

- джерело живлення
- акумуляторна батарея;
- робочі температури
- від 5 до 40 °С;

Перевагами флуорометра Multiplex 3 є висока продуктивність, підтримка можливості вимірювання мультипараметрів, що забезпечує підвищену достовірність результатів, надання можливості оцінювати результати без застосування комп'ютера, застосовність для будь-яких видів рослин, можливість використання як для дослідження як листів, так і плодів.

До основних недоліків флуорометра Multiplex 3 можна, на сам перед віднести, високу вартість, яка складає 4100 у.о., та порівняно великі габарити та вагу, які разом з незначною відстанню вимірювання вносять певні незручності при проведенні досліджень на великій території.

Враховуючи кращі показники аналогів сформулюємо основні технічні характеристики нового виробу та порівняємо їх з прототипом (флуорометр Multiplex 3). При порівнянні краще значення показника будемо оцінювати в два бали, а гірше – в один. Результати порівняння наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльні характеристики аналога і нової розробки

Показники	Multiplex 3	Нова розробка
Вимірювальний параметр	Інтенсивність флуоресценції у синє-зеленому, червоному та інфрачервоному діапазонах (1 бал)	Інтенсивність флуоресценції у діапазоні від 360 нм до 1000 нм з кроком 10 нм (2 бали)
Відстань вимірювання, см	10 (1 бал)	від 10 до 30 (2 бали)
Можливість фіксувати GPS-дані	Так (2 бали)	Ні (1 бал)

Внутрішня пам'ять, Мбайт	до 512 (2 бали)	До 1 (1 бал)
Вартість, грн	114 800 (1 бал)	Не більше 100 000 (2 бали)

Нова розробка дозволить поводити спектральний аналіз флуоресценції у широкому оптичному діапазоні, що підвищить точність та достовірність отримуваних результатів. Крім того, це може розширити область її застосування та підвищити її функціональну гнучкість. Збільшення дистанції, на якій можна здійснювати вимірювання, зробить нову розробку більш зручною для застосування у польових умовах.

Уточнення технічних вимог до об'єкта проектування. Враховуючи результати проведеного у попередньому підрозділі огляду, сформулюємо основні технічні вимоги до розроблюваного приладу:

1. Довжина хвилі збуджуючого випромінювання, нм – біля 500;
2. Оптичний діапазон, що реєструється, нм – від 360 до 1000;
3. Оптичне розрізнення, нм – не більше 10;
4. Відстань вимірювання, см – від 10 до 30;
5. Зовнішній інтерфейс – USB 2.0;

3.2 Розробка структурної схеми системи

Як було зазначено вище, однією з основних задач, що повинні вирішуватися у розроблюваному засобі для контролю вмісту хлорофілу, є вимірювання інтенсивностей спектральних ліній флуоресценції хлорофілу. Тому засіб повинен складатися з двох основних частин: оптико-електронної та мікропроцесорної. Оптико-електронна частина повинна забезпечуватися розкладання вхідного світлового потоку у спектр та перетворення інтенсивностей спектральних ліній в електричні сигнали. Основними

завданнями мікропроцесорної частини є введення та обробка електричних сигналів, що несуть інформацію про інтенсивності відповідних спектральних ліній, відображення отримуваних результатів у графічному вигляді на екрані приладу, збереження результатів вимірювань, передачу їх для аналізу на комп'ютер. З врахуванням цього та основних результатів, отриманих по результатам аналізу, що був проведений у попередньому підрозділі, приходимо до структурної схеми оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу, яка зображена у Додатку А.

Основними блоками розробленої схеми є: оптична система, лазер, дифракційна ґратка, лінійка фотоприймачів, аналоговий мультиплексор, аналого-цифровий перетворювач, цифровий блок обробки та керування, пам'ять, дисплей, кнопки та блок USB.

Збудження флюоресценції відбувається у результаті дії лазерного променя, керування яким здійснюється цифровим блоком обробки та керування. Запуск лазерного джерела здійснюється цифровим блоком обробки та керування при натисканні на одну з кнопок приладу. Для підвищення завадостійкості та ефективності будемо використовувати імпульсний режим роботи лазера. Під дією імпульсу сигналу керування лазер формує світловий імпульс, що збуджує флюоресценцію хлорофілу у рослині.

Оптична система забезпечує приймання світлових променів флюоресценції та спрямування їх у вигляді потоку паралельних променів на увігнуту дифракційну ґратку. Оскільки в даному пристрої використовується увігнута ґратка, вона не лише розкладає прийнятий оптичний сигнал у спектр, а й фокусує отримвані спектральні лінії на лінійку фотоприймачів. Якщо лінійка буде мати однакову спектральну чутливість у всьому спектральному діапазоні флюоресценції, електричний сигнал на виході кожного фотоприймача лінійки буде пропорційним інтенсивності спектрального інтервалу, випромінювання з якого потрапляє на цей фотоприймач.

Сканування лінійки фотоприймачів, яке полягає у послідовному

періодичному зчитуванні сигналів з кожного її елемента, здійснюється цифровим блоком обробки та керування за допомогою аналогового мультиплексора. Під дією сигналів, що формуються цифровим блоком обробки та керування, електричний сигнал з певного фотоприймача подається через мультиплексор та вхід аналого-цифрового перетворювача. Цифровий код, що отримується у результаті перетворення, надходить у цифровий блок обробки та керування і є пропорційним інтенсивності певного спектрального інтервалу. Таким чином, періодично спрямовуючи сигнали з виходів елементів лінійки фотоприймачів на вхід аналого-цифрового мультиплексора, блок обробки та керування отримує цифрові коди, що характеризують розподіл інтенсивності випромінювання у спектрі флюоресценції.

Отримувані результати відображаються у графічному вигляді на дисплеї приладу і можуть зберігатися у його пам'яті. Відображення результатів здійснюється автоматично по завершенню опитування усіх сигналів лінійки, а їх збереження – за вимогою користувача по натисканню на одну з кнопок керування.

Для отримання можливості передачі записаних у пам'ять даних для подальшого аналізу на комп'ютер, у структурну схему засобу для контролю вмісту хлорофілу введений блок USB. Інтерфейс USB (Universal Serial Bus - універсальна послідовна шина) є промисловим стандартом для обміну даними між хост-комп'ютером і різноманітними периферійними пристроями. Розподіл пропускної здатності шини між периферійним пристроєм планується хостом і реалізується їм за допомогою посилки маркерів [32].

Фізично інтерфейс USB утворюється чотирма лініями: дві для передачі даних, дві для подання напруги живлення. Для передачі інформаційних сигналів використовується диференціальний спосіб передачі сигналів по лініях, які позначаються як D+ і D-. Рівні сигналів, які передаються дані, повинні бути нижче 0,3 В (низький рівень) або вище 2,8 В (високий рівень) [32].

У режимі обміну даними розроблюваний засіб для контролю вмісту

хлорофілу є підпорядкованим пристроєм, здатним передавати або приймати дані або керуючу інформацію із шини USB. Блок USB підтримує фізичний рівень інтерфейсу USB. Алгоритмічний рівень підтримується цифровим блоком контролю та управління. Функції хоста, який керує обміном даними є комп'ютер. У момент підключення цифровий блок контролю та управління повинен надати хосту конфігураційну інформацію, що описує можливості флуорометра і вимоги до ресурсів. Перед початком зчитування даних з пам'яті засобу для контролю вмісту хлорофілу він повинен бути сконфігурований хостом - йому повинна бути виділена смуга у каналі та обрані опції конфігурації.

У процесі використання оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу живиться від акумулятора (на схемі не зображений). Під час обміну даними комп'ютером живлення здійснюється від кабелю тобто від контролера USB комп'ютера.

4 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ

4.1 Вибір елементної бази

Цифровий блок обробки та керування буде реалізовувано на мікроконтролері. На відміну від мікропроцесора, мікроконтролер містить вбудовані пам'ять програм та пам'ять даних, порти вводу/виводу та різні контролери периферії, що дозволяє суттєво скоротити кількість використовуваних компонент, а значить підвищити надійність та зменшити вартість та габарити схеми. Сьогодні існує великий вибір мікроконтролерів, які, в першу чергу, відрізняються архітектурою, розрядністю та продуктивністю. Для вирішуваних завдань буде достатньо використати 8-ми бітний мікроконтролер з RISC архітектурою.

Основна відмінність RISC-архітектури полягає у скороченому наборі команд, більшість з яких виконується за один машинний такт, та

використанні замість архітектури з регістром-акумулятором архітектури, в якій кожен з регістрів загального призначення "сам собі акумулятор" [33]. Особливістю сучасних 8-розрядних RISC мікроконтролерів є низька вартість при порівняно високій продуктивності та широких функціональних можливостях.

Вибір конкретного типу мікроконтролера, що буде визначати його функціональні можливості, залежить від інших функціональних блоків пристрою. Тому конкретний тип мікроконтролера виберемо після того, як будуть визначені усі інші функціональні елементи пристрою для контролю вмісту хлорофілу.

Вибір елементної бази розпочнемо з вибору лінійки фотоприймачів. Лінійка фотоприймачів є одним із типів багатоелементних фотоприймачів, які реалізуються у вигляді приладів із зарядовим зв'язком або МОН-фотодіодних структур.

Функціонально фоточутливий прилад із зарядовим зв'язком є приладом [34, 35], що сприймає зображення, розкладає його на елементарні фрагменти, поелементне зчитування зображення та формування вихідного відеосигналу, еквівалентного оптичному зображенню. Фоточутливі прилади із зарядовим зв'язком є приладами динамічного типу, оскільки носієм інформації в них виступають зарядові пакети.

Хоча фотометрія належить до непрямих методів діагностики азотного живлення рослин, відповідним чином сконструйовані і відкалібровані фотометри дають можливість з достатньою точністю визначити потреба рослин в азотному живленні [3].

Основними проблемами, які пов'язані із застосуванням оптичних методів, є неоднозначність в інтерпретації отримуваних результатів, чутливість до фонових засвічувань та складність конструктивної реалізації у портативному вигляді для роботи в польових умовах.

При різній освітленості, температурах і дії зовнішніх факторів

(забруднень), у тому числі і стресовому характері, змінюється продуктивність фотосинтезу і число рослинних клітин і, тим самим, продуктивність сільськогосподарських угідь та життєвий стан інших рослинних екосистем. Джерелом необхідної інформації про подібні зміни служить хлорофіл, локалізований рослинних клітинах, що має певні спектральні властивості, зміну яких при різних впливах можна реєструвати в режимі реального часу. Наприклад, тривалі впливи недостачі вологи, посухи, засоленість ґрунтів призводять до характерних змін спектрів поглинання хлорофілу листового покриву і дозволяють зробити висновок про погіршення стану рослини [5].

Вплив на рослини несприятливих умов середовища може викликати безліч специфічних відповідних реакцій і приводити до переходу їх у стресовий стан. Такі впливи можуть впливати на всі метаболічні процеси в рослині, у тому числі і на процеси фотосинтезу. У зв'язку з цим функціонування фотосинтезуючого апарату є найбільш значимим для визначення стану рослини у цілому [6], [7]. Це пов'язано з тим, що порушення фізіологічного стану рослин вже на початковому етапі викликає зміни у первинних стадіях фотосинтезу, що супроводжується певними змінами кількісної складової хлорофілу та його оптичних властивостей. Тому хлорофіл можна розглядати як свого роду природний датчик стану клітин вищих рослинних організмів. У зв'язку з цим саме оптичні властивості хлорофілу, які можна досліджувати у режимі реального часу, служать джерелом інформації при діагностуванні фізіологічного стану рослин [8], [9].

Основними оптичними методами для дослідження оптичних властивостей хлорофілу є фотометричні та флюорометричні методи. Останні полягають у дослідженні спектрів люмінесценції хлорофілу, що виникає внаслідок опромінення рослин світловим випромінюванням певного оптичного діапазону.

Незважаючи на відмінності фотометричних та флюорометричних методів, їх застосування у рослинництві в основному обмежуються

традиційною фотометрією – вимірювання коефіцієнтів відбивання, пропускання та поглинання [10]. Існуючі же пристрої для дослідження та вимірювання параметрів флуоресценції, являють собою вимірювально-обчислювальні комплекси на основі ПЕОМ, що ускладнює їх застосування в польових умовах.

Враховуючи викладене вище, покращення функціональних характеристик портативного високоефективного пристрою для вимірювання параметрів лазерно-індукованої флуоресценції хлорофілу з метою дослідження фізіологічного стану вищих рослинних організмів в польових умовах є актуальною технічною задачею.

Кожний елемент МОН-фотодіодних багатоелементних фотоприймачів являє собою МОН-фототранзистор, в якому фоточутливою є область витоку (еквівалентна схема такого фототранзистора складається зі звичайного польового МОН транзистора, до витоку якого підключений катод фотодіода). На відміну від фоточутливих приладів із зарядовим зв'язком МОН-фотодіодні прилади характеризуються більшою функціональною гнучкістю, ширшим динамічним діапазоном, кращою стійкістю до температурних та радіаційних впливів, меншою технологічною складністю, а отже меншою вартістю [35]. Тому у розроблюваному засобі будемо використовувати саме МОН-фотодіодну лінійку.

Основним критерієм при виборі лінійки є оптичний діапазон чутливості. В сформованих технічних вимогах до засобу для контролю вмісту хлорофілу було зазначено, що він повинен вимірювати інтенсивність флуоресценції у діапазоні від 360 нм до 1000 нм. У відповідності до цього вибираємо фотодіодну лінійку LIS-1024. Пристрій LIS-1024 являє собою датчик зображення, що складається з масиву фотодіодних пікселів з наднизьким темновим струмом та має продуктивністю більшою за продуктивність приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Основні характеристики лінійки LIS-1024 [36]:

- діапазон спектральної чутливості, нм	350...1100 ;
- розрізнення, точки	1024;
- розмір пікселя, мкм	125 x 125;
- крок пік селів, мкм	7,8;
- робоча частота, МГц	від 0,001 до 20;
- темнова вихідна напруга, В	0,74;
- вихідна напруга насичення, В	3,3;
- відношення сигнал/шум, дБ	не менше 84;
- квантова ефективність на довжині 675 нм, %	60;
- логічні рівні сигналів керування	сумісні з TTL;
- напруга живлення, В	5;
- споживаний струм, мА	18.

Зчитування сигналів з пікселів забезпечується внутрішньою електричною схемою LIS-1024. Для зчитування інформації потрібно лише сформувати зовнішній тактовий сигнал, з частотою, що дорівнює бажаній швидкості зчитування, сигнал вибору режиму скидання та сигнал зовнішнього скидання, щоб почати зчитування.

Пристрій підтримує кілька режимів:

- режим динамічного скидання пікселя, в якому кожен піксель скидається після зчитування сигналу з нього;
- режим неруйнівного зчитування, в якому піксель накопичує результат перетворення,
- режим кадрового скидання, в якому усі пікселі скидаються одночасно.

Вибір режиму здійснюється за допомогою логічних рівнів сигналів на виводах PRE та RMS. У кадровому режимі цикл читання починається за внутрішнім скиданням або за імпульсом на вході RST. В усіх режимах, кінець кожного кадру ідентифікується імпульсом на виводі SYN. Цей імпульс SYN приймає значення високого логічного рівня за переднім фронтом кожного

1026 тактового імпульсу, і повертається у низький логічний рівень за переднім фронтом 1028 тактового імпульсу. Внутрішній лічильник скидається за наростаючим фронтом кожного 1029 тактового імпульсу.

Сигнал на вході RST використовується для зовнішнього скидання. Після скидання один повний кадр відео може знадобитися для отримання достовірних даних, у залежності від того, коли RST ініціюється. Активний рівень сигналу RST є високий, за яким обнуляється внутрішній лічильник і значення сигналів у пікселях.

Для підтримання інтерфейсу USB скористаємося мікросхемою FT232BM [37], яка являє собою перетворювач інтерфейсів USB/RS-232. Такий вибір обумовлений тим, що підтримка інших типів USB-пристроїв, наприклад, запам'ятовуючого на високому інтерфейсному рівні є доволі складним завданням.

Мікросхема ж FT232BM та драйвер, що доступний разом з нею, самостійно забезпечують розпізнавання USB пристрою як COM-порта на комп'ютері. Таким чином, залишається лише організувати обмін даними через USB як через послідовний асинхронний канал RS-232, а це є набагато простішим завданням.

Наступним важливим блоком пристрою є індикатор. Як індикатор будемо використовувати графічну рідкокристалічну панель. З точки зору керуючого інтерфейсу рідкокристалічні дисплеї поділяються на два великих класи – з контролерами і без контролерів. Перші зазвичай використовуються в системах, які мають не дуже великі обчислювальні ресурси. Наявність контролера повністю звільняє програміста від операції регенерації зображення – йому необхідно тільки переслати інформацію в ОЗП панелі. Тому у розроблюваному засобі будемо використовувати рідкокристалічну панель з контролером.

Сьогодні на ринку представлені рідкокристалічні індикаторні панелі багатьох виробників з різноманітними характеристиками. З врахуванням того,

що основним призначенням рідкокристалічного індикатора в засобі для контролю вмісту хлорофілу є відображення результатів вимірювання, та з метою зменшення вартості пристрою, будемо використовувати монохромну рідкокристалічну панель.

Серед монохроматичних панелей найбільш доступними на ринку є панелі компаній Volumin та Tianma.

Вибираємо рідкокристалічний індикатор BG320240 компанії Volumin з резистивною сенсорною панеллю. Основні технічні характеристики BG320240 [38]:

- роздільна здатність, точки 320 x 240;
- розміри екрана, мм 120 x 92;
- розміри точки, мм 0,34 x 0,34;
- крок точок, мм 0,36 x 0,36;
- напруга живлення, В 5.

Цифровий інтерфейс для організації зв'язку між мікроконтролером та панеллю BG320240 утворений 14 лініями.

Ще 4 лінії використовуються для прикладання напруг живлення самої панелі та її цифрової схеми. Сигнали інтерфейсу панелі BG320240 наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Сигнали зовнішнього інтерфейсу панелі BG320240

Номер контакту	Позначення	Рівень, В	Призначення
1	VSS	0	“Земля”
2	VDD	5	Напруга живлення
3	V0	-17,6	Напруга живлення рідкокристалічної панелі (управління контрастністю)
4	A0	В/Н	Вибір типу даних (команда/дані)

5	WR	H	Сигнал запису
6	RD	H	Сигнал читання
7-14	DB0...DB7	В/Н	Шина даних
15	CS	H	Сигнал вибору
16	RESET	H	Сигнал скидання
17	VEE	-19,6	Вихідна від'ємна напруга
18	FGND	0	Захисна земля
19	-	-	Не використовується
20	-	-	Не використовується

Наявність в індикаторі BG320240 резистивної сенсорної панелі дозволяє використати її для реалізації функцій блоку керування користувача. Сенсорні екрани сьогодні отримали широке розповсюдження в багатьох електронних пристроях. Тому реалізація у розроблюваному засобі сенсорного керування робить його ергономічні характеристики відповідними останнім тенденціям в області сучасних електронних технологій.

Для більшої зручності для вмикання лазерного діода будемо використовувати кнопку. Тому до блоку керування користувача крім сенсорної панелі буде входити кнопка. Для підвищення інформативності до блоку керування користувача введемо п'єзоелектричний динамік для формування звукових сигналів.

Як пам'ять для збереження результатів досліджень будемо використовувати пам'ять з електричним старанням, реалізовану за технологією EEPROM. Основними критеріями при виборі типу елемента пам'яті є:

- об'єм;
- простота обміну інформацією;
- мінімальна кількість необхідних зовнішніх компонент для організації інтерфейсу;

- восьми бітна структура запам'ятовуючих комірок.

Оцінимо необхідний об'єм пам'яті. Розроблюваний засіб для контролю вмісту хлорофілу повинен мати діапазон спектральної чутливості від 360 до 1100 нм з оптичним розрізненням 10 нм. Тому кількість отримуваних значень за одне вимірювання складає $(1100 - 360)/10 = 74$. Для зменшення об'єму пам'яті, необхідного для зберігання результатів, можна зберігати їх відносні значення, розраховувачі за співвідношенням I_i/I_{max} , де I_i – значення інтенсивності i -ої спектральної лінії; I_{max} – максимальне значення інтенсивності у даному вимірюванні. Виділяючи для збереження відносного значення 8-ми бітне слово, отримувана точність складе $1/255 = 0,004$. Для збереження максимального значення інтенсивності I_{max} , що дозволить відновити та відобразити абсолютні значення інтенсивності усіх спектральних ліній, будемо використовувати 16 біт. У результаті, об'єм пам'яті, необхідний для збереження результатів одного вимірювання буде дорівнювати $74 \cdot 1 + 2 = 76$ байт. Виберемо пам'ять об'ємом 64 кбайт, що дозволить зберігати результати понад 800 вимірювань.

Для зменшення кількості ліній, що утворюють інтерфейс з пам'ятю, треба вибрати мікросхему з послідовним інтерфейсом. Зазначеним критерієм задовольняє мікросхема послідовного EEPROM AT24C512BN [39], об'ємом 512 кбіт = 64 кбайт.

Зовнішнім інтерфейсом елемента AT24C512BN є дводротова асинхронна шина I²C, що містить дві сигнальні лінії, одна з яких (SCL) призначена для передачі тактового сигналу, друга даних (SDA) - для передачі даних. Для керування лініями використовуються вихідні каскади з відкритим колектором. Пристрої, що обмінюються даними через I²C поділяються на «Master» та «Slave». Пристрій «Master» генерує тактовий сигнал і є ініціатором обміну. Воно може адресувати будь-який пристрій «Slave». Всі пристрої «Slave» приймають адрес і, розпізнаючи його як власний, виконують

передбачувану операцію – читання або запис. Мікросхема AT24C512BN конструктивно реалізована у восьмививідному корпусі.

Останнім функціональним компонентом електричної частини засобу для контролю вмісту хлорофілу є лазерний діод. Як було відмічено у розділі 1, збудження флуоресценція хлорофілу відбувається при опроміненні світлом з довжиною хвилі 480 нм. Отже, основним критерієм для вибору лазерного діода є довжина хвилі у 480 нм. Цьому критерію задовольняє діод, пропонується в [40]. Основні характеристики вибраного діода:

- довжина хвилі, нм 480;
- оптична потужність, мВт 20;
- робочий прямий струм, мА 35;
- пряма напруга, В 2,1;
- робоча температура, °С -10...+50.

Після того, як вибрана елементна база для реалізації усіх функціональних вузлів засобу для контролю вмісту хлорофілу можна вибрати мікроконтролер. Одними з найпопулярніших 8-ми бітних RISC-мікроконтролерів на ринку України є сімейство мікроконтролерів під загальною назвою AVR. Ядро AVR-контролерів складає потужний гарвардський RISC-процесор з роздільним доступом до пам'яті програм і даних і розвинутою системою команд фіксованої 16-бітної довжини. Базова архітектура AVR складається з [41], [42] тридцяти двох регістрів загального призначення, кожний з яких може працювати як регістр-акумулятор, 8-ми та 16-ти розрядних таймерів-лічильників, що підтримують широтно-імпульсну модуляцію, аналогового компаратора, асинхронного та синхронного послідовних приймачів/передавачів UART і SPI, сторожового таймера та пристрою скидання по вмиканню живлення. Усе це перетворює AVR-мікроконтролери в могутній інструмент для побудови сучасних, високопродуктивних і економічних контролерів різного призначення.

Периферія мікроконтролерів AVR включає: порти (від 3 до 48 ліній

ведення/виведення), підтримку зовнішніх переривань, таймери-лічильники, сторожовий таймер, аналогові компаратори, 10-розрядний 8-канальний АЦП, інтерфейси UART, JTAG і SPI, пристрій скидання зі зниження живлення, широтно-імпульсні модулятори. Кожна лінія порту може бути запрограмована на вхід або на вихід. Потужні вихідні драйвери забезпечують струмову здатність навантаження 20 мА на лінію порту при максимальному значенні 40 мА, що дозволяє, наприклад, безпосередньо підключати до мікроконтролеру світлодіоди і біполярні транзистори. Загальна струмова навантаженість на всі лінії одного порту не повинна перевищувати 80 мА [42].

Мікроконтролери AVR мають у своєму складі від 1 до 4 таймерів / лічильників з розрядністю 8 або 16 біт, які можуть працювати і як таймери від внутрішнього джерела тактової частоти, і як лічильники зовнішніх подій. Їх можна використовувати для точного формування тимчасових інтервалів, підрахунку імпульсів на висновках мікроконтролера, формування послідовності імпульсів, тактування прийомопередатчика послідовного каналу зв'язку. У режимі ШІМ (PWM) таймер / лічильник може являти собою широтно-імпульсний модулятор і використовується для генерування сигналу з програмованими частотою і шпаруватістю. Таймери /лічильники здатні виробляти запити переривань, перемикаючи процесор на їх обслуговування за подіям і звільняючи його від необхідності періодичного опитування стану таймерів. Оскільки основне застосування мікроконтролерів знаходять в системах реального часу, таймери / лічильники є одним з найбільш важливих елементів [42].

Враховуючи ці переваги мікроконтролерів AVR, саме на них будемо орієнтуватися при розробці засобу для контролю вмісту хлорофілу. Виходячи з функціональних можливостей вибраної елементної бази, основними критеріями при виборі мікроконтролера є наявність вбудованого аналого-цифрового перетворювача, вбудованого асинхронного приймача/передавача,

вбудованого інтерфейсу I2C, найбільша тактова частота, кількість ліній введення/виведення $28 = 12$ (інтерфейс з індикатором) + 4 (інтерфейс з сенсорно панеллю) + 6 (інтерфейс з фотодіодною лінійкою) + 2 (інтерфейс з пам'яттю) + 2 (інтерфейс з перетворювачем USB/RS-232) + 1 (інтерфейс з лазерним діодом) + 1 (інтерфейс з кнопко).

Зазначеним критеріям задовольняє мікроконтролер ATmega16. Основні характеристики ATmega16 [43]:

- а) високопродуктивний, малопотужний AVR 8-бітний мікроконтролер:
 - 1) 130 потужних команд, більшість з яких виконується за 1 такт;
 - 2) 32x8 робочих регістра загального призначення;
 - 3) продуктивність до 16 MIPS при синхронізації на 16 МГц;
- б) 16 КБайт внутрішньо програмованої Flash пам'яті програм ;
- в) 512 байт енергонезалежної пам'яті даних EEPROM;
- г) 1 кбайт оперативної пам'яті даних;
- д) периферійні властивості:
 - 1) 32 ліній введення/виведення;
 - 2) два 8-бітних таймери/лічильники з роздільними дільником частоти і режимом порівняння;
 - 3) один 16-бітний таймер/лічильник з роздільними дільником частоти, режимом порівняння та режимом захоплення;
 - 4) чотири канали широтно-імпульсного модулятора;
 - 5) 8-и канальний 10-ти бітний аналого-цифровий перетворювач;
 - 6) програмований послідовний UART;
 - 7) ведучий/відомий SPI послідовний інтерфейс;
 - 8) послідовний дводотовий інтерфейс I²C;
 - 9) програмований сторожовий таймер з роздільним внутрішнім осцилятором;
- е) спеціальні властивості мікроконтролера:
 - 1) скидання за вмиканням живлення;

- 2) внутрішній калібрований RC осцилятор;
- 3) зовнішні і внутрішні джерела переривань;
- 4) чотири режими спання: очікування, зменшення шумів АЦП, енергозберігаючий, режим пониженого споживання потужності;
- ж) напруга живлення 2,7-5,5 В;
- з) швидкодія 0-16 МГц.

4.2 Розробка схеми електричної функціональної

Після вибору елементної бази, під час якого були визначені основні функціональні елементи засобу для контролю вмісту хлорофілу, на основі структурної схеми розробляємо схему електричну функціональну електричної частини пристрою. Розроблена електрична функціональна схема засобу для контролю вмісту хлорофілу наведена у Додатку Б.

Оснoву схеми складає мікроконтролер DD2, на якому реалізований цифровий блок обробки та керування. Крім цього, внутрішні ресурси мікроконтролера дозволяють реалізувати функції аналогового мультиплексора та аналого-цифрового перетворювача. Мікроконтролер забезпечує виконання усіх функцій вимірювання, обробки результатів, їх збереження у пам'яті та відображення на рідкокристалічній панелі. Поряд з цим, мікроконтролер керує обміном даних при підключення пристрою до комп'ютера.

Спряження мікроконтролера з фотодіодною лінійкою DA1 здійснюється через виводи PC2...PC6 та AD0. Лінії PC2...PC6 утворюють інтерфейс з цифровою схемою лінійки. На них формуються сигнали керування, що забезпечують зчитування даних з елементів лінійки. Виводи PC2 та PC4 призначаються для формування сигналів PRE та RMS, відповідно, за допомогою яких вибирається режим зчитування даних фотодіодної

лінійки. Вивід PC5 використовується для формування сигналу скидання RST. Тактовий сигнал лінійки, за яким здійснюється зчитування даних, формується виводі PC3. Сигнал SYN, який генерується наприкінці кожного кадру, подається на вивід PC6.

Інформаційні аналогові сигнали, що являють собою результат оптико-електронного перетворення в елементах лінійки, надходять з виходу VIDEO на вхід AD0 мікроконтролера. Цей вхід функціонально є нульовим каналом вбудованого в мікроконтролер аналого-цифрового перетворювача.

Сигнали, які формуються сенсорною панеллю, є аналоговими, а тому також потребують аналого-цифрового перетворення. У відповідності до цього сигнали з сенсорної панелі подаємо на входи AD3, AD4, AD5 та AD6 мікроконтролера, які є, відповідно, 3, 4, 5 та 6 каналами аналого-цифрового перетворювача. Підключення сенсорної панелі здійснюється через роз'єм X1.

Альтернативною функцією ліній PC0 та PC1 порту C мікроконтролера, є сигнали SCL та SDA вбудованого в мікроконтролера послідовного синхронного інтерфейсу I²C. Тому ці лінії використані для підключення мікросхеми зовнішньої енергонезалежної пам'яті EEPROM DD3, що вибрана з таким самим інтерфейсом. На виводі PC0 мікроконтролера формується тактовий сигнал SCL, що використовується для синхронізації бітових послідовностей, які передаються або приймаються по лінії SDA через вивід PC1. На адресні входи A0, A1 та A2 елемента DD3, які використовуються для того, щоб задати адрес елемента на шині I2C, поданий логічний 0. У результаті мікросхема пам'яті DD3 буде мати нульовий адрес.

Елемент DD1 виконує роль перетворювача USB/RS232. Він забезпечує розпізнавання USB пристрою як COM порту. Через цей віртуальний COM порт здійснюється обмін даними між комп'ютером та засобом для контролю вмісту хлорофілу з використанням сигналів RxD та TxD. Лінії введення RxD та виведення TxD послідовних асинхронних даних є альтернативними функціями виводів PD0 та PD1 мікроконтролера. На фізичному рівні

пересилка інформаційних пакетів відбувається по USB шині, підключення до якої здійснюється через роз'єм X2.

До входу PD2 мікроконтролера підключена кнопка. Вивід PD2 буде налаштований на вхід з підключенням через внутрішній резистор порту до напруги живлення +5В. У відповідності до цього, при розімкнених контактах кнопки на вході PD2 формується логічний рівень одиниці. При натисканні на кнопку контакти її замикаються і на виводі PD2 формується логічний нуль.

Керування лазерним діодом, вмикання якого повинно відбуватися при натисканні на кнопку, здійснюється через джерело струму за допомогою сигналу, що формується мікроконтролером на виводі PC7. Джерело струму стабілізує струм лазерного діода, забезпечуючи постійність оптичної потужності його випромінювання.

Інтерфейс з рідкокристалічною панеллю утворюється лініями PB0...PB7, PD3, PD5...PD7. Лінії PB0...PB7 порту В мікроконтролера утворюють 8-ми бітну шину даних, по якій передаються керуючі та інформаційні байти. Лінії PD3, PD5...PD7 порту D утворюють шину керування. Вивід PD3 призначається для формування сигналу A0 для ідентифікації типу даних, що передаються по шині даних – команда чи дані. Сигнали запису WR та читання RD формуються на виводах PD5 а PD6, відповідно. Для формування сигналу скидання RESET використовується вивід PD7. Лінія вибору CS з'єднана з нульовою шиною для формування нульового – активного рівня сигналу.

Вивід PD4 мікроконтролера використовується для керування п'єзоелектричним динаміком. Альтернативною функцією виводу є ШІМ сигнал, що формується за допомогою таймера/лічильника та регістра порівняння OC1B.

4.3 Розробка оптичної функціональної схеми

Головною складовою частиною засобу для контролю вмісту хлорофілу є оптична система. Вона забезпечує приймання випромінювання флуоресценції та розкладання його у спектр, що є основою для аналізу спектрального складу цього випромінювання. Можливість визначення інтенсивності вузьких спектральних інтервалів випромінювання флуоресценції визначається характеристиками оптичної системи.

Основними задачами оптичної системи є концентрація максимальної кількості випромінювання флуоресценції та розкладання його у спектр так, щоб на кожний елемент лінійки фотоприймачів потрапляв окремий, якомога вузький спектральний інтервал. У типових спектральних приладах джерело випромінювання розташовується на оптичній осі приладу. Враховуючи, що визначення функціонального стану рослинних організмів за допомогою розроблюваного засобу для контролю вмісту хлорофілу засноване на дослідженні флуоресценції хлорофілу, що відбувається у ткани рослин під дією лазерного променя, джерелом випромінювання є ділянка рослини, на яку потрапляє світловий потік від лазера. Виходячи з цього, при проведенні досліджень флуорометр повинен розташовувати так, щоб центр освітлюваної лазером ділянки знаходився би на оптичній осі приладу. Для отримання пристрою, який би був простим у використанні, дотримання цієї мови повинно забезпечуватися без використання складних маніпуляцій з боку оператора.

З врахуванням цих задач приходимо до функціональної схеми оптичної системи, що зображена у додатку В. Основним елементами оптичної системи є об'єктив, діафрагма, коліматор, увігнута дифракційна ґратка та два плоских дзеркала 1 і 2. За допомогою плоского дзеркала 1 пучок паралельних променів від лазера спрямовується вздовж оптичної осі засобу для контролю вмісту хлорофілу так, що вісь пучка співпадає з оптичною віссю пристрою.

Оскільки випромінювання лазера характеризується високою спрямованістю, це забезпечує розташування освітлювальної ділянки симетрично до оптичної осі. Під дією лазерного променя на цій ділянці виникає випромінювання флуоресценції, яке потрапляє у вхідну частину оптичної системи.

Основним завданням вхідної частини оптичної системи засобу для контролю вмісту хлорофілу є створення потоку паралельних променів флуоресценції перед дифракційною ґраткою. Це завдання вирішується за допомогою об'єктива, вхідної щілини та коліматора. Випромінювання флуоресценції потрапляє в об'єктив, що створює дійсне зображення джерела випромінювання (опромінена лазером ділянка на рослині, в якій виникає флуоресценція) на кінцевій відстані від нього. Площина дійсного зображення об'єктива співпадає з передньою фокальною площиною коліматора. В ідеальному випадку зображення джерела, створюване об'єктивом, повинно бути у вигляді точки. За цієї умови на виході коліматора отримується потік променів, паралельних оптичній осі.

Лазерне випромінювання може бути сфокусоване у дуже вузький пучок, що полегшує задачу отримання точкового зображення. Проте, для розглядуваної сфери застосування діаметр світлової плями на рослині, а значить і діаметр пучка, повинен мати кінцеві розміри. Чим більша освітлювальна ділянка, тим більше клітин рослини поглинають випромінювання і тим більша інтенсивність флуоресценції. З іншого боку, чим більше площина джерела випромінювання, тим складніше отримати його зображення у вигляді точки.

Задача отримання точкового джерела випромінювання на вході коліматора вирішується за допомогою щілини, отвір якої розташовується у передньому фокусі коліматора. Завдяки цьому промені, що спрямовуються об'єктивом на отвір щілини, після коліматора утворюють потік променів, паралельних оптичній осі приладу. Крім того, що щілина формує гомоцентричний пучок променів з центром у передньому фокусі коліматора,

вона не дає проникнути променям, які потрапляють в об'єктив з точок простору предметів, що знаходяться за межами зони, в якій відбувається флуоресценція. У результаті цього знижується рівень паразитних засвітлень.

Потік паралельних світлових променів, сформований коліматором, спрямовується за допомогою плоского дзеркала 2 на диспергуючий елемент для просторового розкладання по спектральним інтервалам. У даній розробці для розкладання випромінювання у спектр використовується відбивальна увігнута дифракційна ґратка. Перевага відбивальних ґраток полягає у тому, що випромінювання не проходить крізь матеріал ґратки, який має різну прозорість у різних областях спектру. Використання, крім того, увігнутої ґратки дає змогу обійтися без фокусуєчих елементів. Це зменшує габарити та вагу пристрою, а також сприяє зниженню втрат інтенсивності оптичного сигналу.

Дифракційна ґратка проекцією розкладене нею по спектральним інтервалам світло на лінійку фотоприймачів, яка розташована у фокальній площині ґратки. У кожній точці цієї площини збираються проміні, які зазнають однакової дифракції на штрихах решітки. Оскільки кут дифракції променів залежить від довжини світлової хвилі, у кожній точці на лінійці фотоприймачів спостерігаються інтерференційні максимуми для випромінювання певної довжини хвилі. У результаті цього кожний елемент лінійки перетворює інтенсивність світлового потоку певного спектрального інтервалу в електричний сигнал. Кількість елементів у лінійці поряд з характеристиками дифракційної ґратки визначає роздільну здатність приладу.

4.3 Алгоритм управління із зворотним зв'язком

Алгоритм управління із зворотним зв'язком безпосередньо залежить від порівняння фітопотоків сонячної радіації з базою даних [28]. Адаптивна

система в автоматичному режимі за таким способом має забезпечувати його роботу.

Крім того, система повинна визначати рівень сонячної радіації. Зчитувати необхідні режими роботи фітосвітильника з бази даних. Встановлювати по світловому потоку режими роботи фітосвітильника. Коригувати відповідно до змін режим та рівні роботи фітосвітильника.

Аналіз реалізацій системи моніторингу показав можливість її використання в різні пори року за будь-яких погодних умов.

За різних погодних умов та в безперервному режимі у листопаді показані рівні сонячного випромінювання. Спостерігається найбільша різниця у рівнях сонячної радіації, які вимірюються у світлий час доби. Ці відмінності пов'язані з атмосферним розсіюванням та поглинанням.

Рівні сонячної радіації в залежності від різних природних умов показано на рисунку 4.1.

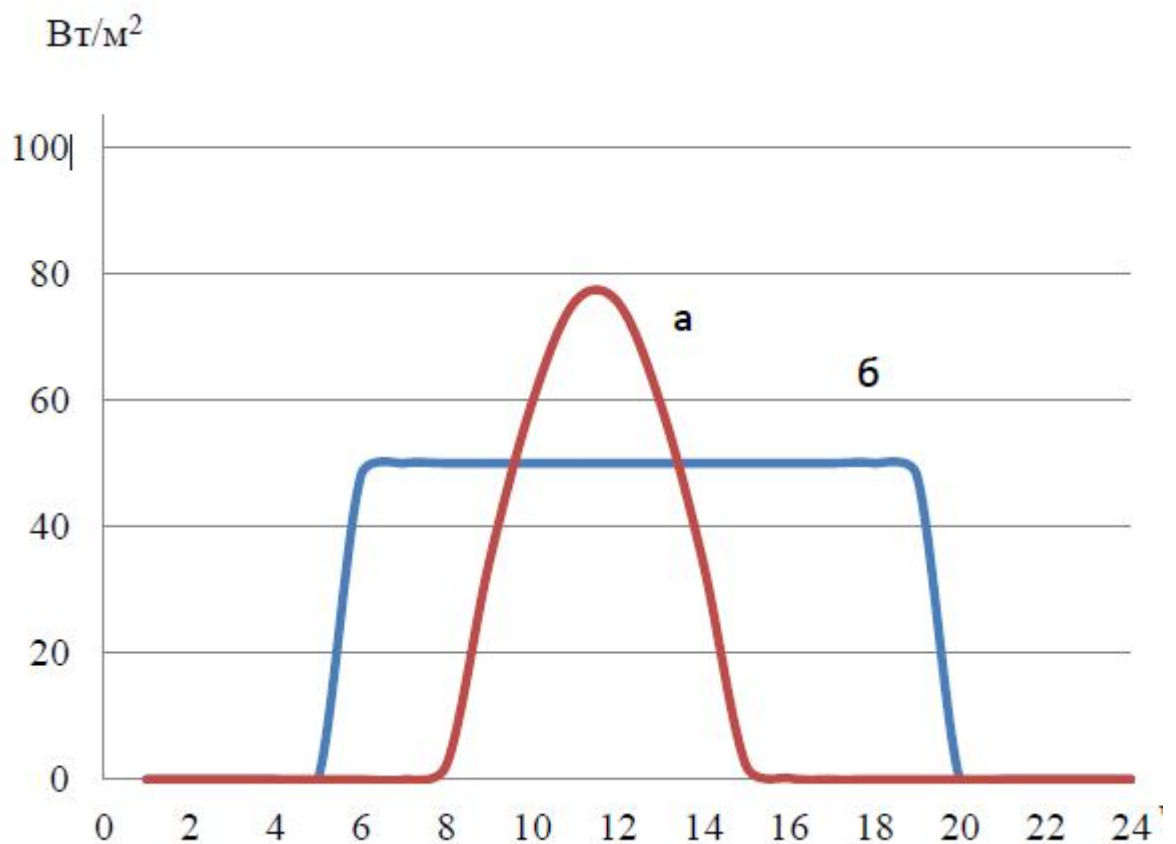


Рисунок 4.1 - Динаміка прямої (а) та розсіяної (б) сонячної радіації (Вт/м²)

У ясну сонячну погоду основна частка – це пряма сонячна радіація. У похмуру погоду відповідно весь світ буде дифузно розсіяний. Звідси, у зимовий час частка штучного освітлення має бути досить високою. У теплу пору року необхідність керувати потоками випромінювання можлива лише через сильну зміну погодних умов.

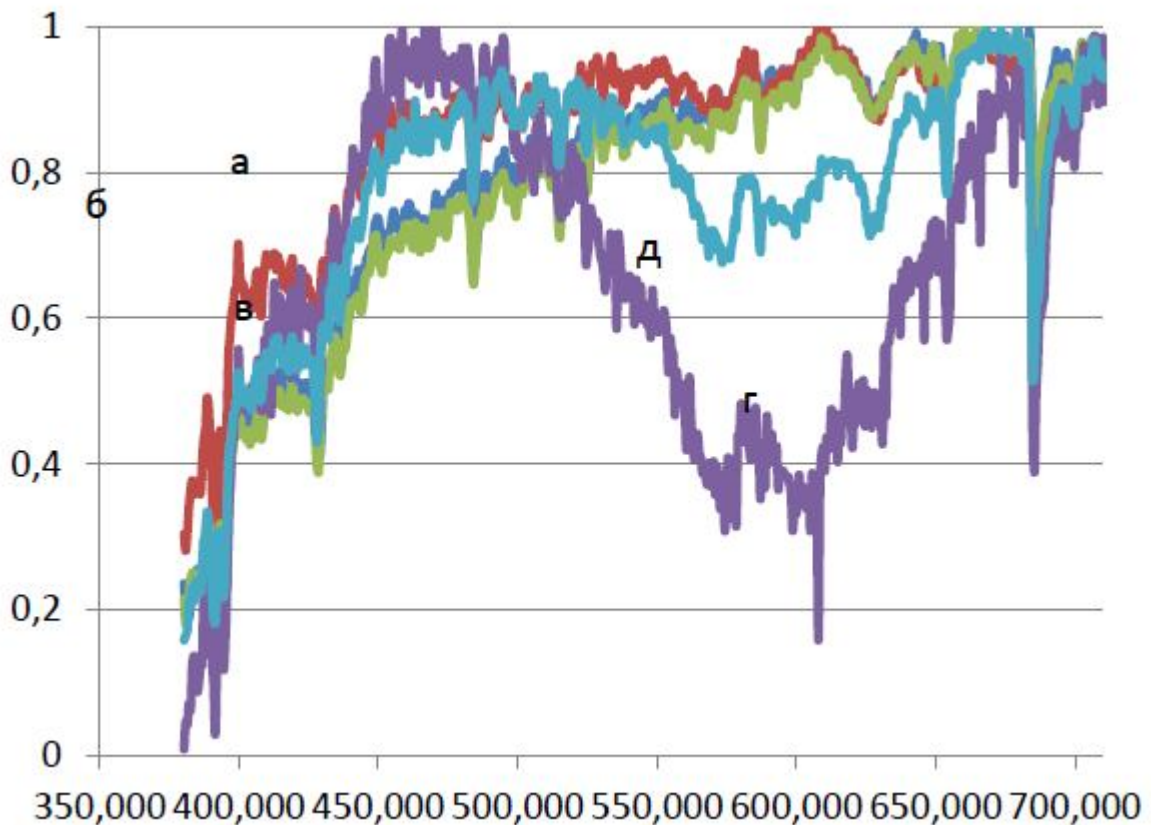


Рисунок 4.2 - Спектри сонячної радіації у різні погодні умов та часи доби

Таким чином, спосіб організації системи із зворотним зв'язком для закритих приміщень у системі освітлення має бути обов'язковим. Таким чином, основна система зворотного зв'язку дозволяє бути найбільш оперативною для вимірювань у реальному часі.

Відповідно необхідний датчик освітленості, який проводить вимірювання в теплиці поточних значень сонячної радіації випромінювання.

Датчик повинен проводити вимірювання у діапазоні (380-750 нм) з точністю не менше 7%.

Для такого датчика випромінювань потрібна наявність цифрового інтерфейсу для передачі даних. Період опитування датчиків моніторингу освітлень не рідше одного разу на кілька секунд.

Вибрано квантовий мікродатчик MQS-B. Це датчик, який вимірює фотосинтетично активну радіацію (ФАР). Діапазон вимірів 400 – 700 нм.



Рисунок 4.3 - Датчик US-MQS/B

Датчик збирає інформацію про значення густини фотосинтетичного фотонного потоку. Тобто про потік фотонів, що падають на освітлену поверхню аркуша з одного боку. Промені не перпендикулярні поверхні листа визначаються косинусом їхнього кута до нормалі. У цьому датчику використовується пластиковий дифузор. Це знижує помилку кутового відгуку до прийнятного рівня. У районі трохи більше 4% при кутах від -80° до 80° . Датчик MQS-B складається з самого датчика освітленості, а також кабелю довжиною та конектор типу BNC. Це дозволяє підключати датчик до

реєстратора даних ULM-500. Мікродатчик MQS-B також може бути у версіях US-MQS/B та US-MQS/WB.

4.4 Моніторинг на основі оптичних методів контролю стану рослин

В основі будь-якої системи керування лежать сигнали. У нашому випадку повинні бути оптичні сигнали, які за допомогою приймачів перетворюються на електричні. Проблема у виборі та реєстрації сигналів від рослини, яка перетворюється на оптичний. Ланцюжок такий: оптичний сигнал – фотохімічний сигнал – оптичний – електричний.

В якості основи управління можуть бути взяті оптичні характеристики рослин, наприклад поглинання, відображення або люмінесценція. Основне завдання в тому, що необхідно встановити зв'язок між цими параметрами та швидкістю фотосинтезу.

Наразі вивчені спектри поглинання та відображення різних пігментів у рослинах. На основі значень цих параметрів можна визначити процеси фотосинтетичної активності. Вони пов'язані з фітомасою рослинності. За спектрами поглинання хлорофілу можна визначити його кількість у рослині. Найінформативнішим є індекс NDVI. Він може бути розрахований при вимірі спектрів відображення у червоному (0,55-0,75 мкм) та інфрачервоному діапазонах (0,75-1,0 мкм) [52].

Також розроблені методики для визначення за спектрами відображення та поглинання листя рослин про накопичуваний хлорофіл у рослинах. Це свідчить про низку процесів у рослині, які залежать від зовнішніх умов освітлення.

Аналіз показує, що такі методи безінвазивного контролю стану розвитку рослин можуть зараз бути використані як додатковий спосіб вимірювання. Так як використання спектрів відображення це метод у

реальному часі і за його допомогою можна коригувати освітленість лише через проміжки часу.

Результати світових досліджень дають змогу говорити про перспективність такого підходу. Оскільки всі ці розглянуті процеси конкурують один з одним, то можна аналізуючи флуоресценцію хлорофілу в рослини, можна дізнатися про здоров'я рослини та інтенсивність фотосинтезу. Кінетика люмінесценції залежить від інтенсивності та тривалості випромінювання. Вона має складний характер. Який визначається процесами транспорту електронів у фотосинтетичному апараті рослини.

В даний час оптичними методами активно вивчаються процеси, які у фотосинтетичному апараті рослин. У тому числі механізми, що викликають стресові стани рослин через багато зовнішніх факторів. Дослідження виявляє реакції рослин на постійні зміни кількості та спектру падаючої радіації і які можна використовувати для організації зворотного зв'язку в адаптивних системах опромінення рослин.

5 РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Як було зазначено у попередньому підрозділі випромінювання флуоресценції надходить в оптичну систему засобу для контролю вмісту хлорофілу через об'єктив. По суті об'єктив у цій системі виконує роль конденсора – створює зображення джерела випромінювання, яким є поверхня, в якій виникає флуоресценція, у площині вхідної зіниці наступної частини оптичної системи, роль якої виконує щілина, що розташовується у передній фокальній площині коліматора. Розрахунок параметрів об'єктива будемо здійснювати за методикою розрахунку конденсорів, яка наведена у [44].

1. Визначасмо необхідне лінійне збільшення об'єктива:

$$\beta = \frac{D_{зоб}}{D_{дж}}, \quad (5.1)$$

де $D_{зоб}$ – діаметр зображення джерела випромінювання;

$D_{дж}$ – діаметр джерела випромінювання.

Враховуючи показники аналогів, прийmemo, що діаметр ділянки рослинної тканини, в якій виникає флуоресценція і яка визначається діаметром лазерного променя, що падає на рослин, складає 8 мм. Приймемо, також, що діаметр отвору щілини не повинен бути більшим за 1 мм. Тоді на основі виразу (3.1) з врахуванням того, що отримуване зображення є дійсним перевернутим, для лінійного збільшення об'єктива отримаємо:

$$\beta = -\frac{1}{8} = -0,125.$$

2. Вибираємо діаметр об'єктива. Оскільки прилад повинен бути портативним, приймаємо, що діаметр об'єктива не повинен перевищувати 50 мм. Вибираємо діаметр об'єктива $D = 45$ мм.

3. Розраховуємо кути падіння нульового променя на заломлювані поверхні лінз об'єктива:

для непарних кутів

$$\operatorname{tg}\alpha_i = \frac{i-1+(m-i+1)\cdot\beta}{m}, \quad (5.2)$$

для парних кутів

$$\operatorname{tg}\alpha_i = \frac{2n+1}{n+2} \cdot \frac{i-1+(m-i+1)\cdot\beta}{m}, \quad (5.3)$$

де i – номер заломлюваної поверхні;

m – кількість заломлюваних поверхонь.

n – показник заломлення середовища, що обмежується i -ою поверхнею;

β – лінійне збільшення об'єктива.

Для зменшення хроматизму положення як матеріал лінз вибираємо оптичне скло типу "крон". Серед "кронів" вибираємо матеріал SK10, показник заломлення якого дорівнює $n = 1.622801$ і є одним серед найбільших для скла цього типу. Це дозволить зменшити повздовжні габаритні розміри оптичної системи.

Об'єктив будемо реалізовувати за дволінзовою схемою, оскільки вона за порівнянням з однолінзовою характеризується більшим кутом охоплення та меншими аберациями. Таким чином $m = 4$. За формулами (3.2) та (3.3) визначасмо тангенси кутів падання нульового променя на заломлювані поверхні:

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{1-1+(4-1+1)\cdot(-0,125)}{4} = -0,125;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{2 \cdot 1,622801 + 1}{1,622801 + 2} \cdot \frac{2 - 1 + (4 - 2 + 1) \cdot (-0,125)}{4} = 0,183;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_3 = \frac{3 - 1 + (4 - 3 + 1) \cdot (-0,125)}{4} = 0,438;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_4 = \frac{2 \cdot 1,622801 + 1}{1,622801 + 2} \cdot \frac{4 - 1 + (4 - 4 + 1) \cdot (-0,125)}{4} = 0,842;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_5 = \frac{5 - 1 + (4 - 5 + 1) \cdot (-0,125)}{4} = 1,0.$$

4. Визначаємо радіуси кривизни заломлюваних поверхонь:

$$r_i = h_i \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} \cdot \operatorname{tg}\alpha_{i+1} - n_i \cdot \operatorname{tg}\alpha_i}, \quad (5.4)$$

де h_i – висота падіння нульового променя на головну площину i -ої поверхні;

n_i – показник заломлення.

Враховуючи те, що для більшості заломлюваних поверхонь головна площина знаходиться по ходу променів за поверхнею, висоті падіння променя на головну площину поверхні не повинна бути меншою за половину діаметра об'єктива, тобто не меншою за $45/2 = 22,5$ мм. Для усіх поверхонь у першому наближенні приймаємо h_i однаковою та рівною 30 мм. Тоді

$$r_1 = 30 \cdot \frac{1,622801 - 1}{1,622801 \cdot 0,183 - 1 \cdot (-0,125)} = 44,259 \text{ (мм)};$$

$$r_2 = 30 \cdot \frac{1 - 1,622801}{1 \cdot 0,438 - 1,622801 \cdot 0,183} = -133,127 \text{ (мм)};$$

$$r_3 = 30 \cdot \frac{1,622801 - 1}{1,622801 \cdot 0,842 - 1 \cdot 0,438} = 20,103 \text{ (мм)};$$

$$r_4 = 30 \cdot \frac{1 - 1,622801}{1 \cdot 1,0 - 1,622801 \cdot 0,842} = 50,924 \text{ (мм)};$$

5. Визначаємо товщини лінз. Для визначення товщини лінз по осі скористаємося рис. 5.1. Як видно з рисунку, для i -ої сферичної поверхні, що має радіус кривизни r_i , довжина відрізка a_i вздовж оптичної осі, який є однією з частин товщини лінзи по осі, дорівнює:

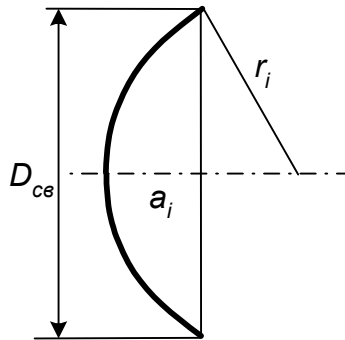


Рисунок 5.1 – Схема для визначення товщини лінзи по осі

$$a_i = |r_i| - \sqrt{r_i^2 - \frac{D_{св}^2}{4}},$$

або

$$a_i = |r_i| - \sqrt{r_i^2 - h^2}, \quad (5.5)$$

де $D_{св} = 2h$ – світловий діаметр лінзи;

h – висота падіння нульового променя на головну площину.

Для першої лінзи підходить умова $r_i > 0$, $r_{i+1} < 0$, тому її товщина по осі на основі виразу (3.5) буде дорівнювати:

$$d_1 = |r_1| + |r_2| - \sqrt{r_1^2 - h^2} - \sqrt{r_2^2 - h^2};$$

$$d_1 = 44,259 + 133,127 - \sqrt{44,259^2 - 30^2} - \sqrt{133,127^2 - 30^2} = 15,143 \text{ (мм)}.$$

Для зменшення поздовжніх розмірів системи необхідно, щоб фокусна відстань об'єктива була якомога меншою. Для системи з двох позитивних лінз найменше значення фокусної відстані досягається при відстані між лінзами, що дорівнює нулю. Отже:

$$d_2 = 0 \text{ (мм)}.$$

Радіус першої поверхні другої лінзи виявився меншим за прийняту висоту падіння нульового променя h . Тому при визначенні її товщини висоту падіння нульового променя на неї приймемо рівною 20 мм. Оскільки для другої лінзи підходить умова $r_i > 0$, $r_{i+1} > 0$, тому її товщина по осі буде дорівнювати:

$$d_3 = |r_3| - |r_4| - \sqrt{r_3^2 - h^2} + \sqrt{r_4^2 - h^2};$$

$$d_3 = 20,103 + 50,924 - \sqrt{20,103^2 - 20^2} - \sqrt{50,924^2 - 20^2} = 13,977 \text{ (мм)}.$$

6. Уточнюємо висоти падіння нульового променя на головні площини лінз:

$$h_{i+1} = h_i - tg_{i+1} \cdot d_i. \quad (5.6)$$

Для уточнюючих розрахунків висоту падіння променя приймаємо рівною половині прийнятого діаметра першої лінзи об'єктива, тобто рівною 22,5 мм. З врахуванням цього за виразом (5.6) знаходимо висоти падіння нульового променя на головні площини заломлюваних поверхонь об'єктива:

$$h_1 = 22,5 \text{ (мм)},$$

$$h_2 = 22,5 - 0,183 \cdot 15,143 = 19,729 \text{ (мм)},$$

$$h_3 = 19,729 - 0,438 \cdot 0 = 19,729 \text{ (мм)},$$

$$h_4 = 19,729 - 0,842 \cdot 13,977 = 7,96 \text{ (мм)},$$

7. Перераховуємо радіуси кривизни заломлюваних поверхонь:

$$r_1 = 22,5 \cdot \frac{1,622801 - 1}{1,622801 \cdot 0,183 - 1 \cdot (-0,125)} = 33,194 \text{ (мм)};$$

$$r_2 = 19,729 \cdot \frac{1 - 1,622801}{1 \cdot 0,438 - 1,622801 \cdot 0,183} = -87,549 \text{ (мм)};$$

$$r_3 = 19,729 \cdot \frac{1,622801 - 1}{1,622801 \cdot 0,842 - 1 \cdot 0,438} = 13,221 \text{ (мм)};$$

$$r_4 = 7,96 \cdot \frac{1 - 1,622801}{1 \cdot 1,0 - 1,622801 \cdot 0,842} = 13,512 \text{ (мм)};$$

Отже основними конструктивними параметрами розрахованого об'єктива є такі: $r_1 = 33,194$ мм, $r_2 = -87,549$ мм, $r_3 = 13,221$ мм, $r_4 = 13,512$ мм, $d_1 = 15,143$ мм, $d_2 = 0$ мм, $d_3 = 13,977$ мм, $n_1 = n_3 = 1,622801$, $n_2 = 1$.

Використовуючи програму по розрахунку оптичних систем OSLO EDU, визначимо основні параксіальні параметри розрахованого об'єктива. На рис. 5.2 зображено вікно з вхідними даними для розрахунку.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	100.000000	4.000000	AIR	
AST	33.194000	15.143000	22.500000	SK10	C
2	-87.540000	0.000000	22.500000	AIR	
3	13.221000	13.977000	13.221000	SK10	C
4	13.512000	0.000000	8.000000	AIR	
IMS	0.000000	13.000000	2.911104	S	

Рисунок 5.2 – Вхідні дані для параксiального аналізу об'єктива

Результати розрахунку основних оптичних параметрів об'єктива наведені на рис. 5.3. Отже, основні параксiальні параметри розрахованого об'єктива:

Фокусна відстань	19,734232 мм.
Положення передньої головної точки	-2,373494 мм.
Положення задньої головної точки	-14,246516 мм.

Зображення об'єктива, отримане за допомогою програми OSLO EDU наведено на рис.5.4.

```

*PARAXIAL SETUP OF LENS
APERTURE
Entrance beam radius: * 18.000000      Image axial ray slope: -0.710471
Object num. aperture:  0.177153      F-number: 0.548173
Image num. aperture:   0.699234      Working F-number: 0.715068
FIELD
Field angle:           -2.290610      Object height: * 4.000000
Gaussian image height: -1.013412      Chief ray ims height: -1.126002
CONJUGATES
Object distance:      100.000000      Srf 1 to prin. pt. 1: -2.373494
Gaussian image dist.: 10.487440      Srf 4 to prin. pt. 2: -14.246516
Overall lens length:  29.120000      Total track length: 142.120000
Paraxial magnification: -0.253353      Srf 4 to image srf: 13.000000
OTHER DATA
Entrance pupil radius: 18.000000      Srf 1 to entrance pup.: --
Exit pupil radius:    16.067513      Srf 4 to exit pupil: -12.127841
Lagrange invariant:  0.720000      Petzval radius: -60.346364
Effective focal length: 19.734232
SPOT DIAGRAMS

```

Рисунок 5.3 – Основні оптичні параметри об'єктива

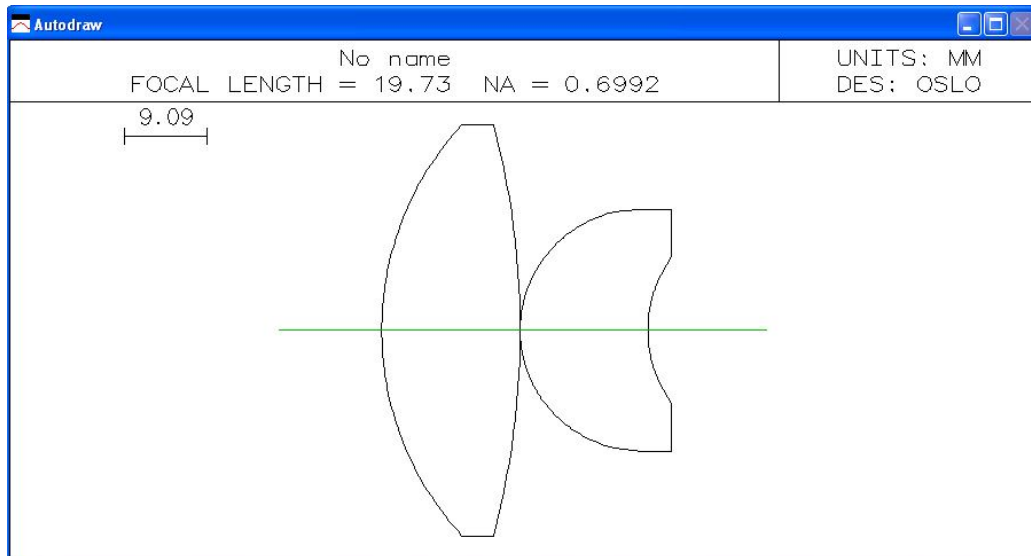


Рисунок 5.4 – Оптична схема об'єктива

В якості коліматора обираємо таку саму лінзу, як і перша лінза об'єктива. Проте розташовувати її будемо так, що заломлювана поверхня з більшим радіусом кривизни знаходилася з боку вхідної щілини. Вікно з вхідними даними для розрахунку параметрів лінзи коліматора наведено на рис. 5.5. Результати розрахунку основних оптичних параметрів коліматора наведені на рис. 5.6.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	100.000000	4.000000	AIR	
AST	87.540000	15.143000	22.500000	SK10	C
2	-33.194000	0.000000	22.500000	AIR	
IMS	0.000000	13.000000	15.453464	S	

Рисунок 5.5 – Вхідні дані для параксiального аналізу коліматора

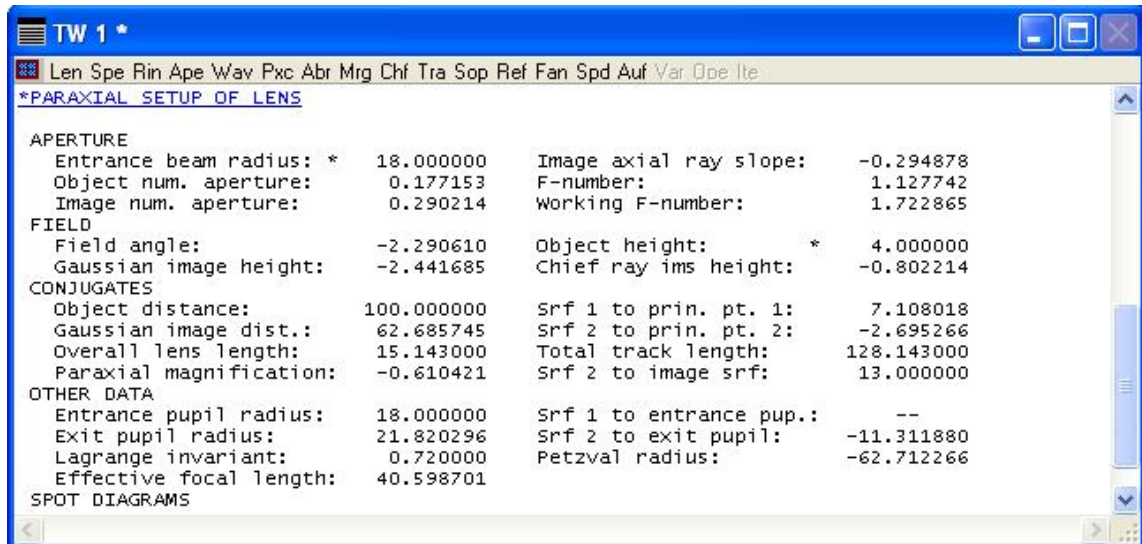


Рисунок 5.6 – Основні оптичні параметри коліматора

Отже, основні параксіальні параметри лінзи коліматора:

Фокусна відстань	40,598701 мм.
Положення передньої головної точки	7,108018 мм.
Положення задньої головної точки	-2,695266 мм.

Для того, щоб на виході коліматора отримати пучок паралельних променів, його передній фокус повинен розташовуватися у площині вхідної щілини, яка є площиною дійсного зображення джерела флуоресценції, створюваного об'єктивом. Виходячи з цієї умови відстань між останньою поверхнею об'єктива та передньою поверхнею коліматора дорівнює:

$$\Delta = f'_{OB} + f'_K + s_{F'OB} - s_{FK}; \quad (5.7)$$

де f'_{OB} – фокусна відстань об'єктива;

f'_K – фокусна відстань коліматора;

$s_{F'OB}$ – задній фокальний відрізок об'єктива;

s_{FK} – передній фокальний відрізок коліматора.

Використовуючи результатами розрахунку основних параксіальних

параметрів об'єктива та коліматора, за формулою (3.7) отримаємо:

$$\Delta = 19,734232 + 40,598701 - 14,246516 - 7,108018 = 38,906237 \text{ (мм)}.$$

Об'єднуючи вхідні файли для розрахунку об'єктива та коліматора, з врахуванням значення Δ , отримуємо вхідний файл для дослідження ходу променів через оптичну систему флуорометра. Оптична схема об'єктива та коліматора наведена у Додатку. Результати моделювання ходу променів через об'єктив та коліматор, отримані за допомогою програми OSLO EDU, зображені на додатку 3. Отримані результати відповідають випадку, коли відстань до джерела флуоресценції складає 100 мм. Як видно на виході коліматора отримується пучок паралельних променів, що підтверджує вірність проведених розрахунків.

Для збудження флуоресценції доцільно використати лазерний діод з довжиною хвилі випромінювання 480 нм. Для отримання значень інтенсивностей спектральних ліній флюоресценції необхідний матричний фотоприймач з областю оптичної чутливості від 360 нм до 1000 нм. Виконання передбачених у розроблюваному засобі функцій може бути забезпечено 8-ми бітним RISC мікроконтролером ATmega16.

Покращення функціональних характеристик засобу для контролю вмісту хлорофілу може бути досягнуто за рахунок збільшення частки світлового потоку флюоресценції, що сприймається його оптичною системою. З врахуванням того, що випромінювання флуоресценції повинно бути перетворене у потік паралельних променів перед дифракційною ґраткою, це завдання може бути вирішено за рахунок використання оптичної системи, що складається з об'єктива та коліматора.

Результати моделювання ходу променів через оптичну систему об'єктив-коліматор підтвердили вірність розрахунку основних конструктивних параметрів об'єктива та окуляра.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Проведення наукового аудиту науково-дослідної роботи

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації.

В даному випадку розробка оптико-електронного методу та засобу для контролю вмісту хлорофілу рослин характеризується відносно новим рівнем і становить – 40%.

Рівень теоретичного опрацювання за темою дослідження передбачає розробку оптико-електронного методу та засобу для контролю вмісту хлорофілу рослин і відповідно становить – 50%.

Показник, який характеризує науковий ефект, визначається за формулою:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,4 = 0,04,$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ – показники ступенів новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, бали; 0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

Відповідно до граничних значень показників наукового ефекту розробка характеризується достатнім рівнем новизни.

Проведення комерційного та технологічного аудиту оптико-електронного методу та засобу для контролю вмісту хлорофілу рослин.

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності, тобто під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

Для проведення комерційного та технологічного аудиту залучаємо 3-х незалежних експертів, якими є провідні викладачі випускової або спорідненої кафедри. Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу здійснюємо із застосуванням п'ятибальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, а результати зводимо до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати оцінювання науково-технічного рівня

Критерії	Експерти		
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
	Бали, виставлені експертами		
Технічна здійсненність концепції	2	2	2
Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	3	3
Ринкові переваги (ціна продукту)	4	2	3
Ринкові переваги (технічні властивості)	3	2	2
Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	2
Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	2
Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	3
Практична здійсненність (наявність фахівців)	2	3	2
Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	3	3
Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	3	2
Практична здійсненність (термін реалізації)	3	3	2
Практична здійсненність (розробка документів)	2	2	2
Сума балів	32	30	28
Середньоарифметична сума балів, СБ	30		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 1 робимо висновок про те, щ науково-технічний рівень та комерційний потенціал оптико-електронного методу та засобу для контролю вмісту хлорофілу рослин – середній.

6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_0) розраховують відповідно до посадових окладів працівників, за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t,$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.; T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21...23)$ дні; t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 2.

Таблиця 6.2 – Витрати на заробітну плату дослідників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	500	5	2500
Програміст	10000	5000	5	2500
Тестувальник	6000	300	5	1500
Всього:				6500

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i,$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год; t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}},$$

де M_m – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн; K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду; K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати; T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21...23$ дні; $t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 6.3 – Витрати на заробітну плату робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Налагодження	3	4	88,4	1,5	265,2
Тестування	4	4	88,4	1,5	353,6
Всього					618,8

Додаткова заробітна плата.

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Зд = 0,1 \cdot (Зо + Зр) = 0,1 \cdot (6500 + 618,8) = 7119 \text{ грн.}$$

6.3 Відрахування на соціальні заходи.

Нарахування на заробітну плату Нзп розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (Зо + Зр + Зд) = \\ &= 0,22 \cdot (6500 + 618,8 + 7119) = 3132 \text{ грн.} \end{aligned}$$

де Зо – основна заробітна плата розробників, грн.; Зр – основна заробітна плата робітників, грн.; Зд – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.; β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Витрати на сировину та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{Bj},$$

де N_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг; n – кількість видів матеріалів; $Ц_j$ – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг; K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$); V_j – маса відходів j -го найменування, кг; $Ц_{vj}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Таблиця 6.4 – Матеріали, що використовуються при розробці

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Флюс ФКСН	4	0,05	2
Склотекстоліт FR4, фольгований двосторонній, товщина 0.2 мм, товщина металізації 18мкм/18мкм	40	1	40
Припой ПОС-40	60	0,5	30
З врахуванням коефіцієнта транспортування			83

Розрахунок витрат на комплектуючі.

Таблиця 6.5 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування	Ціна, грн.	Витрачено, шт.	Вартість, грн
Перетворювач інтерфейсів USB/RS-232i	350	1	350
Рідкокристалічний індикатор BOLYMIN BC 1602A YPLEH	150	1	150
Фотодіодна лінійку Hamamatsu	2999	1	2999

CMOS Linear Image Sensor			
Модуль EEPROM AT24C512BN	28	1	28
Мікроконтроллер ATmega16- 16AU	180	1	180
Всього з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат	4264		

Витрати на комплектуючі K , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_i \cdot K_i,$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1, 1 \dots 1, 15)$; n – кількість видів комплектуючих.

6.4 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування, верстатів, пристроїв, інструментів, приладів, стендів, апаратів, механізмів, іншого спецобладнання, необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Вартість спецустаткування визначається за прейскурантом гуртових цін або за даними базових підприємств за відпускними і договірними цінами. До балансової вартості устаткування окрім прейскурантної вартості входять витрати на його транспортування і монтаж, тому ці витрати беруться додатково в розмірі 10...12% від вартості устаткування.

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

$$\text{Вспец} = \sum_{i=1}^k \text{Ці} \cdot \text{Сі} \cdot \text{Кі},$$

де Ці – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн; Сі – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.; Кі – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$); k – кількість найменувань устаткування.

Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Таблиця 6.6 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість спецустаткування, грн
Лазерний станок GLMaster 4040 40 Вт поле 400x400 мм CO2	15000	1	15000
Всього			15000

До балансової вартості програмного забезпечення входять витрати на його інсталяцію, тому ці витрати беруться додатково в розмірі 10...12% від вартості програмного забезпечення.

Таблиця 6.7 – Програмне забезпечення

Найменування програмного забезпечення	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість програмного забезпечення, грн
---------------------------------------	-----------------------	-----------	--

Chlorolight	1200	1	1200
Всього			1200

Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$В_{\text{прг}} = \sum_{i=1}^k Ц_{\text{іпрг}} \cdot С_{\text{пргі}} \cdot k_i,$$

де $Ц_{\text{іпрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу цього виду, грн;
 $С_{\text{пргі}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.; k_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($k_i = 1, 10 \dots 1, 12$); k – кількість найменувань програмних засобів.

6.5 Амортизація обладнання

Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування A в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t}{12}$$

де $Ц_б$ – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.; t – термін використання основного фонду, місяці; $T_в$ – термін корисного використання основного фонду, роки.

Таблиця 8 – Амортизаційні відрахування за видами основних фондів

Найменування	Балансова вартість, грн.	Строк корисного використання, роки	Термін використання, м.	Сума амортизації, грн.
ПК	7000	5	3	350

Всього	350
--------	-----

6.6 Витрати на електроенергію для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію Ve , якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$Ve = \sum \frac{Wi \cdot ti \cdot Ce \cdot Kвпi}{ККД} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 4,52 \cdot 0,4}{0,97} = 3728 \text{ грн.},$$

Wi – встановлена потужність обладнання, кВт; ti – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год.; Ce – вартість 1 кВт електроенергії, грн.; $Kвпi$ – коефіцієнт використання потужності; $ККД$ – коефіцієнт корисної дії обладнання.

В даному випадку працює лише ПК із наступними параметрами: потужність ПК – 2 кВт, тривалість роботи ПК – 1000 годин, $ККД$ – 0,97, $Kвпi$ – 0,4. Вартість 1 кВт електроенергії за даними енергопостачальної компанії у 2021 році становить 4,52 грн.

6.7 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуються як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Iв = (Зo + Зр) \cdot \frac{Нiв}{100\%} = (6500 + 618,8) \cdot \frac{60}{100} = 4271 \text{ грн.},$$

де $Нiв$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуються як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$\mathbf{Внзв} = (\mathbf{Зо} + \mathbf{Зр}) \cdot \frac{\mathbf{Ннзв}}{100\%} = (6500 + 618,8) \cdot \frac{150}{100} = 10678 \text{ грн.},$$

де Ннзв – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати».

6.8 Витрати на проведення науково-дослідної роботи

Витрати на проведення науково-дослідної роботи розраховуються як сума всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$\begin{aligned} \mathbf{Взаг} &= \mathbf{Зо} + \mathbf{Зр} + \mathbf{Здод} + \mathbf{Зм} + \mathbf{М} + \mathbf{Кв} + \mathbf{Вспец} + \mathbf{Впрг} + \mathbf{Аобл} + \mathbf{Ве} + \\ &+ \mathbf{Всв} + \mathbf{Всп} + \mathbf{Ів} + \mathbf{Внзв} = \\ &= 6500 + 618,8 + 7119 + 3132 + 83 + 4264 + 15000 + 1200 + 350 + 3728 \\ &+ +0 + 4271 + 10678 = 56944 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Загальні витрати ЗВ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$\mathbf{ЗВ} = \frac{\mathbf{Взаг}}{\eta} = \frac{56944}{0,4} = 142360 \text{ грн.},$$

де η – коефіцієнт, що характеризує етап виконання науково-дослідної роботи. Так, якщо науково-технічна розробка знаходиться на стадії: науково-дослідних робіт, то $\eta = 0,1$; технічного проектування, то $\eta = 0,2$; розробки

конструкторської документації, то $\eta = 0,3$; розробки технологій, то $\eta = 0,4$; розробки дослідного зразка, то $\eta = 0,5$; розробки промислового зразка, то $\eta = 0,7$; впровадження, то $\eta = 0,9$.

6.9 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

В даному випадку відбувається розробка оптико-електронного методу та засобу для контролю вмісту хлорофілу рослин, тому основу майбутнього економічного ефекту буде формувати: ΔN – збільшення кількості споживачів, яким надається відповідна інформаційна послуга в аналізовані періоди часу; N – кількість споживачів, яким надавалась відповідна інформаційна послуга у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки; C_0 – вартість послуги у році до впровадження інформаційної системи; $\pm \Delta C_0$ – зміна вартості послуги (зростання чи зниження) від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізовані періоди часу.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_0 \cdot N + C_0 \cdot \Delta N_i) \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right),$$

де $\pm \Delta C$ – зміна основного якісного показника від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізованому році. Зазвичай, таким показником може бути зміна ціни реалізації одиниці нової розробки в

аналізованому році (відносно року до впровадження цієї розробки); $\pm\Delta Ц$ може мати як додатне, так і від'ємне значення (від'ємне – при зниженні ціни відносно року до впровадження цієї розробки, додатне – при зростанні ціни); N – основний кількісний показник, який визначає величину попиту на аналогічні чи подібні розробки у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки; $Ц_0$ – основний якісний показник, який визначає ціну реалізації нової науково-технічної розробки в аналізованому році; $Ц_б$ – основний якісний показник, який визначає ціну реалізації існуючої (базової) науково-технічної розробки у році до впровадження результатів; ΔN – зміна основного кількісного показника від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізованому році. Зазвичай таким показником може бути зростання попиту на науково-технічну розробку в аналізованому році (відносно року до впровадження цієї розробки); λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2021 році ставка податку на додану вартість становить 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$; ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту (послуги). Рекомендується брати $\rho = 0,2 \dots 0,5$; ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2021 році $\vartheta = 18\%$.

Очікуваний термін життєвого циклу розробки 3 роки, тому:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= (-50000 \cdot 100 + 100000 \cdot 100) \cdot 0,8333 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = \\ &= 1024959 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Далі розраховують приведену вартість збільшення всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

$$\text{ПП} = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i} = \frac{1024959}{(1 + 0,1)^3} + \frac{9563986}{(1 + 0,1)^2} + \frac{7642927}{(1 + 0,1)^1} = 15622303 \text{ грн.,}$$

де $\Delta\Pi$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн.; T –

період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки; τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,05 \dots 0,15$; t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

Далі розраховують величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки. Для цього можна використати формулу:

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B = 2 \cdot 142360 = 284720 \text{ грн.}$$

де k – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо; зазвичай $k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$, але може бути і більшим; $3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, грн.

Тоді абсолютний економічний ефект $E_{\text{абс}}$ або чистий приведений дохід для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 15622303 - 284720 = 15337583 \text{ грн.},$$

де ПП – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, грн.; PV – теперішня вартість початкових інвестицій, грн.

Оскільки $E_{\text{абс}} > 0$, то можемо припустити про потенційну зацікавленість інвесторів у розробці.

Для остаточного прийняття рішення з цього питання необхідно розрахувати внутрішню економічну дохідність $E_{\text{в}}$ або показник внутрішньої норми дохідності вкладених інвестицій та порівняти її з так званою бар'єрною ставкою дисконтування, яка визначає ту мінімальну внутрішню

економічну дохідність, нижче якої інвестиції в будь-яку науково-технічну розробку вкладати буде економічно недоцільно.

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_B , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$E_B = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = \sqrt[3]{1 + \frac{15337583}{284720}} - 1 = 2,8,$$

де $T_{ж}$ – життєвий цикл розробки, роки.

Визначимо бар'єрну ставку дисконтування $t_{мін}$, тобто мінімальну внутрішню економічну дохідність інвестицій, нижче якої кошти у впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію вкладатися не будуть.

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій $t_{мін}$ визначається за формулою:

$$t_{мін} = d + f = 0,9 + 0,05 = 0,95,$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2020 році в Україні $d = 0,9...0,12$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій; зазвичай величина $f = 0,05...0,5$, але може бути і значно вищою.

Оскільки $E_B > t_{мін}$, то потенційний інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні впровадження науково-технічної розробки та виведенні її на ринок, тобто в її комерціалізації.

Далі розраховуємо період окупності інвестицій T_0 , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$T_0 = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{2,8} = 0,36 \text{ року} = 4,3 \text{ місяці.}$$

Оскільки $T_0 < 3$ -х років, то це свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження цієї розробки та виведення її на ринок.

ВИСНОВКИ

За результатами технічного аналізу сучасних підходів до контролю фізіологічного стану рослин встановлено, що такий контроль хлорофілу може бути ефективно проведений за дослідженням змін його оптичних характеристик.

Найбільшу точність та достовірність у діагностиці та оцінюванні фізіологічного стану може надати флюорометричний аналіз, спрямований на дослідження параметрів флуоресценції, яка напряду пов'язана з процесами фотосинтезу.

У роботі запропоновано метод та засіб вимірювання флуоресценції хлорофілу. Було проведено вибір світлодіодів і датчиків за функціональними параметрами простоти використання та необхідним вимогам до потужності. Крім того, обрано фільтри і методи збудження флуоресценції. Отримані результати показали позитивні результати в ряді аспектів.

Крім того, аналіз існуючих методів побудови системи моніторингу освітлення рослин вказав на необхідність розробки адаптивних систем для освітлення рослин із додатковим вимірюванням рівня сонячної випромінювання. Це дозволяє освітлювати рослини рівномірним і спектрального повним складом випромінювання. Аналіз вказує, що для контролю стану рослин можна застосовувати запропонований метод за основу системи із зворотнім зв'язком, що дозволяє визначати кількість хлорофілу у рослині.

Для визначення інтенсивності спектральних ліній флуоресценції доцільно здійснювати просторове розкладання випромінювання по спектральним лініям. Реєстрацію інтенсивностей спектральних ліній найбільш доцільно здійснювати з використанням лінійки фотоприймачів.

В роботі були розроблені метод та структурна схема засобу для його реалізації. Також розроблено схему електричну функціональну та оптичну

функціональну. Проведено розрахунок основних параметрів оптичних елементів.

Визначено, що покращення функціональних характеристик може бути досягнуто при збільшенні діапазону відстаней, з яких може здійснюється контроль, що підвищує ефективність методу. Розроблений засіб виконує контроль вмісту хлорофілу рослин за параметрами його флуоресценції у визначеному спектральному діапазоні від 350 до 1100 нм при збудженні випромінюванням лазерного діода з довжиною хвилі 480 нм. Результати контролю в пристрої виводяться для користувача у текстовій або графічній формі на рідкокристалічній панелі з роздільною здатністю 320 x 240 точок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Рубин А.Б. Биофизические методы в экологическом мониторинге // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – №4. – С. 7-13.
2. Кулешова Т. Э. Влияние спектрального состава освещения на изотопный обмен углерода, оптические и электрические свойства в системе атмосфера-растение-почва: дис. на соискание научн. степени канд. физико-математических наук : спец. 03.01.02 – «Биофизика» / Т. Э. Кулешова. – Санкт-Петербург, 2019. – 180 с.
3. Фотометрическая диагностика азотного питания растений. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://agrovesti.net/lib/tech/precise-farming-tech/fotometrisheskaya-diagnostika-azotnogo-pitaniya-rastenij.html>
4. Рубин А.Б. // Биофизика фотосинтеза и методы экологического мониторинга. Технология живых систем. – 2005, Т.2. - С. 47–68
5. Биохемилюминесценция в сельском хозяйстве /Отв. Ред. А.Д. Белов. – М.: МВА, 1986. – 114 с.
6. Казимирко Ю. В. Разработка флуорометрических методов оценки состояния фотосинтетического аппарата для биоиндикации среды: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. биологических наук: спец. 03.00.02 – «Биофизика», 03.00.16 – «Экология» // Ю. В. Казимирко. – Москва, 2006. – 28 с.
7. Гольд В.М., Гаевский Н.А., Григорьев Ю.С. и др. Теоретические основы и методы изучения флуоресценции хлорофилла // Красноярск. 1984. С. 125.
8. Мерзляк М.Н., Погосян С.И. Использование спектроскопии отражения в анализе пигментов высших растений // Физиология растений. – 2003. – №5. – С. 785-792.
9. Будаговский А. В. Парадоксы оптических свойств зеленых клеток

и их практическое применение //Фотоника. – 2010. – №6. – С. 22-28.

10. Будаговская О.Н. Методы и средства оптико-электронной диагностики растений по амплитудно-фазовым параметрам светорассеяния лазерного излучения //Достижения науки и техники АПК. – 2009, №2. – С. 17-19.

11. Тарновський М. Г. Оптичні методи аналізу фізіологічного стану рослин для задач сільського господарства та екологічного моніторингу / М. Г. Тарновський, Я. Ю. Янковський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 1(23).- С. 127-130.

12. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. – Л.: Химия, 1986. – 432 с.

13. Рубин А.Б. Биофизика. – М.: МГУ, 1999. – 464.

14. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. – К.: Альтерпрес, 2002.- 190 с

15. Рубин А. Б. Первичные процессы фотосинтеза //Соросовский образовательный журнал. – 1997, №10. – С. 79-84.

16. Магомедова М.Х.-М., Алиева М.Ю. Флуоресцентная реакция растений на различия в минеральном питании // Известия ДГПУ Естественные и точные науки.- 2010, №3. – С. 60-65.

17. Веселовский В.А., Вселова Т.В. Люминесценция растений: теоретические и практические аспекты. – М.: Наука, 1990. – 200 с..

18. Современные методы биофизических исследований / Под. ред. А. Б. Рубина. М.: Высш. шк., 1988. – 358 с.

19. Рузин М.В. Измерительные комплексы на потоке // Лазер-инфо. – 2007, №4. – С. 1-4.

20. Рогаткин Д.А. Неинвазивные оптические диагностические технологии для медицины //Лазер-Инфо. – 2003, №23. – С. 1-8.

21. Стил Р.В. Мировой лазерный рынок: состояние и тенденции // Лазер-инфо. – 2008, №4. – С. 1-8.

22. Ефремов И.В., Быкова Л.А. Изучение влияния фосфорорганических гербицидов на культурные и сорные растения // Вестник ОГУ. – 2002, №3. – С. 90 – 94.

23. Майор А. Ю., Букин О. А., Павлов А. Н., Киселев В. Д. Судовой лазерный флюориметр для исследования спектров флюоресценции морской воды // Приборы и техника эксперимента. – 2001, №3. – С. 1-4.

24. ССМ-200plus Chlorophyll Content Meter. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.optisci.com/ccm-200.html>.

25. Спектрометр для анализа флуоресценции USB4000-FL. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oemoptic.ru/c18t.php>.

26. Универсальный флуориметр ФОТОН 10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://proflab.com.ua/produkt/product-details/1146-universal-nyj-fluorimetr-foton-10.html>.

27. Multiplex 3 Портативный флуорометр. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://chemtest.com.ua/portativhiy_fluorimetr.

28. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию: Учеб пособие для физических специальностей высших учебных заведений. – М.: Наука, 1979. – 480с.

29. Заглубский А.А., Цыганенко Н.М., Чернова А.П. Спектральные приборы. Учебное пособие. – Спб.: СпГУ, 2007. – 76 с.

30. Дидковкий Я., Дидковская Н., Федорцев Р. Многофункциональный двухлучевой спектрофотометр OPTO-ELECTRONICS SF-05//Фотоника. – 2007, №2. – С. 28 – 34.

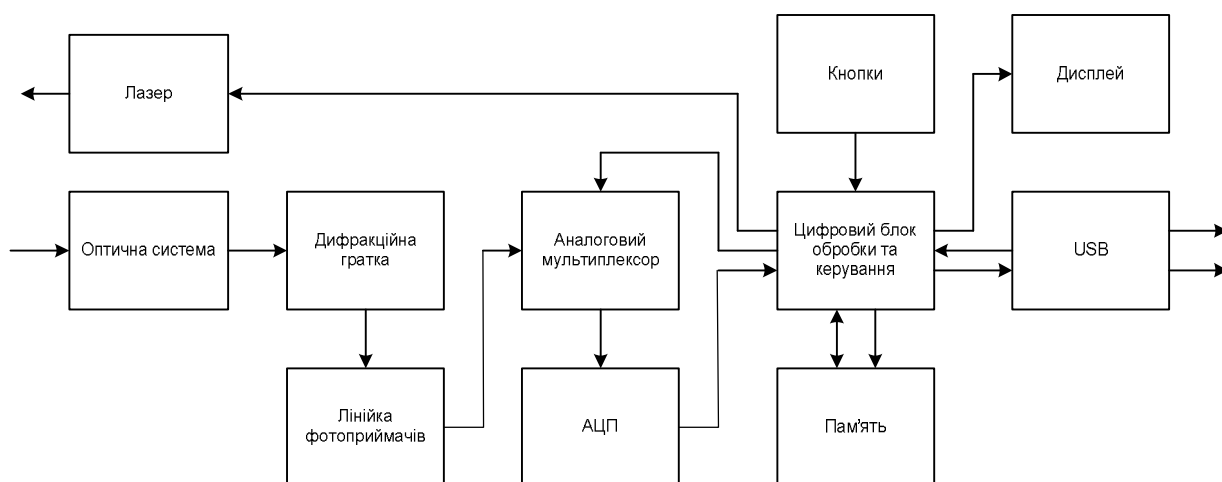
31. Павлычева Н.К. Голограммные дифракционные решётки 2-го и 3-го поколений в спектрографах Роуланда// Оптический журнал. – 2002. – №4, Т 39. – С.69 – 74.

32. Интерфейс USB. Часть 1. Основы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.readkong.com/page/ispolzovanie-multimediyny-te-nologiy-v-biblioteke-4324828?p=3>.

33. Сердюков О.В., Мухин Ю.Н. Выбор микроконтроллера // Электронные компоненты. – 2002. - №5. – С.39-42.
34. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника – М.: Радио и связь, 1989. – 360 с.
35. М.К. Самохвалов Элементы и устройства оптоэлектроники. Учебное пособие – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 125 с.
36. High Performance Linear CMOS Image Sensor. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://electronix.ru/forum/index.php?act=attach&type=post&id=45411>
37. FT232R USB UART I.C. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.sparkfun.com/datasheets/IC/FT232R_v104.pdf.
38. BG320240F – Display. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ic-online.cn/view_download.php?id=1678311&file=0340\bg320240f_2293329.pdf
39. AT24C512BN-SH25-B. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/290/DOC000290561.pdf>.
40. Blue-Violet Laser Diode. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.logictoyz.com/laser-diode-ld/ld-405nm-480nm/blue-violet-laser-diode-ld-405-nm-20-mw-5-6mm-t0-18-405nm-20mw-.html>.
41. Гребнев В.В. Микроконтроллеры AVR фирмы Atmel. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 176 с.
42. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства фирмы Tiny и Mega фирмы Atmel. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 560 с.
43. ATMEGA16 Datasheet (PDF). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2466.pdf>.
44. Цуканова Г.И. Прикладная оптика. Часть 1. Конспект лекций. – Спб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 108 с..

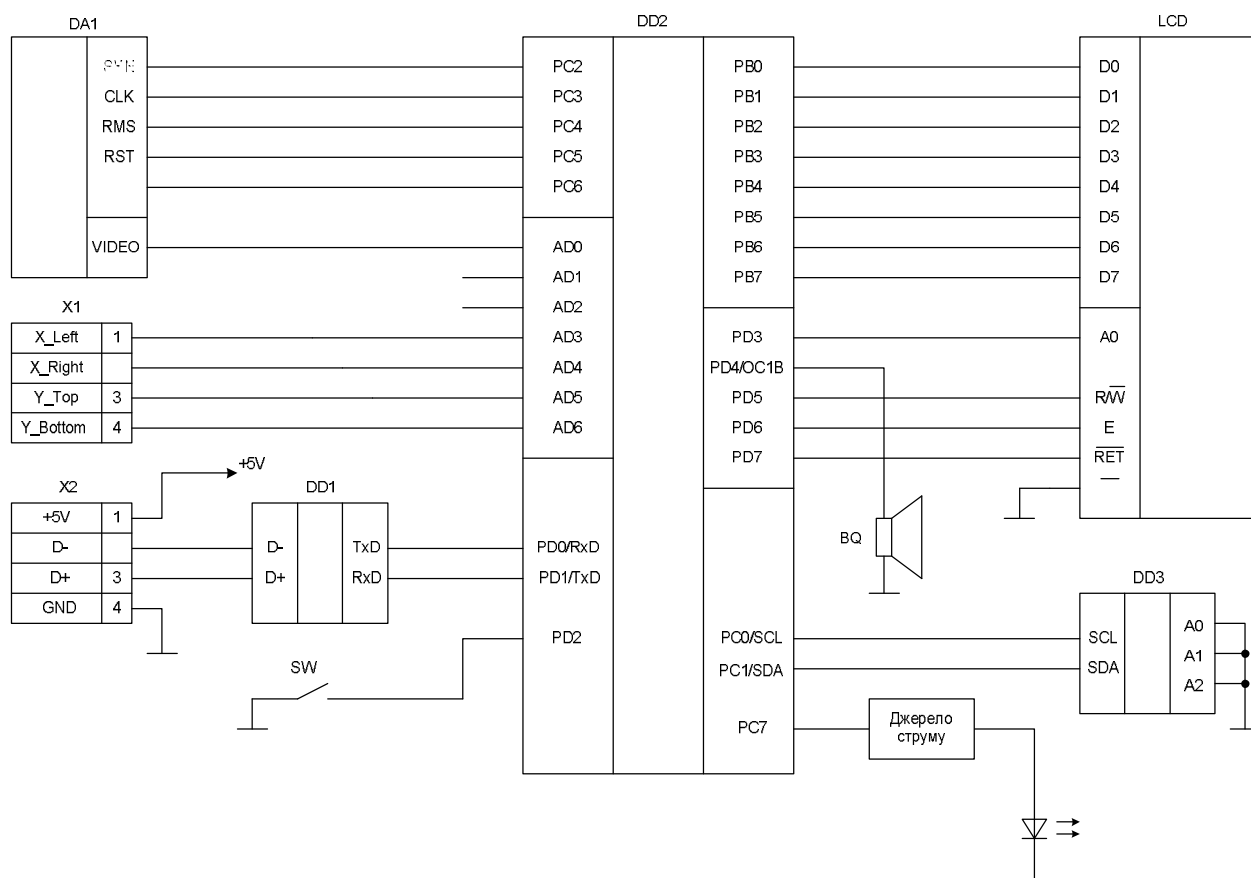
Додаток А
(обов'язковий).

**Загальна структурна схема оптико-електронного засобу для контролю
вмісту хлорофілу**



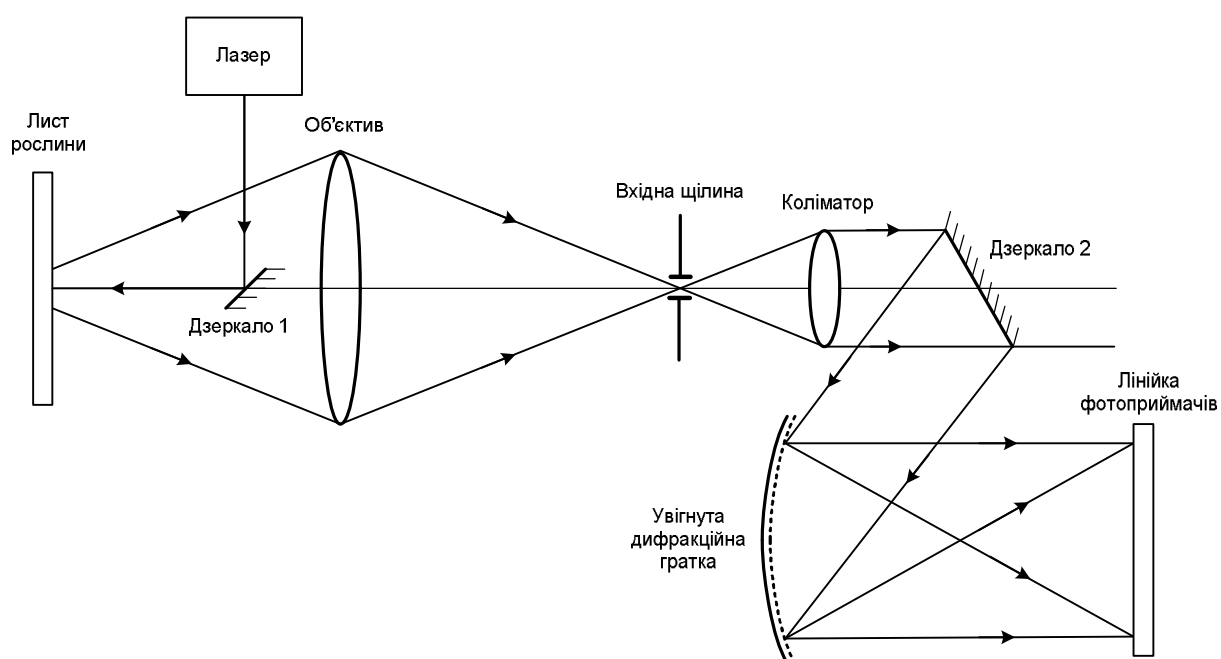
Додаток Б (обов'язковий).

Електрична функціональна схема оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу



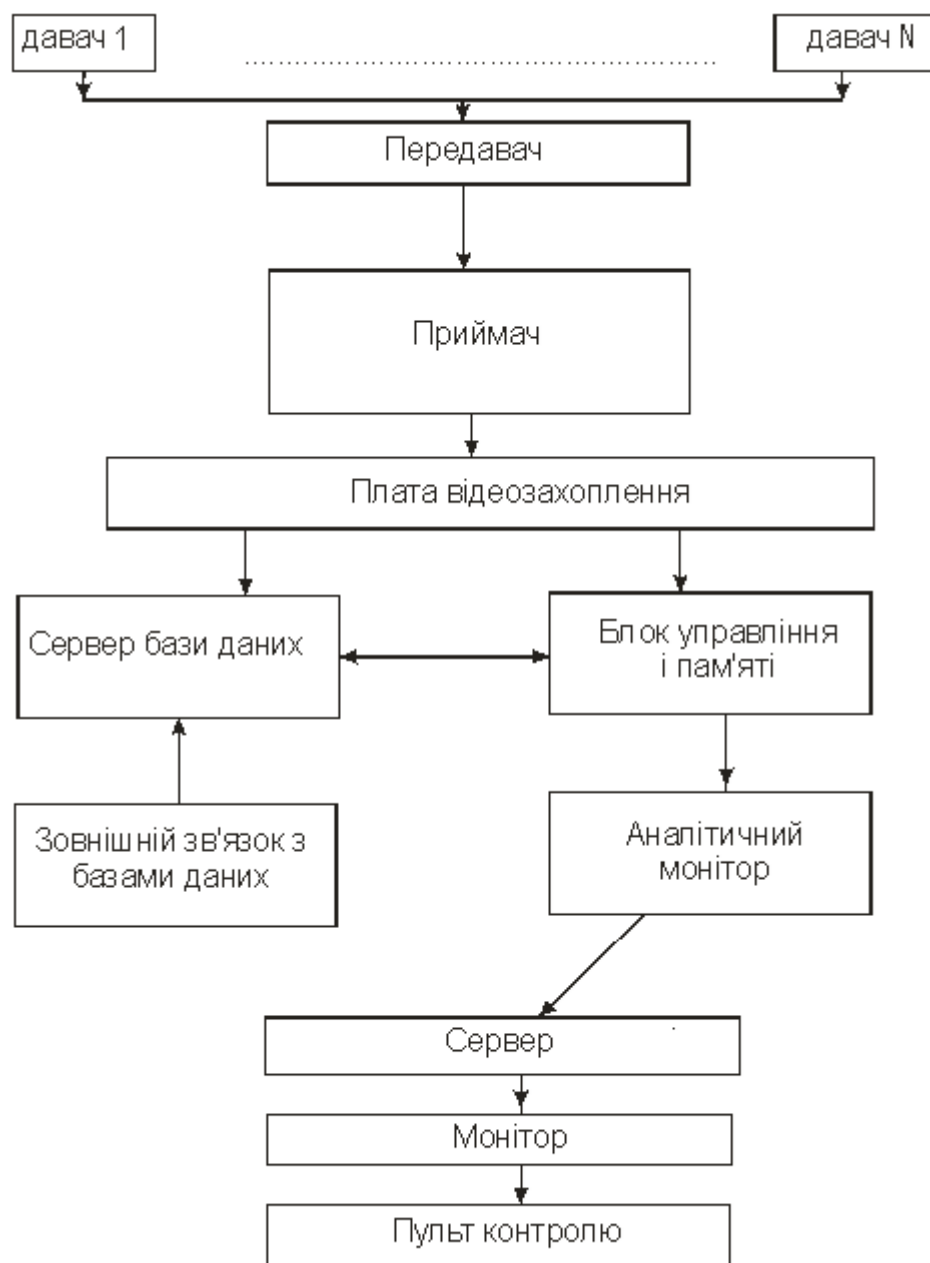
Додаток В
(обов'язковий).

Оптична функціональна схема оптико-електронного засобу для контролю вмісту хлорофілу



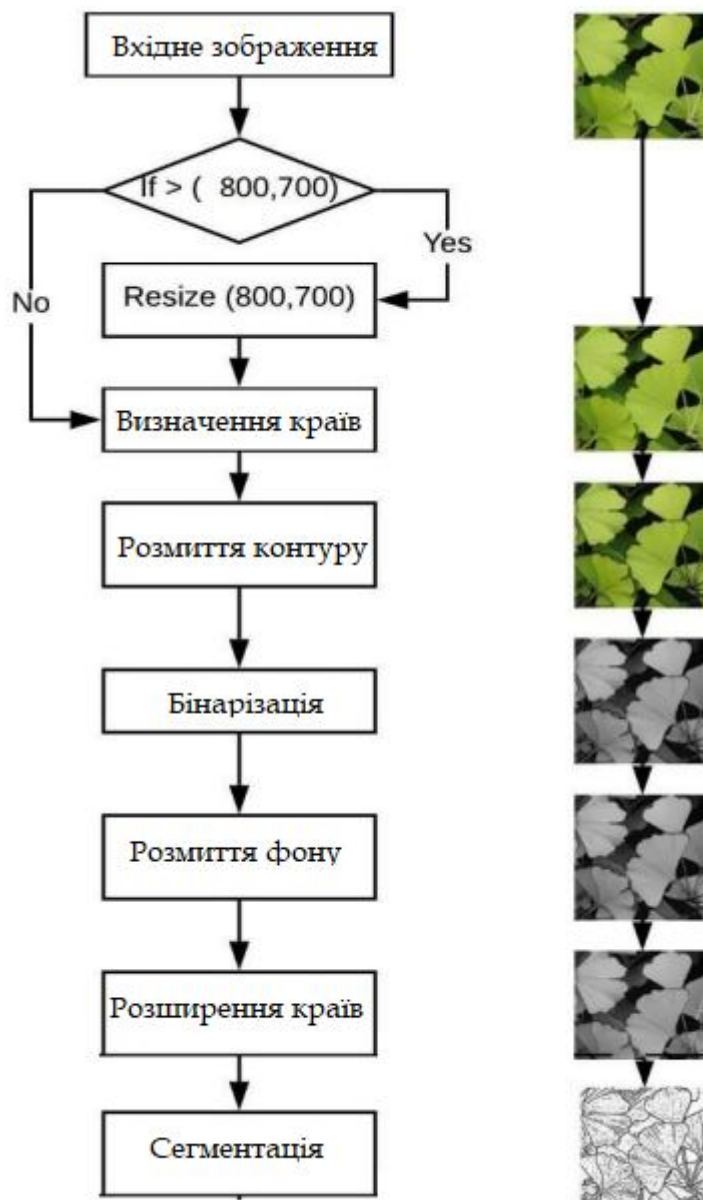
Додаток Г
(обов'язковий).

Система адаптивного керування освітленням. Функціональна схема



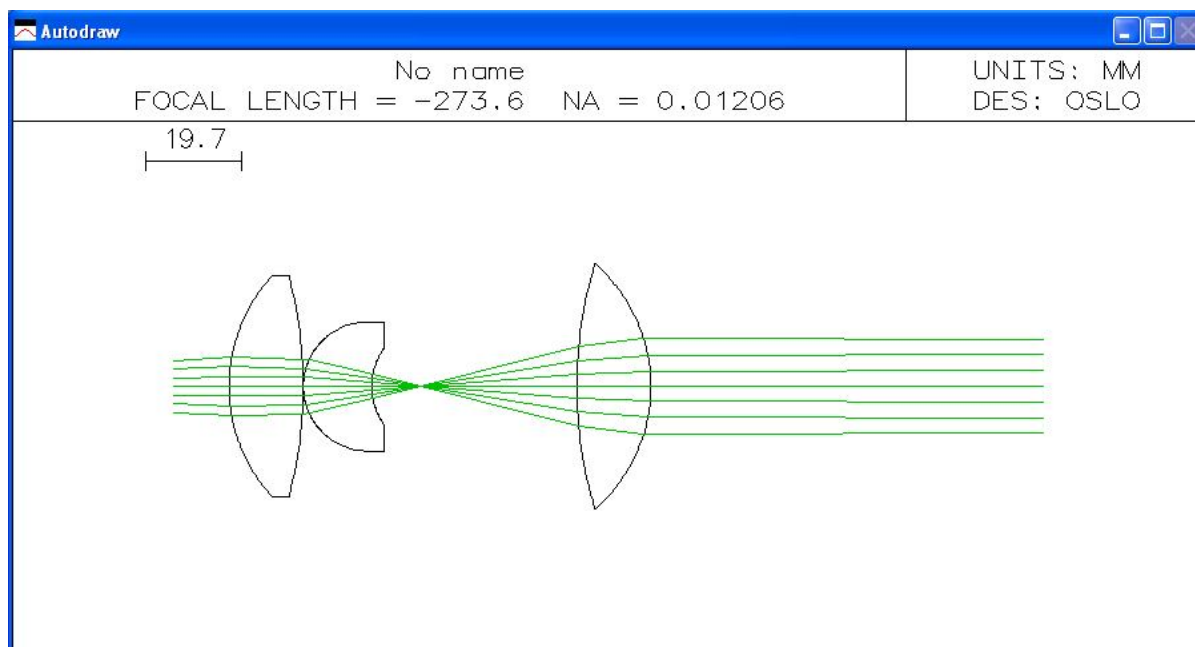
Додаток Д
(обов'язковий).

Алгоритм сегментації листя рослин для обрахунку його площі. Блок-схема алгоритму



**Додаток Е.
(обов'язковий).**

Схема ходу променів через об'єктив та коліматор.



**Додаток Є
(обов'язковий)**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: Оптико-електронний засіб для контролю вмісту хлорофілу рослин

Тип роботи: кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше – зазначити)

Підрозділ: кафедра ЛОТ, ФКСА, ЛТО-20м

(кафедра, факультет, навчальна група)

Науковий керівник: Лисенко Г.Л., проф. каф. ЛОТ

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

<i>Plagiat.pl (StrikePlagiarism)</i>		<i>Unicheck</i>	
КП1	-	Оригінальність	94%
КП2	-		
Тривога/Білі знаки	/	Схожість	6%

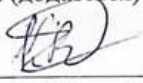
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату

Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання

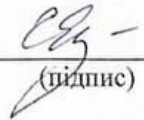
Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор  Купренюк В.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення:

Допустити до захисту

Особа, відповідальна за перевірку  Тужанський С.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)