

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
на тему: «Двоспектральний фотоелектричний детектор диму»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ДП-21

Горбаньов Гліб Сергійович _____

Керівник: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.

Обухова Тетяна Юріївна _____

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.

Свєчніков Георгій Сергійович _____

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Діденко Юрій Вікторович _____

Консультант з оптичної системи: ст.викл.каф.МЕ, к.т.н., б/з

Воронько Андрій Олександрович _____

Рецензент: Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро-та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка» .

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

(підпис) (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Горбаньову Глібу Сергійовичу

1. Тема роботи «Двоспектральний фотоелектричний детектор диму», керівник роботи Обухова Тетяна Юріївна, доц.каф.МЕ, к.т.н., доц, затверджені наказом по університету від «__» _____ 2026 р. № _____
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: розробка двоспектрального оптичного датчика диму, дослідження розсіяного світла інфрачервоного та синього за теорією Мі.
4. Зміст роботи 1. Аналіз ринку пожежних сповіщувачів. 2. Моделювання процесів розсіяння світла в MATLAB. 3. Розрахунок електричного тракту. 4. 3D-моделювання конструкції датчика. 5. Розробка топології друкованої плати в Altium Designer. Висновки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу схема електрична принципова, складальний кресленик, деталювання.

6. Консультант розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка оптичної системи	Воронько А.О. ст.викл.каф.МЕ, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний огляд, написання вступної частини	26.04.2026	
2.	Написання теоретичної частини	03.05.2026	
3.	Розрахунок процесів розсіяння світла в MATLAB.	10.05.2026	
4.	Проектування конструкції датчика	17.05.2026	
5.	Підбір та розрахунок компонентів	24.05.2026	
6.	Остаточне оформлення пояснювальної записки проекту	28.05.2026	

Студент _____
(підпис)

Гліб ГОРБАНЬОВ

Керівник проєкту _____
(підпис)

Тетяна ОБУХОВА

АНОТАЦІЯ

Представлено дипломну роботу Гліба Горбаньова на тему «Двоспектральний фотоелектричний детектор диму».

Даний дипломна робота освітнього рівня бакалавр присвячений розробці автоматизованого пристрою для виявлення задимлення та аналізу характеристик повітряного середовища. Проведено детальний аналіз сучасного ринку пожежних сповіщувачів, представлено класифікацію та порівняльну характеристику існуючих типів девайсів для детектування диму.

Основна дослідницька частина роботи присвячена теоретичному обґрунтуванню та комп'ютерному моделюванню в середовищі MATLAB процесів перевідбивання та розсіяння світла у просторі відповідно до математичного апарату теорії Мі. У ході моделювання було детально досліджено та візуалізовано різницю між характером розсіяння інфрачервоного та синього випромінювання залежно від геометричних розмірів і дисперсності мікрочастинок, та розсіяння частинок світла у просторі на 360 градусів.

Практична частина роботи містить опис інженерної реалізації апаратної архітектури та конструктивного виконання девайса. Спроектовано спеціалізовану вимірну димову камеру з оптичним лабіринтом, оптимізовану для вільного проходження повітря за умов відсікання зовнішнього засвічення, а також розроблено топологію двошарової друкованої плати та елементи захисного корпусу.

Основними результатами дослідження є створення комплексної моделі багатоспектрального датчика диму, що використовує комбінацію двох оптичних каналів для забезпечення високої достовірності реєстрації пожежі на ранніх стадіях.

Ключові слова: теорія Мі, моделювання в MATLAB, розсіяне світло, інфрачервоне випромінювання, синє випромінювання, аналіз частинок, датчик диму, дослідження ринку.

ABSTRACT

The bachelor's qualification project by Hlib Horbanov entitled "Dual-Spectral Photoelectric Smoke Detector" is presented.

This bachelor's thesis is devoted to the development of an automated device for smoke detection and analysis of air environment characteristics. The explanatory note provides a detailed analysis of the modern fire detector market and presents the classification and comparative characteristics of existing types of smoke detection devices.

The main research part of the work is focused on the theoretical substantiation and computer simulation in the MATLAB environment of light reflection and scattering processes in space according to the mathematical apparatus of Mie theory. During the simulation, the differences between the scattering behavior of infrared and blue radiation depending on the geometric dimensions and dispersion of microparticles were thoroughly investigated and visualized, as well as the spatial scattering of light particles over 360 degrees.

The practical part of the project contains a description of the engineering implementation of the hardware architecture and structural design of the device. A specialized measuring smoke chamber with an optical labyrinth optimized for free air passage while blocking external illumination was designed, and the topology of a two-layer printed circuit board together with protective enclosure elements was developed.

The main results of the research include the creation of a comprehensive model of a multispectral smoke sensor that uses a combination of two optical channels to ensure high reliability of fire detection at early stages.

Keywords: Mie theory, MATLAB simulation, scattered light, infrared radiation, blue radiation, particle analysis, smoke detector, market research.

ЗМІСТ

Стор.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЕТЕКТУВАННЯ ДИМУ	10
1.1 Точкові оптичні димові сповіщувачі	10
1.1.1 Mercury SD102P Photoelectric Smoke Detector	11
1.1.2 Bosch FAP-425 Optical Smoke Detector	12
1.2 Лінійні оптичні димові сповіщувачі	13
1.2.1 Notifier NFXI-OSI-RIE Reflective Smoke Detector	15
1.2.2 Gent S4-34740 Beam Sensor Pair	16
1.3 Аспіраційні димові сповіщувачі.....	17
1.3.1 Xtralis VESDA-E VEP	18
1.4 Іонізаційні пожежні сповіщувачі (ІПС).....	19
1.4.1 Fire Sentry™ Battery Operated 4 Smoke Alarm i9040.....	20
1.4.2 System Sensor 2151	21
Висновок до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ФІЗИЧНІ ОСНОВИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНОЇ ДЕТЕКЦІЇ АЕРОЗОЛІВ.....	23
2.1 Еволюція вибору спектральних діапазонів: від інфрачервоного до двоканального методу	24
2.2 Хвильова теорія розсіювання оптичного випромінювання на дисперсних середовищах.....	25
2.2.1 Режим Релеївського розсіювання ($x \ll 1$).....	26
2.2.2 Режим резонансного розсіювання Мі ($x \approx 0.1 \dots 2$)	27
2.2.3 Режим геометричної оптики ($x \gg 1$).....	28
2.3 Фізико-хімічна та морфологічна диференціація пожежних та непожежних аерозолів.....	29
Висновок до розділу 2	32
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИМОВОЇ КАМЕРИ.....	33
3.1 Вибір програмного забезпечення та математичного апарату	33

3.2 Математичне моделювання оптичного відгуку для різних типів аерозолів	34
3.2 Дослідження кутових індикатрис розсіювання	38
3.3 Тривимірне геометричне моделювання робочого об'єму оптичної камери	41
Висновок до розділу 3	43
РОЗДІЛ 4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ ДАТИЧИКУ ДИМУ	45
4.1 Структурно-функціональна схема сповіщувача	46
4.2 Вибір основних компонентів пристрою	47
4.3 Схемотехнічна реалізація та розрахунок функціональних вузлів	51
4.3.1 Розрахунок вузла живлення	51
4.3.2 Розрахунок трансїмпедансного підсилювача	53
4.3.3 Розрахунок живлення і керування оптичними випромінювачами	55
4.4 Розробка 3D-моделі та конструктивне виконання датчика	58
4.5 Проектування топології та компонування друкованої плати	65
ВИСНОВКИ	69
Список використаної літератури	71
ДОДАТОК А	77
ДОДАТОК Б	78
ДОДАТОК В	79
ДОДАТОК Г	80
ДОДАТОК Ґ	81
ДОДАТОК Д	85
ДОДАТОК Е	91

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЕМС – електромагнітна сумісність

ІПС – іонізаційні пожежні сповіщувачі

ІЧ – інфрачервоний

ПК – персональний комп'ютер

САПР – система автоматизованого проєктування

CMOS – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник

DC-DC – імпульсний перетворювач постійного струму

GND – «земля», загальний провідник (заземлення)

JTAG – апаратний інтерфейс для тестування та відлагодження мікроконтролерів

LED – світлодіод

MOSFET – польовий транзистор із ізольованим затвором

PCB – друкована плата

RX – лінія прийому даних (в інтерфейсі UART)

SNR – відношення сигнал/шум

SWD – послідовний інтерфейс відлагодження

TX – лінія передачі даних (в інтерфейсі UART)

UART– універсальний асинхронний приймач-передавач

VDD – лінія позитивної напруги живлення

ВСТУП

В умовах сучасного розвитку житлової та промислової інфраструктури питання забезпечення пожежної безпеки залишається одним із пріоритетних. Значна частина пожеж супроводжується виділенням диму ще до появи відкритого полум'я, що робить системи раннього виявлення диму критично важливими для запобігання надзвичайним ситуаціям.

На даний момент широкого застосування набули оптичні та іонізаційні датчики диму (хоча останні мають суттєві обмеження через використання радіоактивних елементів). Однак існуючі рішення мають деякі недоліки, а саме серед яких основною проблемою є висока ймовірність хибних спрацювань. Такі спрацювання найчастіше виникають внаслідок впливу пилу, водяної пари або інших аерозольних частинок, що не пов'язані з процесом горіння.

Крім того, в більшості сучасних оптичних датчиків диму використовуються два світлодіоди, зазвичай синій та інфрачервоний, але сигнал знімається лише одним фотоприймачем. Через це трохи обмежується можливість нормально "розрізняти" різні типи мікро- об'єктів що потрапляють у зону детектування, бо вся інформація фактично зводиться в одну точку вимірювання.

І як ідея для покращення це є додавання ще одного фотоприймача могло б дати більше інформації про розсіяне світло і потенційно підвищити точність визначення типу аерозолію та зменшити хибні спрацювання.

Актуальність дипломного проєкту у розробці більш точного оптичного датчика диму, здатного зменшити кількість хибних спрацювань, підвищити стійкість до забруднення та забезпечити розрізнення різних типів аерозольних середовищ. У зв'язку з цим розробка багатоспектрального оптичного датчика диму є актуальним науково-технічним завданням.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЕТЕКТУВАННЯ ДИМУ

Ефективність систем протипожежного захисту залежить від технічних характеристик сенсорів. На сучасному етапі розвитку електроніки завдання швидкої детекції загоряння ускладнюється необхідністю забезпечення високої селективності тобто в умовах складних завадових середовищ такі як пил, пара та інші продукти не горіння.

Метою даного розділу є проведення комплексного аналітичного огляду існуючих технічних рішень у галузі детекції диму, виявлення їхніх конструктивних переваг та критичних недоліків. У рамках даного розділу дослідження проводиться за наступними типами димових детекторів:

1. Точкові оптико-електронні сповіщувачі.
2. Лінійні оптичні системи.
3. Аспіраційні системи.
4. Іонізаційні сповіщувачі.

Порівняльний аналіз типів димових оповіщувачів за критеріями чутливості до різних типів пожежних навантажень тління та горіння, стійкості до хибних спрацювань, енергоефективності та вартості впровадження.

1.1 Точкові оптичні димові сповіщувачі

Точкові оптико-електронні димові сповіщувачі є найпоширенішим типом пристроїв у сучасних системах пожежної сигналізації. У середині корпусу пристрою знаходиться оптична камера по детектуванню диму, яка складається з джерела випромінювання, а саме інфрачервоного та додатково в деяких девайсах синього світлодіода та фотоприймача, які розташовані один до одного під

певним кутом. Цей тип сповіщувачів є стандартом для захисту житлових, офісних та адміністративних приміщень зі стандартною висотою стель.

Основою роботи точкового оптичного сповіщувача є ефект Тіндалля це явище розсіювання світла у неоднорідному середовищі характерним для дисперсних систем наприклад аерозолів, із низькою концентрацією частинок заломлення дисперсійного середовища. [1]

За часту камери сконструйовані таким чином, щоб у нормальному стані світлодіодні промені поглинались чорними стінками і не мали прямого потрапляння на фотоприймач. Коли в камеру потрапляють частинки диму, вони перетинають інфрачервоний та синій промінь, змушуючи світло відбиватися та розсіюватися. Частина цього розсіяного світла потрапляє на лінзу фотоприймача. Після цього мікропроцесор аналізує інтенсивність отриманого сигналу і, при перевищенні заданого порогу, формує сигнал пожежі.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр точкових оптичних сповіщувачів, які відрізняються за такими параметрами, а саме конструкцією оптичної камери, кількістю світлодіодів, протоколами зв'язку та алгоритмами обробки сигналів. Для аналізу розглянемо кілька репрезентативних рішень від провідних світових виробників.

1.1.1 Mercury SD102P Photoelectric Smoke Detector

Mercury SD102P є один з типових представників бюджетного сегмента автономних точкових оптико-електронних сповіщувачів диму. Його робота базується на принципі реєстрації розсіяного інфрачервоного випромінювання від частинок. [2]



Рисунок 1.1 – Mercury SD102P [3]

Технічні особливості оптичної системи даного девайсу є елементна база оптичного пристрою яка складається з одного випромінювального інфрачервоного світлодіода, що працює в діапазоні довжин хвиль 850 нм, та одного кремнієвого фотодіода. Геометрія камери така, що компоненти встановлені в закритій димовій камері під кутом 135° один до одного, де випромінювач і приймач розділені чорною перегородкою, що реалізує метод «темного поля», де у нормальному стані пряме світло не потрапляє на фотодіод. Принцип детектування пристрою проявляється під час попадання частинок диму в робочу зону де відбувається розсіювання ІЧ-світла. Частина цього відбитого світла долає бар'єр перегородки та реєструється фотоприймачем, що призводить до зростання напруги на виході підсилювача та подальшої генерації сигналу тривоги. [4]

1.1.2 Bosch FAP-425 Optical Smoke Detector

Bosch FAP-425, це мультисенсорний сповіщувач, де основним інженерним рішенням у даному пристрої є використання технології Dual-Ray. Технологічною особливістю та архітектурою являється багатоспектральна детекція Dual-Ray Technology, на відміну від попереднього сповіщувача, застосовано два джерела випромінювання з різними довжинами хвиль: інфрачервоне близько 850 нм та синє 460 нм, де відбувається інтелектуальна обробка сигналів Intelligent Signal Processing.

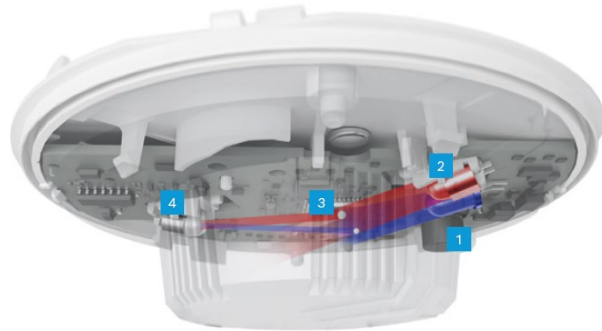


Рисунок 1.2 – Огляд системи детектування Bosch FAP-425 [5]

1. Синій світлодіод
2. Інфрачервоний світлодіод
3. Розсіяне світло
4. Фотодіод

Пристрій використовує вбудований мікропроцесор для безперервного аналізу співвідношення сигналів від обох діодів. Це дозволяє пристрою будувати спектральну частину середовища в реальному часі. Компенсація забруднення камери диму є алгоритм Bosch який дозволяє динамічно коригувати поріг чутливості залежно від рівня пилу в камері, що значно подовжує термін експлуатації без сервісного обслуговування відповідно до сертифікації EN 54-7. [6]

1.2 Лінійні оптичні димові сповіщувачі

Лінійні оптичні сповіщувачі, робота яких базується на аналізі загасання світлового променя в прямому контрольованому видимому просторі. На відміну від точкових систем, які моніторять стан середовища лише всередині власної димової камери, лінійні пристрої здійснюють контроль вздовж протяжної прямої лінії видимості.

Принцип роботи ґрунтується на законі Бугера - Ламберта - Бера, що описується як послаблення інтенсивності випромінювання під час його

проходженні крізь дисперсне середовище. У разі виникнення пожежі частинки диму, що потрапляють у зону дії променя, поглинають та розсіюють світлову частину випромінювання, та коли рівень загасання досягає встановленого порогового значення, система генерує сигнал як димову тривогу. [7]

Сфера застосування лінійних сповіщувачів являється захистом об'єктів з великою площею та високими стелями, висота яких може сягати понад 12–15 метрів, де використання точкових датчиків є малоефективним через ефект термічної стратифікації, це коли дим не може піднятися до самої стелі через прошарок теплого повітря. Данні девайси встановлюють у таких приміщеннях, як складські та логістичні комплекси, атріуми торгових центрів, виробничі цехи та ангари.

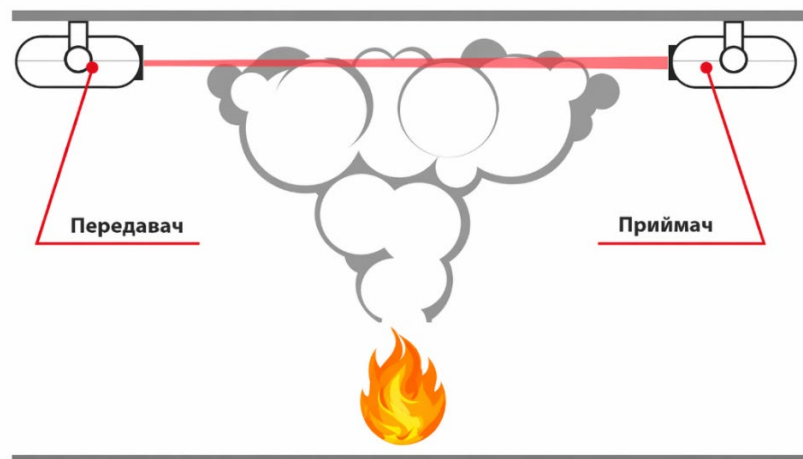


Рисунок 1.3 – Схема лінійного датчика

Конструктивні особливості даних девайсів це типова архітектура лінійної системи з двох основних вузлів а саме: джерело випромінювання, яке формує вузькоспрямований пучок електромагнітних хвиль, зазвичай в інфрачервоному чи ультрафіолетовому діапазоні. Фотоприймач який вимірює амплітуду отриманого сигналу, де після того мікропроцесор здійснює його математичну обробку.

Сучасний розвиток лінійних оповіщувачів призвів до появи двох основних технологічних класифікацій:

- Рефлекторні системи поєднують випромінювач та приймач в одному корпусі та використовують пасивний відбивач (призму).
- Двокомпонентні системи складаються з окремих випромінювача та приймача на протилежних кінцях приміщення. [8]

1.2.1 Notifier NFXI-OSI-RIE Reflective Smoke Detector

Notifier NFXI-OSI-RIE, це лінійний оптичний сповіщувач рефлекторного типу, що поєднує в собі технологію передачі ІЧ-променя та матрицю для формування та аналізу зображення оптичного шляху. Пристрій поєднує випромінювач та приймач в одному корпусі, що вимагає встановлення пасивного рефлектора призми на протилежній стіні. Це значно спрощує монтаж та підключення живлення. [9]



Рисунок 1.4 – Notifier NFXI-OSI-RIE [10]

Технологія опотичного формування зображення являється робота CMOS-матриці замість стандартного фотодіода в приймачі. Це дозволяє пристрою відрізняти не просто зміну амплітуди сигналу, а локалізувати джерело випромінювання через рефлектор. Це допомагає вирішувати одне з головних питань, а саме проблему лінійних датчиків до чутливості щодо структурних коливань будівлі. Датчик програмно відслідковує за пере відбиванням від рефлектора, навіть при зміні через температурне розширення конструкцій будівлі. [11]

Використання вузькосмугових оптичних фільтрів та обробки зображення дозволяє пристрою працювати в атріумах з великою кількістю прямих сонячних променів без хибних спрацювань. Проблемами таких пристроїв являється те що промінь повністю перекривається непрозорим об'єктом, наприклад, вантажем на навантажувачі, тоді система генерує сигнал несправності. Оскільки світло проходить шлях до рефлектора і назад, то будь-яке забруднення призми, наприклад, пил чи іній вже доволі суттєво впливає на сигнал сильніше, ніж у системах з прямим променем. [12]

1.2.2 Gent S4-34740 Beam Sensor Pair

Gent S4-34740, це адресний лінійний оптичний сповіщувач, який складається з окремих вуз лів, а саме випромінювача, та приймача. На відміну від рефлекторних систем, де промінь проходить через зону контролю двічі, у девайсі реалізована техніка прямого проходження променю. [13]



Рисунок 1.5 – Gent S4-34740 [14]

Оскільки світло проходить дистанцію лише один раз від передавача до приймача, система має значно більший запас потужності сигналу. Це дозволяє пристрою стабільно працювати на максимальних дистанціях до 100 метрів. Приймач оснащений системою адаптивної корекції, яка компенсує поступове забруднення оптики або зміну прозорості середовища, намагаючись цим запобігати хибним сигналам про несправність, або тривогу. [15]

Завдяки прямому променю, система менш чутлива до дрібних часток пилу на поверхні лінз порівняно з рефлекторними аналогами. Це робить її кращим вибором для промислових об'єктів. Проблемами даного девайсу є необхідність підведення кабельного живлення та ліній зв'язку до обох сторін приміщення, що значно збільшує вартість інсталяції та витрати матеріалів. Оскільки вузли можуть знаходитись на великій відстані один від одного, навіть через незначне термічне розширення стін будівлі може призвести до розцентрування вузько спрямованого променя. [12]

1.3 Аспіраційні димові сповіщувачі

Аспіраційні димові сповіщувачі являють собою активні системи пожежної детекції, на відміну від пасивних точкових чи лінійних датчиків, які очікують на фізичне потрапляння диму в зону сенсора, він примусово забирає повітря з контрольованих зон через систему трубопроводів і доставляють його до центрального вимірювального модуля.

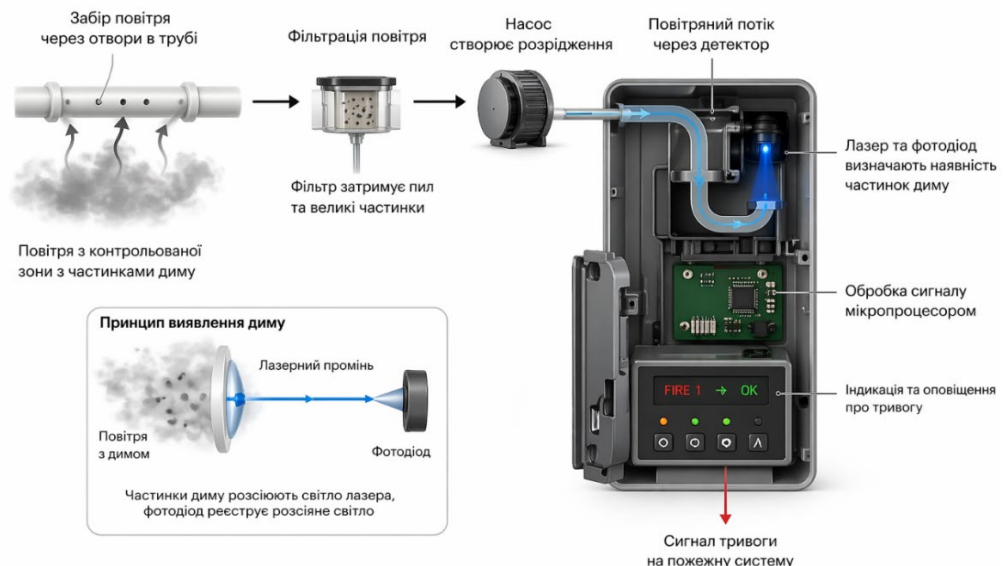


Рисунок 1.6 – Схема роботи аспіраційного димового сповіщувача

Основним вузлом аспіраційної системи є потужна повітряна помпа аспіратор, яка створює розрідження в мережі повітрозабірних труб. Повітря з приміщення через калібровані отвори потрапляє в труби, проходить крізь систему фільтрів для видалення пилу і надходить у лазерну вимірювальну камеру.

Однією з головних проблем даного типу девайсів є здатність раннього виявляти ознаки пожежі коли кількість диму є мізерною, через довге проходження диму по трубам та фільтрам. Оскільки сама вимірювальна електроніка винесена за межі зони контролю, такі системи є ідеальними для приміщень з екстремальними температурами чи високою вологістю.

1.3.1 Xtralis VESDA-E VEP

VESDA-E VEP - є однією з найсучасніших аспіраційних систем. У пристрої реалізовано метод формування зображення в камері детекції за допомогою CMOS-матриці та лазерного джерела світла. Це дозволяє системі не просто фіксувати факт наявності часток, а аналізувати їх кількість, розмір та тип, що забезпечує на порядок вищу стабільність до хибних спрацювань порівняно з класичними оптичними камерами. Система використовує запатентований механізм чистого повітря Clean Air Barrier, який обдуває оптичні поверхні чистим повітрям, запобігаючи їх забрудненню. [16]



Рисунок 1.7 – Xtralis VESDA-E VEP Series Aspirating Smoke Detector [17]

Пристрій автоматично адаптується до фонового рівня забруднення повітря в конкретному приміщенні, що дозволяє тримати чутливість на межі фізичних

можливостей без ризику хибних тривог. Але і є декі недоліки вартість одного модуля VESDA та проектування мережі труб у десятки разів перевищує вартість масиву точкових датчиків. Система потребує регулярної перевірки цілісності труб та заміни фільтрів, що в довгостроковій перспективі збільшує експлуатаційні витрати.

1.4 Іонізаційні пожежні сповіщувачі (ІПС)

Іонізаційні сповіщувачі були тривалий час найбільш ефективним засобом детекції пожеж на стадії відкритого горіння. Їхня робота базується на вимірюванні змін електричних параметрів іонізованого складу повітря де при потраплянні до нього продуктів згоряння змінювались параметри. На відміну від оптичних систем, які реагують на геометричні розміри часток тобто ефект розсіювання, іонізаційні датчики реагують саме на концентрацію та масу часток на молекулярному рівні. В основі роботи ІПС лежить явище іонізації молекул газів, що входять до складу повітря більшою частиною азоту та кисню, під дією радіоактивного випромінювання. [18]

У більшості країн ЄС зокрема у Франції, Нідерландах, Німеччині та Австрії встановлення іонізаційних датчиків у житловому секторі повністю заборонено. Держави переходять на використання оптико-електронних пристроїв згідно з Директивою RoHS про обмеження небезпечних речовин та стандартами серії EN 54, які віддають перевагу екологічно чистим технологіям.

Принцип роботи у вимірювальній камері встановлюється джерело α -частинок зачасту ізотоп Америцію-241, ^{241}Am . Альфа-частки мають високу іонізуючу здатність: пролітаючи крізь повітряний простір, вони вибивають електрони з оболонок молекул повітря, утворюючи пари позитивних іонів та вільних електронів.





При прикладанні електричної напруги до електродів в камері виникає впорядкований рух іонів тобто іонізаційний струм.

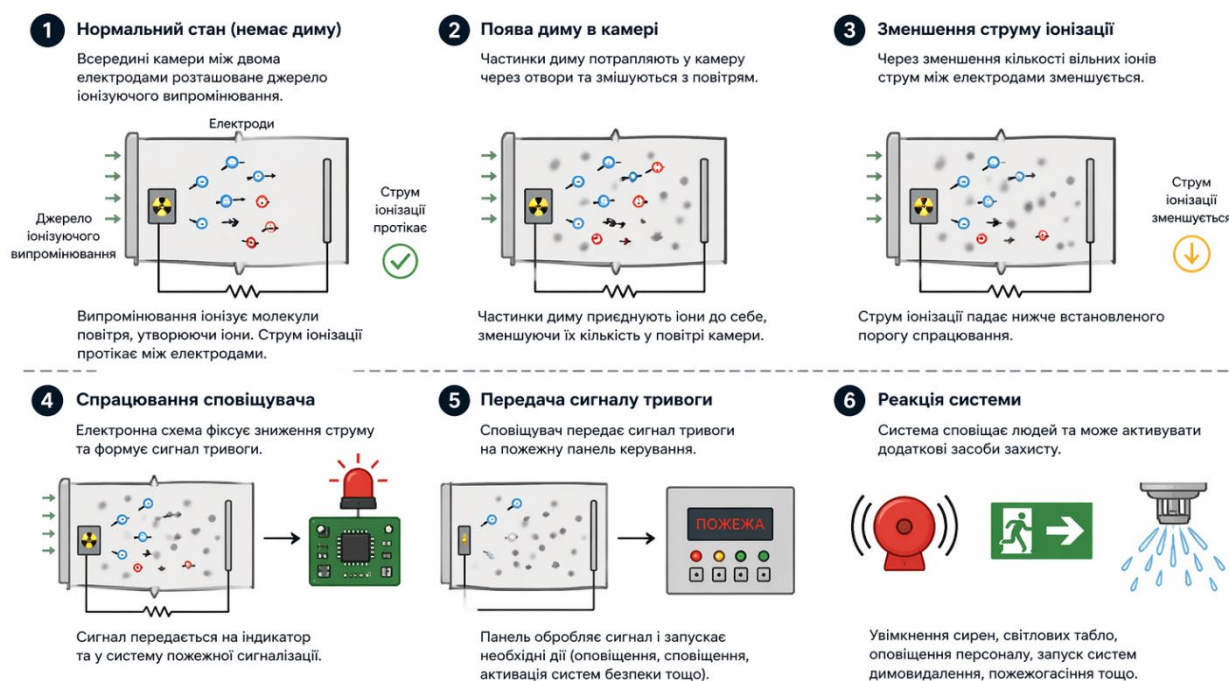


Рисунок 1.8 – Схема роботи іонізаційного сповіщувача

Частинки диму, що потрапляють у камеру, мають значно більшу масу та меншу рухливість порівняно з іонами повітря. Іони адсорбуються на поверхні часток диму, утворюючи важкі комплекси. Це призводить до двох ефектів, а саме зменшення рухливості, бо важкі іони рухаються до електродів повільніше, та друге підвищується ймовірність рекомбінації взаємного знищення зарядів. Як наслідок, сумарний електричний струм у колі різко падає. Саме це падіння струму і аналізується для прийняття рішення про тривогу. Іонізаційні датчики мають вкрай низьку чутливість до «холодного» диму з великими частками тління кабелів чи меблів, що є причиною більшості смертельних пожеж у нічний час. [19]

1.4.1 Fire Sentry™ Battery Operated 4 Smoke Alarm i9040

Модель i9040 є класичним прикладом однокамерного іонізаційного сповіщувача, що отримав масове поширення у житловому секторі США. Він

містить капсулу з ^{241}Am активністю близько 33 кБк (0.9 мкКюрі). Ця активність є безпечною для навколишнього середовища під час цілісності корпусу, але вимагає спеціальної утилізації після строку служби. Девайс використовує спрощену схему з однією відкритою камерою. Це забезпечує надзвичайно низьку собівартість та мінімальне енергоспоживання. [20]



Рисунок 1.9 – Fire Sentry™ Battery Operated 4 Smoke Alarm [21]

Перевагами являються максимальна швидкість реакції на швидкі пожежі, де виділяються мікроскопічні частки менші 0.1 мкм, які практично невидимі для оптичних датчиків. Недоліками є велика чутливість до вологості та швидкості повітряних потоків. Оскільки камера одна, будь-яка зміна тиску або вологості змінює іонізаційний струм, що часто призводить до хибних спрацювань, були названими фантомними тривогами на кухнях. [21]

1.4.2 System Sensor 2151

System Sensor 2151 це професійний девайс, що використовує двокамерну схему, яка є значно стабільнішою. Пристрій має дві іонізаційні камери, з'єднані послідовно: Вимірювальна камера, це відкрита для доступу зовнішнього повітря і еталонна камера майже герметична, вона служить для компенсації змін температури, тиску та вологості навколишнього середовища.



Рисунок 1.10 – System Sensor 2151 [22]

Електроніка пристрою вимірює різницю потенціалів у точці з'єднання двох камер. Коли атмосферні умови змінюються, параметри обох камер змінюються однаково диференціальний метод, і баланс зберігається. Проте, коли дим потрапляє лише у вимірювальну камеру, баланс порушується, що викликає спрацювання. [23]

Висновок до розділу 1

У ході проведення огляду сучасних засобів виявлення диму. Кожен свою нішу застосування, зумовлену фізичними принципами роботи та економічною доцільністю. Незважаючи на високу ефективність спеціалізованих систем таких як аспіраційні, для подальшої розробки в межах даної дипломної роботи було обрано саме точковий оптичний димовий сповіщувач.

Точкові сповіщувачі є найбільш масовим продуктом у галузі пожежної безпеки. Під час аналізу існуючих моделей підтвердив, що залишається актуальною проблемою ідентифікації диму на фоні завад як пил, пар, аерозолі. Оскільки точкові датчики найчастіше встановлюються в місцях з нестабільним середовищем, це офіси, кухні, готельні номери.

Таким чином, метою даної роботи є розробка та дослідження вдосконаленого точкового оптико-електронного сповіщувача. Основний акцент буде зроблено на застосуванні мультиспектрального підходу, аналізі сигналів з декількох ракурсів спостереження.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ФІЗИЧНІ ОСНОВИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНОЇ ДЕТЕКЦІЇ АЕРОЗОЛІВ

Проектування сучасних систем пожежної безпеки вже неможливо уявити без чіткого математичного та фізичного моделювання. Головна проблема, яку необхідно вирішити при створенні надійного оптичного датчика, це його нездатність відрізняти реальний дим від оптичних перешкод, таких як водяна пара або пил. Тому даний розділ присвячений саме фізиці процесів: як світло взаємодіє з аерозолями, чому для селекції диму доцільно використовувати два спектри, і як ці мікроскопічні зміни фіксуються напівпровідниковим фотоприймачем нашого пристрою.

Перш ніж заглиблюватися в оптику, варто чітко визначити, що саме система намагається реагувати. У галузі пожежної безпеки прийнято орієнтуватися на стандартизовані тестові пожежі відповідно до сертифікаційних пожеж описаних в EN-54-7. Залежно від того, які саме матеріали горять і в якому режимі відкрите полум'я чи тління, усереднений розмір часток диму кардинально відрізняється:

- При відкритому горінні деревини (ТП1) виділяється ультрадисперсний дим із розміром часток близько 0.1-0.2 мкм.
- При тлінні бавовняного шнура (ТП3) вони трохи більші — близько 0.15-0.3 мкм.
- Горіння пластиків типу пінополіуретану (ТП4) або таких рідин, як n-гептан (ТП5), дає частки розміром 0.2-0.4 мкм.
- Звичайне тління деревини (ТП2) генерує доволі крупний аерозоль — 0.5-1 мкм.

Саме цей діапазон 0.1 до 1 мкм і є нашою головною робочою зоною. [24]

2.1 Еволюція вибору спектральних діапазонів: від інфрачервоного до двоканалного методу

Вибір довжин хвиль для оптичних сповіщувачів не є випадковим і диктується двома факторами: фундаментальною фізикою розсіювання та технологічним розвитком напівпровідникової оптоелектроніки.

Історично перші та переважна більшість сучасних бюджетних оптичних сповіщувачів будувалися виключно на базі інфрачервоних випромінювачів, на основі гетероструктур GaAs або AlGaAs з довжиною хвилі 850–940 нм. Цей вибір був зумовлений виключно апаратною доцільністю, а саме:

- Максимум спектральної чутливості дешевих кремнієвих (Si) фотодіодів припадає саме на ближній інфрачервоний діапазон, що є близько 900 нм, де квантовий вихід сягає максимуму.
- Пряме падіння напруги на ІЧ-діодах становить всього 1.2–1.5 В, що ідеально підходило для систем з автономним батарейним живленням.
- Інфрачервоне випромінювання має занадто велику довжину самої хвилі 0.9 мкм порівняно з розміром часток диму від відкритого полум'я $d = 0.1 \dots 2$ мкм. Для таких часток розсіювання переходить у релєївську зону, де інтенсивність відблиску катастрофічно падає пропорційно λ^{-4} . Іншими словами, класичний датчик є майже «сліпим» до початкових стадій швидкого горіння. [25]

Для виявлення дрібних часток сажі фізика вимагала переходу до короткохвильового діапазону. Згідно з теорією Мі, щоб отримати максимальний відблиск від частки розміром 0.1–0.2 мкм, довжина хвилі випромінювання повинна бути максимально наближеною до цього розміру. Оптимальним вибором став синій спектр з довжиною хвилі 450–470 нм, проте його впровадження в пожежну безпеку стало можливим лише у 2010-х роках після комерціалізації яскравих синіх світлодіодів на базі нітриду галію та індію InGaN

- відкриття, за яке у 2014 році було присуджено Нобелівську премію з фізики. [26]

Оскільки $\lambda_{blue} = 470$ нм є майже вдвічі коротшою за $\lambda_{шк} = 920$ нм, ефективність розсіювання синього світла на наддрібних частинках, наприклад, дим від горіння пінополіуретану, зростає в десятки разів, наближаючи чутливість оптичної камери до показників старої школи а саме радіоізотопних іонізаційних датчиків.

Використання лише синього діода зробило б датчик надчутливим до всього: і до диму, і до дрібного пилу, так і до пари. Поєднання саме цих двох діапазонів, короткохвильового 470 нм та довгохвильового 850–940 нм, дозволило нам створити систему диференціальних рівнянь. Де інфрачервоний канал став виконувати роль базового вимірювача для детектування великих об'єктів такі як пара, а синій канал до селективного вимірювача щоб відрізнити дрібні частки продуктів горіння. Саме така комбінація дозволила розв'язати багаторічну проблему пожежної безпеки – зі здатністю програмно обчислити середній діаметр аерозолію незалежно від його концентрації, що і реалізується за допомогою спектрального відношення R. [24]

2.2 Хвильова теорія розсіювання оптичного випромінювання на дисперсних середовищах

Процес реєстрації аерозолів в оптичній камері сповіщувача не є тривіальним відбиттям світла. З точки зору електродинаміки, цей процес являє собою дифракцію електромагнітних хвиль на діелектричних та поглинаючих неоднорідностях. Коли плоска електромагнітна хвиля набігає на частинку диму, вона змінює його електричне та магнітне поле, де хвилі збуджують у речовині частинки вимушене коливання зв'язаних чи вільних електронів. Ці електрони самі стають одним з джерел вторинного електромагнітного випромінювання, яке поширюється у всіх напрямках — являється розсіяним світлом.

Для строгого математичного опису цього процесу використовується безрозмірний параметр дифракції, що пов'язує фізичний розмір частинки із довжиною хвилі випромінювання, та описується формулою:

$$x = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \quad (2.1)$$

де x - параметр дифракції, d - фізичний розмір частинки, λ – довжина хвилі випромінювання. [27]

Залежно від значення параметру дифракції, електродинаміка виділяє три граничні випадки, описаних нижче:

2.2.1 Режим Релеївського розсіювання ($x \ll 1$)

Даний режим реалізується, коли об'єкт значно менший за довжину хвилі що розповсюджується на такі частинки розмір яких $d < 0.2$ мкм. Для систем пожежної детекції це відповідає наддрібним частинкам ультрадисперсного диму, які виділяються на початкових найбільш критичних стадіях швидкого горіння.

У цьому режимі класичне релеївське дипольне наближення перестає діяти. Оскільки розмір частинки стає порівнянним із довжиною хвилі, електромагнітне поле всередині частинки більше не можна вважати однорідним. Електромагнітна хвиля, проходячи крізь об'єм частинки, зазнає фазового зсуву. Різні ділянки однієї й тієї ж частинки стають джерелами вторинних хвиль, які інтерферують між собою, створюючи складну дифракційну картину просторового розсіювання. При цьому наближенні електромагнітне поле падаючої хвилі всередині частинки можна вважати однорідним. Де змінне електричне поле індукує в частинці дипольний момент, що коливається з частотою падаючої хвилі. [28]

Згідно з теорією Релея, переріз розсіювання σ_{sca} для сферичної частинки визначається формулою:

$$\sigma_{sca} = \frac{2\pi^5 d^6}{3\lambda^4} \cdot \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (2.2)$$

де $m = n - i \cdot k$ — комплексний показник заломлення речовини частинки.

Як видно з формули, інтенсивність розсіяного світла обернено пропорційна четвертому степеню довжини хвилі $I \propto \lambda^{-4}$. Якщо порівняти ефективність розсіювання класичного інфрачервоного світлодіода $\lambda_{IR} = 850\text{ нм}$ та інноваційного синього $\lambda_{blue} = 470\text{ нм}$ на тих самих ультрадрібних частинках, отримаємо співвідношення:

$$\frac{I_{blue}}{I_{IR}} \approx \left(\frac{850}{470}\right)^4 \approx 10.8 \quad (2.3)$$

Отже, синій оптичний канал майже в 11 разів ефективніше перетворює енергію падаючої хвилі у відблеск, що реєструється фотодіодом. Це математично обґрунтовує необхідність застосування короткохвильових джерел для раннього виявлення відкритих пожеж. [29]

2.2.2 Режим резонансного розсіювання Мі ($x \approx 0.1 \dots 2$)

Це основна робоча межа для пожежних сповіщувачів, оскільки медіанний діаметр частинок типового диму, від тління або піролізу пластику, лежить у межах 0.2 до 2.0 мкм, що повністю спів розмірно з довжиною хвилі оптоелектронних пар.

У цьому режимі дипольне наближення не діє, оскільки поле всередині частинки є суттєво неоднорідним. Точний розв'язок задачі являється рішенням рівнянь Максвелла, який був знайдений Густавом Мі і має вигляд нескінченного збіжного ряду за сферичними гармоніками. Ефективність розсіювання описується фактором Q_{sca} :

$$Q_{sca} = \frac{\sigma_{sca}}{\pi(d/2)^2} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2.4)$$

Де a_n і b_n - коефіцієнти Мі, які виражаються через функції Ріккати-Бесселя. [25]

Однією з головних особливостей режиму Мі є виникнення сильної асиметрії у просторовому розподілі інтенсивності розсіяного світла $I(\theta)$. На відміну від симетричного розсіювання Релея, тут спостерігається яскраво виражений ефект Мі експоненційне переважання інтенсивності розсіювання у напрямку поширення падаючої хвилі, вперед, при кутах $\theta \rightarrow 0^\circ$. Зі збільшенням розміру частинки передня пелюстка індикатрисы стає вузкою та довшою, тоді як бокове та зворотне розсіювання набувають осцилюючого хвилеподібного характеру.

Саме ця складна пелюсткова структура і є індикатрисою яка диктує жорсткі вимоги до геометрії вимірювальної камери розроблюваного сповіщувача. У нашій системі фотоприймач розміщується під тупим кутом, що становить 135° - 145° відносно оптичної осі випромінювача. Таке конструктивне рішення переслідує такі інженерні цілі, а саме:

- Режим темного поля, що унеможливує потрапляння прямого випромінювання від світлодіода на лінзу фотодіода, зводячи фоновий струм практично до нуля в умовах чистого повітря.
 - Оптимізація селективності, яку згідно з розрахунками за моделлю Мі, саме в діапазоні кутів 135° – 140° різниця в інтенсивності розсіювання між водомісткими аерозолями (пара) та вуглецевими фракталами тобто димові частинки є найбільш контрастною для дво спектральної пари між синім та інфрачервоним випромінюванням.
- [24]

2.2.3 Режим геометричної оптики ($x \gg 1$)

Даний режим характерний для макроскопічних частинок, таких як краплі водяної пари, туману, конденсату або пилу де розмір частинок становить приблизно $d > 5 \dots 10$ мкм.

Побудова фізичної моделі при цьому наближенні де хвилеподібна природа світла відходить на другий план. Електромагнітну хвилю можна розглядати як

пучок паралельних променів, локалізованих у просторі. Процес розсіювання зводиться до таких класичних явищ, а саме:

- Фраунгоферова дифракція на контурі частинки, що формує вузький пелюсток розсіювання вперед.
- Дзеркальне відбиття від поверхні краплі.
- Заломлення згідно із законом Снеліуса, що з подальшим внутрішнім перевідбиттям та виходом променів назовні формує такі явища, як веселка.

Критичний наслідок для протипожежної безпеки при наближенні геометричної оптики переріз розсіювання перестає залежати від довжини хвилі λ , так званий парадокс екстинкції, де.

$$\sigma_{ext} \rightarrow 2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.5)$$

Це означає, що хмара водяної пари, або частинок пилу однаково сильно відбиває як інфрачервоне, так і синє світло.

2.3 Фізико-хімічна та морфологічна диференціація пожежних та непожежних аерозолів

Для побудови надійного алгоритму селекції необхідно чітко розмежувати оптичні властивості водяної пари, продуктів піролізу та сертифікаційних чи тестових аерозолів. Взаємодія світла з речовиною визначається її комплексним показником заломлення m :

$$m = n - i \cdot k \quad (2.6)$$

де n — дійсна частина, фазова швидкість світла в середовищі, k — головний показник поглинання згасання амплітуди хвилі, i — уявна одиниця.

Оптичні властивості водяної пари

Краплі води, що утворюють пару в побутових умовах, завдяки силам поверхневого натягу набувають ідеально сферичної форми. Вода у видимому та ближньому ІЧ-спектрі є прозорим діелектриком. Її показник поглинання мізерно малий:

$$m_{water} = 1.33 - i \cdot 10^{-8}$$

Водяна пара діє як ідеальна розсіювальна лінза. Енергія падаючої хвилі майже не перетворюється на тепло, а повністю перевипромінюється в простір. Ідеальна сферична форма крапель призводить до того, що поляризація відбитого світла зберігає високий ступінь симетрії.

Оптичні властивості димового аерозолі

Дим є складною гетерогенною сумішшю. Частинки сажі, які масово виділяються при горінні пластику, кабельної ізоляції та гуми, мають високу концентрацію вуглецю. Їхній показник заломлення характеризується надзвичайно високою уявною частиною, а саме:

$$m_{soot} = 1.65 - i \cdot 0.5 \dots 1.9$$

Дим являється поглинаючим середовищем. Значна частина енергії фотонів витрачається на нагрівання мікрочастинки сажі, через що інтенсивність розсіяного світла I_{sca} суттєво падає. Крім того, морфологія частинок сажі не є сферичною. У процесі коагуляції вони утворюють фрактальні агрегати такі як ланцюжки, пластівці.

Оптичні властивості калібрувального тестового аерозолі

Під час сертифікаційних випробувань та технічного обслуговування систем безпеки використовується штучний дим згідно з вимогами ДСТУ EN 54. Він генерується шляхом термічного випаровування та подальшої конденсації гліколевих сумішей, парафіну або мінеральних масел.

Показник заломлення парафінового аерозолі характерний як для діелектриків:

$$m_{test} = 1.48 - i \cdot 10^{-2}$$

При конденсації такі аерозолі утворюють дрібні краплі розміром $d = 0.4 \dots 1$ мкм. Через дію поверхневого натягу вони набувають ідеально так само сферичної форми, як і водяна пара. Отже, тестовий аерозоль не викликає деполяризації світла. Якщо архітектура сповіщувача базуватиметься тільки на крос-поляризаційному методі селекції, то пристрій заблокує сигнал від тестового аерозолу, класифікувавши його як водяну пару, що призведе до провалу процедури сертифікації.

Для вирішення проблеми з детектуванням алгоритм розроблюваного пристрою базується на спектральному відношенні тобто R . Оскільки розмір крапель парафіну трохи менша 1.0 мкм а розмір крапель генеративної побутової пари більша за 2.0 мкм, то інтенсивність розсіювання синього світла для тестового диму буде значно вищою за інфрачервоне. Після цього мікроконтролер зафіксує спектральне відношення $R \approx 1.0 \dots 1.2$. Таким чином, при відсутності деполяризації, але наявності високого значення спектрального відношення, алгоритм ідентифікує калібрувальний аерозоль і переводить систему в режим Пожежа. [30]

Оптичні властивості пилу

Пил є одним із найпоширеніших факторів хибних спрацьовувань оптичних пожежних сповіщувачів. Побутовий або промисловий пил складається з твердих мікрочастинок, такі як мінеральні речовини, лусочки шкіри, текстильні волокна тощо, розмір яких зазвичай варіюється від 20 до 100 мкм і більше.

Показник заломлення пилових частинок залежить від їхнього походження наприклад, для мінерального пилу він становить близько 1.5. На відміну від ідеально сферичних крапель водяної пари або тестового парафінового аерозолу, частинки пилу мають складну, асиметричну форму з вираженою шорсткістю поверхні. Через таку неправильну геометричну форму пил викликає значну

деполяризацію розсіяного світла (площина поляризації після відбиття від шорсткої поверхні хаотично обертається).

$$m_{pil} = 1.5 - i \cdot 0.3 \dots 0.8$$

Що стосується спектрального відношення R , то через відносно великий розмір частинок пилу (їхній діаметр співставний або більший за довжину хвилі як синього, так і інфрачервоного світла), розсіювання переходить у геометричну оптику. У цьому режимі інтенсивність розсіювання слабо залежить від довжини хвилі. Відповідно, інтенсивність розсіювання синього та інфрачервоного світла є приблизно однаковою, тому спектральне відношення R для пилу є низьким наближається до 1.0.

Для вирішення проблеми хибних спрацьовувань розроблюваного пристрою комплексно аналізує параметри з обох фотоприймачів. Таким чином, при фіксації високого рівня перевідбивання променів у перед, одночасно низького значення на другому фотодіоді через великий розмір частинок, алгоритм мікроконтролера однозначно ідентифікує аерозоль як пил.

Висновок до розділу 2

У даному розділі теоретично було обґрунтовано фізичні принципи роботи багатоспектрального пожежного сповіщувача. Проведений аналіз електродинаміки розсіювання у наближеннях Релея, Мі та геометричної оптики.

Показано, що перехід до двоспектральної архітектури з використанням короткохвильового синього 470 нм та довгохвильового інфрачервоного 850–940 нм випромінювання радикально підвищує чутливість пристрою до часток розміром 0.1–1.0 мкм. Детальний розгляд фізико-хімічної морфології різних середовищ підтвердив, що комплексний аналіз спектрального відношення R та просторової індикатрисы розсіювання завдяки розміщенню фотоприймачів під різними кутами дозволяє розрізняти об'єкти детекції.

РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИМОВОЇ КАМЕРИ

3.1 Вибір програмного забезпечення та математичного апарату

Проектування оптичної системи сучасного пожежного сповіщувача вимагає точного розуміння взаємодії електромагнітного випромінювання з аерозольними середовищами такими як: дим, пил, пара. Оскільки медіанний діаметр частинок диму становить від 0.1 до 1.5 мкм, що є співрозмірним із довжинами хвиль випромінювачів $\lambda_{blue} = 470$ нм та $\lambda_{IR} = 850$ нм, закони класичної геометричної оптики в даному випадку не застосовуються. Для коректного аналізу необхідно використовувати строгий розв'язок рівнянь Максвелла — теорію розсіювання Мі.

Реалізація такого математичного апарату потребує спеціалізованого програмного забезпечення. На етапі підготовки до моделювання було розглянуто кілька альтернативних середовищ, а саме:

1. Python (бібліотеки SciPy, Mierpython): Має відкритий вихідний код і велику спільноту, проте вимагає самостійної інтеграції багатьох модулів для побудови складних 3D-моделей камери та значних витрат часу на оптимізацію швидкості обчислень для великих масивів частинок.
2. COMSOL Multiphysics: Потужні пакети для моделювання на рівні скінченних різниць у часовій області. Вони непогано підходять для розрахунку складних несиметричних структур, але є надлишковими для сферичних часток. Обчислення розсіювання на масиві з 10^6 часток у таких пакетах займало б невиправдано багато обчислювального часу.
3. MATLAB: Зручні для математичних обчислень, мають функціонал для створення кастомізованих 3D-візуалізацій оптичних променів та індикатрис розсіювання у просторі.

У результаті аналізу для виконання розрахункової частини дипломної роботи було обрано програмне середовище MATLAB.

При розробці програмного коду використовувалася офіційна документація MathWorks, а також адаптовані алгоритми чисельних розрахунків з відкритих бібліотек MATLAB Central File Exchange, що базуються на класичних скриптах MIEV0 для атмосферної оптики. [31]

3.2 Математичне моделювання оптичного відгуку для різних типів аерозолів

Головною метою комп'ютерного моделювання є перевірка та чисельне підтвердження теоретичних положень, викладених у п. 2.3, щодо комплексного алгоритму диференціації «пара - дим - пил». Для надійного розпізнавання типу завади мікроконтролер пожежного сповіщувача спирається на показник спектрального співвідношення R Ratio, який визначається як відношення інтенсивностей розсіяного випромінювання у синьому 470 нм та інфрачервоному 850 нм діапазонах:

$$R = \frac{I_{blue}}{I_{IR}} \quad (3.1)$$

Щоб отримати значення R для кожного типу середовища, у програмному середовищі MATLAB було розроблено симуляційну модель на основі точного розв'язку теорії Мі (exact_mie_solver). Програма дозволяє динамічно змінювати фізичні параметри часток і фіксувати зміну оптичного відгуку.

Основними змінними параметрами у скрипті є:

- Діапазон діаметрів часток D (відповідає за розмір дисперсної фази).
- Комплексний показник заломлення $m = n - ik$, де дійсна частина n відповідає за заломлення, а уявна k - за поглинання, характеризує колір та прозорість матеріалу.

Шляхом зміни цих вхідних параметрів у коді було змодельовано чотири базові сценарії, які може зустріти сповіщувач у реальних умовах:

Дим від горіння матеріалів

Для імітації продуктів горіння у скрипті задано високу поглинальну здатність $m = 1.65 - 0.8i$. Діапазон розмірів обрано в межах 0.1 - 1.5 мкм.

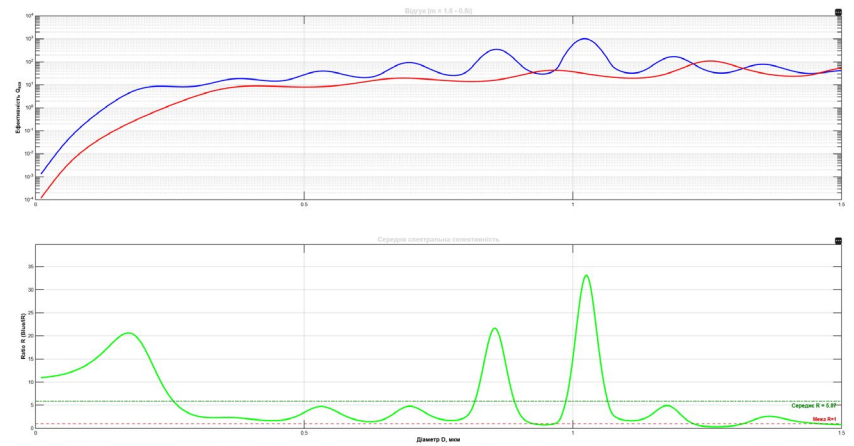


Рисунок 3.1 – Графік різниці заломлення різної довжини хвилі для диму

Алгоритм розраховував, що для диму ефективність розсіювання синього світла значно перевищує ІЧ-випромінювання. Розраховане середнє спектральне співвідношення становить $R_{smoke} = 5.87$.

Тестовий сертифікаційний аерозоль

Під час лабораторних випробувань за стандартом EN 54-7 чи перевірки сповіщувачів тестовими балончиками чи стендами використовується аерозоль на основі парафінових олив або спеціальних дисперсій. Він імітує білий дим із низьким поглинанням $m = 1.48 - 0.01i$ та стабільним розміром часток 0.5 - 1.5 мкм.

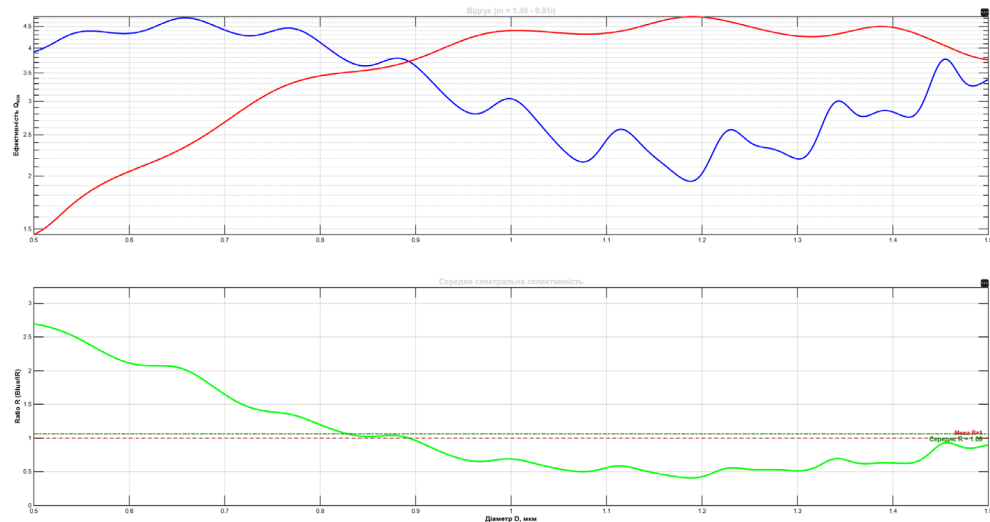


Рисунок 3.2 – Графік різниці заломлення різної довжини хвилі для тестового аерозолію

Через відсутність сильного внутрішнього поглинання, розсіювання на тестовому аерозолі відрізняється від чорної сажі. Однак, завдяки дрібнодисперсній природі, синій канал все одно домінує. Розраховане значення $R_{test} = 1.06$.

Водяна пара

Пара складається з прозорих сферичних крапель води. У коді це відображено встановленням уявної частини показника заломлення в нуль $m = 1.33 - 10^{-5}i$. Розміри крапель пари зазвичай більші за частки диму $D = 1 - 5$ мкм.

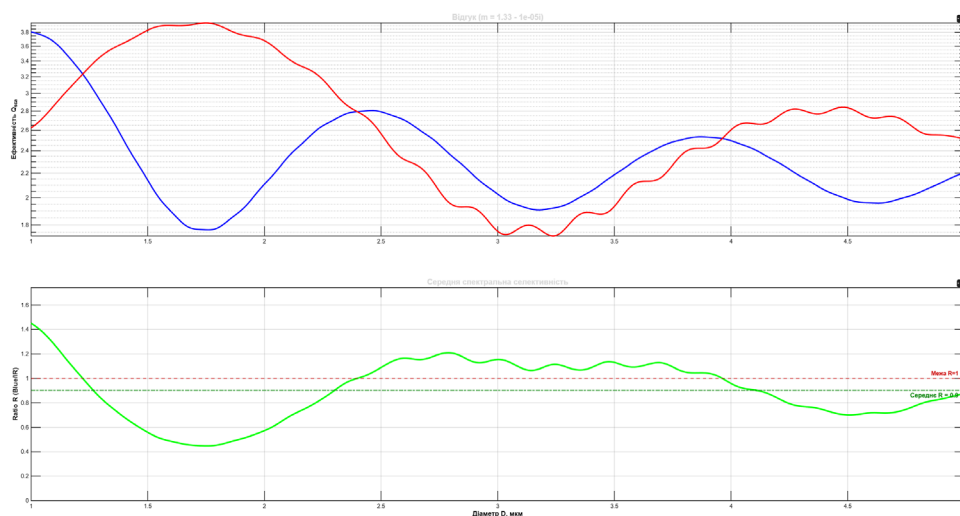


Рисунок 3.3 – Графік різниці заломлення різної довжини хвилі для водяної пари

Відсутність внутрішнього поглинання призводить до того, що крапля води працює як мікролінза. Моделювання показало, що спектральна селективність різко падає, і співвідношення наближається до межі геометричної оптики. Програма зафіксувала середнє значення $R_{water} = 0.9$.

Побутовий пил Ворсинки

Пил та ворсинки є макрооб'єктами порівняно з довжинами хвиль світлодіодів ($D = 50 - 100$ мкм). Для них у кодї задано параметри типового діелектрика $m = 1.5 - 0.3i$.

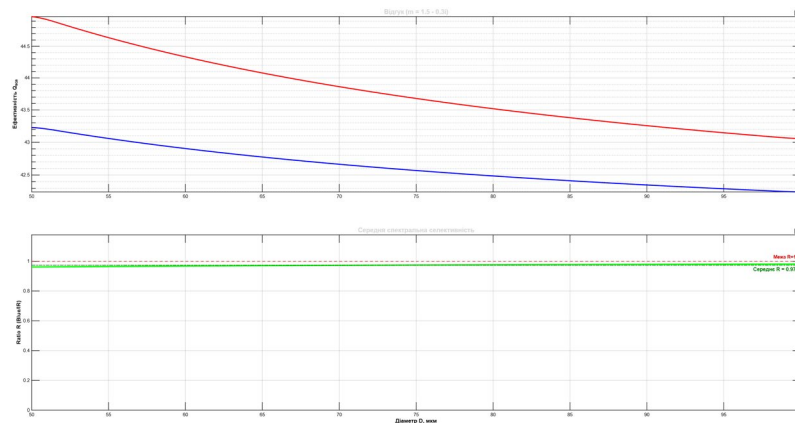


Рисунок 3.4 – Графік різниці заломлення різної довжини хвилі для побутового пилу

Запуск симуляції для великих розмірів підтверджує, що вплив довжини хвилі повністю нівелюється перехід у зону дифракції Фраунгофера. Інтенсивності синього та інфрачервоного сигналів стають майже ідентичними, що дає розрахункове значення $R_{dust} = 0.97$.

Висновок завдяки проведеному комп'ютерному моделюванню вдалося чисельно довести коректність роботи алгоритму, описаного у пунктах 2.3. Створений MATLAB-скрипт підтвердив, що використання двоколірної оптопари дозволяє розділити сигнали. ДОДАТОК Г

3.2 Дослідження кутових індикатрис розсіювання

Незважаючи на ефективність спектрального аналізу, використання лише одного фотоприймача залишає систему вразливою до локальних оптичних аномалій у ближній зоні наприклад, ворсинка безпосередньо перед лінзою. Для доведення необхідності введення другого фотодіода під кутом 60° було проведено порівняльне моделювання кутових індикатрис розсіювання для чотирьох типів часток: диму, тестового аерозолі, водяної пари та пилу.

Розрахунок проводився за алгоритмом Борена-Хафмена (exact_bh_angular) у логарифмічній шкалі децибел, що дозволяє наочно порівняти амплітуди розсіювання в різних напрямках.

$$I_{dB}(\theta) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I(\theta)}{I_{max}} \right) \quad (3.2)$$

де, $I_{dB}(\theta)$ - нормована інтенсивність розсіяного світла, $I(\theta)$ - абсолютна інтенсивність розсіяного випромінювання під заданим кутом спостереження, I_{max} - максимальне значення інтенсивності розсіювання для досліджуваної частинки на всьому діапазоні кутів.

Дим від горіння матеріалів

Індикатриси цих часток мають найбільш рівномірну ізотропну форму. Світло розсіюється у широкому куті через малий розмір часток, забезпечуючи стабільне надходження сигналу у різні сторони. Це підтверджує, що для диму просторова кореляція між сенсорами буде максимальною однаковою.

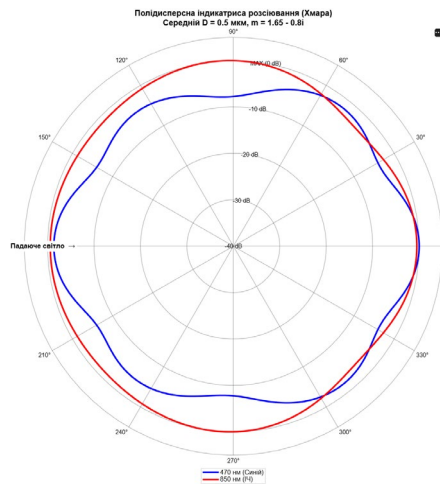


Рисунок 3.5 – Полідисперсна індикатриса розсіювання для диму

Тестовий сертифікаційний аерозоль

На частинках сертифікаційного аерозолі індикатриса починає витягуватися вперед через декілька факторів, а саме збільшення розміру частинки та мале поглинання променів коли показник заломлення розсіювання є більшим відносно диму. Де кількість світла яка потрапляє під кутом 120° відносно 0° менша на 18-22 децибела.

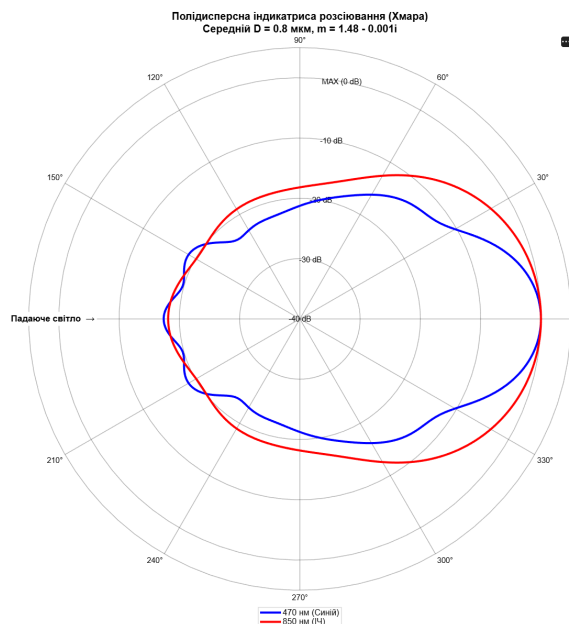


Рисунок 3.6 – Полідисперсна індикатриса розсіювання для тестового аерозолі

Водяна пара

При збільшенні розміру крапель води від 1 до 5 мкм відносно індикатриса починає витягуватися вперед більше ніж у тестового аерозолію. Яка ще більше розтягується від поглинання, та специфічний показник заломлення води, але бічне розсіювання залишається достатньо інтенсивним. Де кількість світла яка потрапляє під кутом 120° відносно 0° менша на 26-28 децибелів.

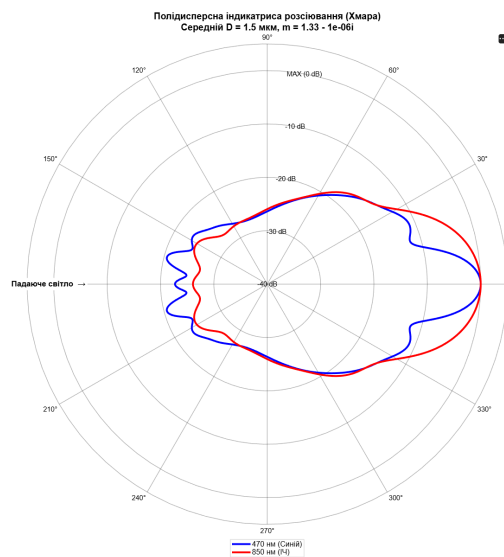


Рисунок 3.7 – Полідисперсна індикатриса розсіювання для водяної пари

Побутовий пил Ворсинки

Для великих часток індикатриса перетворюється на екстремально вузьку голку дифракції Фраунгофера. Переважна частина енергії зосереджена в межах кута $5^\circ - 10^\circ$, стрімко падає на $15^\circ - 50^\circ$ у тисячі разів, при переході до кута спостереження $65^\circ - 80^\circ$ інтенсивність сигналу різко зростає, кількість світла яка потрапляє під кутом 120° відносно 0° менша на 38-40 децибелів. ДОДАТОК Д

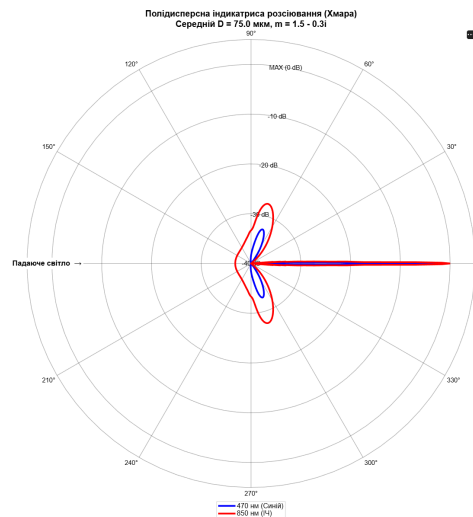


Рисунок 3.8 – Полідисперсна індикатриса розсіювання для тестового побутового пилу

3.3 Тривимірне геометричне моделювання робочого об'єму оптичної камери

На основі результатів моделювання оптичних індикатрис розсіювання п. 3.2 було визначено, що для ефективної роботи системи необхідно забезпечити чітко обмежений об'єм простору, де випромінювання від світлодіодів може зустрітися з полем зору фотоприймача виключно за наявності аерозолію.

Для візуалізації та перевірки коректності розміщення оптичних елементів у середовищі MATLAB було розроблено 3D-модель з можливою геометрією димової камери.

Просторова модель камери базується на методі вокселізації та булевої алгебри 3D-масивів. Кожен оптичний елемент (світлодіоди синього та інфрачервоного спектра, а також фотодіод) представлений як джерело конічного поля з визначеним кутом розкриття.

- Кут розкриття випромінювачів прийнято на рівні 15° .
- Кут огляду фотоприймача прийнято на рівні 15° .

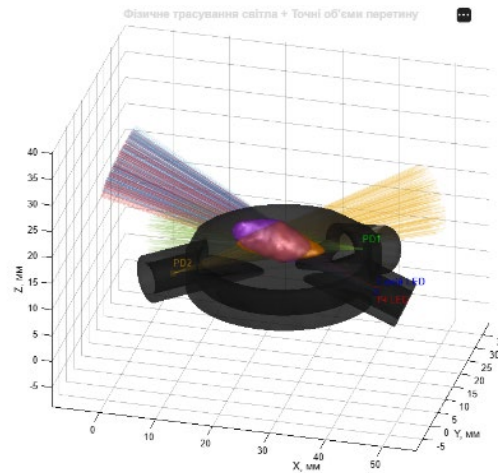


Рисунок 3.9 – 3D модель зони детектування вигляд 1

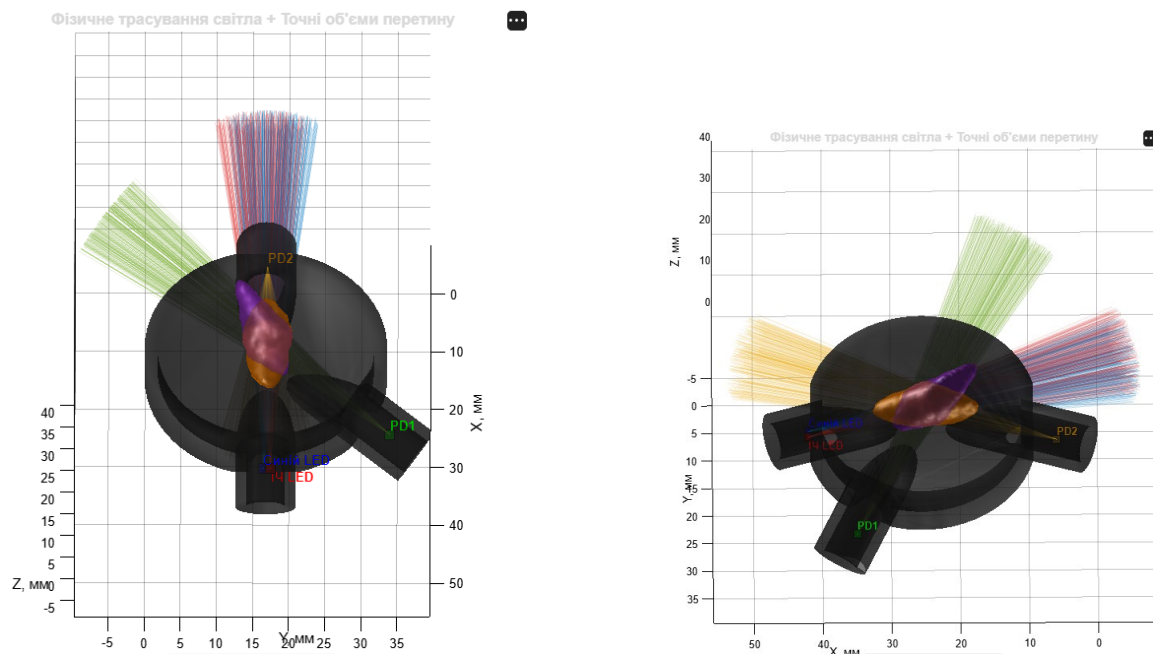


Рисунок 3.10 – 3D модель зони детектування вигляд 2-3

За допомогою операції логічного перетину масивів $\text{Intersection} = \text{vol_LED} \& \text{vol_PD}$ розраховано та візуалізовано, де фіолетова зона ефективний робочий об'єм. Це та унікальна зона простору, яка одночасно освітлюється світлодіодами і знаходиться в полі зору фотодіода. Будь-яка частинка диму, що потрапляє в цю фіолетову зону, гарантовано відбиватиме світло на лінзу приймача. Помаранчева зона, це ефективна зона другого світлодіоду, який знаходиться під кутом 120° від

основного фотодіода. Так само видно що зони двох світлодіодів мають, майже однакову зону детектування, де мають розбіжність у 15-20%. ДОДАТОК Е

Висновок до розділу 3

Архітектура системи та обґрунтування оптичної конфігурації, за результатами комп'ютерного моделювання у розділі 3, дозволяють сформулювати чіткі інженерні критерії щодо просторової організації та апаратної архітектури оптичної камери сповіщувача. Для забезпечення безпомилкової ідентифікації цільових матеріалів таких як дим та тестовий аерозоль, і нецільових як водяна пара, побутовий пил у нашому середовищі, структурна схеми приладу базується на двох фундаментальних рішеннях, а саме:

1. Спектральна селекція використання двоколірного випромінювача є першим рівнем диференціації є аналіз дисперсійних характеристик середовища. Опромінення часток двома різними довжинами хвиль дозволяє системі фіксувати різницю у коефіцієнтах заломлення та поглинання матеріалів. Це дає змогу надійно відрізнити дим від водяної пари. Проте спектральний аналіз не є вичерпним: за своїм оптичним відгуком великі частки пилу можуть імітувати параметри сертифікаційного тестового аерозолю, через це потрібна додаткова селекція.

2. Просторова верифікація додавання другого фотоприймача згідно з нормативними вимогами, алгоритм мікропрограмного забезпечення сповіщувача не може змінюватися: прилад повинен однаково надійно реагувати на тестовий аерозоль під час сертифікації та відсікати побутовий пил у реальних умовах експлуатації. Використання лише одного фотоприймача робить систему вразливою до "локальних оптичних аномалій". Якщо макроскопічна ворсинка або пилинка потрапляє безпосередньо в ближню зону над лінзою PD1, інтенсивне локальне перевідбиття світла може бути хибно ідентифіковано

алгоритмом як заповнення камери аерозолем, що неминуче призведе до хибної тривоги.

Для мінімізації цього ризику в архітектуру системи вводиться другий фотоприймач, розміщений під кутом 120° відносно осі випромінювача у зоні зворотного розсіювання. Другий фотодіод виконує функцію просторового верифікатора. Одночасний аналіз сигналів із двох рознесених точок суттєво покращує селективність приладу: мікроконтролер перевіряє наявність об'ємного середовища і здатний надійно відфільтрувати одиничні об'єкти, які не формують рівномірного розсіювання на обох кутах одночасно.

РОЗДІЛ 4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ ДАТИЧКУ ДИМУ

У цьому розділі переходимо від математичного моделювання оптики до практичної апаратної реалізації пристрою. Головною метою є розробка структури та електрично принципової схеми, та підібрати оптимальні компоненти для проектування друкованої плати з урахуванням вимог щодо малих габаритів та низького енергоспоживання.

Для розробки у даній дипломній роботі апаратної частини сповіщувача та його корпусу було обрано дві зв'язані між собою системи автоматизованого проектування, а саме Altium Designer та SolidWorks. Їхня інтеграція дозволяє уникнути механічних колізій при компонованні плати всередині корпусу.

Розробка електроніки Altium Designer Принципова схема та топологія друкованої плати проектувалось в середовищі Altium Designer, цей вибір зумовлений такими перевагами:

- Надійна система автоматичної перевірки правил, що є критичним для правильного розведення чутливих аналогових ліній трансїмпедансного підсилювача та їх ізоляції від цифрових шумів від мікроконтролера.
- Повноцінна 3D-візуалізація плати в реальному часі. Це дає змогу точно виставити оптичні елементи, світлодіод та фотодіоди під розрахованими кутами.

Механічне проектування у SolidWorks Для створення пластикового корпусу та оптичної димової камери (лабіринту) обрано SolidWorks:

- Середовище чудово підходить для точного твердотільного моделювання складної геометрії з урахуванням мінімальних допусків.
- Підтримка експорту плат з Altium у форматі .STEP. Це дозволяє завантажити віртуальну збірку плати прямо в 3D-модель корпусу і перевірити, чи не впираються радіодеталі у стінки або перегородки камери.

4.1 Структурно-функціональна схема сповіщувача

Проаналізувавши схемотехнічні рішення від виробників на ринку пожежної безпеки, було взято в розробку електричну функціональну схему пристрою. Апаратну частину сповіщувача можна розділити на такі основні функціональні блоки, а саме:

1. Елемент живлення
2. DC-DC перетворювач стабілізатор напруги
3. Стабілізатор струму для інфрачервоного світлодіода
4. Стабілізатор струму для синього світлодіода
5. Світлодіод інфрачервоний
6. Світлодіод синій
7. Фотоприймач під кутом 180°
8. Фотоприймач під кутом 60°
9. Підсилювач для фотоприймача під кутом 180°
10. Підсилювач для фотоприймача під кутом 60°
11. Процесор
12. Індикація

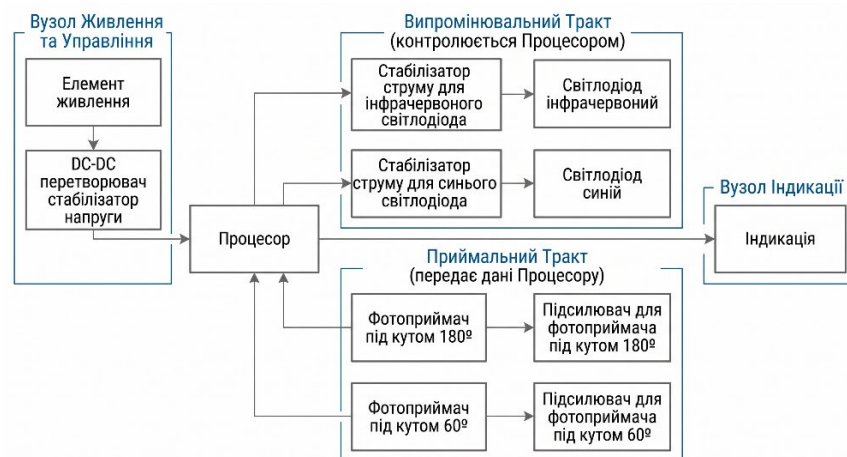


Рисунок 4.1 – Функціональна схема автоматизованого приладу для детектування диму

Оптичний випромінювач

Для реалізації двоспектрального аналізу диму було обрано здвоєний світлодіод Optosupply OSIBNA5A31A-850. Класичний підхід полягає у використанні двох окремих випромінювачів — стандартного інфрачервоного світлодіода, та окремого синього світлодіода.

Використання двох різних корпусів створює оптичну проблему. Оскільки джерела світла рознесені в просторі та їхні промені проходять через різні лінзи через що зона детектування у кожного світлодіода різна. Це рішення об'єднує два кристали, синій та інфрачервоний на 850 нм, в одному спільному корпусі з єдиною лінзою. Випромінювання обох спектрів відбувається фактично з однієї просторової координати. Це гарантує ідеальний збіг оптичних осей, що суттєво підвищує точність детекції диму. [34]

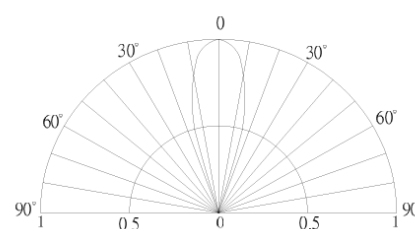
■Absolute Maximum Rating

(Ta=25°C)

Item	Symbol	Value		Unit
		Infrared	Blue	
DC Forward Current	I _F	100	50	mA
Pulse Forward Current#	I _{FP}	1000	120	mA
Reverse Voltage	V _R	5	5	V
Power Dissipation	P _D	160	170	mW
Operating Temperature	T _{opr}	-30 ~ +85		°C
Storage Temperature	T _{stg}	-40 ~ +100		°C
Lead Soldering Temperature	T _{sol}	260°C/5sec		-

*Pulse width Max.10ms Duty ratio max 1/10

■Directivity



■Electrical -Optical Characteristics

(Ta=25°C)

Item	NO.	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
DC Forward Voltage*1	Infrared	V _{F1}	I _{F1} =100mA	-	1.2	1.6	V
	Blue	V _{F2}	I _{F2} =50mA	-	2.9	3.4	V
Peak Wavelength*2	Infrared	λ _p	I _{F1} =100mA	-	850	-	nm
Domi. Wavelength*3	Blue	λ _D	I _{F1} =50mA	465	470	475	nm
Radiant Power*4	Infrared	P _O	I _{F1} =100mA	45	55	-	mW
Radiant Intensity*5	Infrared	I _e	I _{F1} =100mA	180	220	-	mW/Sr
Luminous Intensity*6	Blue	I _v	I _{F2} =50mA	10000	12000	-	mcd
50% Power Angle	Infrared	2θ _{1/2}	I _{F1} =100mA	-	30	-	deg
	Blue	2θ _{1/2}	I _{F2} =50mA	-	30	-	deg

Рисунок 4.3 – Головні характеристики OSIBNA5A31A-850 [34]

Фотоприймач

На початкових етапах проектування оптичної системи як базовий приймач випромінювання розглядався кремнієвий PIN-фотодіод Everlight PD333-3C/H0/L2. Однак, результати оптичного 3D-моделювання, а саме трасування променів у середовищі MATLAB виявили суттєвий недолік даного компонента в контексті розроблюваної архітектури. Головною проблемою PD333 є занадто широкий кут огляду, який становить близько 80° . В умовах компактно вимірювальної камери, така широка діаграма направленості призводить до того, що апертура фотоприймача захоплює не лише корисний об'єм у центрі камери але й зону біля бокових пластикових стінок, що може призвести до хибних срацювань. [35]

Для усунення цього недоліку та оптимізації просторової селективності пристрою, було прийнято обґрунтоване рішення перейти на спеціалізований вузьконаправлений фотодіод OSRAM SFH 213. Завдяки специфічній формі вбудованої лінзи, кут огляду SFH 213 звужено до 15° . Ця просторова вибірковість гарантує, що фотодіод буде сфокусований виключно на центральній точці перетину випромінювачів і значно менше здатен реєструвати паразитне фонове відбиття від стінок камери диму. [36]

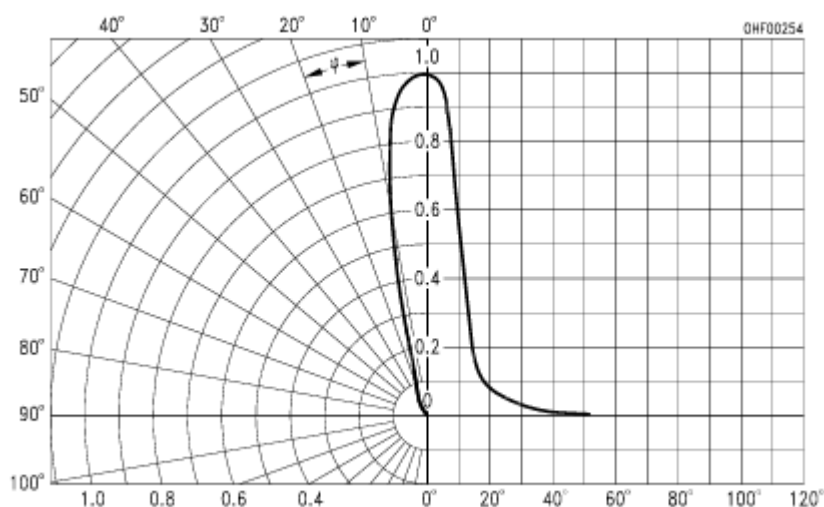


Рисунок 4.4 – Показники куту огляду OSRAM SFH 213 [36]

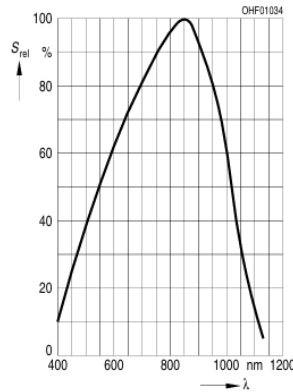


Рисунок 4.5 – Показник чутливості відносно спектру світла [36]

Джерело живлення

Для живлення пристрою обрано літієву батарею формату CR123A. Стандартні лужні батарейки форматів AA або AAA. Мають номінальну напругу 1.5 В. Для забезпечення мінімально необхідної напруги для мікроконтролера їх потрібно з'єднувати послідовно, що збільшує габарити пристрою. Крім того, лужні батареї мають значно вищий струм саморозряду та гірше переносять перепади температур порівняно з літієвими батареями.

CR123A забезпечує напругу 3 В. Літієва технологія гарантує мінімальний саморозряд, де батарея може зберігатися до 10 років. Графік розряду CR123A є дуже пологим вона довго тримає напругу поблизу номіналу, а потім відбувається різкий спад. Враховуючи, що процесор працює до 1.8 В, така батарея є найоптимальнішим вибором для пожежного сповіщувача, де пріоритетом є надійність та малі розміри. [37]

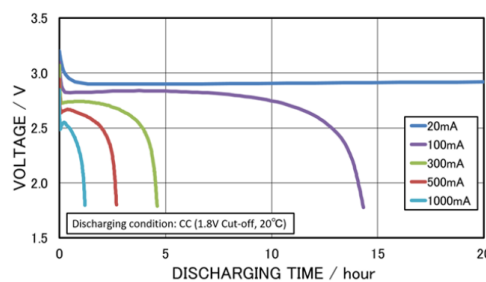


Рисунок 4.6 – Характеристики безперервного розряду CR123A - Panasonic [38]

4.3 Схемотехнічна реалізація та розрахунок функціональних вузлів

4.3.1 Розрахунок вузла живлення

Для забезпечення високої надійності та безперебійної роботи пожежного сповіщувача, згідно з вимогами стандартів безпеки а саме EN54, реалізовано схему апаратного живлення. Вузол побудовано на основі двох незалежних літієвих елементів формату CR123A V1, V2 з номінальною напругою 3.0 В.

На вході шини живлення відразу після батарейного відсіку встановлено класичний швидкий плавкий запобіжник одноразової дії. Він захищає схему від коротких замикань, оскільки літієві батареї CR123A здатні віддавати пікові струми у кілька ампер, що може призвести до загоряння плати при її несправності. Об'єднання джерел живлення виконано за топологією, монтажного АБО. Головним технічним викликом такого підходу є падіння напруги на напівпровідниковому переході V_f , що призводить до незворотних втрат енергії та звуження робочого діапазону напруг для центрального процесора.

Використання стандартних випрямних кремнієвих діодів, наприклад, серії 1N4148 у даній схемі є неприпустимим, оскільки їхнє пряме падіння напруги становить $V_f \approx 0.7$ В. При номінальній напрузі батареї 3.0 В на мікроконтролер надходило б лише 2.3 В, що знижує енергоефективність системи.

З метою мінімізації втрат для схеми обрано бар'єрні діоди Шотткі типу BAT54. Згідно з технічною документацією, пряме падіння напруги для обраних діодів при типовому струмі споживання 10 мА, при максимальному режимі опитування всіх сенсорів становить лише $V_f \approx 0.25$ В. Додатковим критичним критерієм вибору став зворотний струм витоку, обраний компонент має 2 мкА, що унеможливує перетікання струму від зарядженої батареї до розрядженої та запобігає їхньому взаємному нагріванню чи деградації.

Напруга, яка безпосередньо надходить на головну шину живлення мікроконтролера CC1312R V_{MCU} , що описується рівнянням:

$$V_{MCU} = V_{bat} - V_f = 3.0 - 0.25 = 2.75 \text{ В} \quad (4.1)$$

де, V_{MCU} - напруга на процесорі, V_{bat} - напруга батареї, V_f – напруга падіння діодів

Відповідно до документації на мікроконтролер CC1312R, мінімально допустима напруга живлення для гарантованої роботи ядра та АЦП становить 1.8 В. Розрахуємо мінімальну критичну напругу на клеммах батареї, при якій система ще здатна функціонувати:

$$V_{bat_crit} = V_{min} + V_f = 1.8 + 0.25 = 2.05 \text{ В} \quad (4.2)$$

де, V_{bat_crit} - критична напруга батареї з роботою діодів, V_{min} - мінімальна напруга живлення.

Таким чином, корисний діапазон розряду батареї становить $\Delta V = 3.0 - 2.05 = 0.95 \text{ В}$. Цей математичний розрахунок доводить, що обрана елементна база, з діодами Шотткі дозволяє ефективно використати приблизно 80-85% ємності літієвого елемента CR123A.

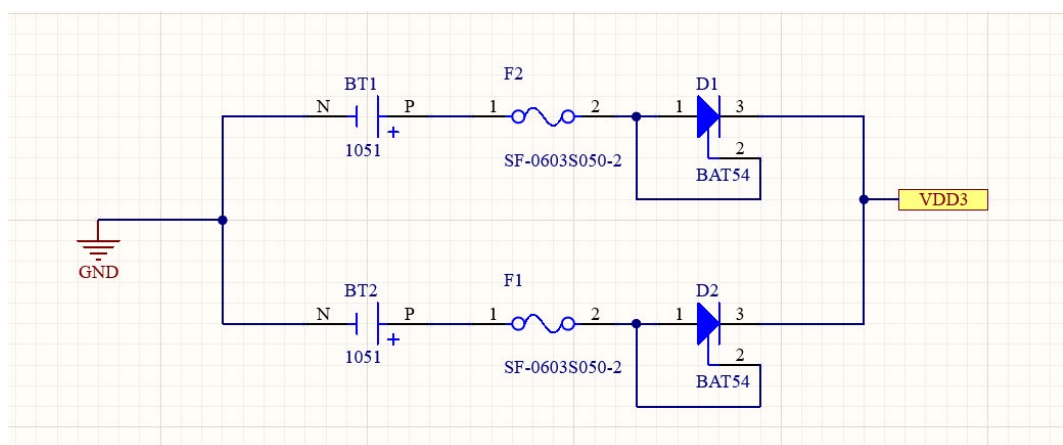


Рисунок 4.7 – Схема вузла живлення

4.3.2 Розрахунок трансімпедансного підсилювача

Для узгодження сигналу від фотодіода з аналого - цифровим перетворювачем мікроконтролера використаємо трансімпедансний підсилювач. Його функція полягає в лінійному перетворенні вхідного фотоструму у вихідну напругу. Для реалізації вузла обрано прецизійний операційний підсилювач SFH 213. Вибір зумовлений його надзвичайно низьким струмом спокою близько 17 мкА та наднизький вхідний струм зсуву приблизно 70 пА, що виключає появу хибної напруги на виході за відсутності освітлення.

Коефіцієнт перетворення чутливість підсилювача задається за допомогою номіналу резистора у колі зворотного зв'язку, де рівняння ідеального трансімпедансного підсилювача має такий вигляд:

$$V_{out} = I_{pd} \cdot R_f \quad (4.3)$$

де, V_{out} - напруга виходу трансімпедансного підсилювача, I_{pd} - струм фотодіода, R_f - опір підсилюючого резистора.

Спираючись на експериментальні дані для подібних оптичних систем, максимальний фотострум при високій концентрації диму становить близько $I_{max} = 500$ нА. Оскільки напруга живлення мікроконтролера за умови розряду батареї може опускатися до 2 В, встановимо максимальну розрахункову вихідну напругу підсилювача на рівні $V_{max} = 2.1$ В, для збереження лінійності та уникнення кліпінгу сигналу.

Розрахуємо необхідний опір:

$$R_f = \frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{2.1}{500 \cdot 10^{-9}} = 4.2 \cdot 10^6 \text{ Ом} \quad (4.4)$$

Зі стандартного ряду номіналів обираємо найближче більше значення: $R_f = 4.3 \text{ МОм}$.

Високий опір зворотного зв'язку в комбінації з власною паразитними ємностями фотодіода та входу операційного підсилювача утворює полюс на

амплітудно-частотній характеристиці, що неминуче призводить до самозбудження генерації схеми. Для забезпечення стабільності та обмеження смуги пропускання, а саме фільтрації високочастотних шумів паралельно до R_f встановлюється компенсуючий конденсатор C_f .

Частота зрізу такого фільтра низьких частот першого порядку розраховується за формулою:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_f} \quad (4.5)$$

де, f_c - частота пропускної здатності ланцюга.

Оскільки зміна концентрації диму є повільним фізичним процесом, нам не потрібна висока швидкодія. Обмежимо смугу пропускання частотою 1.5 кГц, що достатньо для реєстрації імпульсів світлодіода, але відсікає високочастотний електромагнітний шум:

$$C_f = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 4.3 \cdot 10^6 \cdot 1500} \approx 25 \cdot 10^{12} \text{ Ф}$$

Зі стандартного ряду ємностей обираємо $C_f = 25 \text{ пФ}$.

Таким чином, розрахований трансімпедансний підсилювач з параметрами $R_f = 4.3 \text{ МОм}$ та $C_f = 25 \text{ пФ}$ забезпечить стабільне перетворення фотоструму в напругу з коефіцієнтом посилення $4.3 \cdot 10^6 \text{ В/А}$ та відфільтрує високочастотні завади.

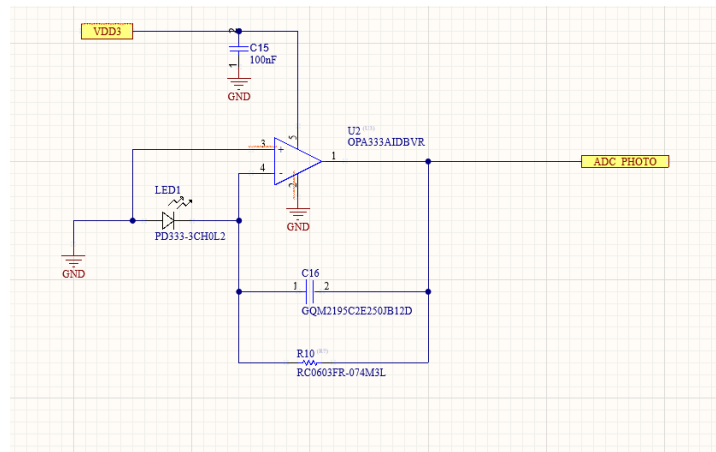


Рисунок 4.8 – Схема трансімпедансного підсилювача

4.3.3 Розрахунок живлення і керування оптичними випромінювачами

Оптична система сповіщувача потребує формування коротких потужних імпульсів світла. Оскільки напруга батареї може падати до 2.0 В, а для живлення синього кристала світлодіода необхідно мінімум 3.2 В, розроблено вузол на базі підвищувального DC-DC перетворювача та каскадного MOSFET-драйвера.

Нам необхідно отримати стабільну вихідну напругу $V_{out2} = 5.0$ В. Мікросхема TPS61070 підтримує цю напругу шляхом порівняння напруги з резистивного дільника із внутрішнім опорним джерелом $V_{ref} = 0.5$ В.

Формула вихідної напруги має вигляд:

$$V_{out2} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_{top}}{R_{bot}} \right) \quad (4.6)$$

Для мінімізації струму витоку через дільник, але забезпечення стійкості до завад, задамо опір нижнього плеча $R_{bot} = 100$ кОм. Виразимо опір верхнього плеча R_{top} :

$$R_{top} = R_{bot} \left(\frac{V_{out2}}{V_{ref}} - 1 \right) = 10^5 \cdot \left(\frac{5}{0.5} - 1 \right) = 9 \cdot 10^5 = 900 \text{ кОм}$$

Оскільки номіналу 900 кОм немає в найпоширенішому ряді, обираємо найближчі стандартизовані значення. Якщо прийняти $R_{top} = 910$ кОм та $R_{bot} = 100$ кОм, то реальна вихідна напруга становитиме 5.05 В, що повністю задовольняє вимоги системи.

Згідно з документацією, для забезпечення стабільності контуру керування, необхідно встановлювати індуктивність у межах від 2.2 до 4.7 мкГн. Обираємо максимально дозволений документацією номінал — 4.7 мкГн зі струмом насичення не менше 0.5 А.

Конденсатор виконує роль локального джерела енергії під час імпульсу світлодіода. Розрахуємо мінімальну ємність для забезпечення пульсацій напруги не більше 50 мВ:

$$C_{out_min} = \frac{I_{out} \cdot (1 - V_{in}/V_{out2})}{f_{sw} \cdot \Delta V_{out2}} = \frac{0.1 \cdot 0.6}{1.2 \cdot 10^6 \cdot 0.05} = 10^{-6} \text{ Ф} \quad (4.7)$$

де, C_{out_min} - мінімальна ємність конденсатора, I_{out} - струм виходу для світлодіодів, f_{sw} - частота перемикачання транзистора ΔV_{out2} – середня напруга під час пульсації.

Враховуючи імпульсний характер навантаження, що струм миттєво зростає від 0 до 100 мА, ємність необхідно збільшити для компенсації перехідних процесів. Тому до схеми закладено стандартний номінал ємності 22 мкФ. [39]

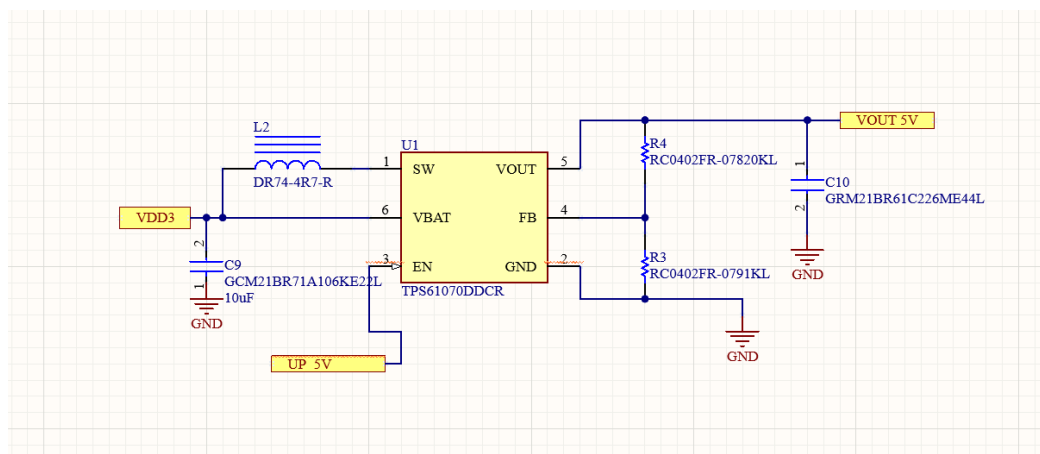


Рисунок 4.9 – Схема DC-DC перетворювача

Цільовий струм імпульсу через світлодіод становить приблизно $I_{pulseIR} = 200$ мА для інфрачервоного світлодіода та синього $I_{pulseB} = 100$ мА. Комутація здійснюється Р-канальним транзистором BSS84, опір відкритого каналу якого при керуванні напругою 5 В становить приблизно $R_{ds(on)} \approx 1.5$ Ом.

За другим законом Кірхгофа, рівняння контуру:

$$V_{out2} = I_{pulse} \cdot (R_{limit} + R_{ds(on)}) + V_f \quad (4.8)$$

де, R_{limit} - захисний опір світлодіода, V_f - напруга роботи світлодіода.

Виразимо необхідний опір:

$$R_{limit} = \frac{V_{out2} - V_f}{I_{pulse}} - R_{ds(on)}$$

Для синього кристала пряме падіння $V_{blue} = 3.3$ В:

$$R_{limit(blue)} = \frac{5 - 3.3}{0.1} - 1.5 = 15.5 \text{ Ом}$$

Обираємо стандартизований номінал 16 Ом.

Для ІЧ кристала (пряме падіння $V_{ir} = 1.5$ В):

$$R_{limit(blue)} = \frac{5 - 1.5}{0.2} - 1.5 = 16 \text{ Ом}$$

Обираємо стандартизований номінал 16 Ом.

Підтягуючий резистор, встановлений між витком та затвором силового Р-канального транзистора, необхідний для його швидкого закриття, щоб не було розряду паразитних ємностей. Для транзистора BSS84 вхідна ємність становить приблизно C_{iss} 30 пФ.

Для забезпечення крутих фронтів імпульсу транзистор повинен закриватися менше ніж за 1 мкс. Час розряду RC-ланцюга:

$$t_{off} = 3 \cdot R_{pullup} \cdot C_{iss} \quad (4.9)$$

Звідси максимальний опір:

$$R_{pullup} \leq \frac{t_{off}}{3 \cdot C_{iss}} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 30 \cdot 10^{-12}} \approx 11.1 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Зі стандартного ряду обираємо класичний номінал **10 кОм**. Це гарантує швидке закриття MOSFET-ключа без завалення фронту світлового імпульсу та без надмірного струму витоку в активному стані. [29]

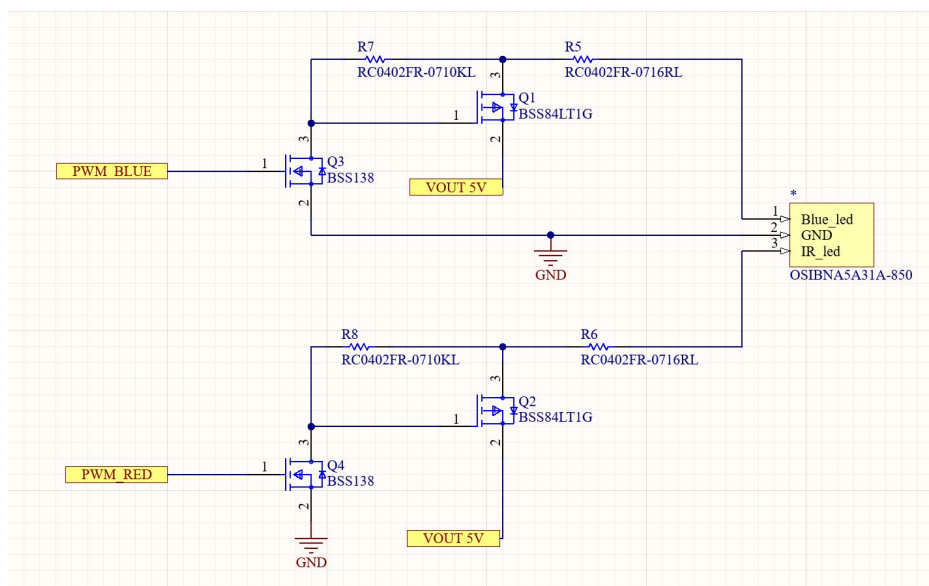


Рисунок 4.10 – Схема роботи світлодіодів

4.4 Розробка 3D-моделі та конструктивне виконання датчика

Для забезпечення коректної роботи двоспектрального оптичного датчика диму, а також для його надійного монтажу та експлуатації, було розроблено повноцінну 3D-модель пристрою..

Конструкція тримача оптичних елементів

Для забезпечення просторової орієнтації та жорсткої фіксації компонентів прийомо-передавального оптичного тракту було розроблено спеціалізований тримач LED-holder. Головним конструктивним завданням цього елемента є створення посадкових місць для одного світлодіода та двох фотодіодів із точним дотриманням розрахованих геометричних кутів взаємного розташування.

Конструкція холдера оптимізована для зручного та безпомилкового монтажу на поверхню друкованої плати. Механічна фіксація на платі реалізована за допомогою чотирьох інтегрованих ніжок-защіпок (фіксаторів). Це дозволяє забезпечити надійне з'єднання та швидкий монтаж без застосування додаткових гвинтових кріплень.

В деталі є реалізація механічного захисту від помилок складання принцип «пока-йоке». Позиціонування оптичних компонентів усередині холдера можливе виключно під строго визначеним місцем завдяки системі спеціально спроектованих внутрішніх пазів та конструктивних фасок. Орієнтація самого холдера на друкованій платі також однозначно задається наявністю двох напрямних штифтів різного діаметра, а саме великого та малого кола. Така конфігурація повністю унеможливорює неправильне встановлення елемента під час збирання девайса.

Габаритні розміри тримача мінімізовані для забезпечення загальної компактності датчика диму: ширина його робочої зони становить приблизно 30 мм. Геометрія деталі не є строго лінійною.

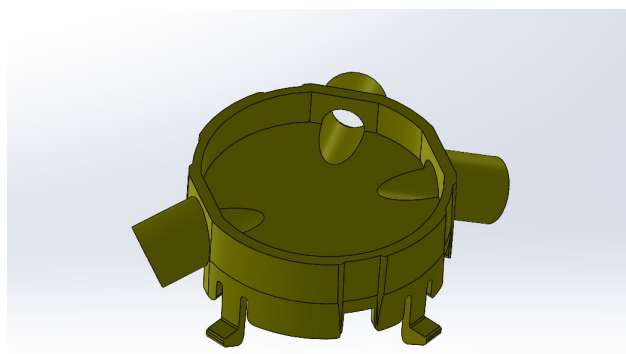


Рисунок 4.11 – Трьохвимірна модель тримача оптичних елементів

Конструкція проміжного сполучного модуля

Для забезпечення механічного та оптичного спряження між тримачем компонентів LED-holder та безпосередньо лабіринтом димової камери було

спроектовано окрему формувальну деталь, а саме сполучний модуль Smoke Chamber Connection.

Впровадження даного модуля вирішує оптимізацію корисного простору всередині датчика. Завдяки спеціальній геометрії деталі вдалося збільшити внутрішній об'єм майже вдвічі. Це розширення є критично необхідним для подальшої побудови ефективного логічного лабіринту в димовій камері, який повинен надійно вловлювати зовнішнє світло та одночасно забезпечувати безперешкодне проходження частинок диму.

Механічне сполучення з LED-холдером реалізовано за допомогою чотирьох інтегрованих зачіпок. Для зручності збирання, на корпусі тримача світлодіодів передбачено відповідні пази напрямні елементи. Вони задають правильну траєкторію руху під час монтажу. Протилежна сторона модуля оптимізована для надійного стикування з корпусом димової камери, утворюючи з нею єдиний монолітний оптичний блок.

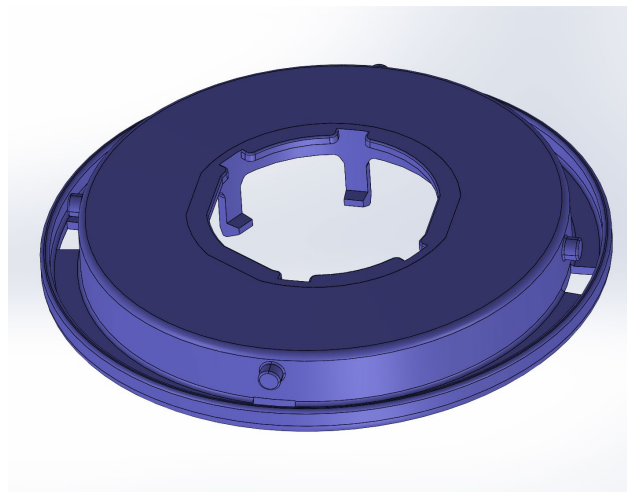


Рисунок 4.12 – Трьохвимірна модель сполучного модуля

Конструкція димової камери з оптичним лабіринтом

Центральним конструктивним вузлом аналітичного блока пристрою є лабіринт димової камери з інтегрованим оптичним лабіринтом Smoke Chamber. Головною функцією цього елемента є створення замкненого середовища для

взаємодії оптичного випромінювання з частинками диму, за умови повного відсікання зовнішнього фонового освітлення та мінімізації внутрішніх перевідбиттів.

На внутрішній нижній стінці камери сформовано масив спеціалізованих пірамідальних структур. Вони призначені для ефективного розсіяння та багаторазового перевідбивання світлового потоку, що виходить за межі робочої зони вимірювання. Така конфігурація дозволяє практично повністю поглинути залишкове випромінювання джерел та запобігти його потраплянню на чутливі зони фотодіодів, що суттєво знижує рівень статичного фонового шуму системи.

Для запобігання хибним спрацьовуванням пристрою, викликаним потраплянням всередину камери побутового пилу, ворсу, волокон або комах, реалізовано двоступеневу систему механічної фільтрації:

- *Перший ступінь:* у конструкції передбачено спеціальне посадкове місце для встановлення дрібнокомірчастої захисної сітки. Вона затримує більшу частину великих механічних часток ще на вході до вимірювального об'єму.
- *Другий ступінь:* безпосередньо за сіткою розташовані Г-подібні захисні перегородки елементи лабіринту. Якщо поодинокі волокна або ворсинки долають перший бар'єр, вони затримуються у складній геометрії Г-подібних каналів або фіксуються на нижніх пірамідальних структурах. Це повністю виключає їхнє проникнення у робочу зону перетину оптичних осей та мінімізує ризик появи непередбачуваних перевідбиттів.

Фіксація димової камери до проміжного сполучного модуля Smoke Chamber Connection, описаного в попередньому підрозділі, реалізована за допомогою кругового замкового з'єднання. Конструкція забезпечує швидкий монтаж круговим рухом до характерного механічного клацання. Таке рішення гарантує надійну і жорстку фіксацію деталей між собою.

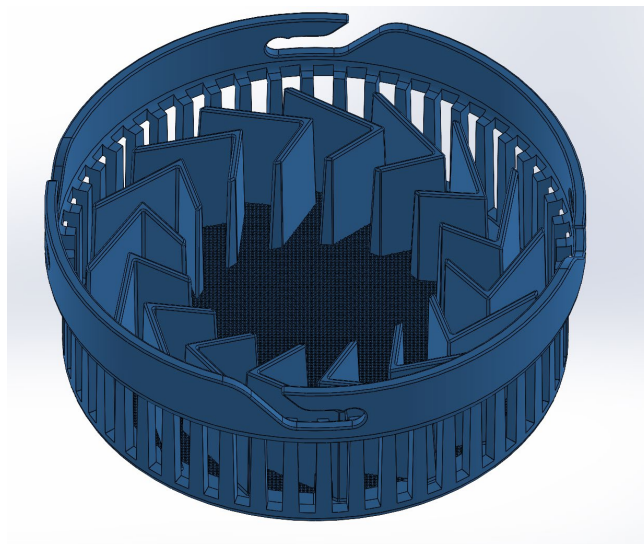


Рисунок 4.13 – Трьохвимірний модель димової камери

Конструктивне виконання передньої кришки корпусу

Передня кришка пристрою є зовнішнім конструктивним елементом корпусу, який виконує захисну, монтажну та аеродинамічну функції. Її геометрія спроектована з розрахунком на забезпечення максимальної ефективності захоплення повітряних мас із навколишнього простору та їхнього безперешкодного транспортування до аналітичного блоку.

Для забезпечення потоків диму, конфігурація кришки оптимізована таким чином у корпусі реалізовано систему напрямних елементів, зорієнтованих по 8 просторових осях. Така архітектура дозволяє ефективно вловлювати димові потоки, що розповсюджуються під будь-яким кутом відносно сповіщувача, та цілеспрямовано спрямовувати їх безпосередньо до вимірювальної камери диму.

Внутрішня архітектура передньої кришки розроблена для утримання друкованої плати. Швидка та жорстка первинна фіксація плати реалізована за допомогою чотирьох інтегрованих зачіпних фіксаторів. З метою забезпечення високої технологічності складання пристрою, в геометрії кришки реалізовано механічний ключ за принципом «пока-йоке». Спеціальні внутрішні виступи та

обмежувачі унеможливають неправильну орієнтацію плати під час монтажу, дозволяючи встановити її виключно у правильному положенні.

Для забезпечення автономності девайса у внутрішньому просторі передньої кришки безпосередньо відформовано спеціальні посадкові ложементи для автономних елементів живлення. Така конфігурація дозволяє надійно зафіксувати батарейки всередині корпусу, запобігає їхньому зміщенню.

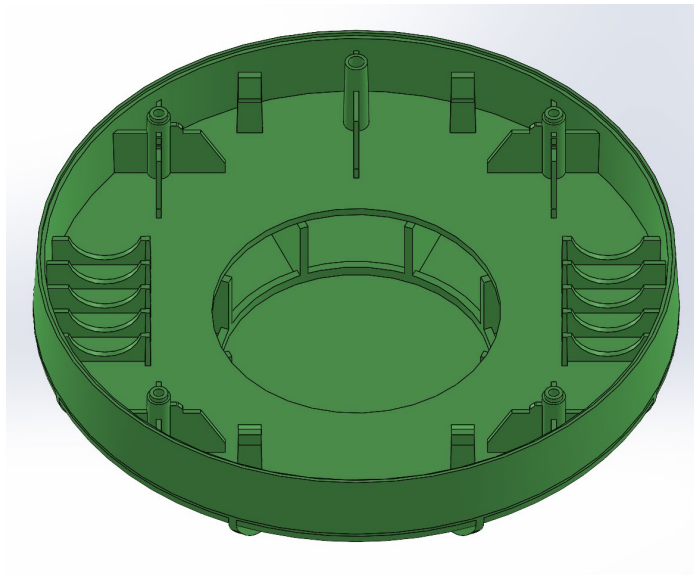


Рисунок 4.14 – Трьохвимірна модель передньої кришки корпусу

Конструкція задньої кришки корпусу та брекету

Для повної герметизації внутрішнього електронного вузла та забезпечення надійного кріплення на об'єкті експлуатації було розроблено дві взаємопов'язані деталі, а саме задня кришка Back cover та брекету Smart bracket.

Задня кришка виступає запірним елементом корпусу, яка ізолює внутрішню порожнину з друкованою платою від зовнішнього середовища. Фіксація задньої кришки до передньої Front cover реалізована за допомогою чотирьох наскрізних отворів, розрахованих під гвинтове з'єднання.

Так само інтегровано чотири спеціалізовані отвори-пази, які утворюють механічний інтерфейс для з'єднання зі стельовим кронштейном. Кронштейн є

базовим монтажним елементом, який безпосередньо закріплюється на тримальну поверхню за допомогою стандартних дюбелів чи гвинтів. Механічне спряження між задньою кришкою та кронштейном реалізовано за круговою поворотно-пазовою схемою. Фіксація пристрою на кронштейні здійснюється шляхом суміщення пазів і легкого повороту корпусу датчика навколо своєї осі до характерного механічного зачеплення.

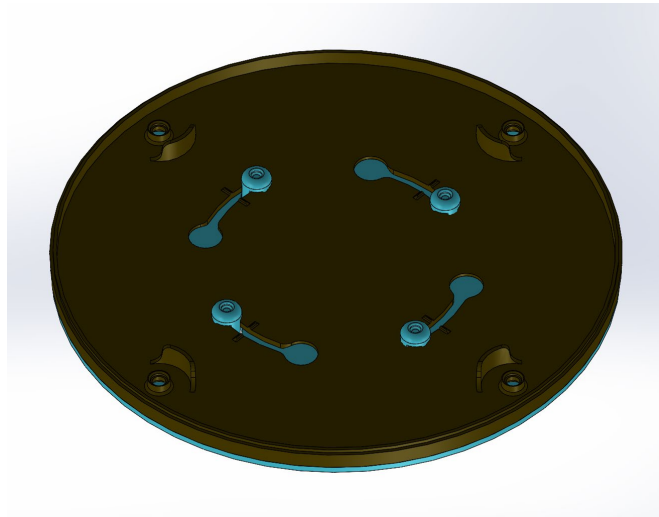


Рисунок 4.15 – Трьохвимірна модель задньої кришки корпусу та брекету

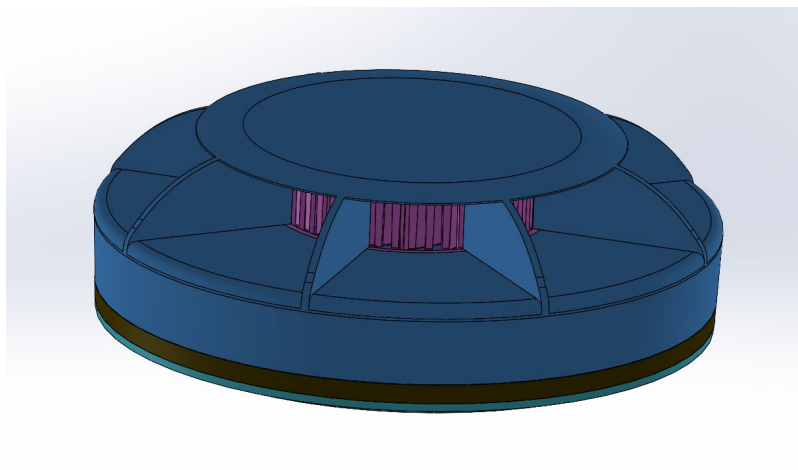


Рисунок 4.16 – Трьохвимірна модель девайсу у збірці

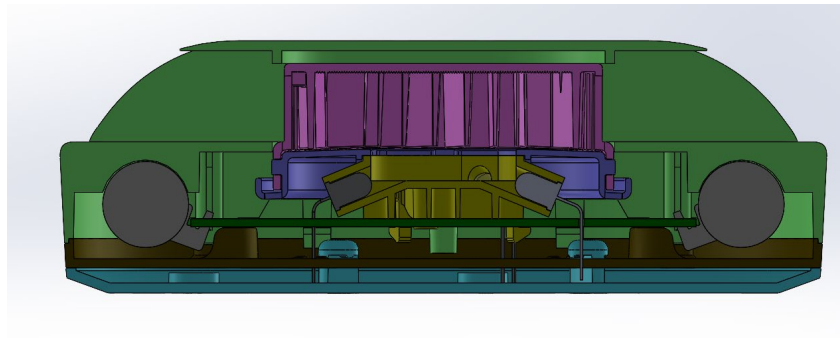


Рисунок 2.17 – Трьохвимірний переріз моделі пристрою

4.5 Проектування топології та компонування друкованої плати

На основі розробленої принципової електричної схеми та виконаних математичних розрахунків параметрів компонентів було здійснено проектування двохшарової друкованої плати у спеціалізованому середовищі автоматизованого проектування Altium Designer.

Ключовою особливістю цього етапу стала наскрізна інтеграція між САПР механічного моделювання (SolidWorks) та САПР електроніки (Altium Designer). Завдяки експорту точного контуру плати у форматі тривимірного тіла, вдалося забезпечити відповідну геометричну межу плати. На етапі імпорту були зафіксовані контури посадкових місць елементів живлення, а також наскрізні отвори для монтажу тримача оптичних елементів.

У нижній області друкованої плати розташовано системний мікроконтролер Texas Instruments CC1312R. Таке розміщення мікроконтролера обумовлене необхідністю забезпечення приблизно рівної довжини цифрових та аналогових трас до периферійних вузлів, що мінімізує затримки та фазові зсуви сигналів.

Відповідно до вимог технічної документації виробника Texas Instruments, навколо мікроконтролера було спроектовано локальну мережу розв'язувальних та фільтрувальних конденсаторів різного номіналу. При проектуванні топології було дотримано правила мінімальної довжини провідника: конденсатори

розташовані на мінімально можливій відстані до виводів живлення VDD мікроконтролера, а їхні заземлювальні виводи підключені безпосередньо до загального контуру заземлення через перехідні отвори з мінімальною індуктивністю. [40]

Найбільш критичним вузлом з завадозахищеності є підсистема зняття сигналів із фотодіодів. Оскільки оптична система працює за принципом реєстрації слабких потоків розсіяного світла, корисні сигнали напруги холостого ходу та струму короткого замикання, що генеруються двома приймальними фотодіодами, мають наднизькі амплітудні значення і є вкрай чутливими до наведених електромагнітних завад. Для забезпечення максимальної точності вимірювань та високого співвідношення зони розміщення обох фотодіодів були максимально віддалені від цифрових ліній зв'язку мікроконтролера, імпульсних трас живлення та ліній керування індикацією.

Для підключення батарей на платі передбачено спеціалізовані залуджені контактні майданчики збільшеної площі, що забезпечує надійне безпосереднє впаювання виводів живлення і низький перехідний опір контакту.

У правому верхньому куті плати виділено відокремлену зону під підвищувальний імпульсний DC-DC перетворювач зі стабілізацією вихідної напруги. Ця напруга є опорною для живлення випромінювальних елементів оптичної камери — інфрачервоного та синього світлодіодів.

Для забезпечення можливості гнучкого налагодження, прошивки та подальшого сервісного обслуговування пристрою, на фронтальній стороні плати розведено два інтерфейсні контактні роз'єми, а саме 5-піновий роз'єм призначений для підключення програматора-відладчика та реалізує інтерфейси JTAG/SWD. Він використовується для безпосереднього завантаження скомпільованого бінарного коду в пам'ять мікроконтролера CC1312R та покрокового дебагу прошивки в реальному часі. 3-піновий роз'єм виведений для організації UART-інтерфейсу лінії RX, TX та загальний GND. Його основним

завданням є виведення телеметричної інформації на ПК під час калібрування датчика, зняття точних цифрових значень сигналів із фотоприймачів та встановлення порогових рівнів спрацювання.

Для забезпечення двостороннього зв'язку з користувачем або обслуговуючим персоналом, на платі розпаяно два діагностичні SMD-світлодіоди: червоного та жовтого кольорів світіння.

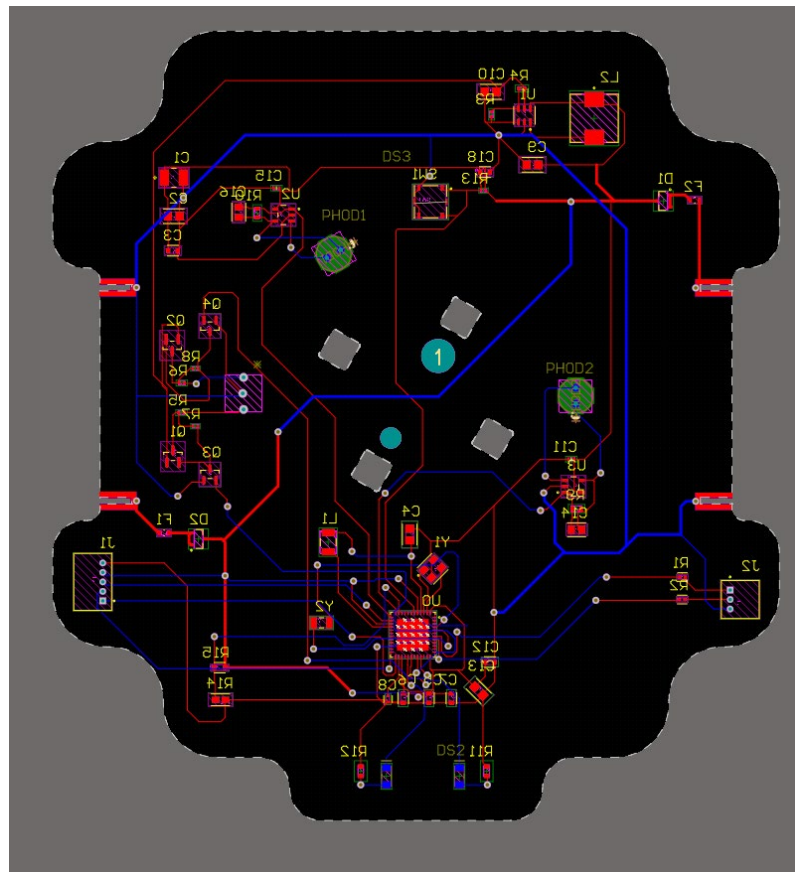


Рисунок 4.18 – Топологія друкованої плати

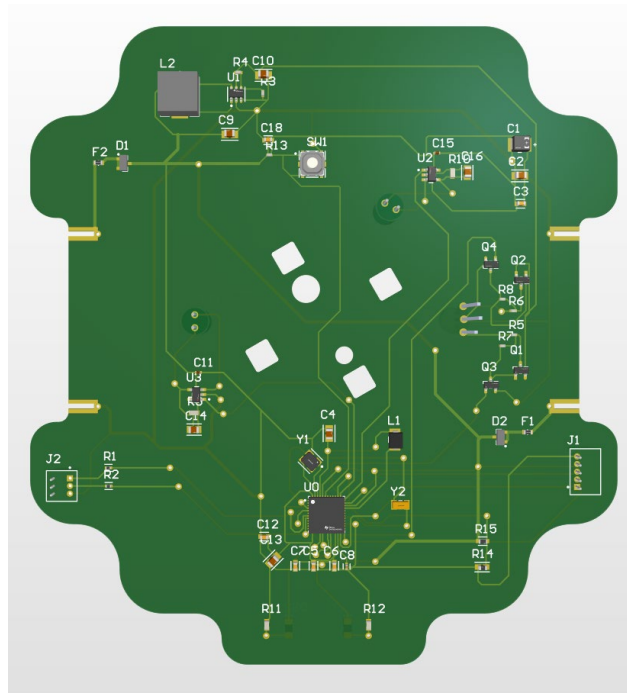


Рисунок 4.19 – Трьохвимірна модель зібраної друкованої плати

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту на тему розробки двоспектрального фотоелектричного детектора диму було проведено комплексне дослідження сучасних методів виявлення продуктів горіння, проаналізовано принципи роботи оптичних систем пожежної сигналізації та розроблено технічне рішення, здатне забезпечити підвищення ефективності виявлення задимлення у контрольованому середовищі. Основною метою роботи було створення конструкції детектора, що використовує два спектральні канали аналізу оптичного випромінювання для підвищення точності визначення диму та зменшення ймовірності хибних спрацювань.

У першому розділі дипломного проєкту проведено аналітичний огляд існуючих систем пожежної сигналізації та сучасних фотоелектричних детекторів диму. Було розглянуто основні типи пожежних сповіщувачів, їх принципи роботи, конструктивні особливості та сфери застосування. Особливу увагу приділено оптичним методам виявлення диму, заснованим на процесах розсіювання та поглинання світлового випромінювання частинками аерозолі. У результаті аналізу встановлено, що традиційні одноканальні фотоелектричні датчики мають обмеження щодо селективності та чутливості до різних типів диму, що може призводити до хибних тривог або несвоєчасного виявлення пожежі. Це обґрунтувало доцільність застосування двоспектрального підходу для покращення характеристик системи.

У другому розділі роботи виконано розробку структурної та функціональної схеми двоспектрального фотоелектричного детектора диму. Було визначено основні вимоги до пристрою, проведено вибір елементної бази та обґрунтовано використання двох джерел випромінювання з різними спектральними характеристиками. Проаналізовано принцип взаємодії випромінювання з частинками диму та вплив довжини хвилі на ефективність реєстрації аерозольних частинок різного типу. Для реалізації системи було розглянуто фотодіоди як основні приймальні елементи, оцінено їх чутливість,

спектральні характеристики та особливості роботи в умовах змінної концентрації диму. Також проведено аналіз схем підсилення та обробки сигналу, необхідних для забезпечення стабільної роботи детектора.

У процесі проектування було розроблено конструкцію оптичної камери детектора та визначено геометричне розташування випромінювачів і фотоприймачів. Особливу увагу приділено мінімізації впливу зовнішнього освітлення, паразитних відбиттів та електронних шумів на результати вимірювання. Виконані розрахунки підтвердили можливість ефективного виявлення частинок диму різної дисперсності шляхом порівняння сигналів у двох спектральних діапазонах. Це дозволяє підвищити достовірність визначення продуктів горіння та зменшити вплив сторонніх факторів, таких як пил або водяна пара.

У результаті виконання дипломного проєкту було сформовано технічно обґрунтовану модель двоспектрального фотоелектричного детектора диму, яка поєднує сучасні принципи оптичного аналізу та автоматизованої обробки даних. Запропоноване рішення дозволяє підвищити чутливість системи до продуктів горіння, знизити кількість хибних спрацювань та покращити надійність виявлення пожеж на ранніх стадіях їх виникнення. Отримані результати підтверджують перспективність використання двоспектрального підходу у фотоелектричних системах пожежної сигналізації та створюють основу для подальшого вдосконалення конструкції, оптимізації алгоритмів обробки сигналів і практичної реалізації пристрою.

Список використаної літератури

- [1] О. Яцков, М. Буденкова та Н. Мисіна, в *Фізична та колоїдна хімія*, 2016, р. 114.
- [2] «Mercury SD102P Smoke Detector with Hush. User Manual [Electronic resource],» [Онлайновий]. Available: <https://www.avsl.com/assets/manuals/3/5/350137UK.pdf>.
- [3] «Mercury SD102P Smoke Detector,» [Онлайновий]. Available: <https://www.mstronics.com/p/14716/mercury-sd102p-smoke-detector-with-hush-350-126uk.html>.
- [4] «Photoelectric Smoke Detectors: EN14604 Standard Requirements and Implementation. Technical Review.,» [Онлайновий]. Available: <https://particlesensing.com/knowledge-hub/guides/en-14604-certification-guide>.
- [5] «BOSCH Fire Alarm Systems,» [Онлайновий]. Available: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://uesphil.com/assets/img/portfolio/9_FDAS/BOSCH%20Fire%20Alarm%20Systems.pdf.
- [6] «Bosch Smoke detector, optical,» [Онлайновий]. Available: <https://catalog.boschbuildingtechnologies.com/lifesafetysystems/en/AVENAR-detector-4000/p/F.01U.307.726>.
- [7] «Бугера – Ламберта – Бера закон,» [Онлайновий]. Available: https://vue.gov.ua/%D0%91%D1%83%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B0_%E2%80%93%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0_%E2%80%93%D0%91%D0%B5

%D1%80%D0%B0_%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD.

- [8] В. Томенко, Системи пожежної сигналізації, оповіщення та спостерігання, Черкаси, 2023.
- [9] «NFXI-OSI-RIE OSID Reflective Imaging Smoke Beam,» [Онлайновий]. Available: <https://www.acornfiresecurity.com/index.php?route=extension/module/document/download&filename=Notifier/NFXI-OSI-RIE%20-%20Datasheet.pdf&srsId=AfmBOoo6BACd0-mck9XIvF8gRpi00li8qx8hsCLQncfAbWb4xZCcHy7u>.
- [10] «Notifier FS-OSI-RI Addressable Reflective Beam Smoke Detector,» [Онлайновий]. Available: <https://www.buyfirealarmparts.com/shop/notifier-fs-osi-ri-addressable-reflective-beam-smoke-detector.html>.
- [11] «Xtralis OSID Smoke Detection Data Sheet,» [Онлайновий]. Available: https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/hbt/en-us/documents/literature-and-specs/datasheets/gf19797_16.pdf.
- [12] EN 54-12: Fire detection and fire alarm systems — Part 12: Smoke detectors — Line detectors using an optical light beam..
- [13] «Honeywell Gent S4-34740 Installation instructions,» [Онлайновий]. Available: <https://source.thenbs.com/en/literature/honeywell-gent-s4-34740-installation-instructions/io22TZ26ywewmiXhPLVmRm/sXhFcD6fnTEpD3fkQ6xePD>.

- [14] «Gent S4-34740 Addressable Beam Sensor Pair (Transmitter & Receiver),» [Онлайновий]. Available: <https://www.thesafetycentre.co.uk/gent-s4-34740-addressable-beam-sensor-pair-transmitter-receiver>.
- [15] «Gent by Honeywell S4-34740 Beam Sensor Pair. Technical Specification,» [Онлайновий]. Available: <https://buildings.honeywell.com/gb/en/brands/our-brands/gent/tools-and-resources/download-centre>.
- [16] «VESDA Aspirating Smoke Detection,» [Онлайновий]. Available: https://xtralis.com/product_subcategory/2/VESDA-Aspirating-Smoke-Detection.
- [17] «Intelligent VESDA-E VEP Notifier 2nd Gen. FlashScan SLC with VESDAnet - UL 268 7th Ed. Compliant,» [Онлайновий]. Available: <https://buildings.honeywell.com/us/en/products/by-category/fire-life-safety/sensors-and-detectors/aspirating-smoke-detection/aspirating-smoke-detector/intelligent-vesda-e-vep-notifier-2nd-gen-flashscan-slc-with-vesdanet-ul-268-7th-ed-compliant>.
- [18] «У чому різниця між іонізаційними та фотоелектричними пожежними датчиками?,» [Онлайновий]. Available: <https://worldvision.com.ua/v-chem-raznitsa-mezhdu-ionizatsionnymi-i-fotoelektricheskimi-pozharnymi-datchikami/>.
- [19] «СИСТЕМИ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ,» [Онлайновий]. Available: <https://www.deos-release.com/pdf/DBN/06.pdf>.
- [20] «SMOKE ALARM USER'S GUIDE,» [Онлайновий]. Available:

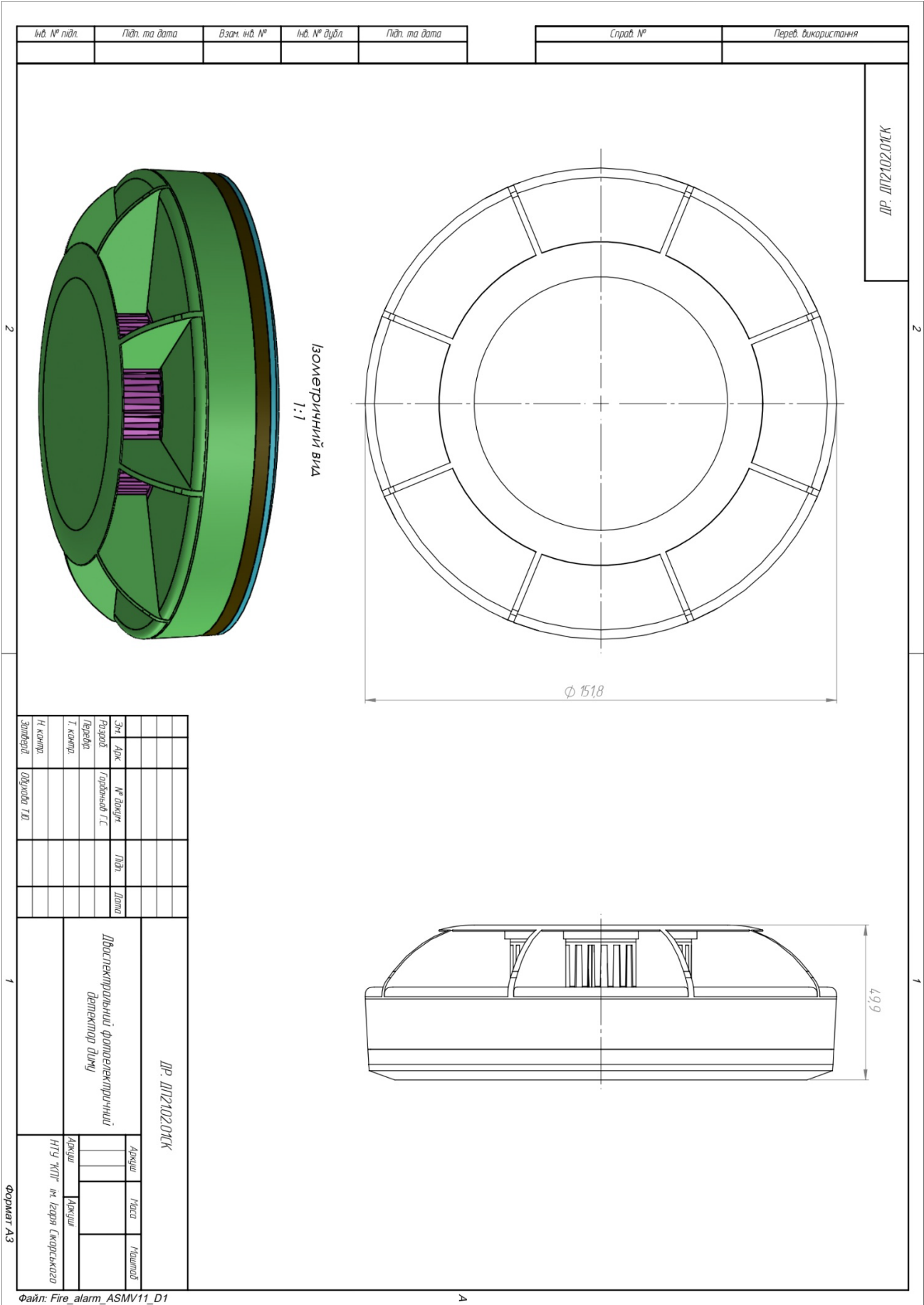
https://www.steelfire.com/UserFiles/Docs/KID_i9040CA_Manual_English.pdf.

- [21] «Fire Sentry Battery Operated 4” Smoke Alarm,» [Онлайновий]. Available: <https://www.emergencylighting.ca/resources/documents/technical-specs/i9040%20datasheet.pdf>.
- [22] «System Sensor 2151 Low-Profile Plug-in Photoelectric Smoke Detector, Old Style,» [Онлайновий]. Available: <https://www.buyfirealarmparts.com/shop/browse-by-type/detectors/system-sensor-2151-old-style-low-profile-plug-in-photoelectric-smoke-detector.html>.
- [23] «System sensor low profile, ionization plug-in smoke detector,» [Онлайновий]. Available: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/hbt/en-us/documents/literature-and-specs/datasheets/9020-0582.pdf>.
- [24] «ДСТУ EN 54-7:2004,» [Онлайновий]. Available: <https://antifire.ua/dbn/68.pdf>.
- [25] H. D. R. Bohren C. F., «Absorption and Scattering of Light by Small Particles,» 2004.
- [26] «Nobel Media AB. The Nobel Prize in Physics 2014: Blue LEDs.,» [Онлайновий]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/summary/>.
- [27] В. Колобродов, ОПТИКА, ХВИЛЬОВА, НТУУ «КПІ ІМ. І. СІКОРСЬКОГО», 2017 .

- [28] «Релеївське розсіювання,» [Онлайновий]. Available: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%97%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D1%81%D1%96%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F.
- [29] Ю. М. Поплавко, Фізика діелектриків, Київ НТУУ «КПІ», 2015.
- [30] M. & W. E. Born, Principles of Optics. Cambridge University Press, 2019.
- [31] «MathWorks Open Source and Community Projects,» [Онлайновий]. Available: <https://github.com/mathworks>.
- [32] «SimpleLink™ 32-bit Arm Cortex-M4F Sub-1 GHz wireless MCU with 352kB Flash,» [Онлайновий]. Available: <https://www.ti.com/product/CC1312R>.
- [33] «MCU, CC1312R SimpleLink™ High-Performance Sub-1 GHz Wireless,» [Онлайновий]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1312r.pdf>.
- [34] «OSIBNA5A31A-850,» [Онлайновий]. Available: <https://www.tme.eu/en/details/osibna5a31a-850/tht-leds-round/optosupply/>.
- [35] «PD333-3C/H0/L2,» [Онлайновий]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Everlight/PD333-3C-H0-L2?qs=8cKuZ6Ok2lbuLh%252BDMLN9aA%3D%3D&srsltid=AfmBOoqFiNWotn--z4BrADtBb6bjL5-Jz4z7fMfvW4zqGUQjx2mPGY8x>.

- [36] «OSRAM Radial T1 3/4, SFH 213,» [Онлайновий]. Available: <https://ams-osram.com/products/photodetectors/photodiodes/osram-radial-t1-34-sfh-213>.
- [37] «CR123A,» [Онлайновий]. Available: <https://energy.panasonic.com/na/business/products/lithium/cylindrical-cr-standard/models/CR123A>.
- [38] «CR123A CR Cylindrical-type Lithium Battery (Standard type),» [Онлайновий]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://energy.panasonic.com/dam/master/pdf/en/datasheet/lithium/CR123A_Datasheet_EN.pdf.
- [39] Ю. М. Поплавко, Фізика твердого тіла, Київ : Політехніка, 2017.
- [40] CC1312R7 SimpleLink™, Texas Instruments Incorporated.

ДОДАТОК А



ДОДАТОК Б

№202012102K
ДР. 012102102K

Exploded view diagram of a fire alarm device. The diagram shows the following components: 1. LED holder, 2. GB WOOD SCREWS_I, 3. YPE137 M3X12-C, 4. OSRB5131A, 5. SFH_213, 6. PCB_BATT, 7. Smoke_chamber_con, 8. Smoke_chamber, 9. Front_cover, 10. Back_cover. The diagram also shows the assembly of the front cover (9) and back cover (10) with screws (2) and the internal components (1-8) being installed into the main housing (8).

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	LED holder		1
2	GB WOOD SCREWS_I		4
3	YPE137 M3X12-C		1
4	OSRB5131A		2
5	SFH_213		1
6	PCB_BATT		1
7	Smoke_chamber_con		1
8	Smoke_chamber		1
9	Front_cover		1
10	Back_cover		1

Экз. 1

№ докум. 1

Лист 1

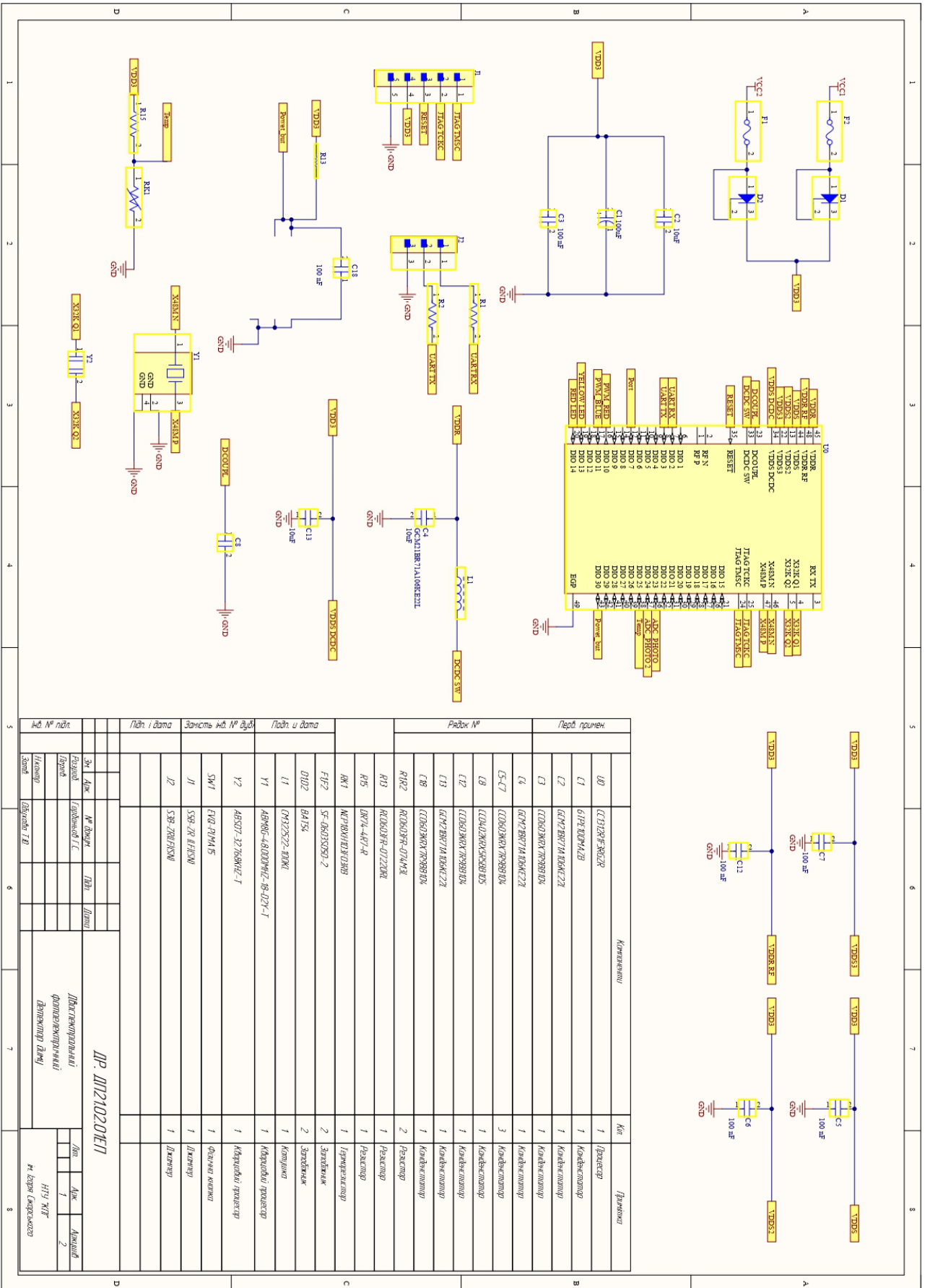
Контракт 1

ДР. 012102102K

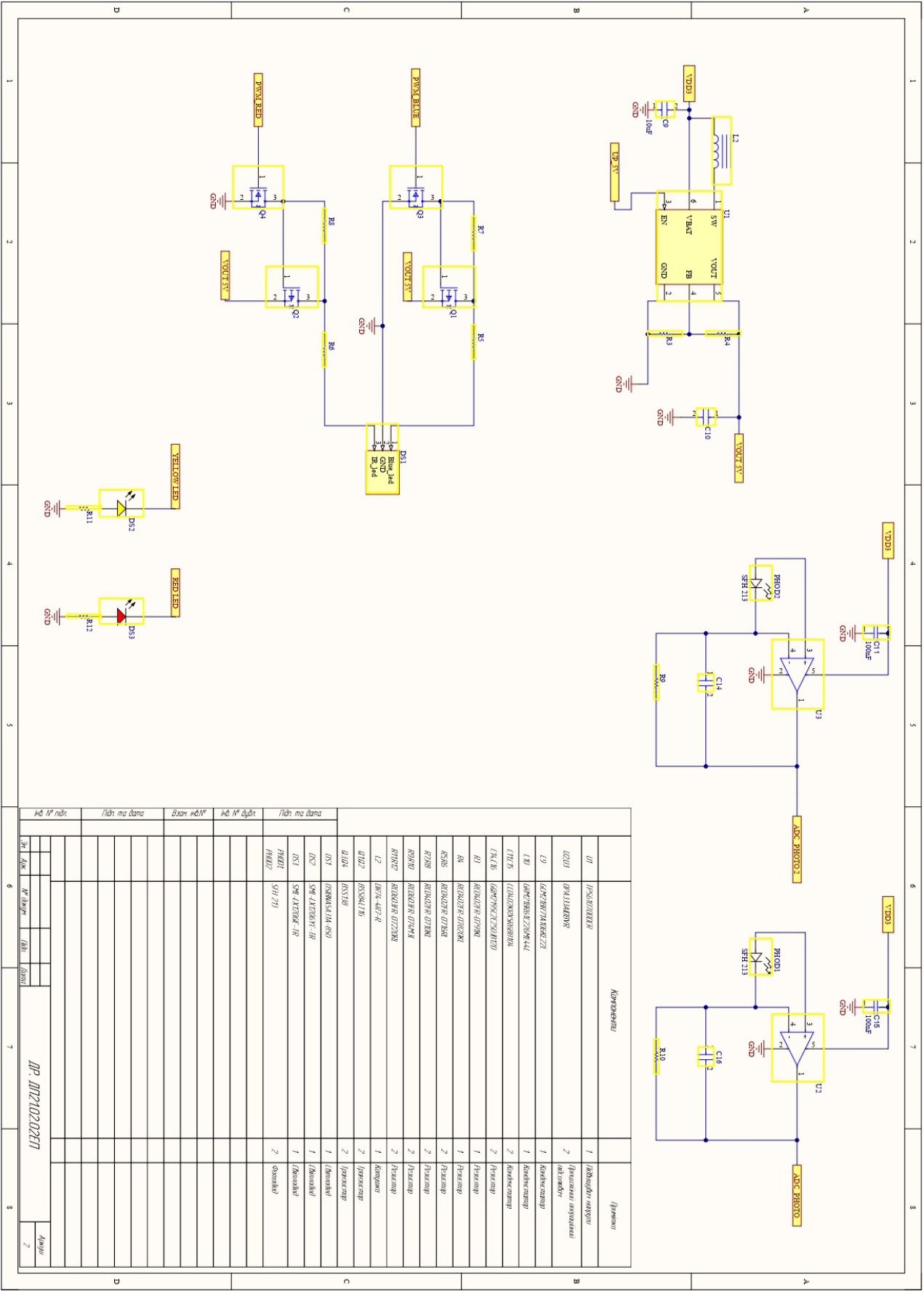
Страница 12

2

ДОДАТОК В



ДОДАТОК Г



ДОДАТОК Г

Matlab

```
clear; clc; close all;
```

```
%% ----- 1. ВХІДНІ ПАРАМЕТРИ -----
```

```
lambda_blue = 0.470;
```

```
lambda_ir = 0.850;
```

```
% Параметри матеріалу
```

```
n_soot = 1.48;
```

```
k_soot = 0.01;
```

```
m_smoke = n_soot - 1i * k_soot;
```

```
% Діапазон діаметрів
```

```
D = linspace(0.5, 1.5, 500);
```

```
I_blue = zeros(size(D));
```

```
I_ir = zeros(size(D));
```

```
%% ----- 2. РОЗРАХУНОК МІ-СОЛВЕР -----
```

```
fprintf(' Розрахунок інтенсивності розсіювання...\n');
```

```
for k = 1:length(D)
```

```
    I_blue(k) = exact_mie_solver(D(k), lambda_blue, m_smoke);
```

```
    I_ir(k) = exact_mie_solver(D(k), lambda_ir, m_smoke);
```

```
end
```

```

% Згладжування

I_blue_sm = smoothdata(I_blue, 'gaussian', 30);

I_ir_sm = smoothdata(I_ir, 'gaussian', 30);

% Спектральне відношення

R_smoke = I_blue_sm ./ (I_ir_sm + 1e-12);

% --- РОЗРАХУНОК СЕРЕДНЬОЇ СЕЛЕКТИВНОСТІ ---

mean_R = mean(R_smoke);

fprintf(' Розрахунок завершено. Середнє R = %.2f\n', mean_R);


%% ----- 3. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ -----

fig = figure('Color', 'w', 'Position', [100 100 900 850]);

t = tiledlayout(2,1, 'TileSpacing', 'Loose', 'Padding', 'Compact');

% --- ГРАФІК 1: Ефективність розсіювання Qsca ---

ax1 = nexttile;

semilogy(D, I_blue_sm, 'b', 'LineWidth', 2.5); hold on;

semilogy(D, I_ir_sm, 'r', 'LineWidth', 2.5);

grid on;

set(ax1, 'Color', 'w', 'XColor', 'k', 'YColor', 'k', 'GridColor', 'k', 'GridAlpha',
0.15);

set(ax1, 'FontSize', 11, 'LineWidth', 1.2);

ylabel('Ефективність Q_{sca}', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');

```

```

title(['Відгук (m = ', num2str(n_soot), ' - ', num2str(k_soot), 'i)'], ...
      'FontSize', 15, 'FontWeight', 'bold');

legend('Blue LED (470 nm)', 'IR LED (850 nm)', 'TextColor', 'k', 'FontSize',
12);

% --- ГРАФІК 2: Спектральна селективність ---

ax2 = nexttile;

plot(D, R_smoke, 'g', 'LineWidth', 3); hold on;

% Лінія межі R=1

yline(1, '--r', 'Межа R=1', 'LineWidth', 1.5, 'FontSize', 11, 'FontWeight',
'bold', 'Color', [0.8 0 0]);

% ЛІНІЯ СЕРЕДНЬОГО ЗНАЧЕННЯ

yline(mean_R, '-.', 'Color', [0 0.5 0], 'LineWidth', 2, ...

      'Label', ['Середнє R = ', num2str(round(mean_R, 2))], ...

      'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'LabelVerticalAlignment', 'bottom');

set(ax2, 'Color', 'w', 'XColor', 'k', 'YColor', 'k', 'GridColor', 'k', 'GridAlpha',
0.15);

set(ax2, 'FontSize', 11, 'LineWidth', 1.2);

xlabel('Діаметр D, мкм', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');

ylabel('Ratio R (Blue/IR)', 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');

title('Середня спектральна селективність', 'FontSize', 15, 'FontWeight',
'bold');

ylim([0 max(R_smoke)*1.2]);

```

grid on;

set(findall(fig,'-property','TextColor'),'TextColor','k');

%% ===== ФУНКЦИЯ MI =====

function Qsca = exact_mie_solver(D, lambda, m)

 x = (pi * D) / lambda;

 if x <= 0, Qsca = 0; return; end

 nmax = round(2 + x + 4 * x^(1/3)); n = 1:nmax;

 z = m * x;

 sqx = sqrt(pi ./ (2 * x)); sqz = sqrt(pi ./ (2 * z));

 jx = besselj(n + 0.5, x) .* sqx;

 jz = besselj(n + 0.5, z) .* sqz;

 hx =esselh(n + 0.5, 1, x) .* sqx;

 psx = x.*jx; psz = z.*jz; xix = x.*hx;

 psx_p = x.*(besselj(n-0.5, x).*sqx) - n.*jx;

 psz_p = z.*(besselj(n-0.5, z).*sqz) - n.*jz;

 xix_p = x.*(esselh(n-0.5, 1, x).*sqx) - n.*hx;

 an = (m.*psz.*psx_p - psx.*psz_p) ./ (m.*psz.*xix_p - xix.*psz_p);

 bn = (psz.*psx_p - m.*psx.*psz_p) ./ (psz.*xix_p - m.*xix.*psz_p);

 Qsca = (2 / x^2) * sum((2 .* n + 1) .* (abs(an).^2 + abs(bn).^2));

end

ДОДАТОК Д

%% ПОЛІДИСПЕРСНА ІНДИКАТРИСА РОЗСІЮВАННЯ (ХМАРА
ЧАСТОК)

```
clear; clc; close all;
```

```
% --- 1. ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ ---
```

```
lambda_blue = 0.47;
```

```
lambda_red = 0.85;
```

```
% Параметри середовища: ВОДЯНА ПАРА (Steam)
```

```
m = 1.5 - 0.3i;      % Вода не поглинає світло
```

```
D_mean = 75;         % Середній діаметр хмари пари (мкм)
```

```
sigma = 0.15;        % Ширина розкиду розмірів (дисперсія)
```

```
% Створюємо хмару: 100 різних діаметрів від 0.5 до 5.0 мкм
```

```
D_vec = linspace(50, 100, 5);
```

```
% Розраховуємо Логнормальний розподіл (скільки яких часток у  
хмарі)
```

```
weights = lognpdf(D_vec, log(D_mean), sigma);
```

```

weights = weights / sum(weights); % Нормалізація до 1 (100%)

theta = linspace(0, pi, 800);

% --- 2. РОЗРАХУНОК ХМАРИ (ІНТЕГРУВАННЯ) ---

fprintf('Рахуємо хмару зі 100 розмірів часток. Зачекайте...\n');

I_blue_total = zeros(size(theta));

I_red_total = zeros(size(theta));

for i = 1:length(D_vec)

    % Рахуємо розсіювання для конкретного розміру D_vec(i)

    I_blue_single = exact_bh_angular(D_vec(i), lambda_blue, m, theta);

    I_red_single = exact_bh_angular(D_vec(i), lambda_red, m, theta);

    % Додаємо його до загальної суми з урахуванням його кількості
(weights)

    I_blue_total = I_blue_total + I_blue_single * weights(i);

    I_red_total = I_red_total + I_red_single * weights(i);

end

fprintf('Розрахунок завершено!\n');

```

% --- 3. НОРМАЛІЗАЦІЯ В ДЕЦИБЕЛИ ---

$I_blue_norm = I_blue_total / \max(I_blue_total);$

$I_red_norm = I_red_total / \max(I_red_total);$

$I_blue_dB = 10 * \log_{10}(I_blue_norm + 1e-6);$

$I_red_dB = 10 * \log_{10}(I_red_norm + 1e-6);$

$floor_dB = -40;$

$I_blue_plot = \max(I_blue_dB, floor_dB) - floor_dB;$

$I_red_plot = \max(I_red_dB, floor_dB) - floor_dB;$

% Дзеркальне відображення

$theta_full = [theta, theta + \pi];$

$I_blue_full = [I_blue_plot, fliplr(I_blue_plot)];$

$I_red_full = [I_red_plot, fliplr(I_red_plot)];$

% --- 4. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ---

$fig = figure('Color','w','Position',[100 100 850 850]);$

$polarplot(theta_full, I_blue_full, 'b', 'LineWidth', 3); hold on;$

$polarplot(theta_full, I_red_full, 'r', 'LineWidth', 3);$

```

pax = gca;

pax.ThetaZeroLocation = 'right';

pax.ThetaDir = 'counterclockwise';

pax.Color = 'w'; pax.ThetaColor = 'k'; pax.RColor = 'k';

pax.GridColor = 'k'; pax.GridAlpha = 0.3; pax.FontSize = 11;

pax.RTick = [0, 10, 20, 30, 40];

pax.RTickLabel = {'-40 dB', '-30 dB', '-20 dB', '-10 dB', 'MAX (0 dB)'};

title({'Полідисперсна індикатриса розсіювання (Хмара)', ...
      sprintf('Середній D = %.1f мкм, m = %g - %gi', D_mean, real(m),
abs(imag(m))))}, ...

      'FontSize', 15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');

lgd = legend('470 нм (Синій)', '850 нм (ІЧ)', 'Location', 'southoutside');

set(lgd, 'TextColor', 'k', 'Color', 'w', 'FontSize', 12);

% НАПИС "ПАДАЮЧЕ СВІТЛО"

text(pi, 41, 'Падаюче світло \rightarrow', ...

      'HorizontalAlignment', 'center', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 13, ...

      'Color', 'k', 'BackgroundColor', 'w', 'Margin', 2);

```

```

set(findall(fig,'-property','TextColor'),'TextColor','k');

%=====

function I = exact_bh_angular(D, lambda, m, theta)

    x = (pi * D) / lambda;

    nmax = round(2 + x + 4 * x^(1/3)); n = 1:nmax;

    z = m * x; sqx = sqrt(pi ./ (2 * x)); sqz = sqrt(pi ./ (2 * z));

    jx = besselj(n + 0.5, x) .* sqx; jx_p = besselj(n - 0.5, x) .* sqx;

    jz = besselj(n + 0.5, z) .* sqz; jz_p = besselj(n - 0.5, z) .* sqz;

    hx = besselh(n + 0.5, 1, x) .* sqx; hx_p = besselh(n - 0.5, 1, x) .* sqx;

    psix = x .* jx; psiz = z .* jz; xix = x .* hx;

    psix_p = x .* jx_p - n .* jx; psiz_p = z .* jz_p - n .* jz; xix_p = x .* hx_p
- n .* hx;

    an = (m .* psiz .* psix_p - psix .* psiz_p) ./ (m .* psiz .* xix_p - xix .*
psiz_p);

    bn = (psiz .* psix_p - m .* psix .* psiz_p) ./ (psiz .* xix_p - m .* xix .*
psiz_p);

    S1 = zeros(size(theta)); S2 = zeros(size(theta));

    for k = 1:length(theta)

        u = cos(theta(k)); pi_n = zeros(1, nmax); tau_n = zeros(1, nmax);

        pi_n(1) = 1; tau_n(1) = u;

        if nmax > 1, pi_n(2) = 3*u; tau_n(2) = 2*u*pi_n(2) - 3*pi_n(1); end

```

```

for idx = 3:nmax

    pi_n(idx) = (2*idx - 1)/(idx - 1)*u*pi_n(idx-1) - idx/(idx -
1)*pi_n(idx-2);

    tau_n(idx) = idx*u*pi_n(idx) - (idx + 1)*pi_n(idx-1);

end

fn = (2.*n + 1) ./ (n .* (n+1));

S1(k) = sum(fn .* (an .* pi_n + bn .* tau_n)); S2(k) = sum(fn .* (an .*
tau_n + bn .* pi_n));

end

I = 0.5 * (abs(S1).^2 + abs(S2).^2);

end

```

ДОДАТОК Е

Matlab

%% ФІЗИЧНЕ ТРАСУВАННЯ + ТОЧНА ГЕНЕРАЦІЯ 3D-ЗОН
ПЕРЕТИНУ

```
clear; clc; close all;
```

```
% --- 1. ЗАВАНТАЖЕННЯ STL ---
```

```
[file, path] = uigetfile('*.*stl', 'Оберіть файл вашої камери');
```

```
if isequal(file, 0), error('Файл не вибрано!'); end
```

```
camMesh = stlread(fullfile(path, file));
```

```
OFFSET = [0, 0, 0];
```

```
V = camMesh.Points + OFFSET;
```

```
F = camMesh.ConnectivityList;
```

```
V0 = V(F(:,1), :); V1 = V(F(:,2), :); V2 = V(F(:,3), :);
```

```
% --- 2. ПАРАМЕТРИ ОПТИКИ ---
```

```
num_rays = 350;
```

```
ray_length_max = 50;
```

```
fov_LED = 15;
```

```
fov_PD = 15;
```

```
pos_LED_B = [42, 16.5, 7];
```

```
pos_LED_R = [42, 17.5, 7];
```

```
pos_PD1 = [35, 34, 5.5];
```

```
pos_PD2 = [ 6, 17, 5.5];
```

```
target_LED_B = [25, 17, 14];
```

```
target_LED_R = [25, 17, 14];
```

```
target_PD1 = [25, 17, 14];
```

```
target_PD2 = [25, 17, 14];
```

```
% --- 3. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ СЦЕНИ ---
```

```
figure('Color', 'w', 'Position', [100 100 1100 800]);
```

```
hold on; grid on; axis equal; view(45, 25);
```

```
set(gca, 'Color', 'none', 'XColor', 'k', 'YColor', 'k', 'ZColor', 'k');
```

```
xlabel('X, мм'); ylabel('Y, мм'); zlabel('Z, мм');
```

```
title('Фізичне трасування світла + Точні об'єми перетину', 'FontSize',  
12);
```

```
patch('Faces', F, 'Vertices', V, 'FaceColor', [0.15 0.15 0.15], ...
```

```
    'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.6, 'SpecularStrength', 0.1);
```

% --- 4. ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ ---

grid_res = 0.5;

disp('Трасування: Синій LED...');

pts_LED_B = shoot_rays(pos_LED_B, target_LED_B, fov_LED,
num_rays, ray_length_max, V0, V1, V2, [0 0.45 0.74], grid_res);

disp('Трасування: ІЧ LED...');

pts_LED_R = shoot_rays(pos_LED_R, target_LED_R, fov_LED,
num_rays, ray_length_max, V0, V1, V2, [0.85 0.15 0.15], grid_res);

disp('Трасування: PD1...');

pts_PD1 = shoot_rays(pos_PD1, target_PD1, fov_PD, num_rays,
ray_length_max, V0, V1, V2, [0.47 0.67 0.19], grid_res);

disp('Трасування: PD2...');

pts_PD2 = shoot_rays(pos_PD2, target_PD2, fov_PD, num_rays,
ray_length_max, V0, V1, V2, [0.93 0.69 0.13], grid_res);

% --- 5. РОЗРАХУНОК ПЕРЕТИНІВ ---

disp('Розрахунок об'ємів перетину...');

```
[Xg, Yg, Zg] = meshgrid(0:grid_res:50, 0:grid_res:50, 0:grid_res:20);
```

```
%=====
```

```
Vol_LED_B = points_to_volume_strict(pts_LED_B, Xg, Yg, Zg, grid_res);
```

```
Vol_LED_R = points_to_volume_strict(pts_LED_R, Xg, Yg, Zg, grid_res);
```

```
Vol_PD1 = points_to_volume_strict(pts_PD1, Xg, Yg, Zg, grid_res);
```

```
Vol_PD2 = points_to_volume_strict(pts_PD2, Xg, Yg, Zg, grid_res);
```

```
% Перетин: (Синій LED АБО ІЧ LED) І PD1/PD2
```

```
Intersection_PD1 = (Vol_LED_B | Vol_LED_R) & Vol_PD1;
```

```
Intersection_PD2 = (Vol_LED_B | Vol_LED_R) & Vol_PD2;
```

```
% Малюємо тільки якщо перетин не порожній
```

```
if any(Intersection_PD1(:))
```

```
    % Легке згладжування тільки фінального перетину
```

```
    smooth1 = smooth3(double(Intersection_PD1), 'gaussian', 3, 0.8);
```

```
    p1 = patch(isosurface(Xg, Yg, Zg, smooth1, 0.3));
```

```

    p1.FaceColor = [0.6 0.2 0.8]; p1.EdgeColor = 'none'; p1.FaceAlpha =
0.85;

    isonormals(Xg, Yg, Zg, smooth1, p1);

    disp(['Перетин PD1: ', num2str(sum(Intersection_PD1(:))), '
вокселів']);

    else

        p1 = []; disp('УВАГА: Перетин PD1 порожній! Перевір позиції та
кути.');
```

```

    end

    if any(Intersection_PD2(:))

        smooth2 = smooth3(double(Intersection_PD2), 'gaussian', 3, 0.8);

        p2 = patch(isosurface(Xg, Yg, Zg, smooth2, 0.3));

        p2.FaceColor = [1.0 0.5 0.0]; p2.EdgeColor = 'none'; p2.FaceAlpha =
0.85;

        isonormals(Xg, Yg, Zg, smooth2, p2);

        disp(['Перетин PD2: ', num2str(sum(Intersection_PD2(:))), '
вокселів']);

    else

        p2 = []; disp('УВАГА: Перетин PD2 порожній! Перевір позиції та
кути.');
```

```

    end

```

% --- 6. МАРКЕРИ ТА ПІДПИСИ ---

```
plot3(pos_LED_B(1), pos_LED_B(2), pos_LED_B(3), 's', 'MarkerSize',
10, 'MarkerFaceColor','b', 'MarkerEdgeColor','k');
```

```
plot3(pos_LED_R(1), pos_LED_R(2), pos_LED_R(3), 's', 'MarkerSize',
10, 'MarkerFaceColor','r', 'MarkerEdgeColor','k');
```

```
plot3(pos_PD1(1), pos_PD1(2), pos_PD1(3), 's', 'MarkerSize', 10,
'MarkerFaceColor','g', 'MarkerEdgeColor','k');
```

```
plot3(pos_PD2(1), pos_PD2(2), pos_PD2(3), 's', 'MarkerSize', 10,
'MarkerFaceColor',[0.93 0.69 0.13], 'MarkerEdgeColor','k');
```

```
text(pos_LED_B(1), pos_LED_B(2), pos_LED_B(3)+2, 'Синій LED',
'Color', 'b', 'FontWeight', 'bold');
```

```
text(pos_LED_R(1), pos_LED_R(2), pos_LED_R(3)-2, 'ТЧ LED',
'Color', 'r', 'FontWeight', 'bold');
```

```
text(pos_PD1(1), pos_PD1(2), pos_PD1(3)+2, 'PD1', 'Color', 'g',
'FontWeight', 'bold');
```

```
text(pos_PD2(1), pos_PD2(2), pos_PD2(3)+2, 'PD2', 'Color', [0.8
0.5 0], 'FontWeight', 'bold');
```

```
camlight('headlight'); lighting gouraud;
```

```
handles = []; labels = {};
```

```

    if ~isempty(p1), handles(end+1) = p1; labels{end+1} = 'Зона перетину з
PD1'; end

```

```

    if ~isempty(p2), handles(end+1) = p2; labels{end+1} = 'Зона перетину з
PD2'; end

```

```

    if ~isempty(handles), legend(handles, labels, 'Location', 'southoutside');
end

```

```

disp('Готово!');

```

```

%% ===== ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ =====

```

```

function ray_pts = shoot_rays(start_pos, target_pos, fov_deg, num_rays,
max_len, V0, V1, V2, col, res)

```

```

    dir_vec = target_pos - start_pos;

```

```

    dir_norm = dir_vec / norm(dir_vec);

```

```

    v1 = [0, 0, 1]; v2 = dir_norm;

```

```

    a = cross(v1, v2); s = norm(a); c = dot(v1, v2);

```

```

    if s < 1e-6

```

```

        R = eye(3);

```

```

        if c < 0, R = diag([1 -1 -1]); end

```

```

    else

```

```

Vx = [0 -a(3) a(2); a(3) 0 -a(1); -a(2) a(1) 0];

R = eye(3) + Vx + Vx^2 * ((1-c)/s^2);

end

ray_pts = zeros(num_rays * round(max_len/(res/2)) + num_rays, 3);

idx_pt = 1;

for i = 1:num_rays

    max_ang = deg2rad(fov_deg / 2);

    z = 1 - rand() * (1 - cos(max_ang));

    r_val = sqrt(1 - z^2);

    phi = 2 * pi * rand();

    local_dir = [r_val * cos(phi), r_val * sin(phi), z];

    ray_dir = (R * local_dir)';

    E1 = V1 - V0; E2 = V2 - V0;

    P = cross(repmat(ray_dir, size(E1,1), 1), E2, 2);

    det_val = sum(E1 .* P, 2);

    valid_idx = abs(det_val) > 1e-6;

    inv_det = 1 ./ det_val(valid_idx);

```

```

T = start_pos - V0(valid_idx, :);

u = sum(T .* P(valid_idx, :), 2) .* inv_det;

Q = cross(T, E1(valid_idx, :), 2);

v = sum(repmat(ray_dir, sum(valid_idx), 1) .* Q, 2) .* inv_det;

t = sum(E2(valid_idx, :) .* Q, 2) .* inv_det;

hit = (u >= 0) & (v >= 0) & ((u + v) <= 1) & (t > 1e-4);

if any(hit)

    end_pos = start_pos + ray_dir * min(t(hit));

else

    end_pos = start_pos + ray_dir * max_len;

end

plot3([start_pos(1),    end_pos(1)],    [start_pos(2),    end_pos(2)],
[start_pos(3), end_pos(3)], ...

    'Color', [col, 0.15], 'LineWidth', 0.5);

dist = norm(end_pos - start_pos);

if dist > 0

    n_pts = max(2, ceil(dist / (res / 2)));

```

```

    t_vals = linspace(0, 1, n_pts)';

    r_pts = start_pos + t_vals .* (end_pos - start_pos);

    ray_pts(idx_pt : idx_pt+n_pts-1, :) = r_pts;

    idx_pt = idx_pt + n_pts;

end

end

ray_pts = ray_pts(1:idx_pt-1, :);

end

%

=====

=====

function Vol = points_to_volume_strict(pts, Xg, Yg, Zg, res)

    Vol = false(size(Xg));

    if isempty(pts), return; end

    ix = round((pts(:,1) - Xg(1,1,1)) / res) + 1;

    iy = round((pts(:,2) - Yg(1,1,1)) / res) + 1;

    iz = round((pts(:,3) - Zg(1,1,1)) / res) + 1;

    valid_mask = (ix >= 1 & ix <= size(Xg,2)) & ...

```

```
(iy >= 1 & iy <= size(Xg,1)) & ...
```

```
(iz >= 1 & iz <= size(Xg,3));
```

```
ix = ix(valid_mask);
```

```
iy = iy(valid_mask);
```

```
iz = iz(valid_mask);
```

```
ind = sub2ind(size(Vol), iy, ix, iz);
```

```
Vol(ind) = true;
```

```
% Морфологічне розширення на 1 воксель (заповнює дірки між  
точками
```

```
se = strel('sphere', 1);
```

```
Vol = imdilate(Vol, se);
```

```
end
```