

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

мікроелектронних та електронних інформаційних систем  
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий (магістрський)

(рівень вищої освіти)

на тему Синтез моделі вимірювального тракту системи  
визначення концентрації озону

Виконав: студент 2 курсу, групи Р.1719

спеціальності 171 Електроніка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроніка

(назва освітньої програми)

Д.А. Маспенников

(ініціали та прізвище)

Керівник доц.к.т.н. Кісельов Є.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

Шершов С.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра мікроелектроніки та електронних інформаційних систем  
Рівень вищої освіти другий (майстрський)  
Спеціальність 171 Електроніка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Маспенников Дмитро Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Синтез моделі вимірювальної тракту системи визначення концентрації озону

керівник роботи доц.к.і.н. Кісельов Єгор Миколайович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року № \_\_\_\_\_

2 Строк подання студентом роботи 01.12.2020

3 Вихідні дані до роботи 1. Діапазон вимірювальних концентрацій озону  $2 \cdot 10^{-2} \%$  2. Похибка вимірювань - не більше 2% 3. Час встановлення результатів вимірювань - не більше 65с

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів вимірювання 2. Моделювання оптичного каналу 3. Синтез моделі системи 4. Моделювання системи 5. Економіка 6. Охорона праці

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Методи вимірювань 2. Моделювання оптичного каналу 3. Схема системи (кр.) 4. Моделювання датчика 5. Моделювання опорного каналу 6. Моделювання доз. каналу 7. Моделювання тракту 8. Моделювання системи 9. Моделювання завдань

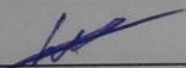
## 6 Консультанти розділів роботи

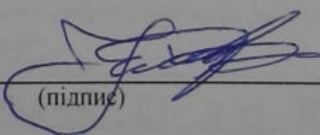
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Кісельов Е.М., доц.	01.10.19	06.04.20
2	Кісельов Е.М., доц.	06.04.20	05.05.20
3	Кісельов Е.М., доц.	05.05.20	19.05.20
4	Кісельов Е.М., доц.	19.05.20	02.06.20
5	Кісельов Е.М., доц.	02.06.20	21.09.20
6	Кісельов Е.М., доц.	21.09.20	05.10.20
		02.11.20	15.11.20

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

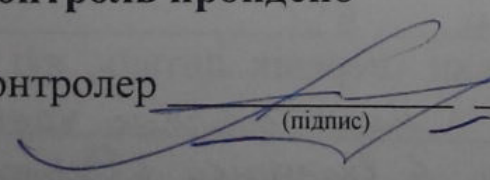
## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів вимірювання	06.04.20	
2	Модель оптичного каналу	05.05.20	
3	Синтез моделі системи	19.05.20	
4	Моделювання системи	02.06.20	
5	Економіка	21.09.20	
6	Охорона праці	05.10.20	
7	Оформлення пояснювальної записки	15.11.20	
8	Оформлення графічної частини	01.12.20	

Студент  Р.А. Маспенников  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  Е.М. Кісельов  
(підпис) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер  К.О. Шуришев  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить 101 стор., 51 рис., 17 табл., 44 інформаційних джерела.

Метою магістерської роботи є створення обчислювального інструментарію для оцінювання можливостей УФ – вимірювачів концентрації озону у воді, при використанні джерел і фотоприймачів різних типів з врахуванням впливу на результати вимірювань зовнішніх негативних факторів.

Об'єктом дослідження у роботі є процеси перетворення сигналів у системі визначення концентрації озону.

Задачі роботи - дослідження фізичних процесів, що визначають роботу абсорбційних УФ – датчиків випромінювання; синтез візуально – блочної моделі оптичного тракту системи визначення концентрації озону; синтез багатопроменевої візуально – блочної моделі вимірювача озону; дослідження впливу заважаючих чинників на функціонування вимірювача озону.

Методи рішення задач – теоретичний аналіз побудови систем визначення концентрації озону, синтез і імітаційне моделювання складових частин системи визначення концентрації озону.

Основні результати – синтезовано і проведено дослідження моделі трипроменевої системи визначення концентрації озону.

Прогнозні пропозиції – рекомендується розробка абсорбційного датчика озону і пристрою обробки його вихідних сигналів.

ОЗОН, МОДЕЛЮВАННЯ, ДАТЧИК, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ФОТОДІОД, СВІТЛОДІОД, СПЕКТР, ОПТИЧНИЙ КАНАЛ

Робота виконана на кафедрі МЕЕІС ІННІ ЗНУ з 01.10.2019 по 01.12.2020.

## ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз методів вимірювання концентрації озону	8
1.1 Вимірювання концентрації озону на основі поглинання ультрафіолетового випромінювання	8
1.2 Колориметричний метод	10
1.3 Амперометричні методи	12
1.4 Порівняльна характеристика методів вимірювання концентрації озону	17
2 Синтез візуально – блочної моделі оптичного каналу системи визначення концентрації озону	22
2.1 Структура датчика системи визначення концентрації озону	22
2.2 Обґрунтування обрання інструментарію розробки моделі	29
2.3 Опис блоку розрахунку поглинання ультрафіолетового випромінювання	35
2.4 Опис блоків джерел і приймачів випромінювання	43
3 Синтез трипроменевої моделі системи вимірювання концентрації озону	50
3.1 Структура трипроменевої системи вимірювання концентрації озону	50
3.2 Опис основного датчика вимірювального каналу	52
3.3 Синтез моделі опорного каналу	54
3.4 Синтез моделі широкосмугового датчика	56
3.5 Комплексна модель системи визначення концентрації озону	58
4 Моделювання системи визначення концентрації озону	61
4.1 Моделювання системи з джерелами випромінювання постійної інтенсивності	61

4.2	Моделювання впливу випадкових процесів на точність визначення концентрації озону	64
4.3	Моделювання системи з модуляцією інтенсивності випромінювання	67
5	Економіка та організація роботи науково-дослідної лабораторії	72
5.1	Формуляр проекту	72
5.2	Характеристика робіт за проектом	73
5.3	Робоча структура проекту - WBS	74
5.4	Організаційна структура проекту - OBS	75
5.5	Структура затрат проекту - CBS	76
5.6	Матриця відповідальності	77
5.7	Система кодування проекту	78
5.8	CTR - каталог	79
5.9	Стрілчастий графік	80
5.10	Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу	81
6	Вимоги з охорони праці та техніки безпеки у науково-дослідній лабораторії	85
6.1	Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів	85
6.2	Заходи з поліпшення умов праці	86
6.3	Виробнича санітарія	87
6.4	Електробезпека	88
6.5	Пожежна та техногенна безпека	89
6.6	Розробка блискавкозахисту	92
	Висновки	96
	Список посилань	97

## ВСТУП

Хоча озон був відкритий в 1839 р. і використовувався для очищення водопровідної води в Нідерландах (1880-ті рр.), Ніщі (1907 р.) та Санкт-Петербурзі (1910 р.) [1], дослідження процесу озонування є актуальними [2, 3]. Це викликано тим, що у 1982 р. управління з контролю за продуктами та ліками США (FDA) визнало безпечним використання озону для очищення води, а згодом і для переробки рідких продуктів харчування та напоїв. Розробка оптимальної системи озонування води є складним завданням через унікальні особливості технології озонування. По-перше, генератори озону можуть працювати як на повітрі (вихід - 1-3% озону), так і на чистому кисні (вихід - близько 6% озону) - якщо використовується коронний розряд або інший генератор високої напруги. Для цього застосування ультрафіолетового випромінювання є недостатнім, бо вихід озону дорівнює або менше 0,5%.

По-друге, озон - це дуже нестабільний газ, який неможливо зберігати [4]. Час напіввиведення озону в дистильованій воді становить близько 20 хвилин [5] (у необробленій питній воді приблизно 10 хв.). Це полегшує проблему надмірного використання озону, але передбачає застосування генератора озону як невід'ємної частини установки для озонування [6, 7].

По-третє, розчинність озону у воді досить низька - приблизно в 10 разів нижча за розчинність хлору [8] (з цієї причини хлор все ще використовується для очищення хоча здатність озону до знищення мікроорганізмів в 400 разів сильніша, ніж для хлору). Тому у озонаторних станціях використовується спеціальна камера (барботажна колонка або контактний резервуар, або контактор), що дозволяє надавати озон до води [9]. Озон (змішаний з повітрям або киснем від генератора) впорскується у воду дрібними бульбашками газу, і відбувається турбулентний перенос його маси (шляхом дифузії). При більш високих температурах відбувається зниження розчинності озону, але збільшується швидкість реакції взаємодії. Оскільки бульбашки містять кілька від-

сотків озону, а розчинність є низькою, масообмін і, як наслідок, швидкість реакції є помірними, навіть для такого потужного окислювача, як озон (лише фтор має вищий потенціал окислення) [9].

Коли озон розчиняється у воді, існує необхідність вимірювати концентрацію озону на вході до озонаторної станції. Рівень концентрації озону залежить від виду мікроорганізмів або неорганічних забруднювачів у воді та від необхідного значення коефіцієнту їх зниження. Цей рівень також залежить від необхідного часу лікування. Стандарти дезінфекції враховують обидва фактори (наприклад, необхідний вплив концентрації озону 4 ppmw протягом 4 хвилин) [8]. На практиці застосовується озонування з концентраціями від 0,2 ppmw до 10 ppmw. Лише окремі технологічні процеси вимагають надчистої води, обробленої 30 ppmw озону.

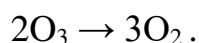
Тривалий вплив на персонал озону з концентраціями 0,2 ppmw шкідливий для легенів та дихальних шляхів. Людина, яка не працює навколо озону, може відчувати запах повітря в концентрації  $40 \text{ мкгО}_3 / 1 \text{ м}^3$  повітря (тобто  $18,7 \text{ ppmvO}_3$ , або  $0,03 \text{ ppmwO}_3 = 30 \text{ ppbwO}_3$ ) - "тест на нюх". Приблизно 0,1 одиниць на мільйон озону присутній в навколишньому повітрі. Тому для робочого простору обмежується припустима концентрація озону до рівня 0,1 ppmv. З цих причин залишковий розчинений озон у вихідній воді слід перевіряти та підтримувати на рівні 5 - 50 ppbw.

Таким чином, моделювання вимірювального тракту системи визначення концентрації озону є актуальним науково-технічним завданням.



## 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ

Методи вимірювання озону у воді можна класифікувати як специфічні або неспецифічні для озону. Специфічними методами розчиненого озону є: метод поглинання ультрафіолетових променів, метод індиго, амперометрично-мембранний метод, метод десорбції та виявлення газової фази. Неспецифічними методами розчиненого озону є метод йодистого калію та простий амперометричний метод. Абсолютні методи вимірювання концентрації озону засновані на зміні об'єму, що супроводжує реакцію розкладання озону:



Манометричний метод засновано на зміні тиску при фіксованому обсязі. Але, всі ці методи мають велику трудомісткість та невисоку точність при вимірюванні низьких концентрацій.

### 1.1 Вимірювання концентрації озону на основі поглинання ультрафіолетового випромінювання

Метод поглинання ультрафіолетового (УФ) випромінювання було розроблено головним чином для вимірювання концентрації озону в повітрі, але він застосовується і до розчиненого озону у воді, так як УФ - випромінювання на довжині хвилі 254 нм поглинається лише озоном; повітря, вода або кисень є «прозорими» для цього випромінювання. Основним рівнянням, що полягає у основі методу є [10]:

$$n_o = \frac{10^6 T}{273 P k l} \log \frac{I_0}{I}$$

де  $T$  – абсолютна температура, К,  $P$  – тиск, Па,  $k$  – коефіцієнт зменшення концентрації озону,  $I_0$  – інтенсивність випромінювання від джерела освітлення,  $I$  – інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь вимірювальне середовище,  $l$  – довжина шляху випромінювання у вимірювальному середовищі, см.

Структуру пристрою для вимірювання концентрації озону у воді показано на рис.1.1.

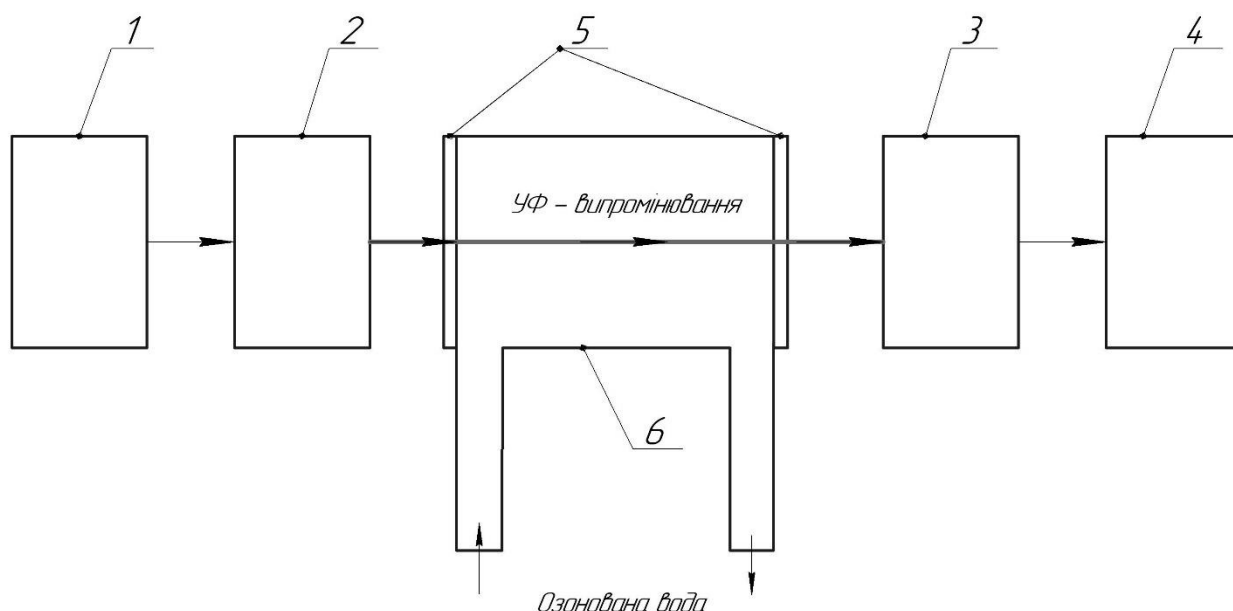


Рисунок 1.1 – Схема вимірювання концентрації озону на основі однопроменевого поглинання ультрафіолетового випромінювання: 1 – джерело УФ – випромінювання; 2 – монохроматор (фільтр) на довжину хвилі 254 нм; 3 – детектор (приймач) випромінювання; 4 – блок обробки результатів вимірювань; 5 – кварцові вікна; 6 – вимірювальний обсяг ( довжиною приблизно 1м)

У наведеному пристрої у якості джерела УФ – випромінювання використовується ртутна лампа низького тиску, у якій приблизно 80 % інтенсивності відповідають довжині хвилі 253,7 нм, що співпадає з максимумом смуги поглинання Хартлі [11]. Такі пристрої мають досить високі показники з

чутливості і швидкодії. Також можливо застосування і інших джерел УФ – випромінювання. Відомі [12] вимірювачі засновані на оптоакустичному методі при поглинанні четвертої Nd: YAG лазера на довжині хвилі 266 нм. В останній час активно використовують широкосмугові джерела світлі, такі як ксенонові лампи і світлодіоди. Так, наприклад, за допомогою ксенонових ламп з потужністю 75 Вт і зовнішнього резонатору з коефіцієнтами відбивання дзеркал 99,8 %, виконувались вимірювання перетинів поглинання газів, у тому числі і озону, у смузі довжин хвиль 333 – 375 нм.

Разом з тим, існують й інші різновиди пристроїв з подвійним або роздільними променями. Поправки на температуру та тиск всередині камери для зразків необхідні для вимірювання в повітрі; щодо води цими виправленнями можна знехтувати. Метод поглинання УФ випромінювання чутливий до бульбашок у воді або інших домішок. Тому зразок слід відфільтрувати та захистити від дегазації перед проведенням процедури вимірювання.

## 1.2 Колориметричний метод

У 1953 році було запропоновано перший колориметричний реєстратор окислювачів. Фотометричне визначення речовин (іонів) у розчинах складається з двох етапів:

1. Проведення колориметричної хімічної реакції, мета якої – переведення досліджуваного компоненту в забарвлену речовину, що поглинає електромагнітне випромінювання певної довжини хвилі. Для цього до розчину компоненту, який визначають, додають певний реагент, що утворює з компонентом забарвлену речовину (за хімічною природою, як правило, це або комплексна сполука, або продукт окислювально-відновної реакції).

2. Вимірювання інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання (світлопоглинання) забарвленим розчином.

Вимірювання світлопоглинання можна виконати різними методами:

а) колориметричний метод базується на візуальному порівнянні кольору (інтенсивності забарвлення) розчину, що досліджують, із кольором (інтенсивністю забарвлення) серії стандартних розчинів з відомою концентрацією. При цьому забарвлений розчин поглинає суцільне випромінювання немонохроматичної видимої ділянки спектру;

б) спектрофотометричний метод базується на вимірюванні інтенсивності монохроматичного світла в УФ-, видимому чи ІЧ-діапазонах спектру; в) фотоелектроколориметричний метод базується на вимірюванні інтенсивності світлопоглинання забарвленим розчином видимої частини спектру за допомогою приладів із спрощеним способом монохроматизації – фотоелектроколориметри (ФЕК, ЛМФ).

У 1978 р. розроблено метод «індиго». Барвник «індиго» використовувався при цьому, оскільки швидкість реакції озону з подвійним зв'язком індиго відрізняється простотою та відсутністю перешкод. Знебарвлення тригносульфонату індиго (ТСІ) під впливом озону спричиняє лінійне падіння абсорбції зі збільшенням концентрації озону. Метод «індиго» рекомендується застосовувати у тому разі, коли метод поглинання УФ випромінювання неможливо реалізувати або у випадку вимірювання концентрацій озону менш ніж  $10^{-7}$  %. Основним недоліком методу «індиго» є неможливість здійснення вимірювань у динамічному середовищі. Рівняння, що застосовується для розрахунку концентрації озону, має наступний вигляд [13]:

$$n_o = \frac{100A}{fbV}$$

де  $A$  – різниця у поглинанні випромінювання пробою робочої рідини і чистою пробою,  $b$  – довжина проходження випромінювання у кюветі з рідиною, см,  $V$  – обсяг реагенту, що додано до кювети (зазвичай – 90мл),  $f$  – емпіричний коефіцієнт.

При проведенні колориметричних вимірів потрібно дотримуватися певних умов і застережень:

- кювети повинні бути чистими, зовнішні стінки сухими;
- до робочої поверхні кювети (нижче рівня розчину) не можна доторкатися пальцями; перед заповненням кювети обов'язково прополіскують розчином, що досліджують;
- кювети заповнюють до такого рівня, щоб увесь потік випромінювання проходив крізь шар розчину;
- кювети встановлюють у кюветну камеру завжди однакою способом – щоб уникнути помилок, пов'язаних з розсіюванням і віддзеркалюванням світла;
- вимірювання виконують тільки при щільно закритій кришці кюветної камери;
- товщину кювети вибирають таким чином, щоб значення оптичної густини, яку вимірюють, вкладалося в оптимальний інтервал 0,1-1,0. Збільшення товщини кювети відповідно призводить до зростання чутливості визначення. Однак, кювети повинні мати товщину не більшу за 5 см, бо із зростанням товщини збільшуються втрати світла на розсіювання.

### 1.3 Амперометричні методи

У прямій амперометрії вимірюється або питома електропровідність, або електричний опір досліджуваного води. Це здійснюється в спеціальних амперометричних комірках, головним елементом якої є два платинові електроди. Вимірювання опору виконують компенсаційним методом – методом компенсації невідомої величини опору досліджуваного розчину опором, що виставляють на магазині опорів. Вимірювання проводять з використанням змінного струму низької частоти (50–105 Гц), що дозволяє уникнути поляризації електродів при вимірах. Пряма амперометрія має обмежене застосуван-

ня в аналізі через те, що навіть мізерний вміст домішок змінює аналітичний сигнал, який реєструється, тому що електрична провідність розчину є адитивною величиною і визначається наявністю всіх іонів в розчині.

Прості амперометричні датчики засновані на використанні озонованої води у якості електроліту [14]. Окислювачі, присутні у воді, відновлюються на катоді, і згенерований струм лінійно залежить від концентрації всіх окисників, що знаходяться у воді. Такі датчики вимагають видалення всіх окисників, окрім озону, або ж коригування по вмісту інших оксидантів, крім озону.

Ці недоліки можна уникнути за допомогою озоноселективної мембрани, що знаходиться під дією струму озонованої води. В результаті озон разом з водою дифундує через мембрану, а інші окисники затримуються. При цьому швидкість дифузії лінійно пропорційна концентрації озону у воді (рис. 1.2).

Таким чином, датчики озону мембранного типу - це амперометричні або полярографічні електрохімічні комірки, які перетворюють вимірювання у концентрації озону у воді на вимірювання в повітрі. Простір датчиків необхідно періодично заповнювати повітрям, а озонвмісне повітря після вимірювання видаляти. Метод випаровування води та метод газової фази схожі на датчики мембранного типу, але процес видалення озону з води може бути реалізований або барботуванням інертним газом, таким як азот (або повітрям), через пробу води, або інтенсивним струшуванням кювети з пробєю води для отримання розчиненого газу турбулентним потоком.

Тонкоплівкові напівпровідникові датчики, з поверхневим шаром оксиду металу, що нагрівається (НМОС), використовують зміну питомого опору на кордонах зерен, озonom, що виділяється з води і адсорбується на поверхні напівпровідника, для визначення концентрації озону [15].

В основі роботи НМОС лежить явище адсорбції газів поверхнею напівпровідника, що зумовлюється наявністю некомпенсованого силового поля, яке знаходиться на межі поділу «газ-тверде тіло». Адсорбція завжди супро-

воджується зменшенням вільної енергії, тобто є екзотермічним процесом. У міру встановлення рівноваги між поверхнею і газовою фазою адсорбція зменшується.

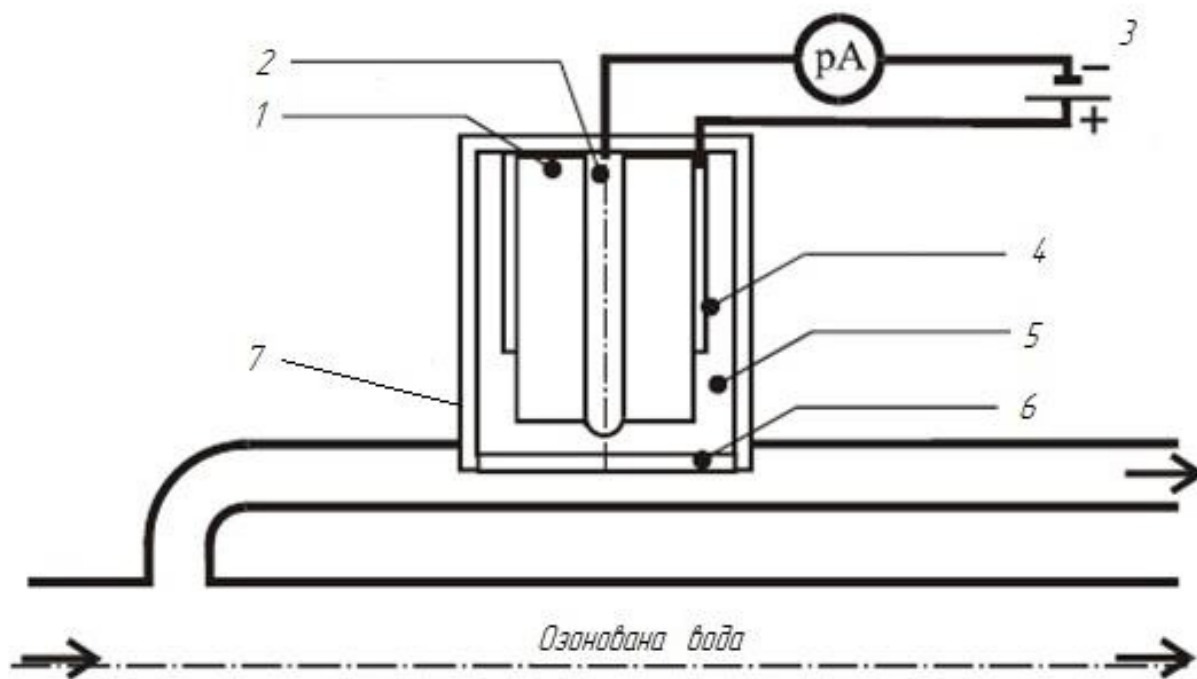


Рисунок 1.2 – Схема вимірювання концентрації озону амперометричним методом : 1 – ізолятор; 2 – катод (електрод з золота); 3 – поляризаційне джерело; 4 – анод (електрод зі срібла); 5 – електроліт; 6 – озоночутлива мембрана; 7 – полімерний корпус

У загальному вигляді процес взаємодії газу з поверхнею напівпровідника складається з таких стадій:

- фізична адсорбція, яка залежить від сил електростатичного походження. При цьому енергія зв'язку адсорбованої молекули газу з поверхнею напівпровідникового матеріалу становить 0,01–0,1 еВ.
- хімічна адсорбція, що зумовлюється ковалентними силами, які приводять до хімічного з'єднання молекули газу з твердим тілом. Енергія зв'язку при цьому досягає декількох еВ.

Теоретичним засадами процесу випарювання є закон Генрі, за яким концентрація газу, розчиненого у воді, лінійно пропорційна парціальному тиску цього газу в повітрі над поверхнею води:

$$p = H \cdot c ,$$

де  $p$  – концентрація озону у повітрі,  $c$  – концентрація озону у рідині,  $p$  і  $c$  мають однакову розмірність,  $H$  – константа Генрі, що відповідає температурі 20°C.

Закон Генрі відповідає рівноважному стану, але на практиці ця умова не виконується. Тому процес осадження озону на поверхню плівки датчика не строго узгоджується із законом Генрі, що, в свою чергу, впливає на точність цього методу. Крім того, більш високі значення тиску збільшують розчинність озону, що також впливає на похибку вимірювань за таким методом.

Як чутливий елемент у напівпровідникових газових сенсорах найширше застосування знайшли напівпровідникові оксиди металів – цинку, олова, титану, цирконію, кобальту. В області робочих температур до 900 К електропровідність оксидів визначається домішковими атомами (як власними, так і чужорідними). Як правило, оксиди металів нестехіометричні, тому дефекти їхньої структури є центрами адсорбції газу. Цим і пояснюється активність оксидів і їхня вибірковість до певних газів. Якщо оксиди мають у своєму складі катіони металів з недобудованими  $d$ -оболонками, то вони характеризуються підвищеною вибірковою здатністю. До таких матеріалів належать оксиди перехідних металів.

У результаті вивчення фізичних процесів, що відбуваються на поверхні й в об'ємі напівпровідника під час адсорбції на ньому газів, було виділено декілька вихідних інформативних параметрів, що змінюються в процесі адсорбції і несуть як якісну, так і кількісну інформацію про предмет вимірювання у вхідному параметрі. Наразі найбільш поширеними є чутливі елемен-



ти резистивного типу, для яких вихідний інформативний параметр – зміна поверхневої та об'ємної провідності.

Найпростіший чутливий НМОС елемент виконаний у вигляді плівки напівпровідника (найчастіше металооксидного) з двома контактними площадками і двома металевими електродами, розміщеними на діелектричній підкладці (рис. 1.3). За необхідності на підкладці розташовують тонкоплівковий нагрівач.

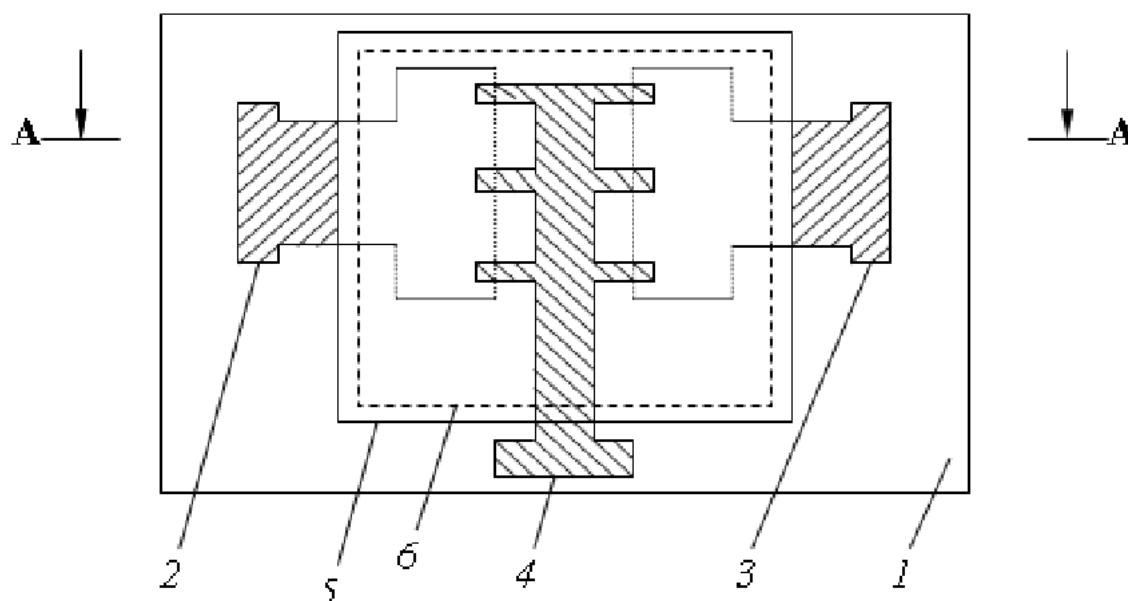


Рисунок 1.3 – Тонкоплівковий датчик для детектування складової газового або рідкого середовища: 1 – підкладка; 2, 3 – вимірювальні електроди; 4 – допоміжний електрод; 5 – діелектрична плівка; 6 – напівпровідникова плівка

На НМОС датчика впливає робоча температура: з підвищенням температури зростає інтенсивність поверхневих реакцій і, відповідно, чутливість. Збільшення чутливості з підвищенням температури досягає насичення в області 300 °С. Робочі температури цих сенсорів залежать від складу домішок доданого у плівку двоокису олова і конструкції та варіюються від 100 до 400°С [15].

#### 1.4 Порівняльна характеристика методів вимірювання концентрації озону

Електрохімічні або НМОС - датчики можуть бути відкалібровані як за допомогою «індиго» - методу, так і за допомогою методу поглинання УФ випромінювання [15]. Але весь діапазон вимірювальних концентрацій озону охоплюється лише методом поглинання УФ випромінювання. Також датчики можливо калібрувати за допомогою спектрофотометрів або УФ - аналізаторів поглинання випромінювання, При цьому ці прилади повинні бути відкалібровані за допомогою еталонних розчинів або хімічних методів, таких як титрування газової фази або йодометрія, які є громіздкими і потребують дуже досвідченого персоналу.

Для тестування наявності чутливості до озону датчиків («тест на придатність»), використовуються портативні озонатори. Для визначення низьких концентрацій озону, розчиненого у воді, використовуються одиниці ppmw ( $10^{-6}$  % за вагою) - частки на мільйон ваги або ppbw ( $10^{-9}$  % за вагою) - частки на мільярд ваги. З іншого боку, низькі концентрації озону в повітрі подаються у одиницях ppmv (частка на мільйон об'ємних об'ємів) або одиницях ppbv (частка на мільярд об'ємних об'ємів). У багатьох випадках використовується аббревіатури ppm або ppb, що може викликати неоднозначність, особливо, коли використовуються датчики мембранного або газового типів. Оскільки концентрація у повітрі залежить від температури та тиску, необхідно перевіряти перерахування відображувані результатів вимірювань, отриманих приладом, відповідно до стандартних умов.

Наразі існує тенденція до розширення діапазону вимірювань впродовж до нижчих меж визначення концентрацій озону. Це зумовлено сучасними санітарними стандартами, що вимагають зменшення припустимих концентрацій на робочих місцях, а також необхідністю регулювання значень залишкового озону на виході з установки озонування.

Результати порівняльного аналізу методів визначення концентрації озону у воді наведено на рис. 1.4 – 1.6.

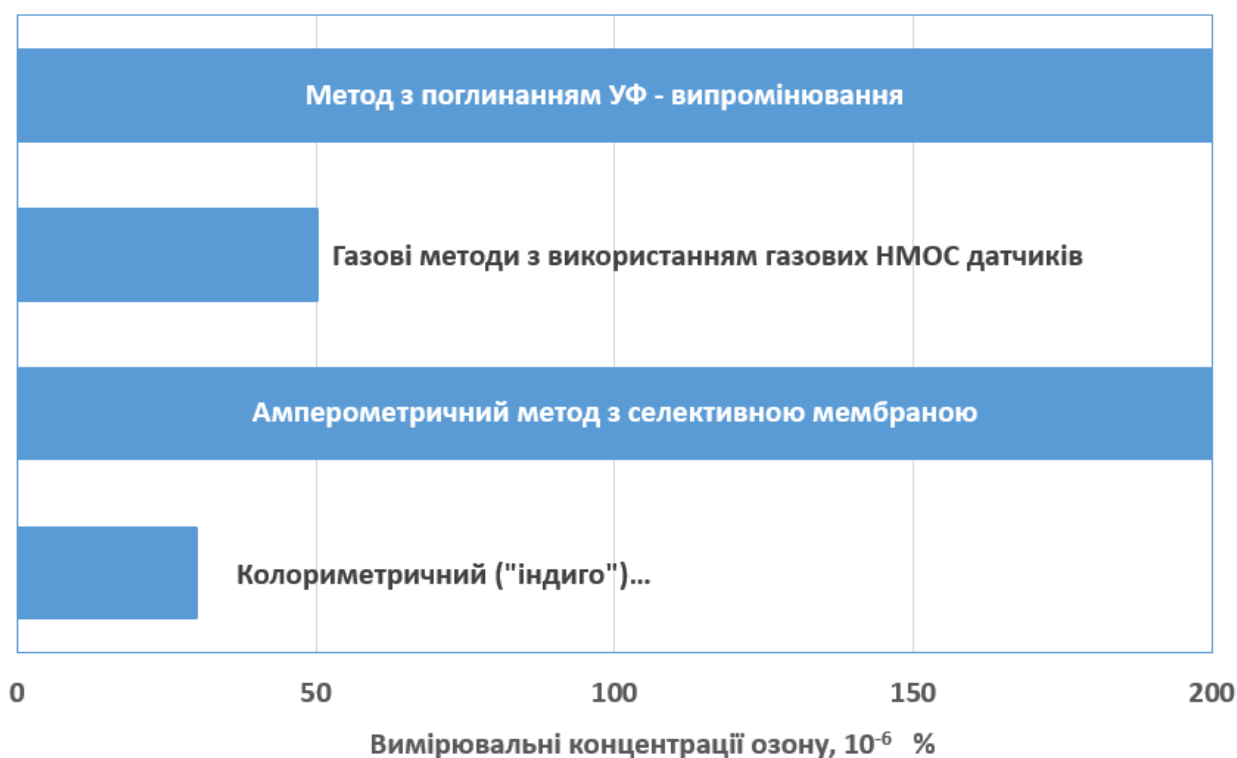


Рисунок 1.4 – Порівняльна характеристика методів за діапазоном визначення концентрації озону

З рис. 1.4 – 1.6 слід, що метод поглинання УФ випромінювання та метод «індіго» забезпечують час реакції приблизно на порядок швидше, ніж амперометричні датчики для розчиненого або виділеного озону. Разом з тим, сучасні тенденції розвитку інформаційно – вимірювальних систем потребують зменшення часу відгуку датчиків.

Таким чином, загальна тенденція до низьких рівнів припустимих концентрацій озону в повітрі або його залишків у воді вимагає проектування нових вимірювачів або датчиків з діапазоном у кілька десятків ррбw. Для кращого контролю установок озонування необхідні датчики з високою швидкістю, що дозволяють швидко реагувати на зміни режимів експлуатації обладнання.

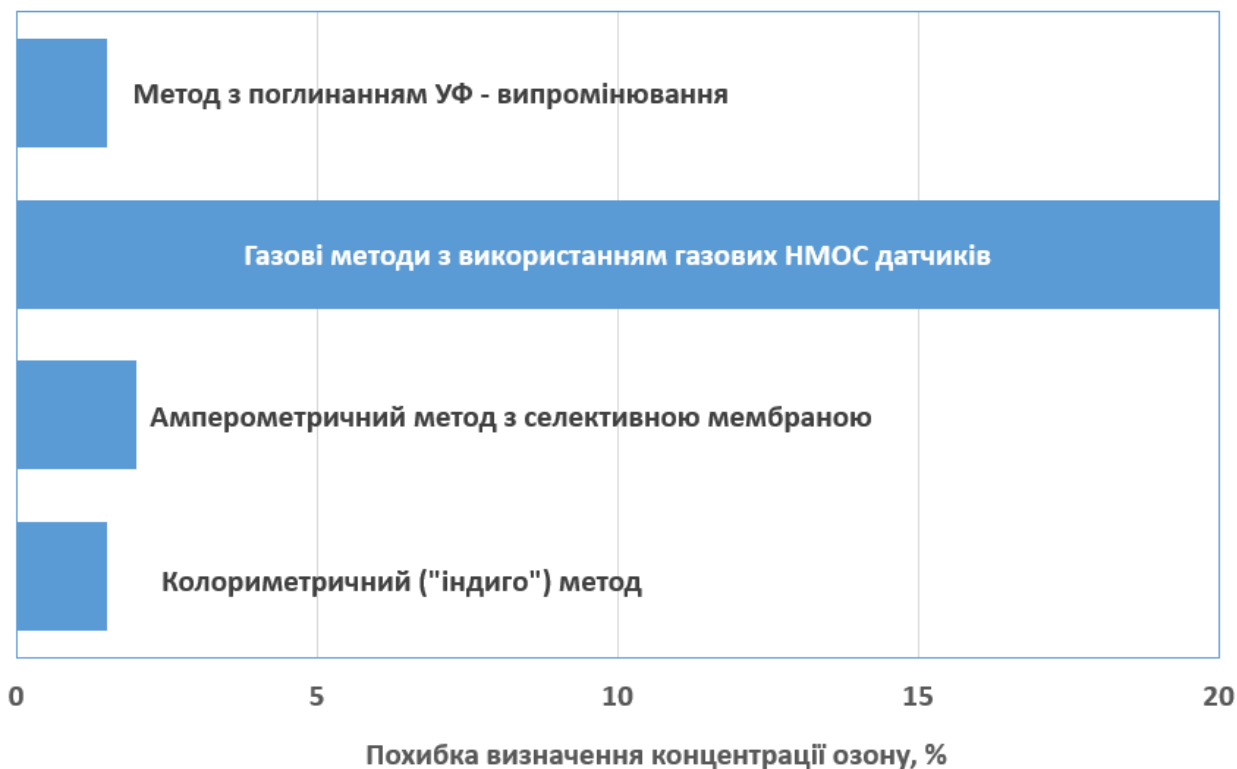


Рисунок 1.5 – Порівняльна характеристика методів за похибкою визначення концентрації озону

Крім того, для отримання кращих метрологічних характеристик датчиків озону слід використовувати динамічні методи вимірювань.

Однією з основних задач, що вирішуються при побудові таких систем, є калібрування приладів для вимірювання концентрації розчиненого озону. За цією ознакою метод поглинання УФ випромінювання є найбільш надійним у якості еталонного методу. Разом з тим проблемою є складання точних еталонних розчинів для перевірки УФ - аналізаторів. Такі ж скрутності характеризують і метод «індиго». Це відбувається тому, що не існує еталонних стандартів калібрувальних приладів для вимірювання розчиненого озону. Наразі здійснюються деякі спроби калібрування амперометричних датчиків озону мембранного типу за допомогою еталонних газових сумішей, що містять кисень. Це зумовлюється тим, що кисень не є таким нестійким, як озон, і його концентрація у повітрі добре відома. Однак вимірювання газоподібного

озону за газовим еталоном не настільки надійні, як розчиненого озону, отриманого безпосередньо у воді.

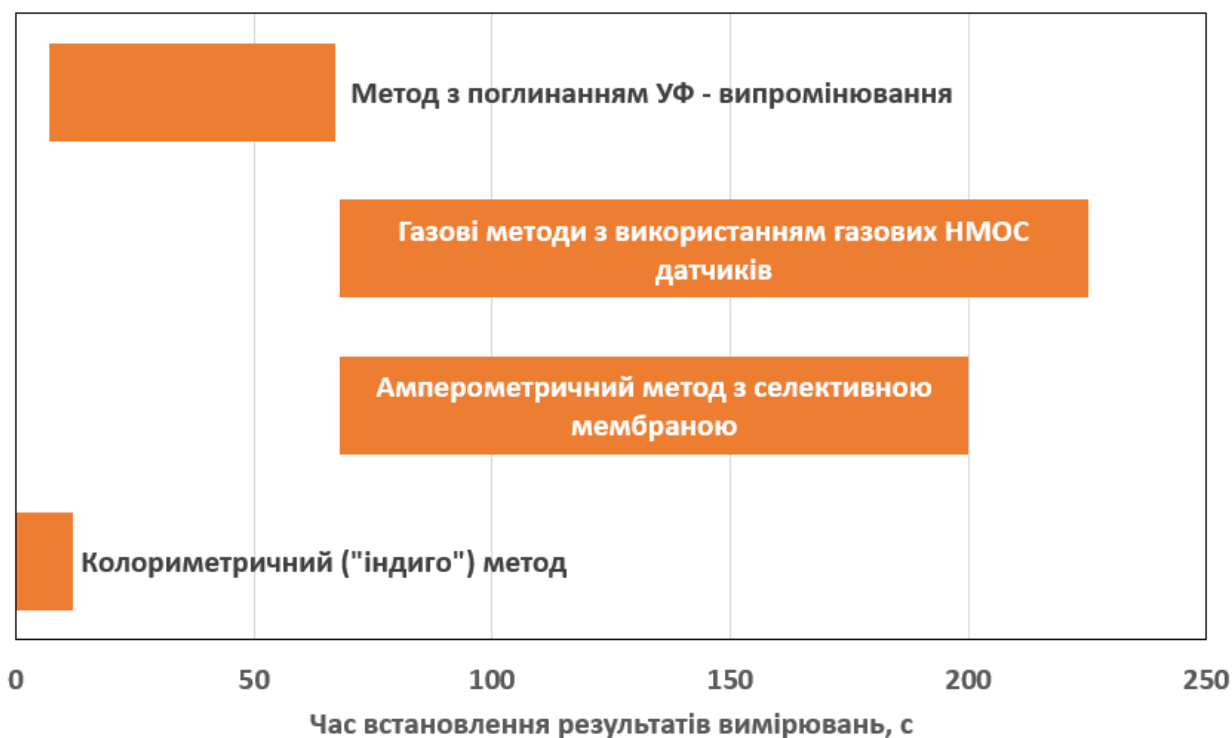


Рисунок 1.6 – Порівняльна характеристика методів визначення концентрації озону параметром швидкодії

Тому існує потреба у точних, надійних і специфічних відносно озону методах прямого вимірювання та датчиках для вимірювання концентрації озону в озонованій воді.

Зважаючи на це, метою магістерської роботи є створення обчислювального інструментарію для оцінювання можливостей УФ – вимірювачів концентрації озону у воді, при використанні джерел і фотоприймачів різних типів з врахуванням впливу на результати вимірювань зовнішніх негативних факторів.

При цьому необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідження фізичних процесів, що визначають роботу абсорбційних УФ – датчиків випромінювання;

- синтез візуально – блочної моделі оптичного тракту системи визначення концентрації озону;
- синтез багатопроменевої візуально – блочної моделі вимірювача озону;
- дослідження впливу заважаючих чинників на функціонування вимірювача озону.

## 2 СИНТЕЗ ВІЗУАЛЬНО – БЛОЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ

### 2.1 Структура датчика системи визначення концентрації озону

Аналіз структури і параметрів озонаторної станції показав раціональність реалізації вимірювача озону на основі адсорбційних методів поглинання УФ - випромінювання.

Метод визначення вмісту озону за поглинанням ультрафіолетового (УФ) випромінювання було розроблено для газоподібних середовищ. Нами пропонується конструкція датчика озону у воді, дія якого базується на таких же принципах [16]. Але на відміну від відомих варіантів реалізації, така схема містить джерело УФ випромінювання у вигляді світлодіоду, перевагою якого у порівнянні з ртутними лампами є стабільність і монохроматичність випромінювання, а у порівнянні з УФ – лазерами – собівартість і знижена потужність споживання. Структура розробленого датчика неведена на рис. 2.1.

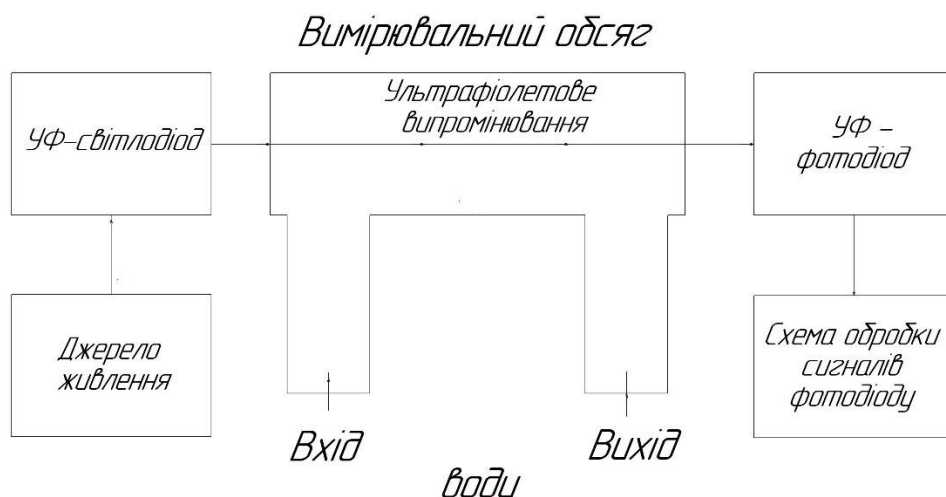


Рисунок 2.1 – Структура датчика озону

Загально відомими джерелами УФ – випромінювання є флюоресценційні лампи, лампи розжарювання, лазери та світлодіоди [17]. До основних параметрів таких випромінювачів належать діапазон довжин хвиль випромінювачів, стабільність параметрів випромінювання, вихідна оптична потужність та термін служби.

До джерел УФ – випромінювання, що використовуються у системах вимірювання концентрації озону висувають вимоги щодо високої стабільності і значної потужності довжини хвилі випромінювання. Світлова стабільність випромінювання зумовлюється короткоточасними коливаннями і дрейфом його параметрів з розрахунку тривалого часу. Кількісною характеристикою стабільності світлового потоку є відношення зміни інтенсивності до середньої інтенсивності випромінювання. Так як вимірювання концентрації озону зазвичай здійснюється шляхом послідовного визначення поглинання випромінювання на робочих і еталонних зразках, що надходять до оптичного тракту датчика, тому бажано забезпечити оптичну стабільність протягом всього циклу роботи [17].

Термін експлуатації джерел випромінювання впливає на довгострокову стабільність і визначається моментом часу, коли світловий потік виходить за припустимі межі довжини хвиль. З цієї точки зору, стислий термін роботи призводить до необхідності заміни джерела, що збільшує витрати на експлуатацію.

Дейтерієві лампи характеризуються більшою стабільністю, ніж інші УФ – лампи при високих значеннях світловіддачі [18]. Але вони мають великі розміри, необхідність у стабільному джерелі живлення і до 0,5 год підготовки до роботи шляхом поступового прогріву.

Ртутні лампи низького тиску мають максимум спектра випромінювання на довжині хвилі 254 нм [19]. Також існує їх різновид у вигляді ксенонових ртутних ламп. Разом з тим, таким джерелам притаманні великі значення споживаємої потужності, невисока стабільність параметрів випромінювання і вміст шкідливих речовин.



У порівнянні з зазначеними джерелами, світлодіоди є більш мініатюрними, споживають значно меншу потужність і собівартість. Результати порівняльного аналізу джерел УФ – випромінювання наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика джерел УФ – випромінювання для систем визначення концентрації озону

Параметри	Світлодіоди	Дейтерієві лампи	Ксенонові лампи	Ртутні лампи
Довжина хвилі випромінювання	Монохроматичне випромінювання	120 – 400 нм	160 – 2000 нм	185 – 2000 нм
Стабільність випромінювання	Дуже висока	Добра (> 99,995 %)	Задовільна (> 97 %)	Задовільна (> 98 %)
Час підготовки до роботи	Не потребує	20 – 30 хв	Не потребує	1 – 15 хв
Термін праці, год	3000 - 10000	2000 - 4000	400 - 5000	500 - 3000
Споживаєма потужність, Вт	Постійний струм 6 – 10 В	5 – 150	2 – 60	50 - 500
Теплове випромінювання	Відсутнє	Присутнє	Відсутнє	Присутнє
Вартість	Низька	Висока	Висока	Низька
Складність систем керування	Незначна	Висока	Висока	Висока
Безпечність у використанні	Низькі напруги живлення і відсутність теплового випромінювання	Велика потужність споживання і значний радіаційний нагрів	Висока напруга живлення, висока ймовірність іскроутворення	Висока напруга живлення, високий вміст ртуті у крихкому корпусі

Світлодіоди, у порівнянні з іншими джерелами УФ – випромінювання, мають невеликі розміри, низький рівень оптичного шуму, незначний дрейф інтенсивності випромінювання, низькі показники з генерації теплового потоку, незначну вартість і тривалий термін роботи [20]. До їх особливостей також можливо віднести здатність функціонувати у імпульсному режимі з частотою перемикавання до 1 ГГц. Смуга випромінювання цих приладів є квазі-монохроматичною зі смугою пропускання до 30 нм, що дозволяє будувати вимірювачі без наявності монохроматорів.

Конструктивне виконання світлодіодів передбачає варіанти для звичайного монтажу, так і для поверхневого монтажу. До того ж є можливість зміни верхньої кришки, що виконує функцію лінзи, на інший оптичний варіант, поєднуючи колімоване УФ – випромінювання з оптоволоконними лініями передачі.

Вартість реалізації вимірювача озону на основі УФ – світлодіоду становить приблизно 350 у.о., що у порівнянні вартістю пристрою з ртутною лампою (580 у.о.) є більш вигідним. Така економія обумовлюється тим, що у вимірювачі відсутні монохроматори (оптичні фільтри), засоби термостабілізації та зниженими витратами щодо експлуатації і обслуговування.

Разом з тим, існують проблеми у реалізації УФ – світлодіодів з довжиною хвилі випромінювання менш 300 нм. Це обумовлено низькою ефективністю перетворення фотонів, що знижує оптичну потужність, призводить до наявності паразитних теплових ефектів і підвищує вартість. Сьогодні існують промислові зразки УФ – світлодіодів на довжину хвилі до 260 нм, що виготовляються на основі напівпровідників AlGaIn. Нещодавно були розроблені світлодіоди на основі нітриду алюмінію (AlN), що мають високу оптичну потужність (1,5 мВт, 100 мА) з низьким значенням паразитного випромінювання в порівнянні зі світлодіодами на основі сапфіра (30 мА). Показано, що світлодіоди на основі AlN мають мінімальне паразитне випромінювання в порівнянні зі світлодіодами на основі сапфіру. Співвідношення паразитного ви-

промінювання до УФ - випромінювання становило 0,0002% та 8% для світлодіодів на основі AlN та сапфіру відповідно.

Таким чином, УФ – світлодіоди відрізняються просторовою стабільністю, стійкістю інтенсивності випромінювання та вузькою смугою випромінювання з низькими оптичними втратами. Це можливо використовувати для досягнення кращої селективності визначення озону, ніж при використанні звичайних джерел. Мінімізуючи шум джерел живлення, коливання температури та механічну стабільність оптики, продуктивність реалізації вимірювачів озону може перевершити традиційні конструкції на основі УФ–ламп [21].

Тому для створення приладу визначення концентрації озону у воді запропоновано у якості джерела випромінювання використовувати УФ – світлодіод CUD5GF1A [22], з максимумом випромінювальної характеристики на довжині хвилі 255 нм, що відповідає піку поглинання озону у смугі Хартлі (рис. 2.2).

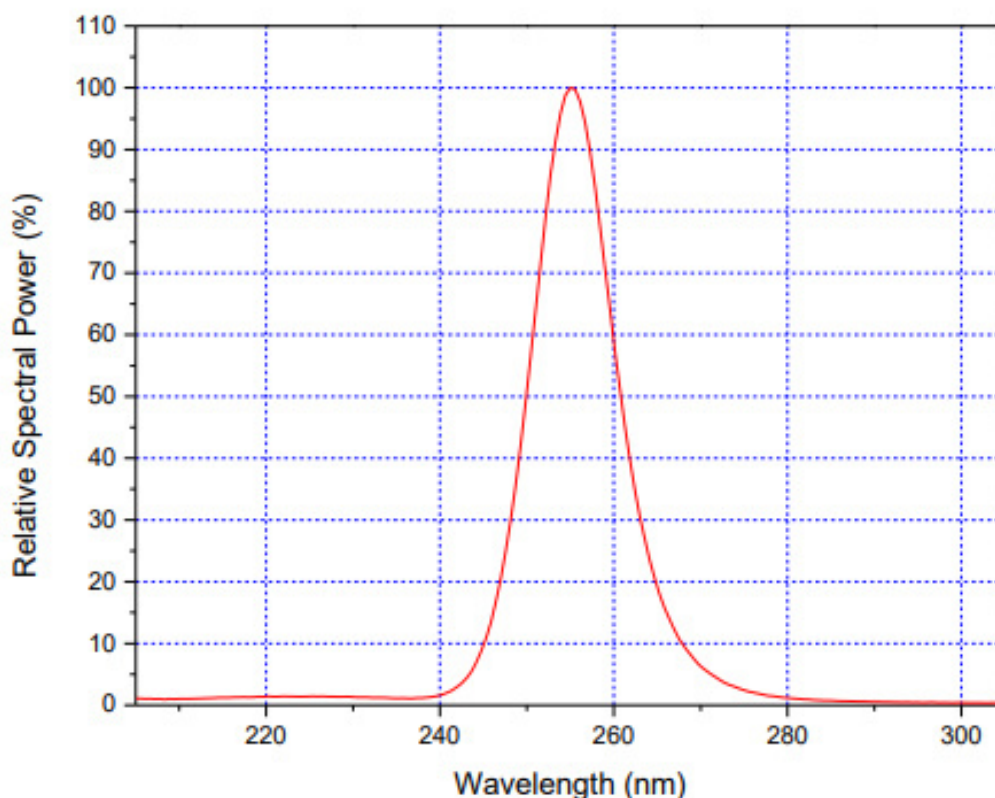


Рисунок 2.2 – Випромінювальна характеристика світлодіоду CUD5GF1A

Світлодіод CUD5GF1A виконується у прямокутному керамічному корпусі з прозорим для УФ – випромінювання верхнім вікном. Конструкція корпусу передбачає шляхом поверхневого монтажу на друковані плати з невеликим значенням теплового опору.

З рис. 2.2 можливо встановити, що довжина хвиль випромінювання світлодіоду знаходиться у межах від 250 до 260 нм. При цьому максимальна потужність випромінювання становить 500 мкВт для номінальної прямої напруги 6,5 В. Максимальний прямий струм для такого приладу мусить не перевищувати 30 мА, з максимальною потужністю розсіювання 220 мВт. Діапазон робочих температур діоду відповідає значенням від – 30 до 60 °С.

Як показано у [23], відносна потужність УФ – випромінювання світлодіоду зростає від 25% до 150% при збільшенні прямого струму від 5 до 30 мА. Також світлодіод має незначну зміну максимуму випромінювальної характеристики ( $\pm 1$  нм) у діапазоні робочих струмів.

Більш істотний вплив на зміну потужності і довжину хвилі випромінювання світлодіоду спричиняє збільшення температури активної структури. Зазначається, що при зростанні температури приладу від 25 до 80 °С, випромінювальна спроможність зменшується на 23 %, а довжина хвилі випромінювання зростає до 256,5 нм. Це потребує ретельного забезпечення теплового режиму експлуатації світлодіоду.

При цьому приймачами випромінювання є фотодіоди, що спектрально суміщені з відповідними випромінювачами. В результаті аналізу сучасної номенклатури фотодіодів для побудови датчику озону було обрано прилад GUVС-T21GH [24], виготовляється на основі AlGaN. Спектральна характеристика діоду наведена на рис. 2.3. і характеризується максимумом поглинання на довжині хвилі 260 нм., що є приблизно сумісним зі спектром випромінювання світлодіоду CUD5GF1A (рис. 2.4).

Для фотодіоду робоча смуга поглинання знаходиться у діапазоні від 240 до 280 нм, що дозволяє виключити оптичні фільтри з конструкції датчи-

ка. Чутливість детектору складає 0,6 мВ/нВт при вихідній напрузі у 0,335 В для щільності потужності 1 мВт/см<sup>2</sup>.

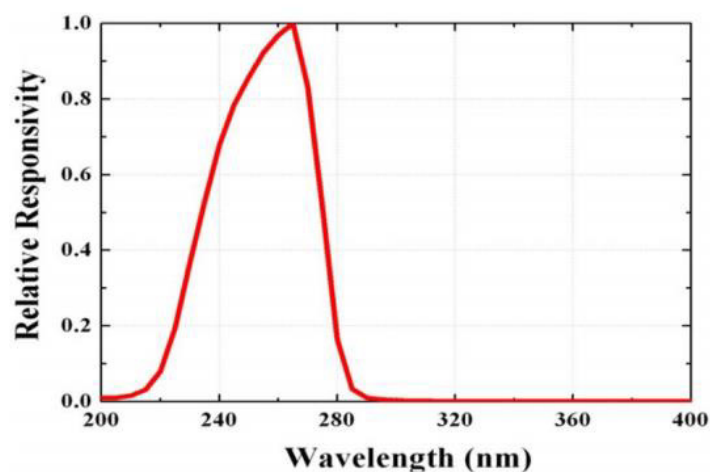


Рисунок 2.3 – Спектральна характеристика фотодіоду GUVС-T21GH

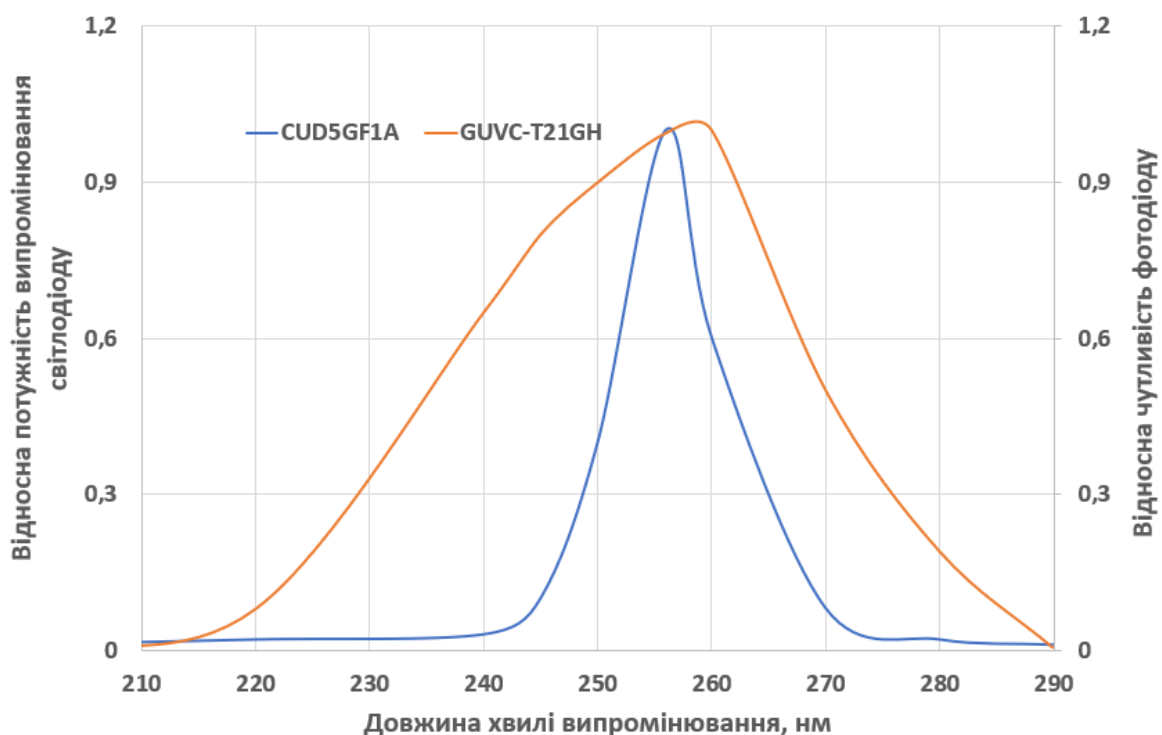


Рисунок 2.4 – Порівняльна характеристика спектру випромінювання світлодіоду і спектральної чутливості фотодіоду

Конструктивно фотодіод GUVС-T21GH виконано у корпусі TO-5 і для його функціонування потрібно однополярне джерело живлення.

## 2.2 Обґрунтування обрання інструментарію розробки моделі

Серед засобів моделювання електронних систем найбільше поширення набули пакети програмних продуктів Micro-Cap [25], NI Multisim [26], VisSim [27], Matlab Simulink [28]. Переважними для розробки моделей вимірювального тракту системи визначення концентрації озону є VisSim і Matlab Simulink.

Для обрання інструментарію розробки моделі проаналізовано ієрархії чотирьох варіантів (табл.2.2), враховуючи шкалу відносної важливості (табл.2.3) [29].

Таблиця 2.2 - Можливі варіанти інструментарію розробки моделі

Засіб моделювання		Стислий опис
A	VisSim	імітаційне графічне моделювання систем різноманітної фізичної природи з інтерфейсом до Matlab Simulink
B	Micro-Cap	SPICE-подібна програма для аналогового і цифрового моделювання електричних та електронних схем з інтегрованим візуальним редактором
C	NI Multisim	простий наочний інтерфейс, потужні засоби графічного аналізу результатів моделювання, наявність віртуальних вимірювальних приладів, які копіюють реальні аналоги
D	Matlab Simulink	графічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, нелінійні і розривні системи

Таблиця 2.3 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робився за критеріями, наведеними в табл. 2.4.

Відносну вагу кожного критерію встановлювалась на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (табл. 2.4),

У матриці прийняті наступні позначення [34]:

$i$  – номер критерію;

при порівнянні 6-ох критеріїв (табл. 2.4)  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;

$X_i$  - локальний пріоритет, тобто відносна вага  $i$ -го критерію в глобальному критерії:

Таблиця 2.4 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}$	$X_i$
1. Точність	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Вартість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Швидкість	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Сумісність	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Вимоги до платформи	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Зручний інтерфейс	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
$\Sigma$							9,033	1,00

$$X_i = \frac{\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}}{\sum_{i=1}^6 \sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}},$$

$\sum$  - сума по стовпці  $\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}$ ;

Порівняння виконувалось таким чином: відносна вага кожного критерію самого до себе дорівнює 1. Спочатку розглядався критерій «сумісність»: відносно критерію «точність» він має значну перевагу (за табл. 2.4 оцінка – 7), тоді в 4-й строці, 1-му стовпчику вказується 7, а в 1-й строці, 4-му стовпчику вказується 1/7;

відносно критерію «вартість» він має помірну перевагу (за табл.2.3 оцінка – 3), тоді в 4-й строці, 2-му стовпчику вказується 3, а в 2-й строці, 4-му стовпчику вказується 1/3;

відносно критерію «швидкість» він має сильну перевагу (за табл.3.3 оцінка – 5), тоді в 4-й строці, 3-му стовпчику вказується 5, а в 3-й строці, 4-му стовпчику вказується 1/5; і т. д. щодо порівняння цього критерію з іншими.

Так само порівнючи кожний критерій з іншими, заповнювалась табл. 2.5.

Далі в кожній строці виконувалось перемноження усіх 6 значень і отримувався з цього добутку корінь 6-го ступеню – таким чином заповнюва-

вся стовпчик  $\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}$ ; далі знаходилася сума по цьому стовпчику  $\sum$ , і знаходилося

$$X_i = \frac{\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}}{\sum_{i=1}^6 \sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}}$$



для кожної строки  $i$  заповнювався стовпчик  $X_i$ .

Далі аналогічно були складані 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (табл. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9). Оскільки порівнювалися 4 інструментарію за одним критерієм, то  $i = 1, 2, 3, 4$ ;

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}}{\sum_{i=1}^4 \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}} ;$$

$$\Sigma - \text{сума по стовпці } \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i} .$$

Таблиця 2.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «точність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	1/5	3	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
$\Sigma$					6,07	1,00

Таблиця 2.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
$\Sigma$					5,37	1,00

Таблиця 2.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
Σ					6,41	1,00

Таблиця 2.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
Σ					4,73	1,00

Таблиця 2.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вимоги до платформи»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
Σ					5,88	1,00

Таблиця 2.10 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «зручний інтерфейс»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
$\Sigma$					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислювався як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт. В табл. 2.11 рядок «вага» - це стовпчик  $X_i$  таблиці, строчка «VisSim» - це значення  $X_i$  таблиць 2.5 – 2.9 для інструментарію А, строчка «Micro-Cap» - для інструментарію В і т. д. Глобальний пріоритет для кожної програмного комплексу розраховувався таким чином:

для програми «VisSim»:  $0,073 \times 0,19 + 0,116 \times 0,21 + 0,051 \times 0,09 + 0,254 \times 0,21 + 0,473 \times 0,13 + 0,033 \times 0,56 = 0,176$ ;

для програми «Micro-Cap»:  $0,073 \times 0,65 + 0,116 \times 0,09 + 0,051 \times 0,04 + 0,254 \times 0,05 + 0,473 \times 0,04 + 0,033 \times 0,26 = 0,100$ ; і т.д.

Таблиця 2.11 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
VisSim	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Micro-Cap	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
NI Multisim	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Matlab Simulink	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364

З порівняння глобальних пріоритетів різних програмних засобів (табл. 2.11) видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта з комплексом моделювання Matlab Simulink.

За допомогою методу аналізу ієрархій проведено порівняння чотирьох програмних пакетів моделювання електронних систем за наступними критеріями: 1) точність; 2) вартість; 3) швидкість; 4) сумісність; 5) вимоги до платформи; 6) зручний інтерфейс. Найбільший локальний пріоритет у критерію «вимоги до платформи» (див. табл. 2.4). За даними таблиці 2.11 локальний пріоритет за критерієм «зручний інтерфейс» є найвищим для моделювання у системі VisSim. Проте найбільший глобальний пріоритет має пакет програм Matlab Simulink. Тому цей інструментарій буде використовуватися для реалізації моделей вимірювального тракту системи визначення концентрації озону. Крім того, рекомендується також обмежене застосування системи VisSim з подальшою передачею результатів до Matlab Simulink.

### 2.3 Опис блоку розрахунку поглинання ультрафіолетового випромінювання

Абсорбційні оптичні датчики озону використовують у своїй роботі закон Бера – Ламберта [30]. Процес абсорбції є процесом послаблення УФ – випромінювання при проходженні скрізь досліджувальне середовище. Електромагнітне випромінювання з високим рівнем енергії призводить до переведення електронів речовини на рівні з більшим значенням енергії. Абсорбція має місце тоді, коли енергія фотонів випромінювання є більшою ніж відстань між двома рівнями у речовині. При цьому змінюється конфігурація структури валентних оболонок. Таким чином, власне абсорбція є поєднанням процесів проходження і поглинання випромінювання у середовищах.

Кількісно проходження випромінювання через середовище можливо описати за допомогою співвідношення потужності сигналу на виході джерела

випромінювання  $I_0$  до потужності сигналу, що пройшов через вимірювальне середовище  $I$ . Ці два показника пов'язані одне з одним наступним співвідношенням:

$$I(C, \lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)LC], \quad (2.1)$$

де  $C$  – концентрація досліджуваної речовини,  $L$  – довжина шляху поглинання,  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $\alpha$  – спектральний коефіцієнт поглинання випромінювання досліджуваною речовиною.

Поглиналина здатність молекул озону має лінійчату структуру. При цьому смуги поглинання містять велику кількість практично рівномірно рознесених одна від одної спектральних ліній, ширина яких обумовлюється ймовірностями зштовхувань між молекулами  $O_3$ . Напівширина (FWHM) цих ліній менш ніж 1 нм при стандартних умовах вимірювань, а форма спектральної лінії задається функцією Лоренца, яка і визначає коефіцієнт поглинання випромінювання для кожної спектральної складової:

$$k(\nu) = \frac{S}{\pi} \frac{\sigma_L}{\sigma_L^2 + (\nu - \nu_0)^2}, \quad (2.2)$$

де інтенсивність лінії

$$S = \int_0^{\infty} k(\nu) d\nu.$$

Кожна спектральна лінія визначається трьома параметрами:

- резонансною частотою  $\nu_0$ , що має розмірність  $\text{см}^{-1}$  і не залежить від тиску або температури;

- інтенсивністю  $S$  з розмірністю  $\text{см}^{-1}/(\text{кількість молекул см}^{-2})$  і не залежить від тиску, але не неї впливає температура;
- шириною лінії поглинання  $\sigma_L$ , що має незначну температурну залежність.

Для заданих для озону параметрів  $\nu_0$  і  $S$  використовувались таблиці міжнародної бази даних NITRAN (High Resolution Transmission Molecular Absorption Database [11]). Отриманий таким чином спектр поглинання озону наведено на рис. 2.5.

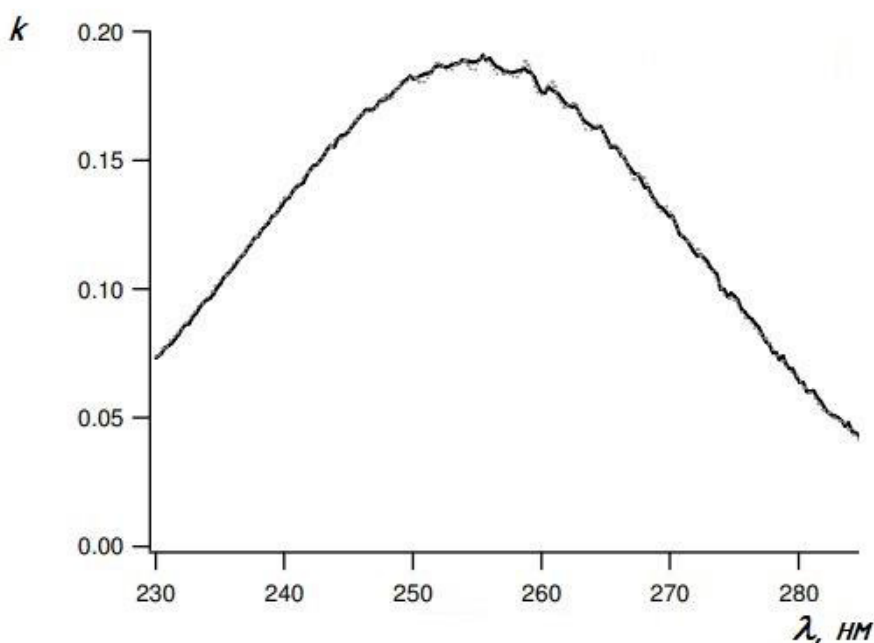


Рисунок 2.5 – Спектр поглинання молекул озону

Тому з метою для розробки візуально – блокової моделі вимірювального тракту пропонується створити модель поглинання випромінювання озonom за допомогою додаткового загороджувального цифрового фільтру, що характеризується амплітудно -частотною характеристикою (АЧХ) інверсною спектру поглинання озону (рис. 2.5). Таким чином специфікацію фільтру можливо отримати з даних [11] у наступному вигляді: відносний коефіцієнт передачі у смузі пропускання – 0,19, відносний коефіцієнт передачі у смузі загородження – 0,075, відносна ширина смуги загородження від 1304 ТГц до

1079 ТГц. Задачею дослідження було отримання фільтру найкращою селективністю при мінімальному рівні спотворень у смузі пропускання.

Синтез і дослідження фільтрів виконувались у пакеті Filter Design & Analyssis системи Matlab. За визначеною специфікацією було розроблено фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ або ІІР) еліптичного типу, Баттерворту, Чебишева першого і другого типу, а також фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ або FIR) Чебишева звичайного типу, Чебишева узагальненого типу, фільтру на основі метода найменших квадратів і фільтру віконного типу.

Результати досліджень наведено на рис. 2.6 – 2.13 у вигляді АЧХ фільтрів.

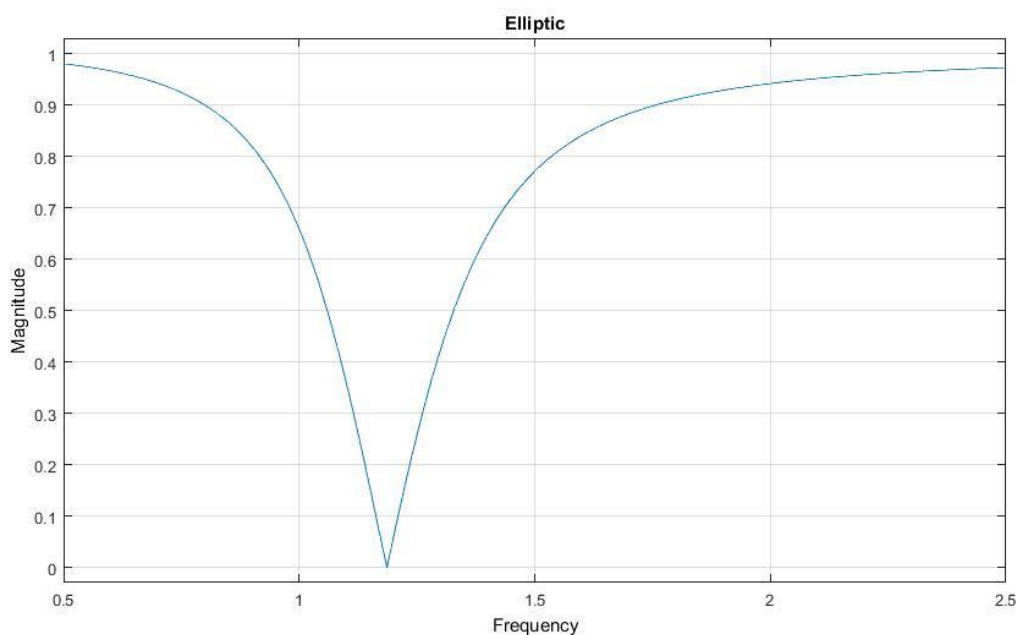


Рисунок 2.6 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ еліптичного фільтру

Аналіз отриманих результатів показує, що НІХ фільтри відрізняються від КІХ фільтрів відсутністю нерівномірності АЧХ у смугах загородження і пропускання.

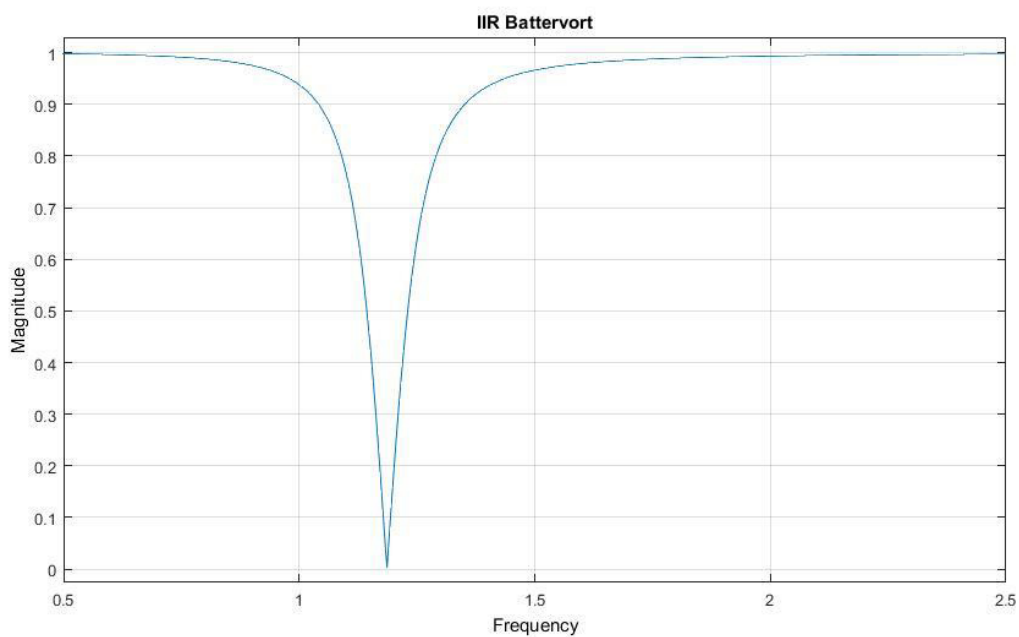


Рисунок 2.7 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ фільтру Баттерворту

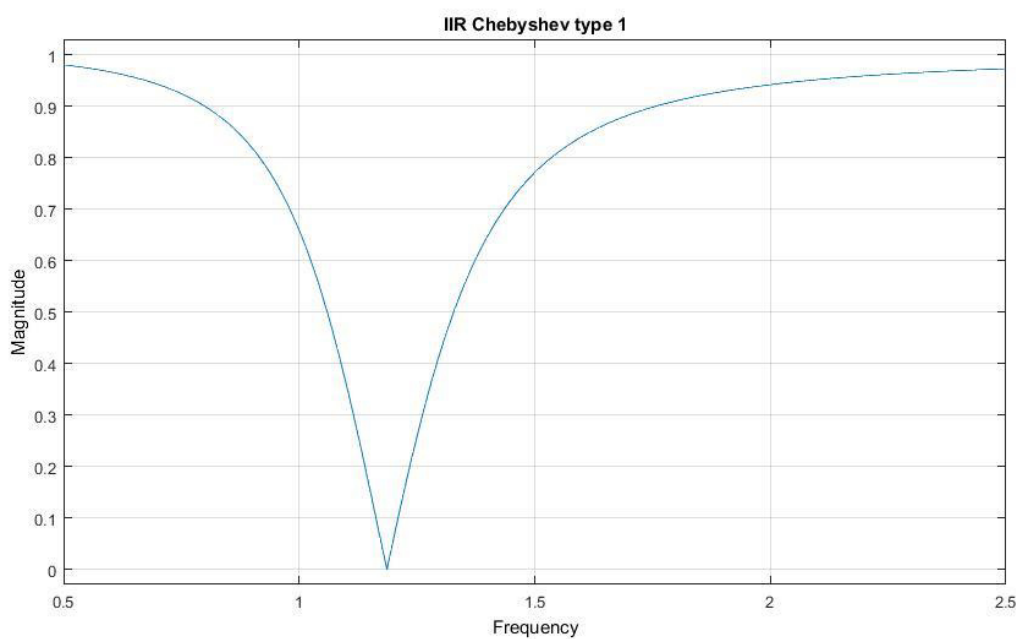


Рисунок 2.8 – Амплітудно-частотна характеристика НІХ фільтру Чебишева 1-го типу



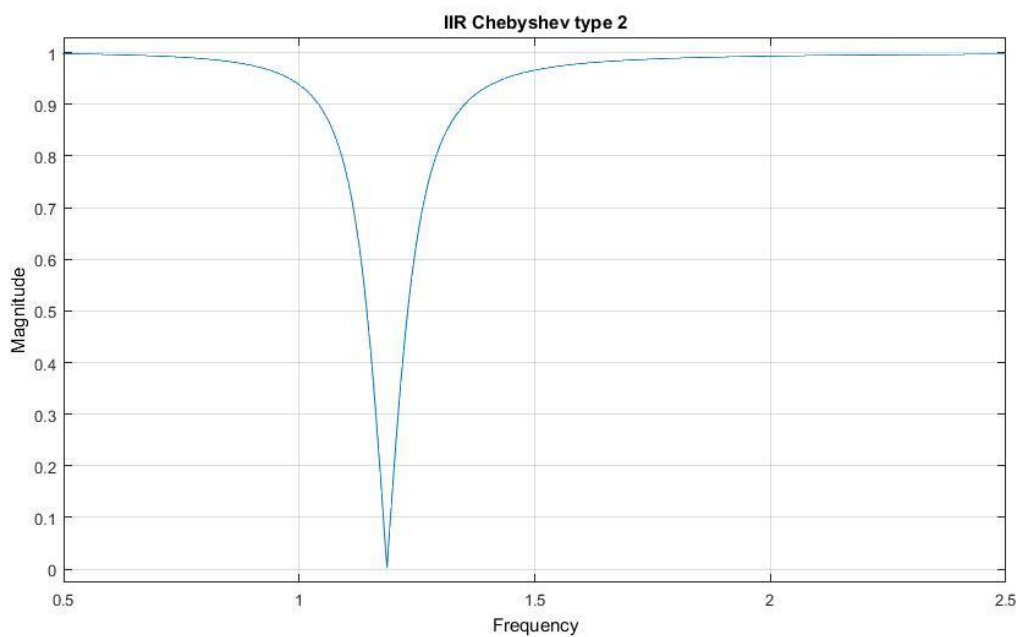


Рисунок 2.9 – Амплітудно – частотна характеристика НІХ фільтру Чебишева 2-го типу

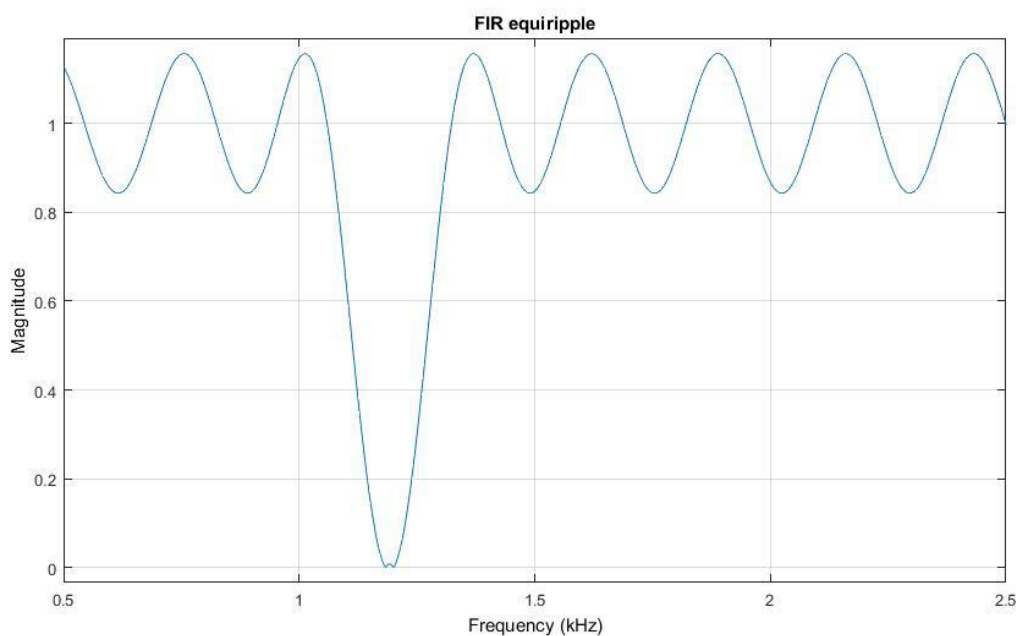


Рисунок 2.10 – Амплітудно – частотна характеристика КІХ фільтру Чебишева

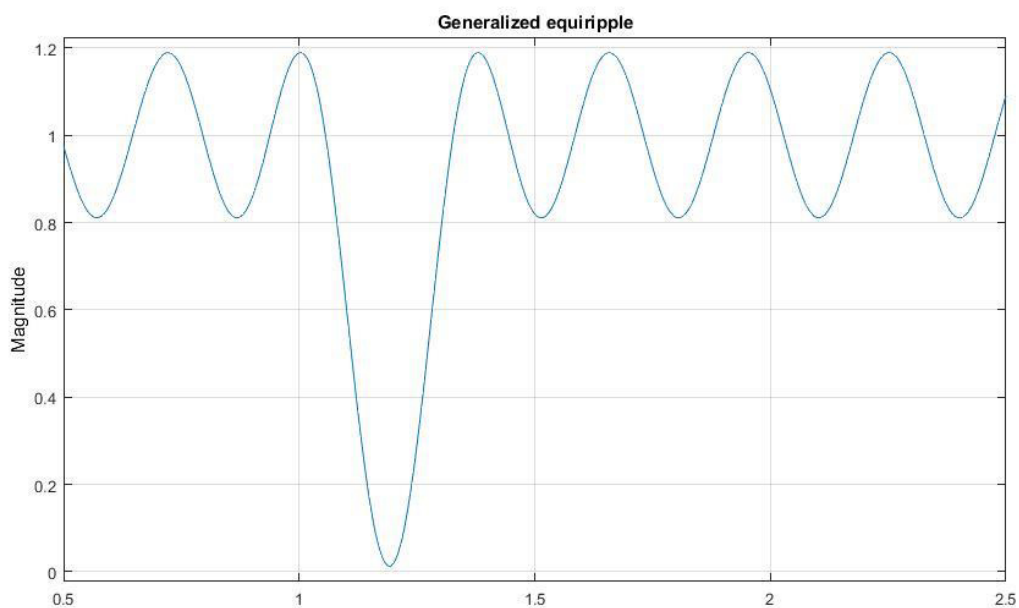


Рисунок 2.11 – Амплітудно – частотна характеристика узагальненого КІХ фільтру Чебишева

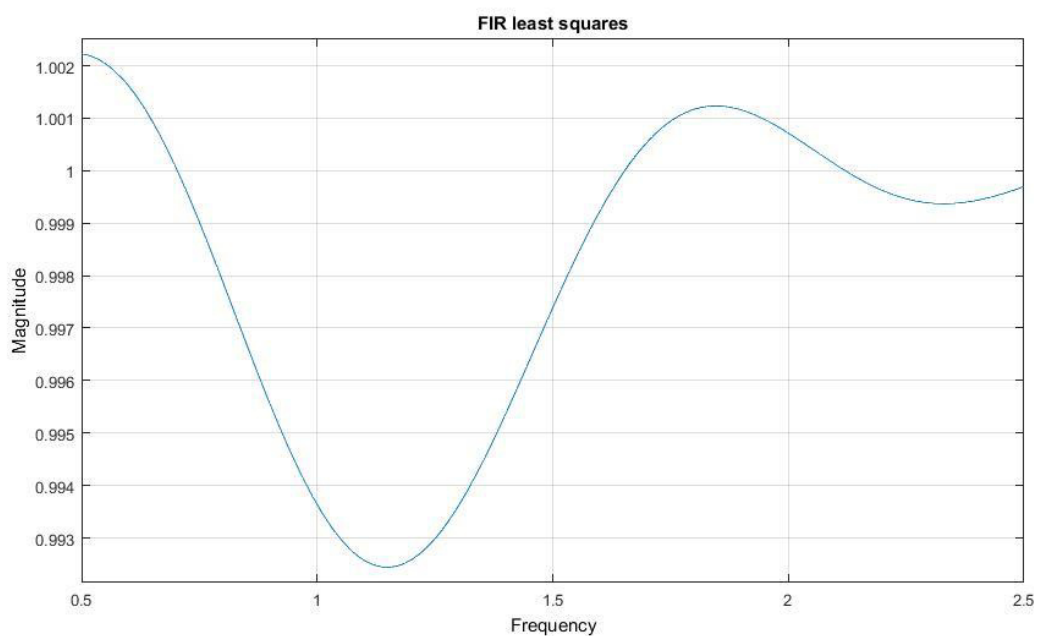


Рисунок 2.12 – Амплітудно – частотна характеристика КІХ МНК фільтру

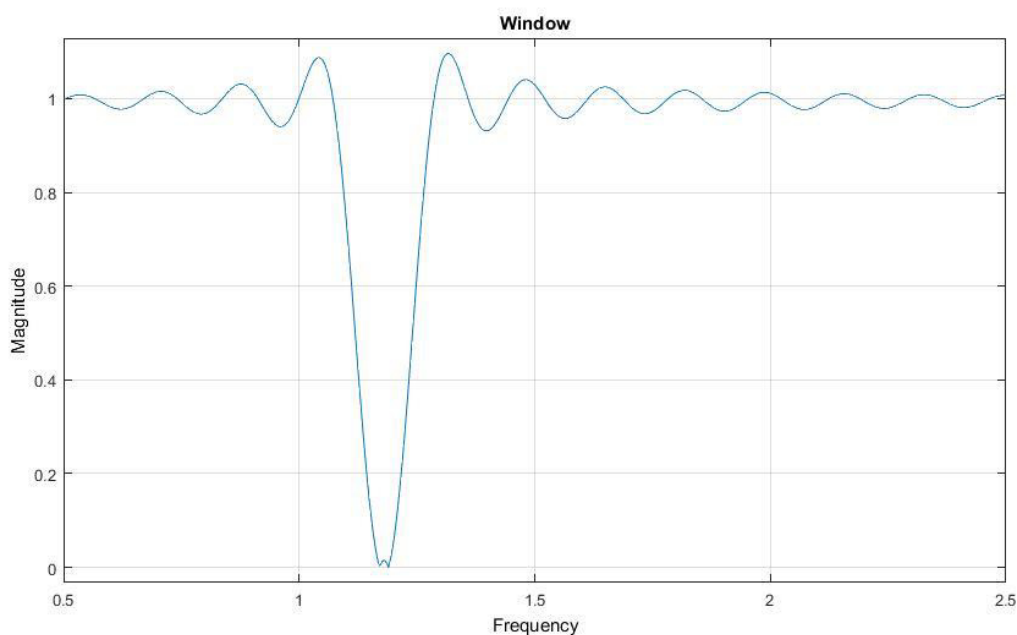


Рисунок 2.13 – Амплітудно – частотна характеристика КІХ фільтру віконного типу

Таким чином, до подальшого аналізу щодо моделювання оптичного каналу датчик озону було відібрано НІХ фільтри, незважаючи на їх недоліки у порівнянні з КІХ фільтрами при практичній реалізації. Всі варіанти залишенихся фільтрів мають рівномірну АЧХ. Тому їх подальший аналіз здійснювався шляхом кореляційного аналізу з інвертованим спектром поглинання озону [11]. При цьому найкращий показник множинної кореляції було отримано для фільтру Чебишева першого типу ( $R^2 = 0,93$ ).

Отримані результати показують, що розроблений фільтр характеризується пригнічення з боку більш низьких частот на рівні 0,15 дБ/ТГц і 0,11 дБ/ТГц з боку більш високих частот з центральною частотою на рівні 1200 ТГц.

Для визначення коефіцієнтів передавальної функції фільтру було використано програмний пакет VisSim Comm [27]. Результати синтезу блоку передавальної функції і випробувань фільтру наведені на рис. 2.14.

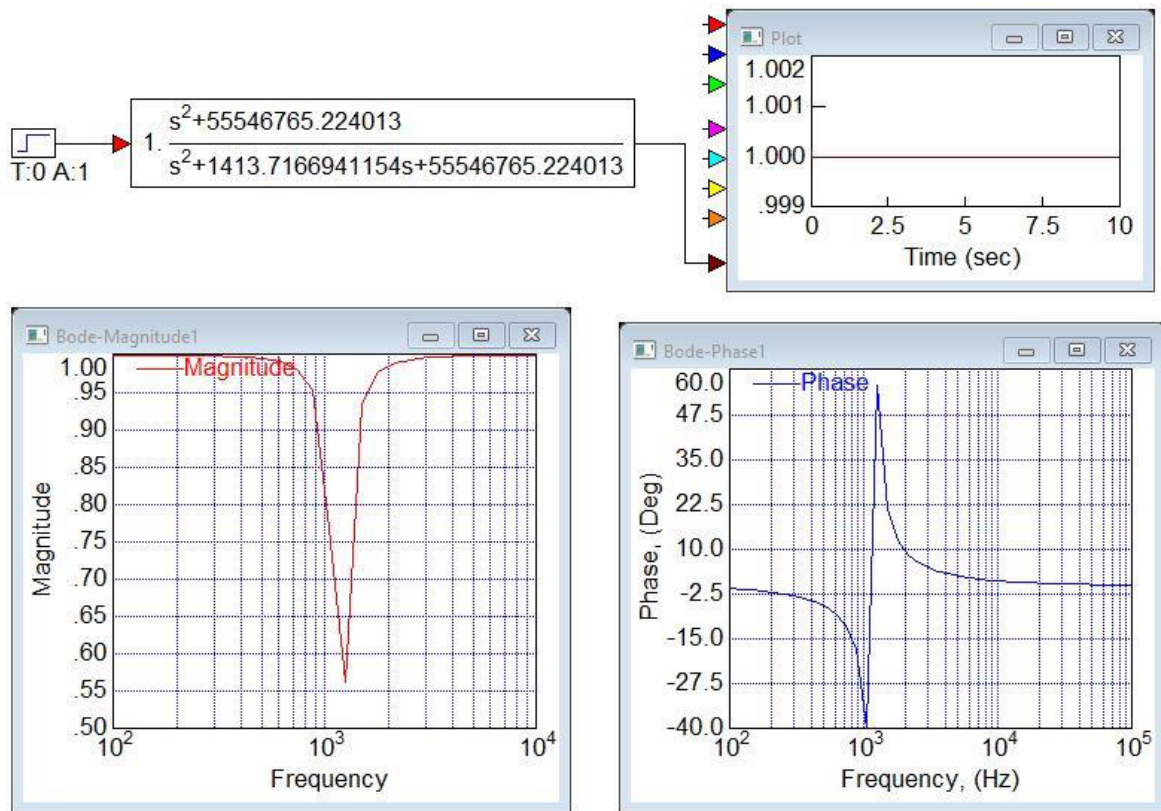


Рисунок 2.14 – Результати визначення коефіцієнтів і випробування фільтру

У наведеному завданні було використано вхідне джерело з стрибкоподібним сигналом. За допомогою частотного аналізу було отримано АЧХ і фазо – частотну характеристику (ФЧХ) синтезованого фільтру.

Аналіз рис. 2.8 і рис. 2.14 показує, що АЧХ фільтру, що було обрано для реалізації спектру поглинання озону, співпадає з АЧХ фільтру, що синтезовано шляхом визначення коефіцієнтів передавальної функції.

#### 2.4 Опис блоків джерел і приймачів випромінювання

Для реалізації джерела випромінювання моделі оптичного каналу системи визначення концентрації озону було використано блок Light-Emitting Diode з бібліотеки Simulink - Simscape / Electric / Sensors & Transducers, зовнішній вигляд вікна задання параметрів якого, наведено на рис. 2.15.

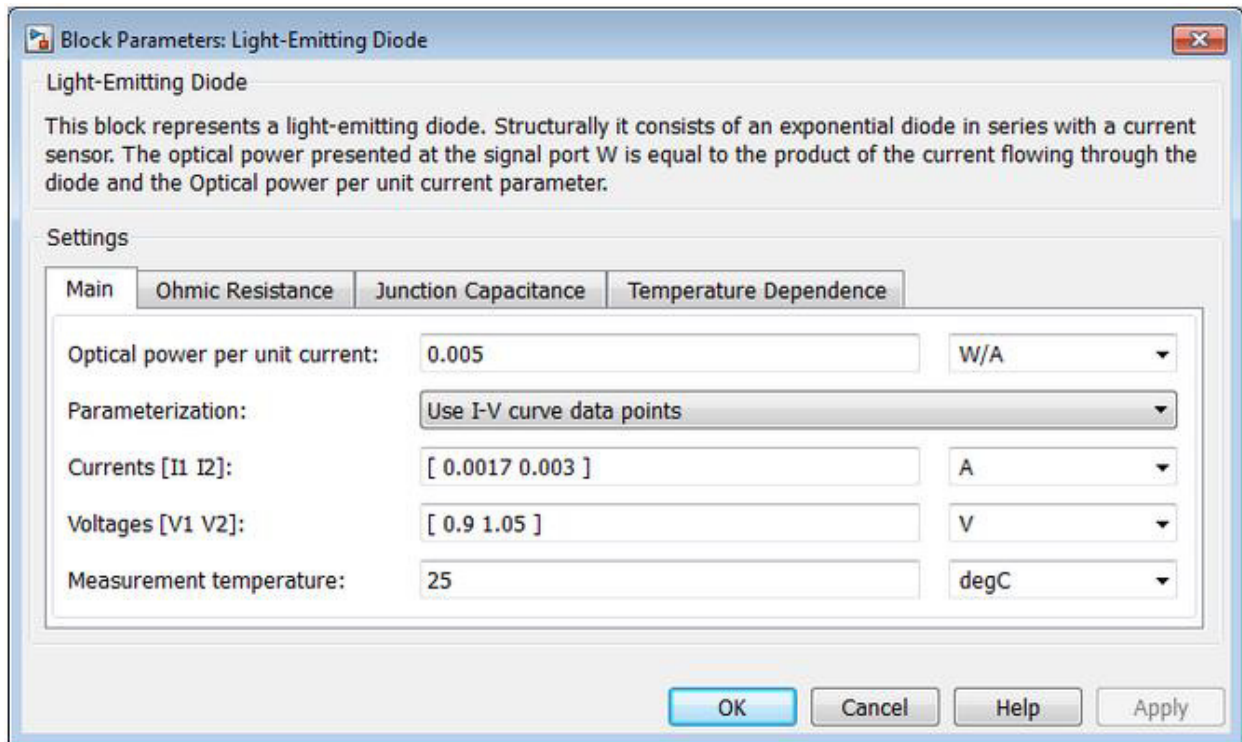


Рисунок 2.15 – Вікно задання параметрів блоку світлодіоду

Такий блок поєднує у своєму складі модель діоду з ВАХ експоненційного типу послідовно поєднаний з сенсором струму. Оптичне випромінювання надається на окремий фізичний порт, потужність якого є твором струму, що тече через діод, і параметром приладу «Оптична потужність випромінювання на одиницю електричного струму».

Математична модель ВАХ діоду має наступний вигляд:

$$I = I_S \left( e^{\frac{qU}{nkT_m}} - 1 \right), \quad (2.3)$$

де  $I$  – струм діоду,  $U$  – падіння напруги на діоді,  $I_S$  – струм насичення,  $q$  – заряд електрону,  $k$  – постійна Больцмана,  $T_m$  – температура, за якою визначено параметри діоду.

При  $\frac{qU}{nkT_m} > 80$ , виконується заміна  $e^{\frac{qU}{nkT_m}}$  на  $\left(\frac{qU}{nkT_m} - 79\right)e^{80}$ . Це означає, що градієнт струму діоду  $\frac{qU}{nkT_m} = 80$ , тобто струм починає лінійно зале-

жить від значення напруги на діоді. У випадках, коли  $\frac{qU}{nkT_m} < -79$ , виконується

заміна  $e^{\frac{qU}{nkT_m}}$  на  $\left(\frac{qU}{nkT_m} + 80\right)e^{-79}$ , що також відповідає лінійній ділянці ВАХ.

Але у більшості режимів аналізу електричних схем такі екстремальні режими функціонування не використовуються. Лінійна екстраполяція ВАХ застосовується з метою забезпечення збіжності у процесі моделювання.

За допомогою параметрів блоку  $I_s$  і  $n$  визначаються значення струму насичення і коефіцієнту емісії. Для відомої ВАХ діоду можливо задання  $I_s$  і  $n$  шляхом введення крапок графіку через «I-V curve data points». При цьому розрахунок струму насичення і коефіцієнту емісії здійснюється наступним чином:

$$I_s = (I_1 / (\exp(U_1 / (nUt)) - 1) + (I_2 / (\exp(U_2 / (nUt)) - 1))) / 2, \quad (2.4)$$

$$n = ((U_1 - U_2) / Ut) / (\log(I_1) - \log(I_2)), \quad (2.5)$$

де  $Ut = k T_m / q$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  - значення напруги, що отримуються з ВАХ для струмів  $I_1$ ,  $I_2$ .

Експоненційна складова ВАХ блоку світлодіоду містить параметри, що визначають ємності р-п переходу діоду. Для цього існують наступні способи задання цих параметрів:

- при використанні опції «Fixed or zero junction capacitance» у розділі «Junction capacitance» встановлюються фіксовані значення параметрів;
- при використанні опції «Use parameters CJO, VJ, M & FC» у розділі «Junction capacitance» відповідні коефіцієнти застосовуються до обчислення залежності ємності переходу від напруги на діоді;
- при використанні опції «Use C-V curve data points» у розділі «Junction capacitance» задіюється трьохкрапкова апроксимація вольтфарадної характеристики діоду до обчислення параметрів CJO,

$VJ$ ,  $M$ , що визначають значення  $FC$ , яке застосовується до обчислення залежності ємності переходу від напруги на діоді; при цьому  $CJO$ ,  $VJ$ ,  $M$  отримуються наступним чином:

$$CJO = C_1((V_{R2} - V_{R1})/(V_{R2} - V_{R1}(C_2/C_1)^{-1/M}))^M, \quad (2.6)$$

$$VJ = -(-V_{R2}(C_1/C_2)^{-1/M} + V_{R1})/(1 - (C_1/C_2)^{-1/M}), \quad (2.7)$$

$$M = \log(C_3/C_2) / \log(V_{R2}/V_{R3}), \quad (2.8)$$

де  $V_{R1}$ ,  $V_{R2}$ ,  $V_{R3}$  – значення напруги вольтфарадної характеристики, що відповідають значенням ємностей  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ .

У випадках коли неможливо визначити параметр  $FC$  за крапками вольтфарадної характеристики виконується задання типового значення, що приблизно дорівнює 0,5.

Напруга зворотньоозміщеного діода повинна забезпечувати виконання співвідношення  $V_{R3} > V_{R2} > V_{R1}$ . Це означає, що до ємностей виконується співвідношення  $C_1 > C_2 > C_3$  у випадках коли зворотна напруга збільшує область збіднення переходу і зменшує його ємність. Невиконання цих співвідношень призводить помилки при моделюванні. В свою чергу, значення напруг  $V_{R3}$ ,  $V_{R2}$  повинні значно відрізнитись від значення вбудованого потенціалу переходу  $VJ$ , а значення напруги  $V_{R1}$  не повинно перевищувати  $VJ$  (типове значення для  $V_{R1}$  становить 0,1В).

Залежність просторового заряду переходу  $Q_j$  від напруги на діоді виражається наступним чином:

$$Q_j = CJO \cdot (VJ / (M - 1)) \cdot ((1 - V/VJ)^{1 - M} - 1), \text{ при } V < FC \cdot VJ; \quad (2.9)$$

$$Q_j = CJO \cdot F_1 + (CJO/F_2) \cdot (F_3 \cdot (V - FC \cdot VJ) + \\ + 0.5(M/VJ) \cdot (V^2 - (FC \cdot VJ)^2)), \text{ при } V \geq FC \cdot VJ;$$

де

$$F_1 = (VJ / (1 - M)) \cdot (1 - (1 - FC)^{1 - M}), \quad (2.10)$$

$$F_2 = (1 - FC)^{1 + M}), \quad (2.11)$$

$$F_3 = 1 - FC \cdot (1 + M). \quad (2.12)$$

Температурна залежність електричних параметрів блоку світлодіоду аналогічна відповідним залежностям, що використовуються у блоці звичайного діоду бібліотеки Simulink - Simscape / Electric / Sensors & Transducers.

У блоці світлодіоду можливо задіяти додатковий порт Н для моделювання впливу температури навколишнього середовища, або з метою оцінки нагріву приладу в результаті проходження електричного струму.

У якості приймача випромінювання моделі оптичного каналу було використано блок фотодіоду бібліотеки Simulink - Simscape / Electric / Sensors & Transducers, зовнішній вигляд вікна задання параметрів якого, наведено на рис. 2.16.



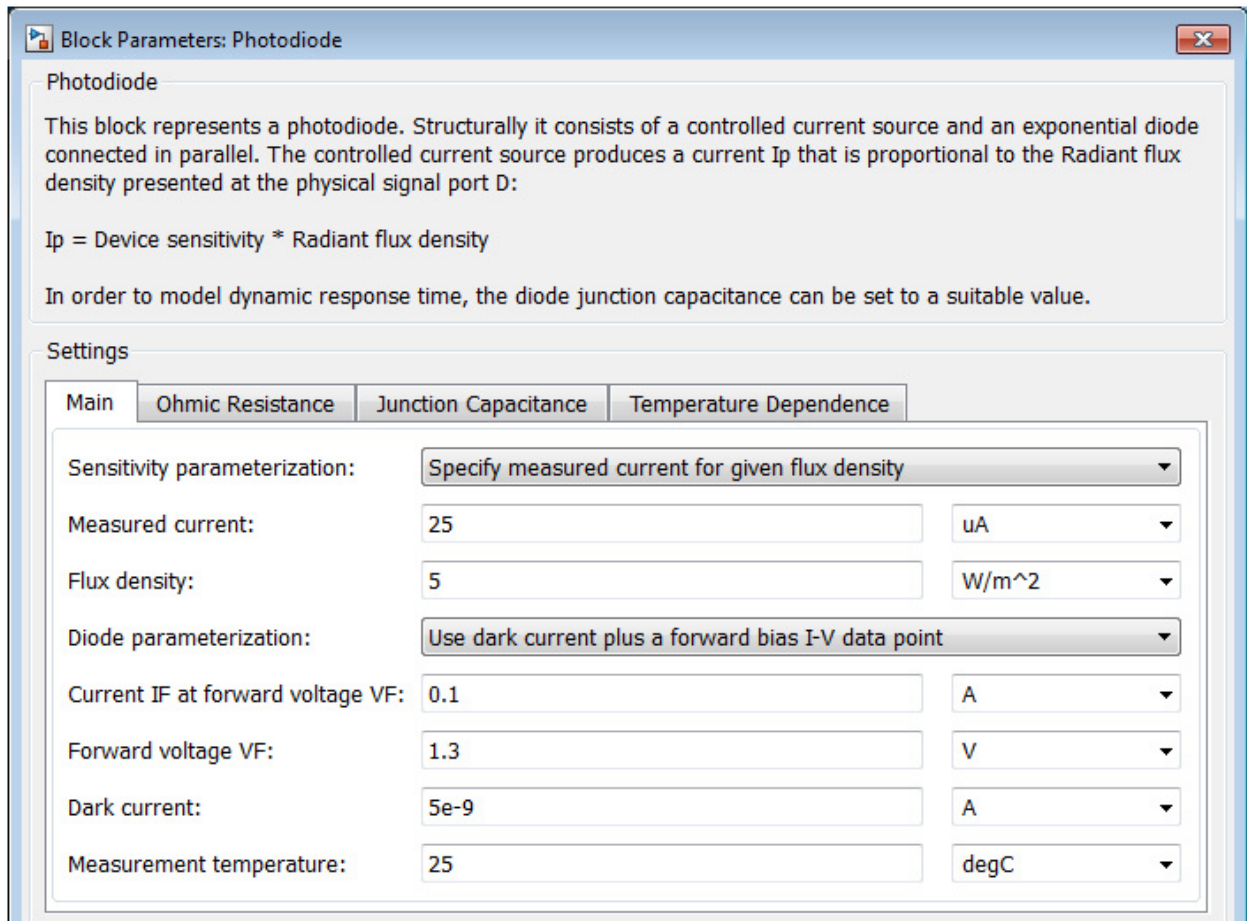


Рисунок 2.16 – Вікно задання параметрів блоку фотодіоду

Такий блок є послідовним поєднанням джерела струму, що керується оптичним випромінюванням, з моделлю діоду, яка має ВАХ експоненційного типу. Значення струму джерела визначається як:

$$I_p = S \cdot R,$$

де  $S$  – чутливість фотодіоду,  $R$  – інтенсивність оптичного випромінювання, що задаються у якості параметрів блоку.

Математична модель ВАХ діоду має вигляд (2.3), але параметр  $I_S$  є темновим струмом, коефіцієнт емісії розраховується як:

$$n = V_F / (V_t \log(I_F / I_S + 1)),$$

$V_F$  – пряма напруга на діоді;  $V_t = k T_m / q$ ,  $I_F$  – прямий струм через діод при напрузі  $V_F$ .

Всі інші параметри і залежності блоку ідентичні блоку світлодіоду і визначаються (2.4) – (2.12).

З урахуванням блоків світлодіоду, фотодіоду і блоку передавальної функції фільтру, що моделює поглинання випромінювання озonom, розроблено візуально – блочну модель оптичного каналу, яка наведена на рис. 2.17.

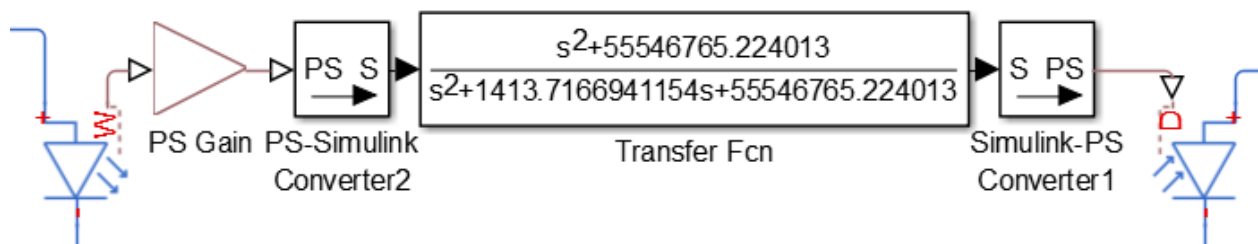


Рисунок 2.17 – Модель оптичного каналу датчика озону

До складу моделі також входять блок PS-Simulink Converter, блок Simulink-PS Converter і блок PS Gain.

Блоки PS-Simulink Converter і Simulink-PS Converter виконують функції фізичних сигналів у сигнал моделювання і навпаки відповідно. Таким чином реалізується поєднання з фізичними моделями світлодіоду і фотодіоду загальної моделі передавальної функції смугового фільтру.

Блок PS Gain реалізує за допомогою функції твору послаблення оптичного сигналу у каналі датчика.

Таким чином, розроблена модель дозволяє синтезувати на більш високому ієрархічному рівні схему вимірювання концентрації озону з використання одного чи декілька опорних сигналів і власно вимірювального сигналу.

### 3 СИНТЕЗ ТРИПРОМЕНЕВОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ

#### 3.1 Структура трипроменевої системи вимірювання концентрації озону

Метод визначення вмісту озону за поглинанням УФ - випромінювання було розроблено для газоподібних середовищ. Було запропоновано [31] структуру системи вимірювання концентрації озону у воді, дія якої базується на таких же принципах. Але на відміну від відомих варіантів реалізації, така структура містить джерело УФ - випромінювання у вигляді УФ - світлодіоду, перевагою якого у порівнянні з ртутними лампами є стабільність і монохроматичність випромінювання, а у порівнянні з УФ – лазерами – собівартість і знижена потужність споживання. Структура розробленої системи наведена на рис. 3.1.

Озонаторна станція виконує збагачення води озоном для її дезінфекції і дезодоровання. Цьому процесі потрібно контролювати вміст розчиненого озону у воді, щоб визначати ступінь очищення і продуктивність станції. На гідравлічному виході станції для цього встановлено абсорбційний оптичний датчик озону, структура і принцип дії якого наведено у п.п. 2.1, що формує вимірювальний канал. Але, згідно (2.1) для визначення ступеню поглинання УФ випромінювання, необхідно здійснювати вимірювання інтенсивності випромінювання УФ – світлодіоду. Тому для цього, а також для врахування можливості поглинання випромінювання іншими складовими оброблюємої води, застосовано розподілену двопроменеву схему вимірювань, де значення опорного оптичного сигналу отримується за допомогою датчика, ідентичного датчику вимірювального каналу, який встановлюється на гідравлічному вході станції. Але така схема не може враховувати побічні зміни вміст води, що виникають у процесі її обробки і проходження крізь станцію і комунікації.

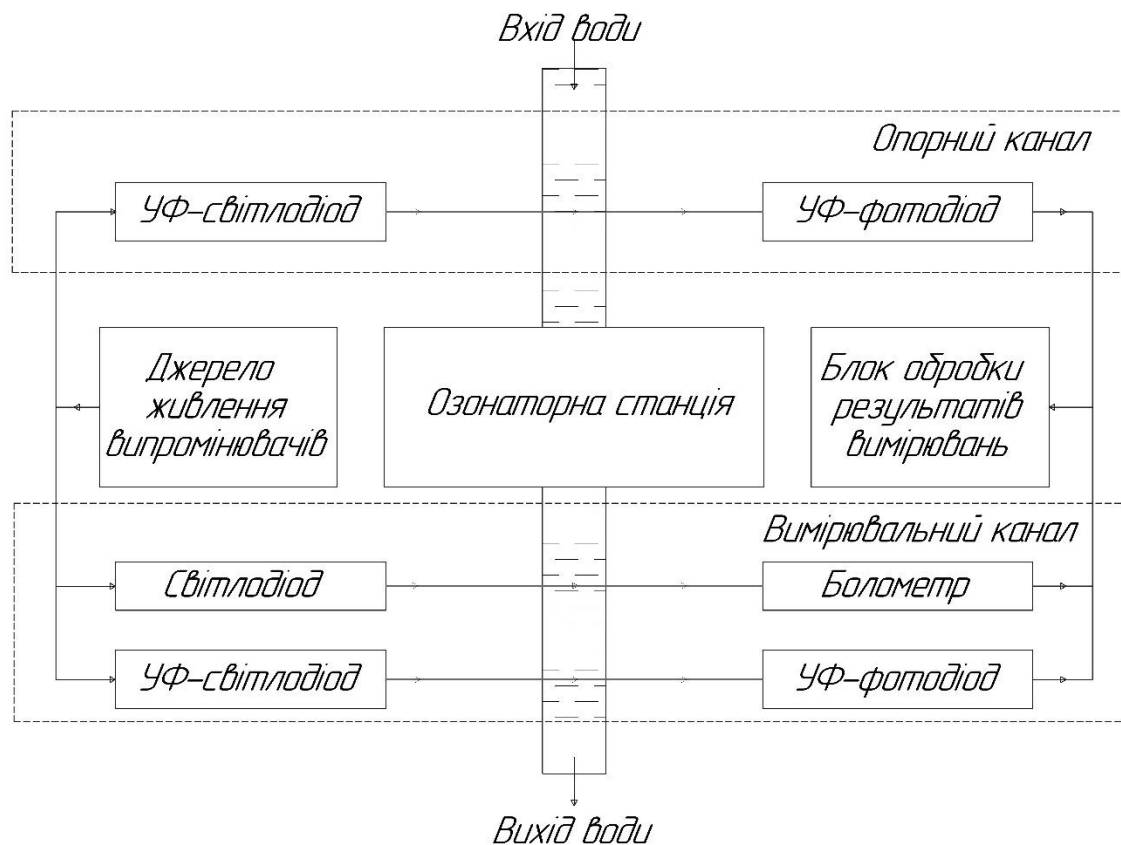


Рисунок 3.1 – Структура системи вимірювання концентрації озону

Тому у вимірювальному каналі пропонується застосування додаткового широкосмугового оптичного абсорбційного датчика, що встановлюється безпосередньо перед вимірювальним датчиком і враховує зміни макроскладу води. Такий датчик реалізується поєднанням світлодіоду видимого спектру випромінювання з спектрально неселективним приймачем на основі болометру. У разі коли його вихідний сигнал зменшується нижче критичного значення, то результати вимірювань розпізнаються як хибні.

Структура передбачає наявність джерела живлення випромінювачів датчиків і схему обробки результатів вимірювань, що формує інформативний сигнал, щодо ступеня поглинання УФ випромінювання водою і здійснює корекцію щодо зміни інтенсивності в результаті змін макроскладу води.

У розробленій структурі необхідно забезпечити додаткову фільтрацію води на вході виході озонаторної станції. Також пропонується, за можливос-

ті, здійснювати переміщення обробленої води перед її подачею до вимірювального каналу.

### 3.2 Опис основного датчика вимірювального каналу

На основі моделі оптичного каналу датчика озону (рис. 2.17) у середовищі Matlab Simulink [28] було розроблено модель основного датчика вимірювального каналу. Структура моделі датчика наведено на рис. 3.2.

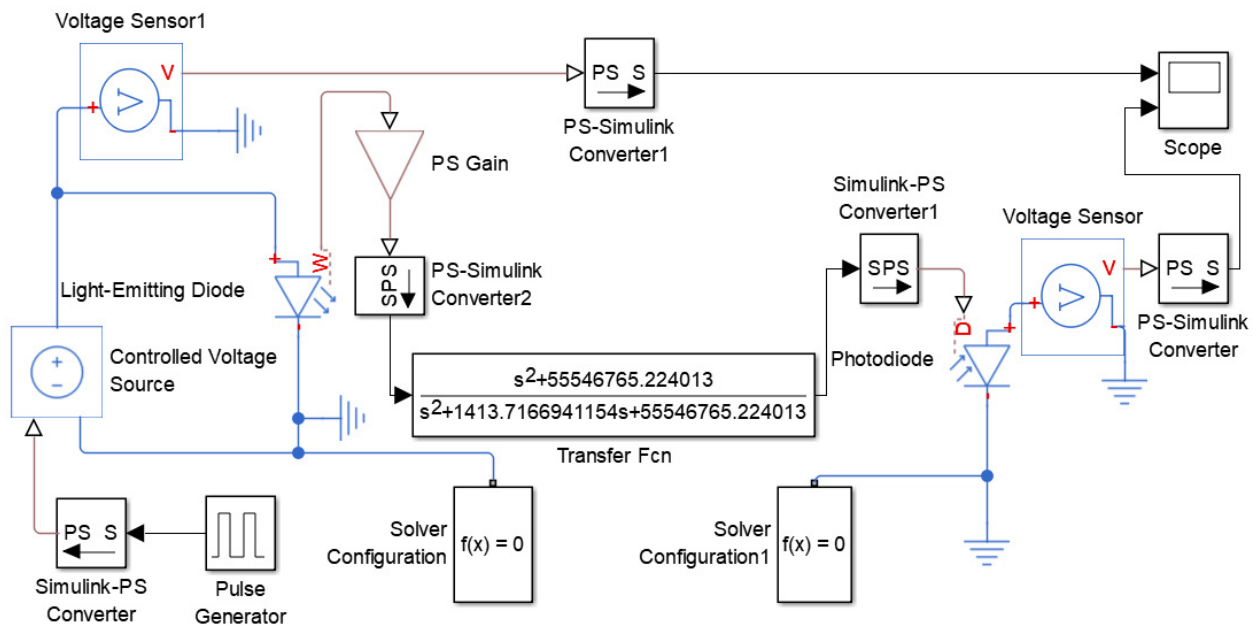


Рисунок 3.2 – Модель основного датчика вимірювального каналу

У розробленій моделі в якості джерела живлення УФ – світлодіоду використовується блок генератора прямокутних імпульсів Pulse Generator, що через перетворювач загальних сигналів Simulink у фізичні сигнали Simulink-PS Converter задає напругу на полюсах керованого джерела напруги Controlled Voltage Source. Для вимірювання інформаційних сигналів моделі застосовано сенсори напруги Voltage Sensor, що через перетворювачі фізич-

них величин у загальні сигнали Simulink PS-Simulink Converter поєдані з блоком відображення сигналів Scope.

В моделі додатково використовуються блоки Solver Configuration для обчислювального поєднання підсистем загального і фізичного моделювання.

Параметри моделей УФ – світлодіоду і УФ – фотодіоду задавались відповідно довідкових даних на прилади CUD5GF1A і GUVС-T21GH відповідно.

Результати дослідження розробленої моделі наведено на рис. 3.3.

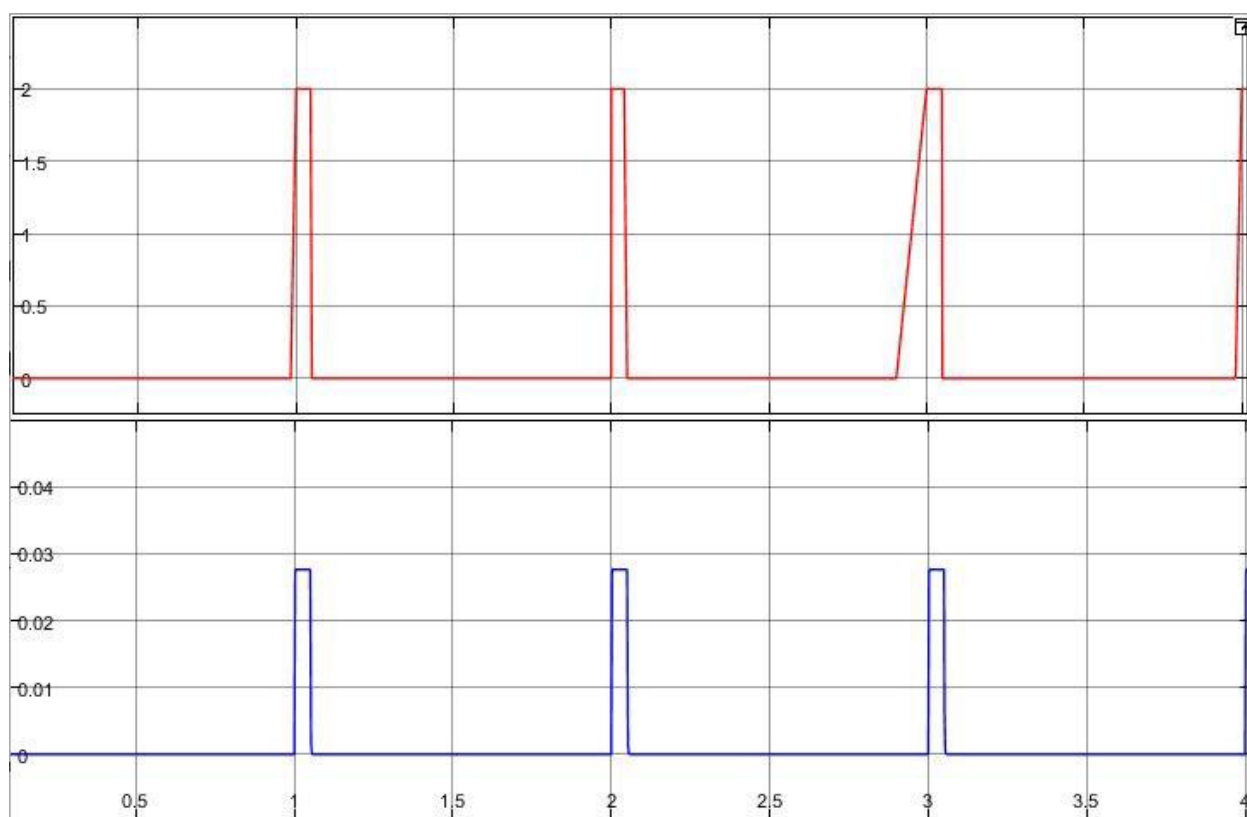


Рисунок 3.3 – Епюри сигналів моделі основного датчика

З рис. 3.3 слід, що вихідний сигнал, розрахований за розробленою моделлю датчика, зменшує амплітуду вхідного сигналу у 74 рази не змінюючи його форму при частоті 1 Гц.

Результати частотного аналізу розробленої моделі показано на рис. 3.4 у вигляді АЧХ.

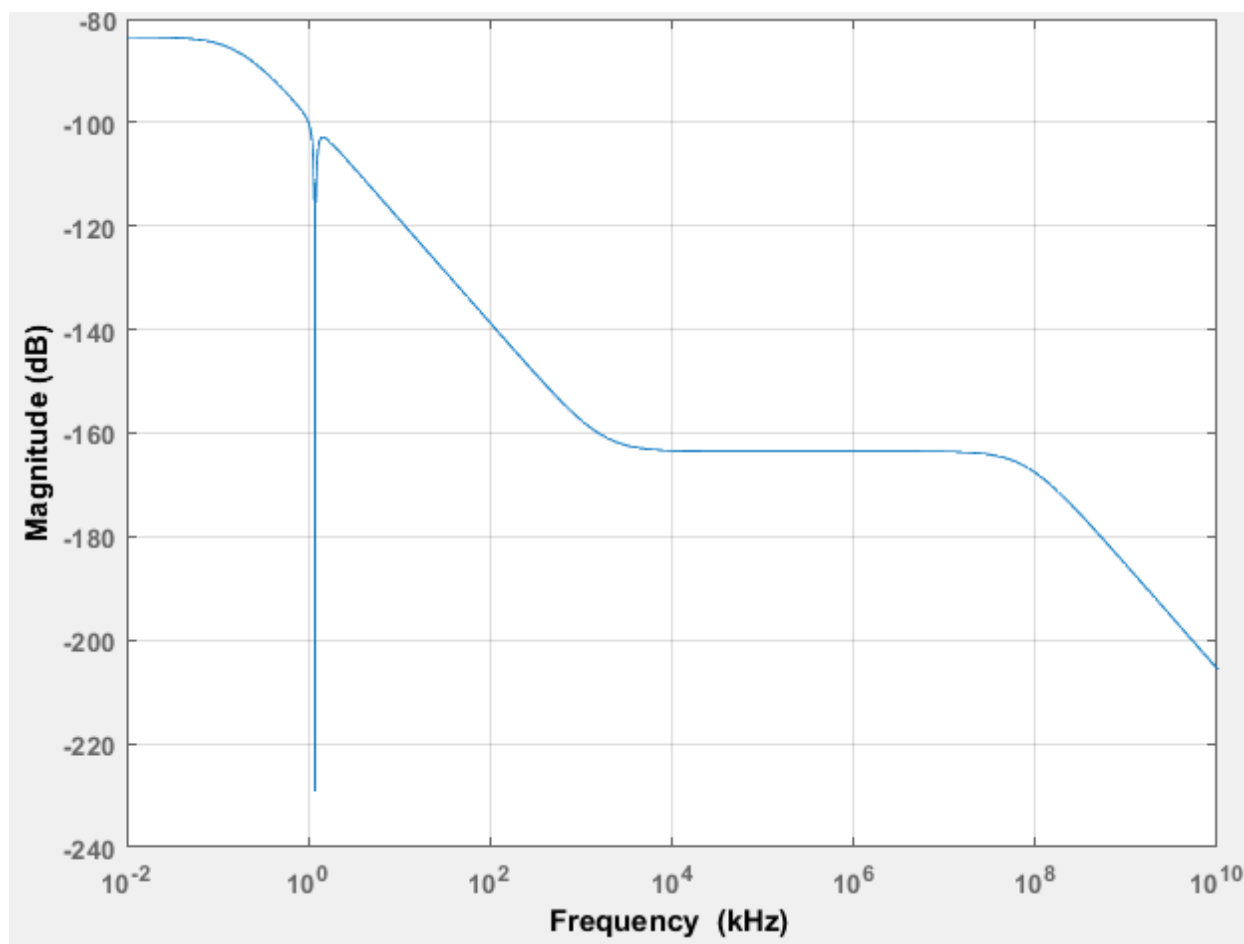


Рисунок 3.4 – Амплітудно-частотна характеристика моделі основного датчика

Аналіз АЧХ датчика показує, що максимальне послаблення сигналу рівня 130 дБ відповідає смузі поглинання озону. Це перевищує зміну амплітуди сигналів на інших ділянках АЧХ майже у 2 рази.

Таким чином, отримані результати випробування розробленої моделі підтверджують її працездатність і можуть бути основою для синтезу моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону.

### 3.3 Синтез моделі опорного каналу

На основі структури системи вимірювання концентрації озону і результатів синтезу моделі основного датчика системи було створено модель опор-

ного каналу, яка наведена на рис. 3.5.

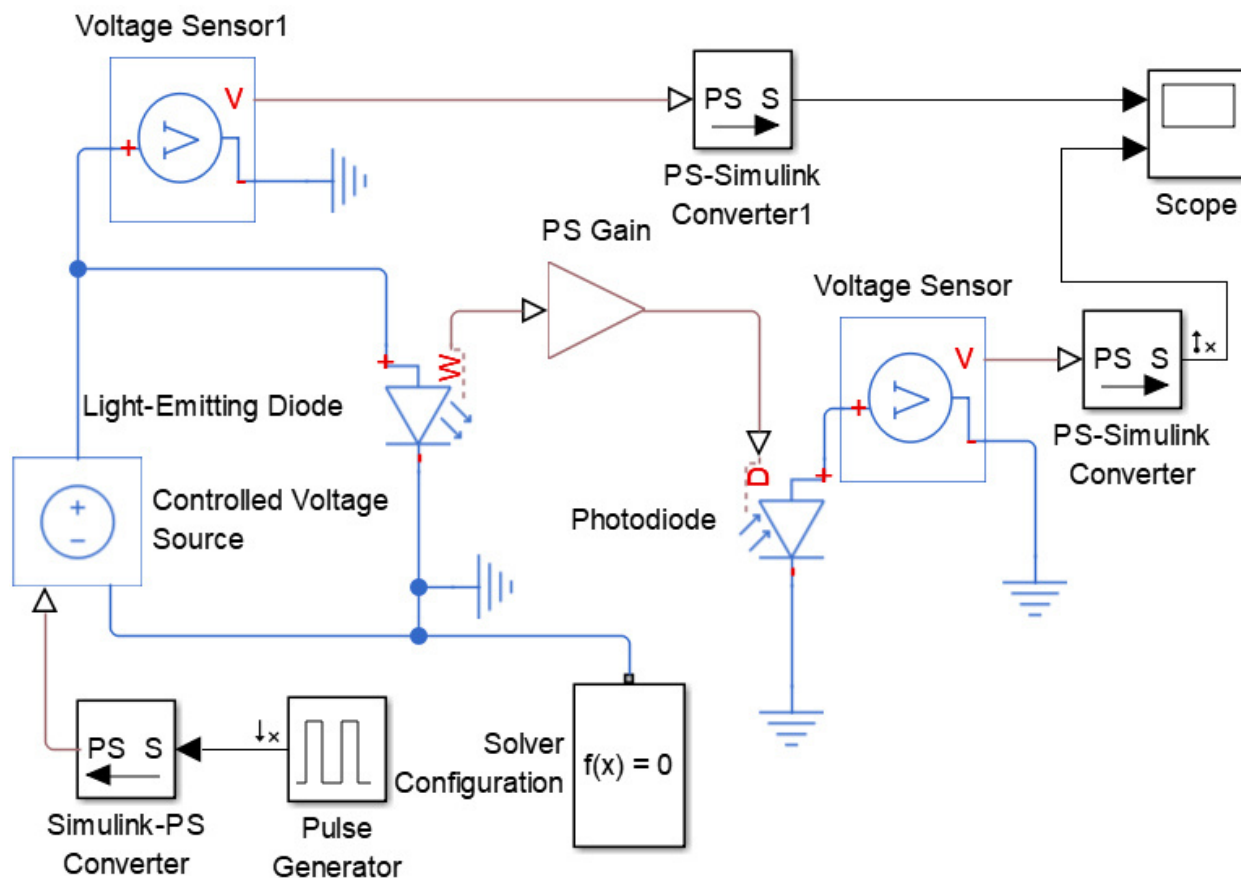


Рисунок 3.5 – Модель опорного каналу системи

Основною відмінністю розробленої моделі від моделі основного датчика є те, що у оптичному каналі відсутній блок моделювання спектру поглинання озону, залишено лише блок PS Gain, який відповідає загальному поглинанню УФ – випромінювання водою.

Результати частотного аналізу синтезованої моделі у вигляді АЧХ наведено на рис. 3.6.

Порівняння результатів наведених на рис. 3.6 і рис. 3.4 показує, що АЧХ опорного каналу не характеризується послабленням сигналів у смузі поглинання озону.



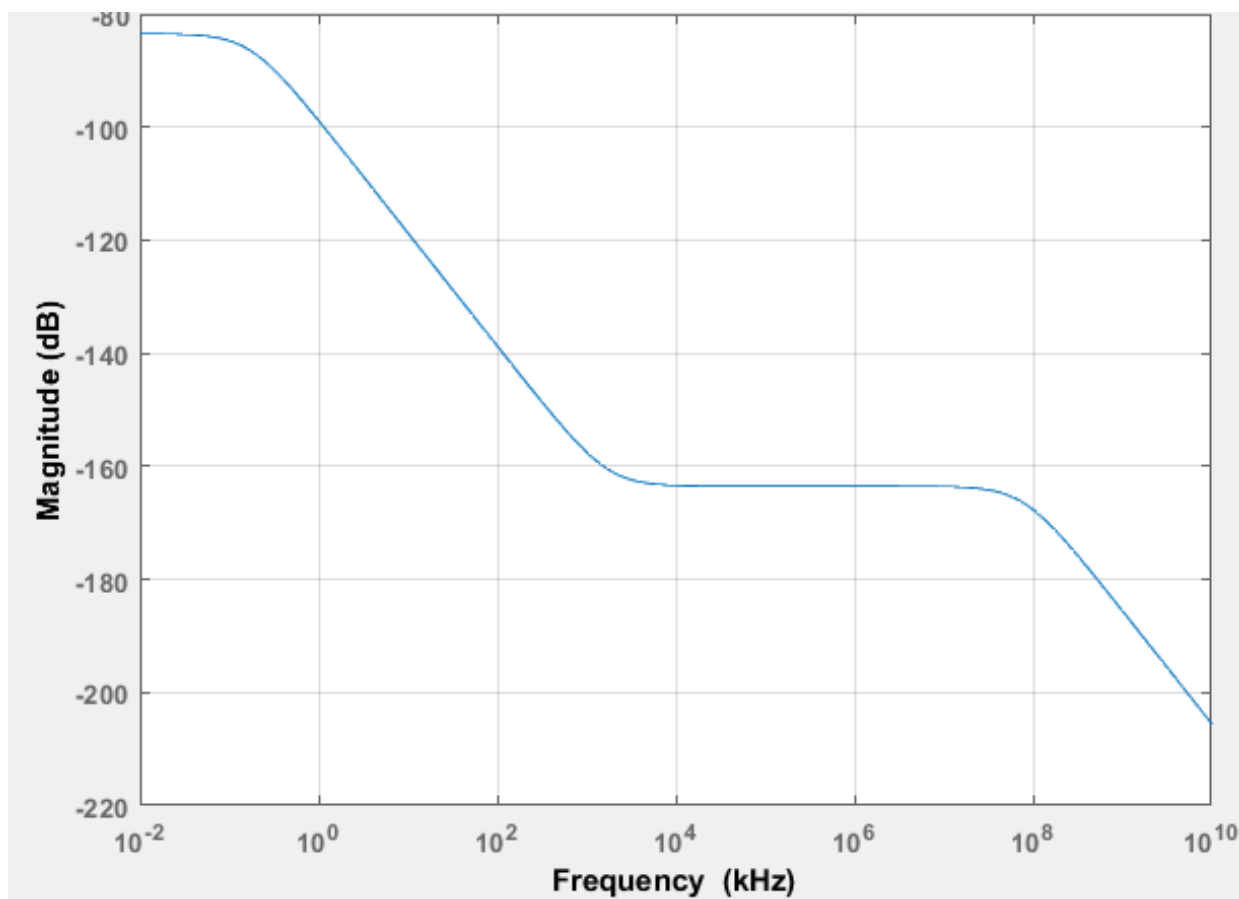


Рисунок 3.6 – Амплітудно – частотна характеристика опорного каналу

#### 3.4 Синтез моделі широкосмугового датчика

На основі структури системи вимірювання концентрації озону і результатів синтезу моделі основного датчика системи було створено модель широкосмугового датчика, яка наведена на рис. 3.7.

Основною відмінністю розробленої моделі від моделі опорного каналу є те, що у оптичному каналі відсутній блок фотодіоду, у якості приймача випромінювання використано модель болометра у вигляді джерела напруги, яке керується оптичним сигналом.

Результати частотного аналізу синтезованої моделі широкосмугового датчика у вигляді АЧХ наведено на рис. 3.8.

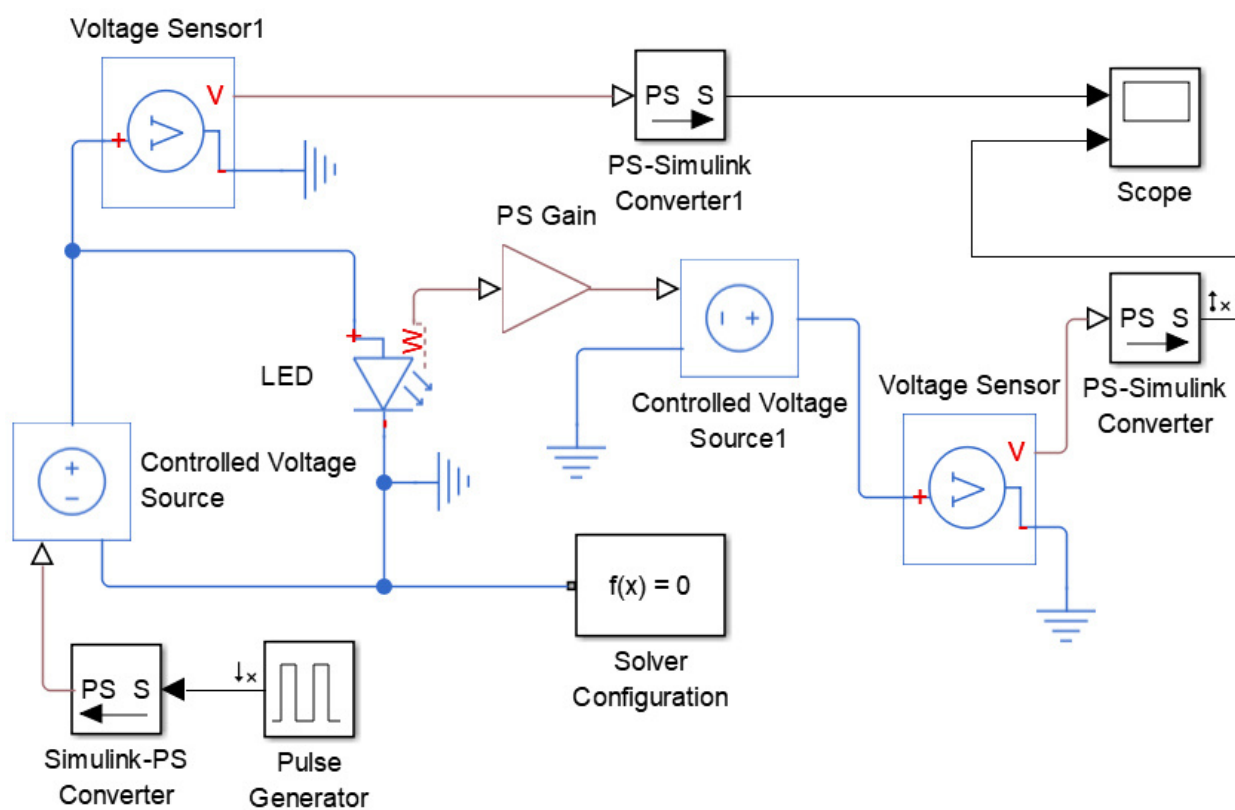


Рисунок 3.7 – Модель широкопугового датчика

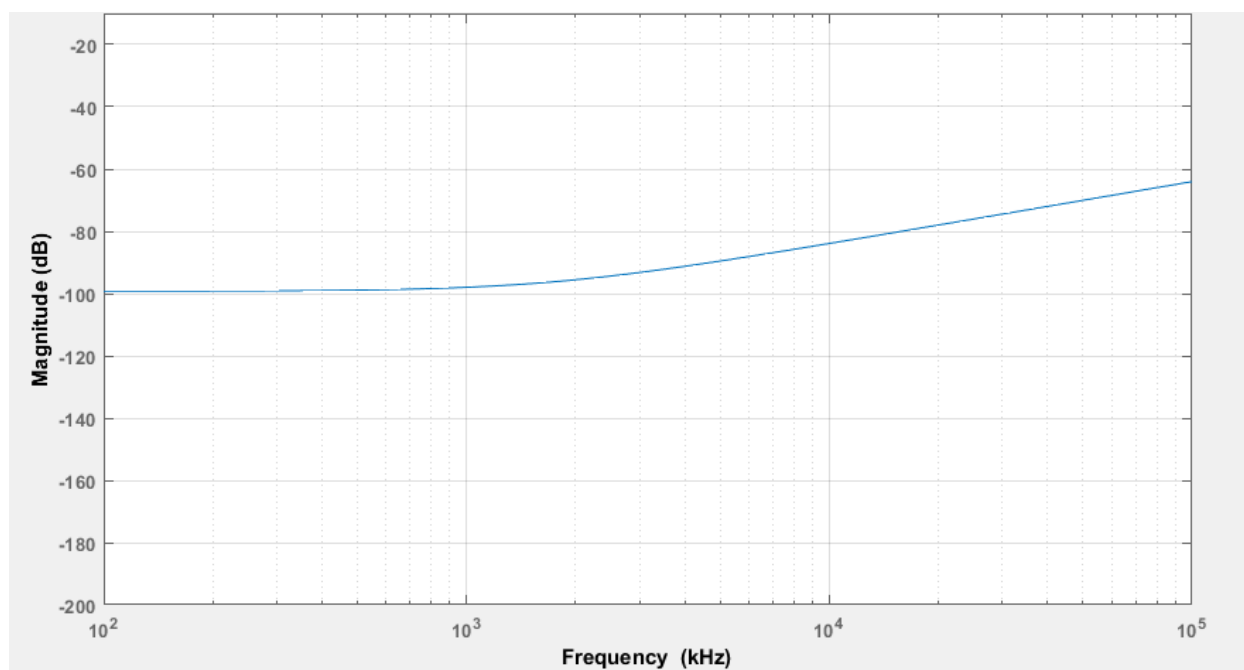


Рисунок 3.8 – Амплітудно-частотна характеристика широкопугового датчика

Аналіз рис. 3.8 показує, АЧХ має майже постійний коефіцієнт передачі у діапазоні робочих частот і змінює це значення на 20 дБ при зростанні частоти за його межами.

### 3.5 Комплексна модель системи визначення концентрації озону

На основі синтезу моделей основного датчика, опорного каналу і широкосмугового датчика було розроблено комплексну модель системи визначення концентрації озону.

Структура розробленої у системі Matlab Simulink моделі наведено на рис. 3.9.

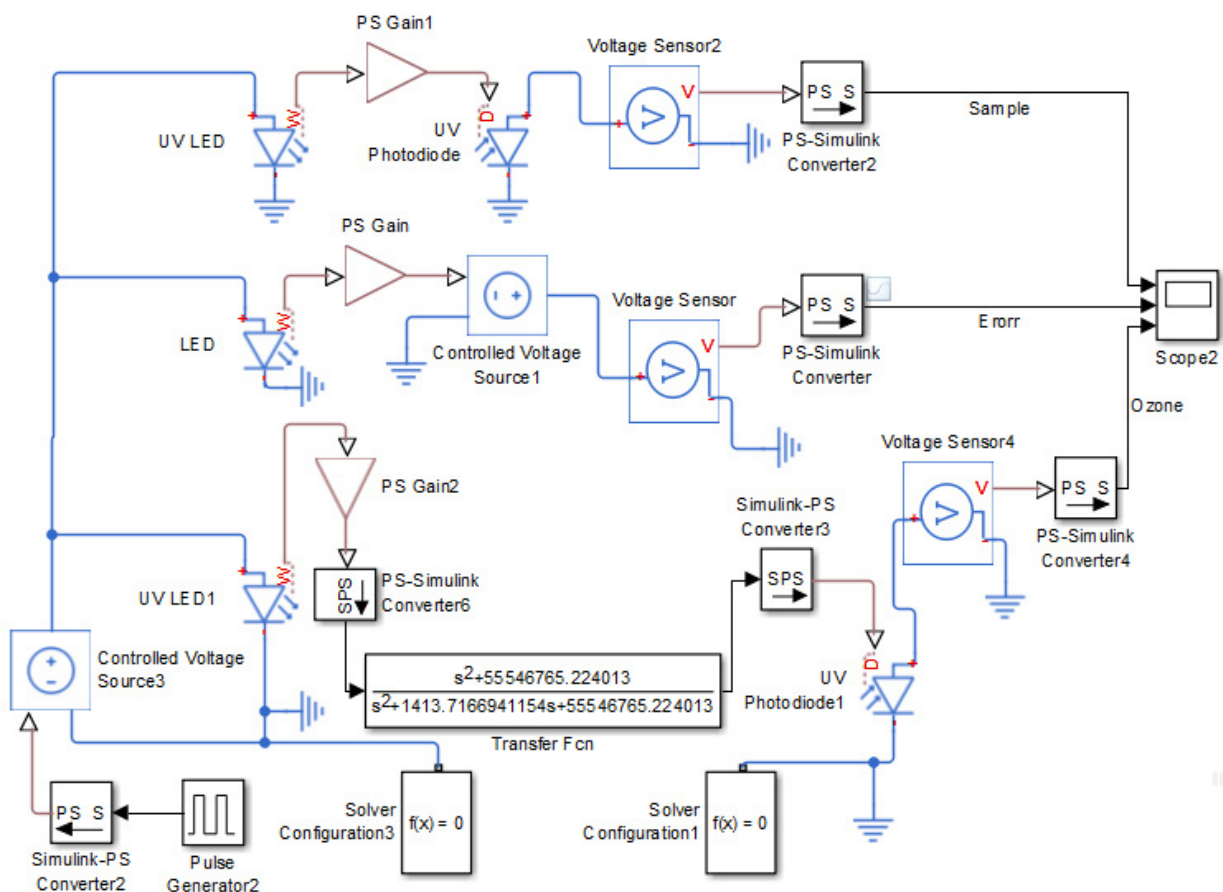


Рисунок 3.9 – Модель вимірювального тракту системи визначення концентрації озону

Модель містить випромінювачі у вигляді УФ світлодіодів UV LED і UV LED1 вимірювального і опорного каналів, а також світлодіод LED широкого спектра датчика. Ці блоки мають спільне живлення від генератора прямокутних імпульсів, що керує джерелом напруги Controlled Voltage Source3. Приймачам випромінювання відповідають блоки фотодіодів UV Photodiode і UV Photodiode1 для вимірювального і опорного каналів відповідно. У якості моделі широкоспектрового приймача застосовується блок Voltage Sensor.

Сигнали з виходів блоків приймачів Sample, Ozone і Error відповідають напругам опорного каналу, вимірювального каналу і широкоспектрового датчика відповідно. Останній призначено для корекції результатів вимірювань викликаних відбуттям і розсіюванням випромінювання на забрудненнях води. Результати випробування моделі наведено на рис. 3.10 у вигляді епюрів напруги приймачів випромінювання.

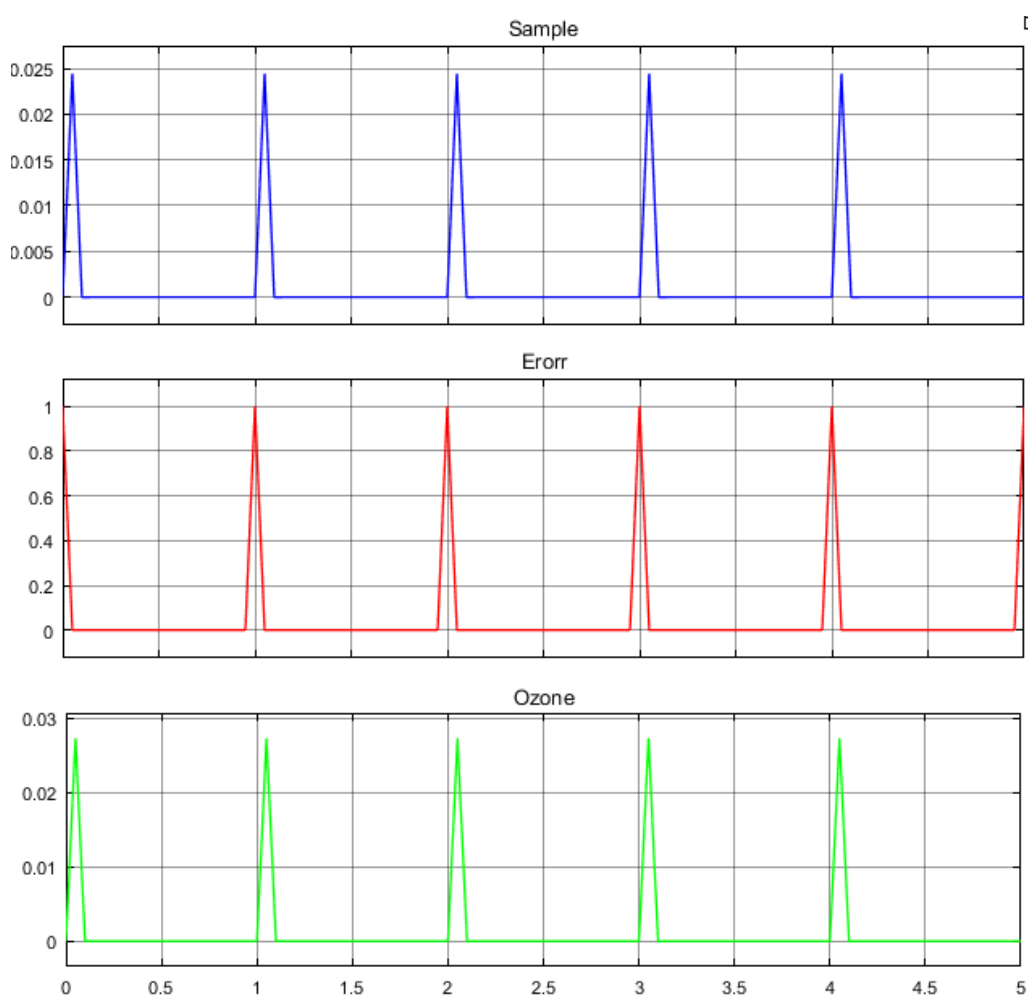


Рисунок 3.10 – Епюри сигналів на виході каналів моделі

Аналіз отриманих результатів показує, що форма всіх трьох сигналів співпадає одне з одним, але відрізняється від прямокутної форми напруги живлення випромінювачів. Це можливо пояснити тим, що при малій тривалості прямокутних імпульсів, завдяки нелінійності приймачів і випромінювачів, відбувається викривлення форми до вигляду меандрів. Також фази сигналів опорного і вимірювального каналів співпадають, а сигнал широкосмугового датчика випереджає їх завдяки меншій інерційності болометра на 0,1с. Це також має відповідати геометричному розташуванню широкосмугового датчика перед основним датчиком.

Таким чином, для об'єктивного визначення концентрації озону більш оптимальним є застосування вимірювальних імпульсів з значною тривалістю і у граничному випадку – УФ випромінювання з постійною інтенсивністю.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОЗОНУ

### 4.1 Моделювання системи з джерелами випромінювання постійної інтенсивності

Як показали випробування моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону (п.п. 3.5), результати визначення зміни інтенсивності випромінювання у опорному і вимірювальному каналі краще проводити у стаціонарних режимах роботи оптичних підсистем. Тому розроблена модель була доповнена постійним джерелом живлення випромінювачів – світлодіодів (рис. 4.1). Поєднання джерела з електричною частиною моделі здійснюється таким же чином, як і при імпульсному джерелі.

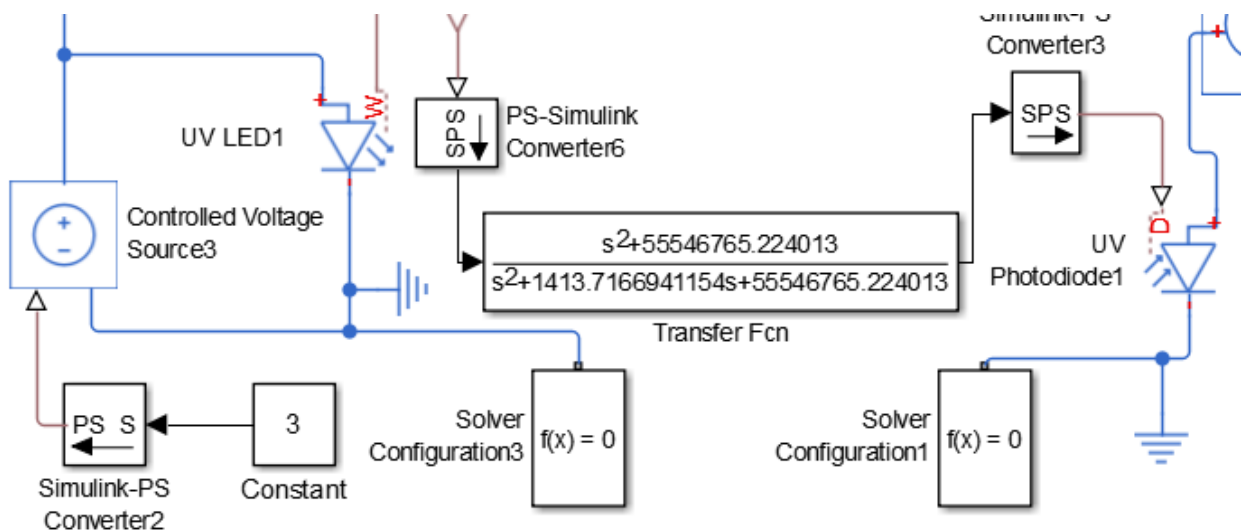


Рисунок 4.1 – Реалізація постійного джерела живлення у моделі

Крім того, модель було доповнено блоками з обробки і спостереження вихідних сигналів Sample, Ozone і Error приймачів випромінювання, як показано на рис. 4.2. Так, відповідно до (2.1), визначається відношення сигналів вимірювального каналу і опорного каналу за допомогою блоку Divide.

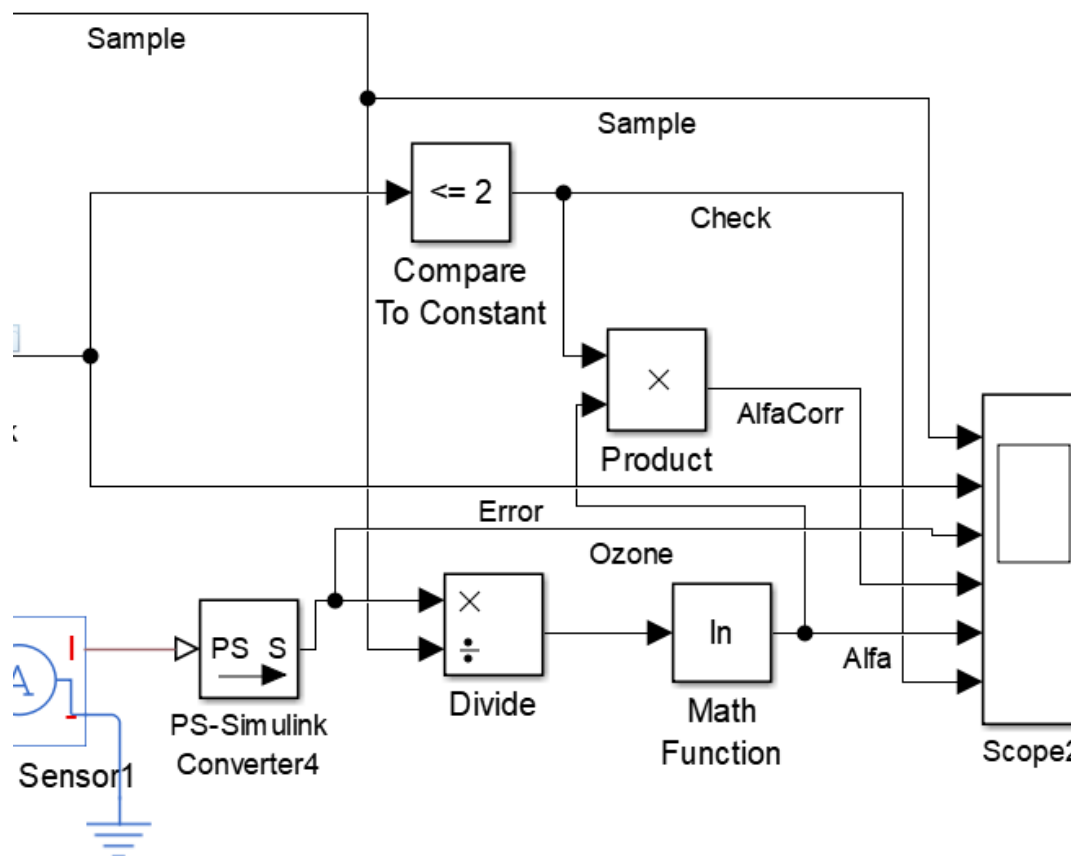


Рисунок 4.2 – Блоки обробки вихідних сигналів приймачів моделі

У наступному блоці Math Function виконується логарифмування ступені послаблення сигналів і обчислюється коефіцієнт поглинання УФ – випромінювання молекулами озону – сигнал Alfa (рис. 4.3).

На основі блоку компаратора Compare To Constant реалізовано повідомлення про наявність непрозорих макрочастинок у воді і скидання, шляхом твору його вихідного значення Check на величину сигналу Alfa, результатів вимірювань до нуля (блок Product). Такому скоригованому сигналу відповідає величина AlfaCorr. При перевищенні вихідним сигналом широкосмугового датчика граничного значення (2 В) відбувається скидання стану компаратора до нуля і величина AlfaCorr також буде дорівнювати нулю. На наведених епюрах такий стан спостерігається на початкових ділянках часу, коли встановлюється рівноважний стан функціонування випромінювачів і приймачів системи.

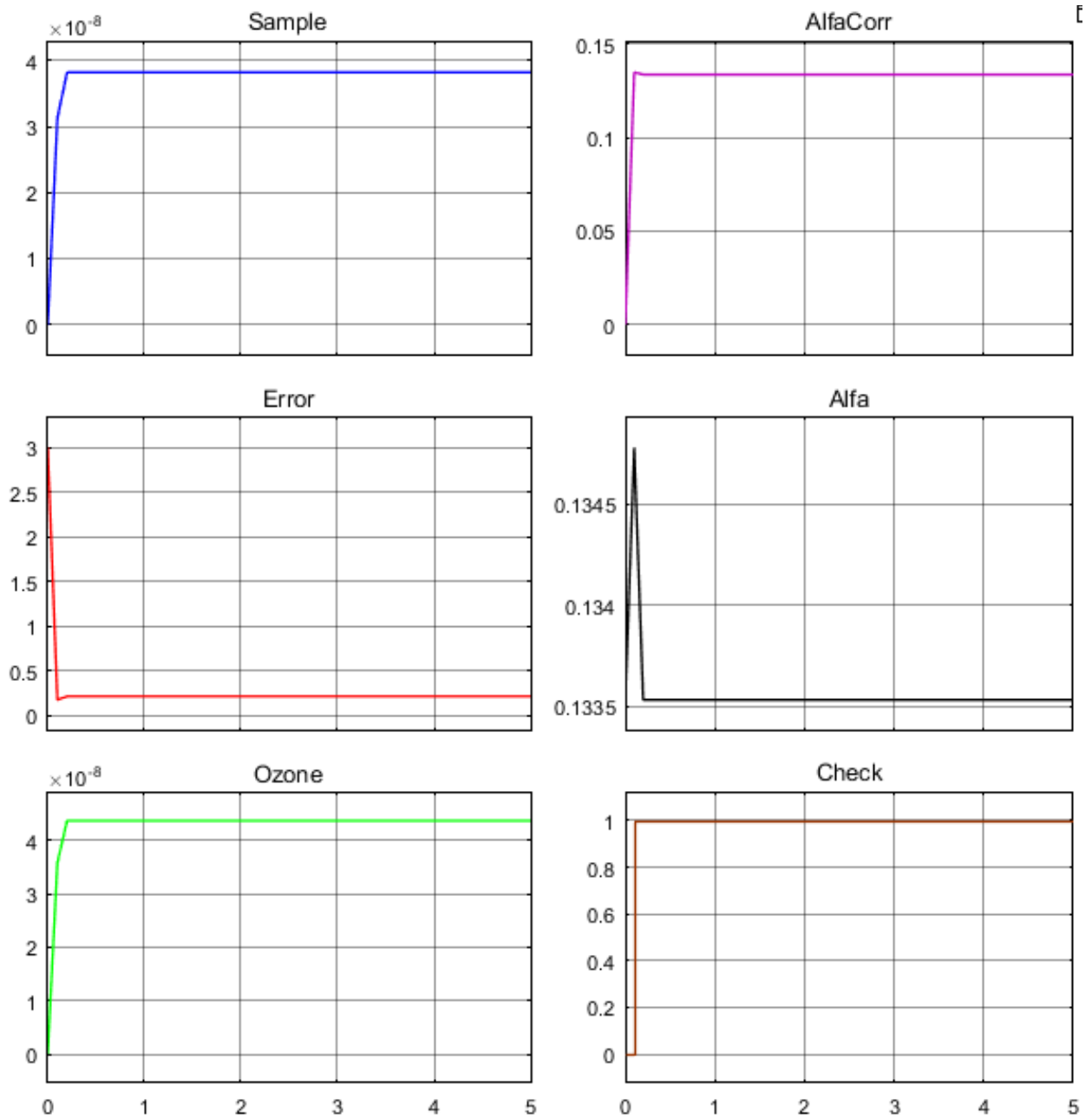


Рисунок 4.3 – Епюри сигналів при моделюванні стаціонарного режиму роботи моделі: Sample – вихідний сигнал опорного каналу, Error – вихідний сигнал широкосмугового датчика, Ozone – вихідний сигнал вимірювального каналу, AlfaCorr – скориговане значення коефіцієнту поглинання, Alfa - значення коефіцієнту поглинання, Check – сигнал, що відповідає наявності непрозорих макрочастинок у воді.



Аналіз отриманих результатів показує, що час встановлення результатів вимірювань становить 0,21 с при значенні коефіцієнту поглинання 0,135.

#### 4.2 Моделювання впливу випадкових процесів на точність визначення концентрації озону

Проблема завадостійкості інформаційно-вимірювальних систем є однією з найважливіших проблем сучасної теорії передачі інформації. Ця проблема виникає при проектуванні і експлуатації інформаційно-вимірювальних систем, що мають обмежений енергетичний потенціал. Це, перш за все, відноситься до інформаційно-вимірювальної техніки, в якій в якості носія інформації використовується оптичне випромінювання. Оптиелектронні інформаційно-вимірювальні системи передачі інформації ефективно працюють за умови, що співвідношення «сигнал / шум» на вході приймача випромінювання перевищує деяке порогове значення. Зменшення співвідношення «сигнал / шум» на вході приймача випромінювання при роботі в області порога призводить до швидкого зростання похибки вимірювання і, відповідно, до різкого погіршення якості вимірювання. До теперішнього часу немає єдиних і чітких визначень для порогового режиму, порогового сигналу і порогового співвідношення «сигнал / шум».

Робота інформаційно-вимірювальних систем при порогових режимах мало вивчена. Відомо лише, що разом з корисним сигналом через елементи оптиелектронної інформаційно-вимірювальної системи практично завжди проходять перешкоди, звані шумами, які можуть генеруватися і в самих елементах системи. Накладаючись на корисний сигнал, ці перешкоди спотворюють його параметри, що неминуче веде до виникнення похибок вимірювання. У більшості випадків ці перешкоди є випадковими, статистичні характеристики яких залежать від характеру завдання, структури і складу елементів оптиелектронної інформаційно-вимірювальної системи. Для зменшення

інерційності оптоелектронної інформаційно-вимірювальної системи і зниження значення її динамічних похибок смуга частот, що пропускаються частотної характеристики системи розширюється, що веде до підвищення рівня перешкод і зростання спотворень параметрів корисного сигналу від них. Таким чином, тенденції зміни динамічних похибок і похибок від шумів при зменшенні інерційності інформаційно-вимірювальних систем протилежні, і існують такі параметри системи, що визначають її частотну передавальну функцію, при яких сума динамічної похибки та похибки від шумів буде мінімальною для заданих умов роботи.

Тому аналіз функціонування моделі вимірювального тракту в умовах дії випадкових перешкод є актуальним для розробки методів підвищення точності системи визначення концентрації озону. Для цього у синтезовану модель з постійними джерелами живлення було додано джерело випадкових сигналів Band-Limited White Noise до оптичного каналу вимірювального тракту (рис. 4.4).

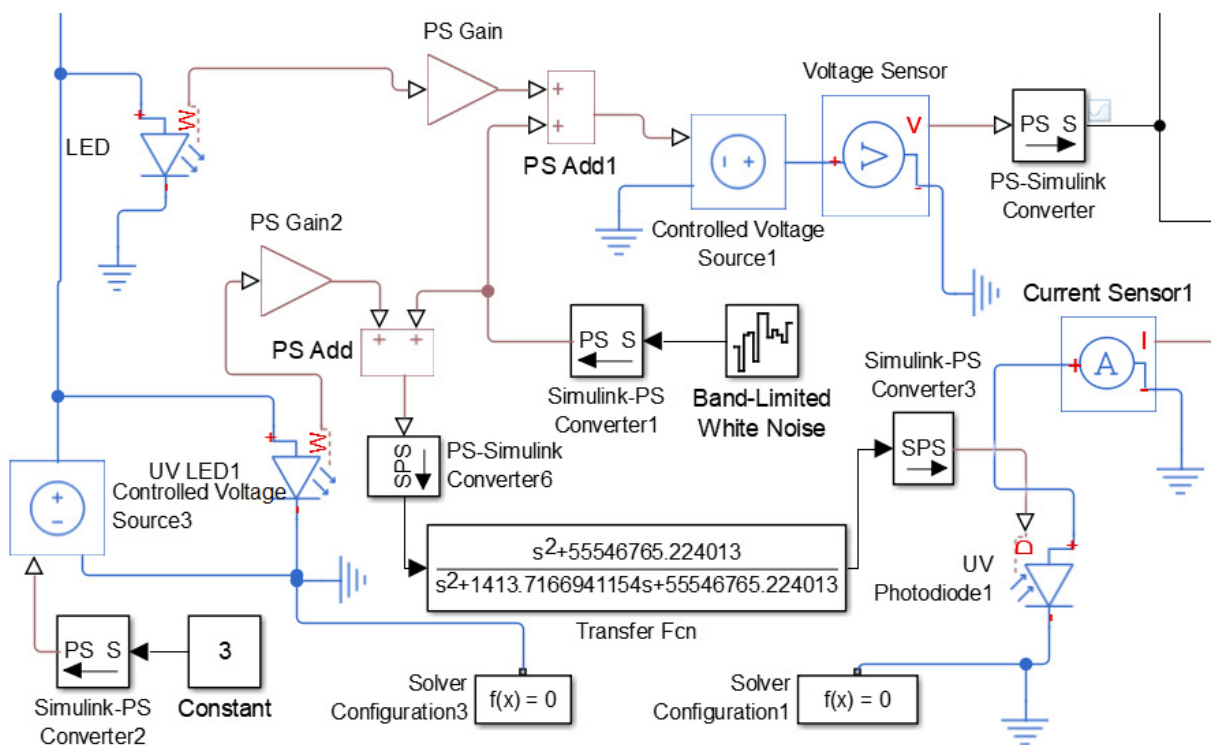


Рисунок 4.4 – Реалізація дії завад у вимірювальному каналі

Таким чином, за допомогою блоків підсумовування PS Add1 і PS Add реалізовано адитивну суміш випромінювання світлодіодів із завадами на входах приймачів основного і широкосмугового датчиків (рис. 4.5).

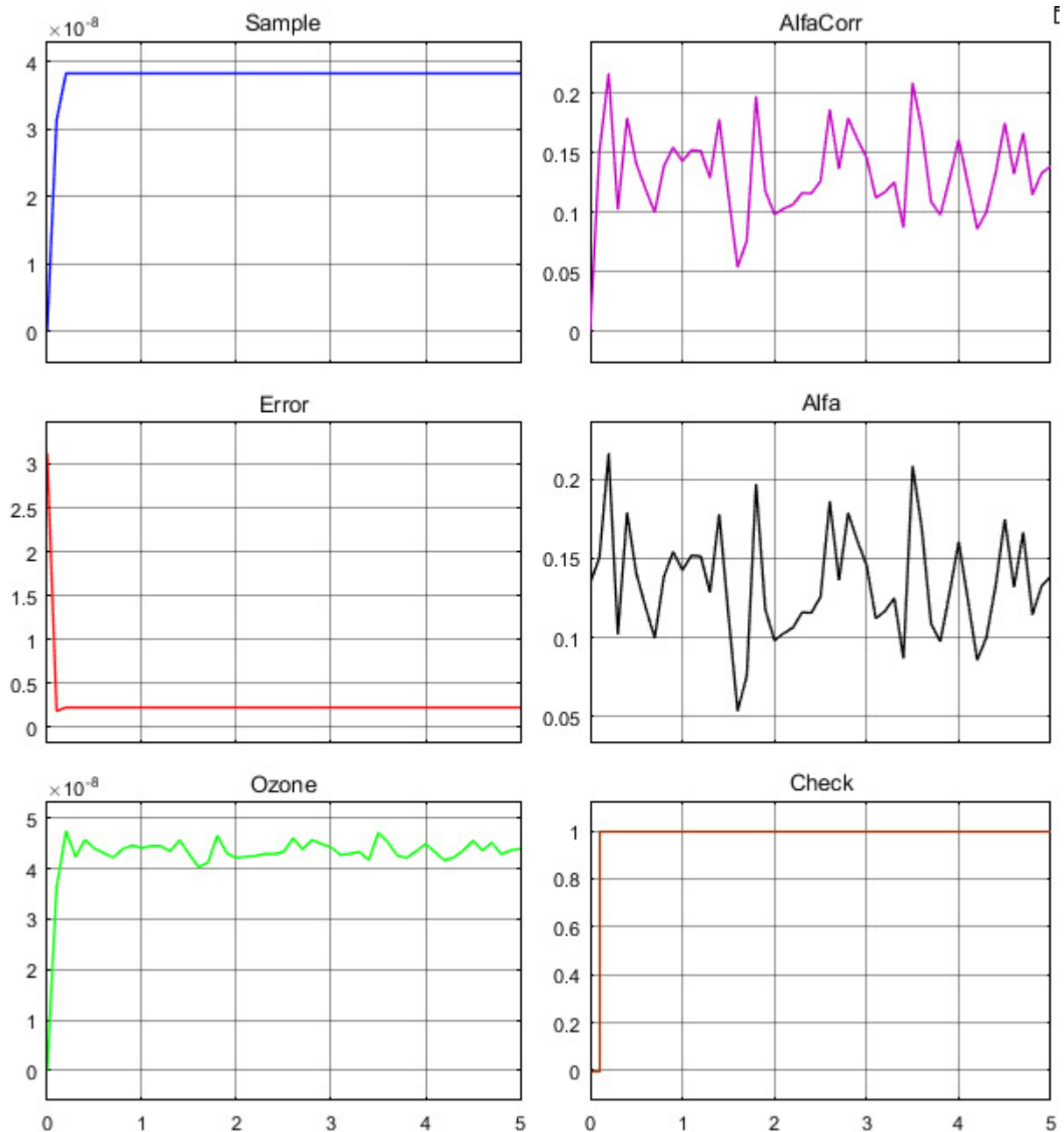


Рисунок 4.5 – Епюри сигналів при моделюванні завадостійкості у стаціонарному режимі роботи моделі: Sample – вихідний сигнал опорного каналу, Error – вихідний сигнал широкосмугового датчика, Ozone – вихідний сигнал вимірювального каналу, AlfaCorr – скориговане значення коефіцієнту поглинання, Alfa - значення коефіцієнту поглинання, Check – сигнал, що відповідає наявності непрозорих макрочастинок у воді.

Аналіз рис. 4.5 показує, що результати поглинання УФ випромінювання AlfaCorr під дією випадкових перешкод також хаотично змінюються від 0,056 до 0,22. Це відповідає виникненню помилки вимірювань від 0,17 до 0,69 при потужності шумів 1нВт/Гц.

#### 4.3 Моделювання системи з модуляцією інтенсивності випромінювання

Для зниження величини похибки вимірювань пропонується застосовувати вимірювальний тракт з модуляцією випромінювання, фрагмент візуально-блочної моделі якого наведено на рис. 4.6.

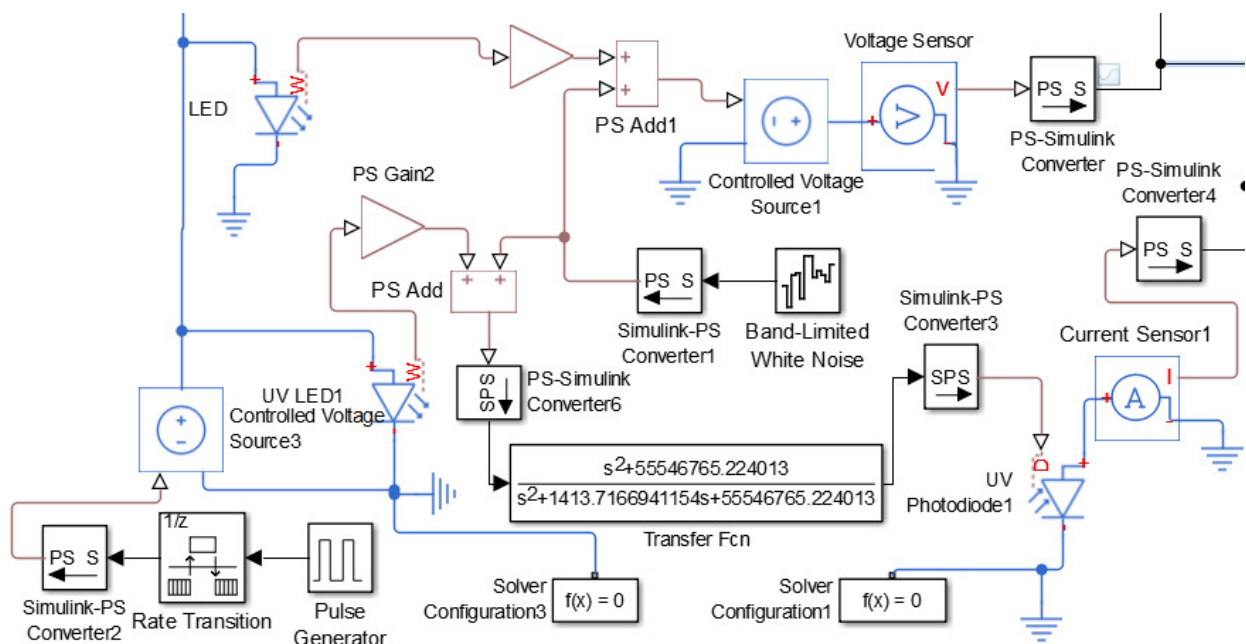


Рисунок 4.6 – Фрагмент моделі з модуляцією випромінювання

На відміну від нестационарної моделі (рис. 3.9) у цьому завданні додано блок Rate Transition для узгодження частоти модуляції випромінювання у каналі (0,33 Гц) з випадковою частотою появи завад. При цьому шпаруватість модуляції складає 0,7.

Крім того, було запропоновано застосування обробки вихідних сигналів датчиків, так як показано на рис. 4.7.

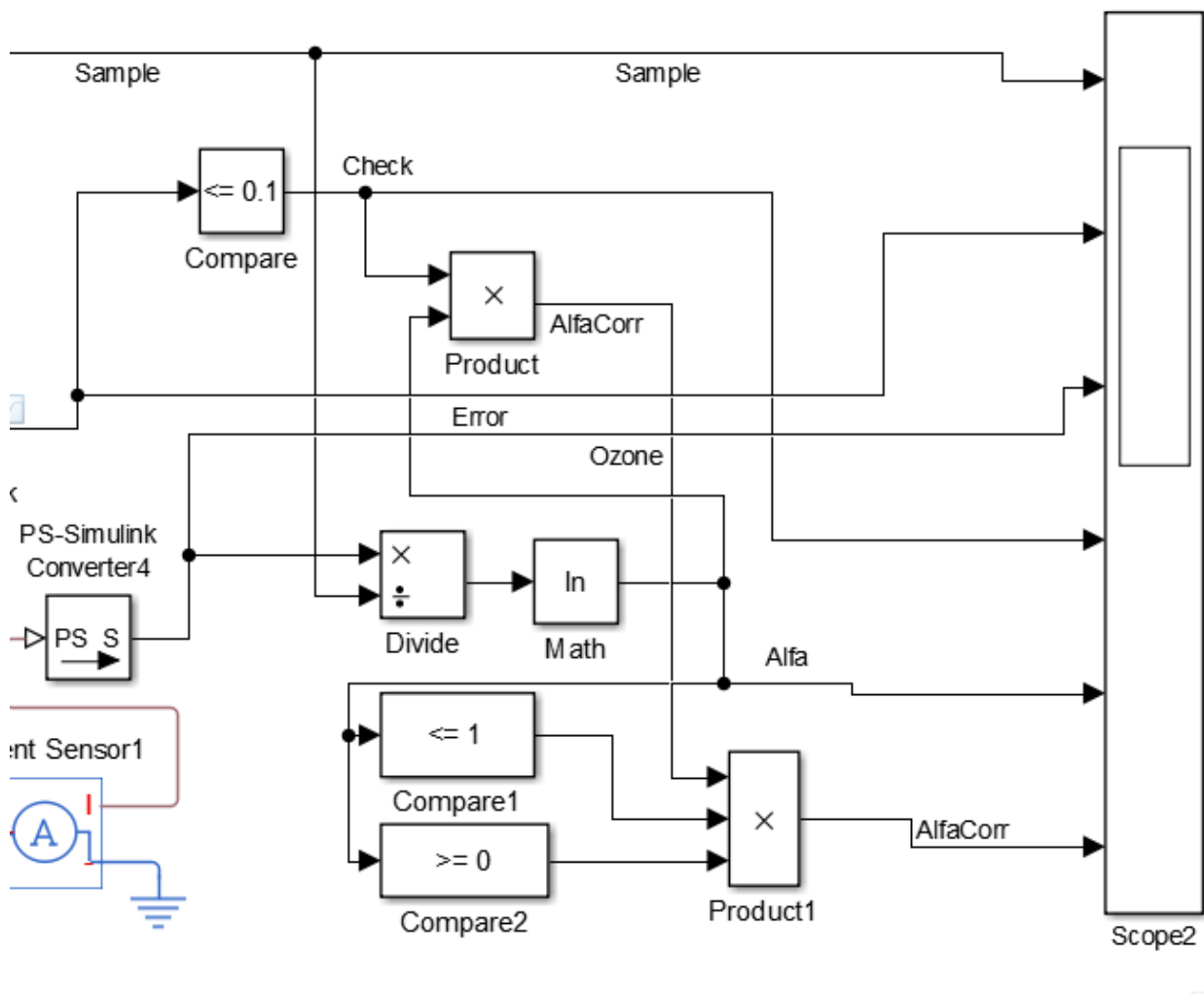


Рисунок 4.7 – Фрагмент моделі з додатковою обробкою вихідних сигналів

Для зниження величини похибки визначення було додано, у порівнянні з початковим варіантом (рис. 4.2), обмежувач рівня коефіцієнту поглинання Alfa на основі двох паралельно поєднаних блоків Compare1 і Compare2. Вихідні значення цих операцій перемножуються зі значенням Alfa, що враховує розсіювання світла на макродефектах у оптичному каналі. Результати моделювання цих процесів наведено на рис. 4.8.

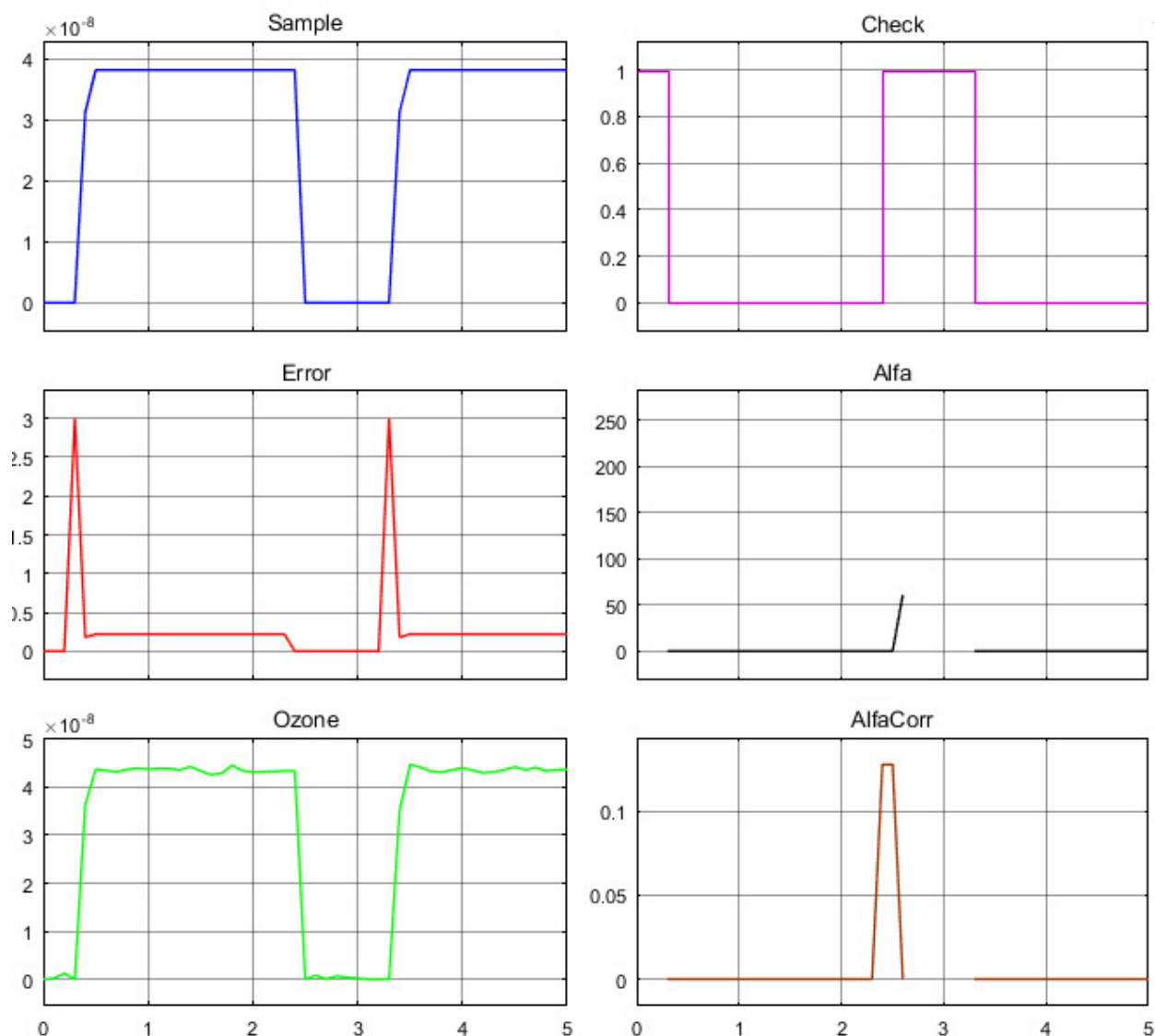


Рисунок 4.8 – Епюри сигналів при моделюванні завадостійкості при модуляції випромінювання: Sample – вихідний сигнал опорного каналу, Error – вихідний сигнал широкосмугового датчика, Ozone – вихідний сигнал вимірювального каналу, AlfaCorr – скориговане значення коефіцієнту поглинання, Alfa – значення коефіцієнту поглинання, Check – сигнал, що відповідає наявності непрозорих макрочастинок у воді.

Аналіз рис. 4.8 показує, що амплітуда сформованого імпульсу AlfaCorr є інформативним показником з визначення поглинання випромінювання. При цьому похибка визначення концентрації озону стабілізується на рівні 0,1 %.

Також було виконано моделювання завадостійкості розробленої моделі для різних значень частоти модуляції випромінювання, але при незмінності всіх інших умов. Результати досліджень показано на рис. 4.9 у вигляді залежності величини похибки вимірювань від частоти модуляції випромінювання наведено на рис. 4.9.

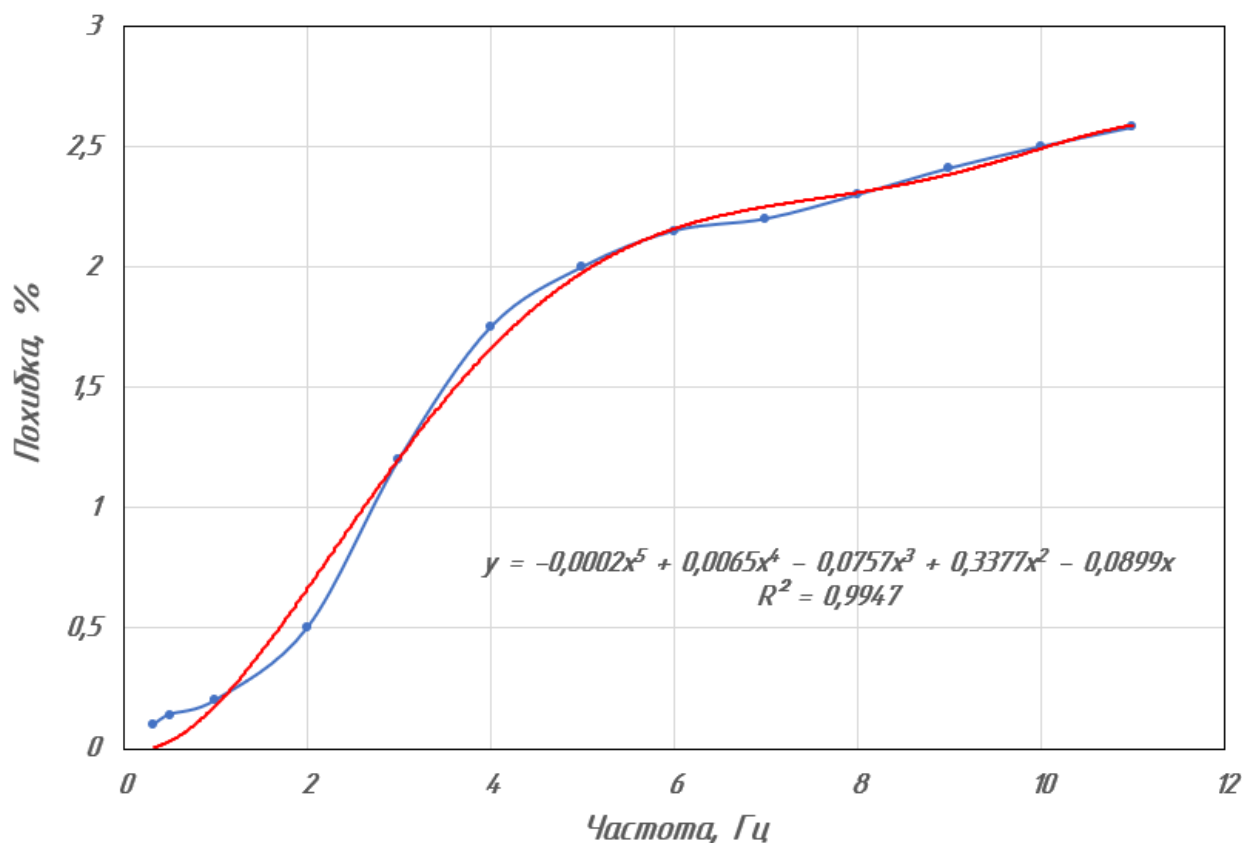


Рисунок 4.9 – Залежність величини похибки вимірювань від частоти модуляції випромінювання

З рис. 4.9 слід, що величина похибки зростає зі збільшення частоти модуляції випромінювання за нелінійним законом від 0,1% до 2,62%.

Для встановлення аналітичної залежності величини похибки вимірювань від частоти модуляції випромінювання було проведено апроксимації отриманих даних за допомогою лінії тренду. Найбільшої збіжності теоретичної залежності і отриманих даних було досягнуто для поліноміальної лінії

п'ятого ступеню. Таким чином, встановлено, що похибка вимірювань може бути задана як:

$$D = -0,0002 f^5 + 0,0065 f^4 - 0,0757 f^3 + 0,3377 f^2 - 0,0899 f, \quad (4.1)$$

де  $f$  – частота модуляції випромінювання, Гц.

Оцінка точності апроксимації оцінювалась за допомогою коефіцієнту множинної кореляції  $R^2 = 0,9947$ . Це означає, що похибка апроксимації за допомогою (4.1) становить 0,53 %.



## 5 ЕКОНОМІКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

### 5.1 Формуляр проекту

Таблиця 5.1 – Формуляр проекту

Завдання	№ проекту	1
	Дата замовлення	02.02.2020
	Назва проекту	Синтез візуально-блочної моделі вимірювального тракту системи визначення концентрації озону
	Замовник ПІБ	
	Адреса	
	Контактна особа, ПІБ	
	Телефон і факс	
Договірна ціна	Усього	1
	План оплати	попередня оплата – 50%
	Додаткові умови	-
Строки	Початок	08.04.2020
	Проміжні строки	-
	Кінець	01.12.2020
Партнери	Кооперація	-
	Субпідрядники	-
	Завдання	-
Персонал	Керівник	
	Заступник	
	Співробітники	

Проект	Скорочена назва	-
	Цілі	Створення моделі
	Критичні строки	1. 01.09.20 (створення моделі оптичного каналу)
		2. 15.11.19 (створення моделі тракту)
Особливості та проблеми	Моделювання тракту складовою частинами якого є оптико-електронний канал	

## 5.2 Характеристика робіт за проектом

Таблиця 5.2 - Характеристика робіт за проектом

Характеристика робіт за проектом			
Код роботи	Назва (зміст) роботи	Безпосередньо попередня робота	Тривалість, діб
1.1.1	Аналіз методів вимірювання концентрації озону	-	5
1.1.2	Підготовка технічного звіту	1.1.1	4
1.2.1	Обґрунтування обрання інструментарію розробки моделі	1.1.5	6
1.2.2	Опис блоку розрахунку поглинання УФ випромінювання		4
1.2.3	Опис блоків джерел і приймачів випромінювання	1.2.2	2
1.2.4	Підготовка технічного звіту	1.2.3	4

Характеристика робіт за проектом			
Код роботи	Назва (зміст) роботи	Безпосередньо попередня робота	Тривалість, діб
1.3.1	Опис основного датчика вимірювального каналу	1.1.1	3
1.3.2	Синтез моделі опорного каналу	1.2.3, 1.3.1	2
1.3.3	Синтез моделі широкосмугового датчика	1.2.3	5
1.4.1	Моделювання системи з джерелами випромінювання постійної інтенсивності	1.3.1, 1.3.2, 1.3.3	5
1.4.2	Моделювання впливу випадкових процесів на точність визначення концентрації озону	1.4.1	15
1.4.3	Моделювання системи з модуляцією інтенсивності випромінювання	1.4.2, 1.4.3	10
1.4.4	Усунення недоліків роботи системи	1.4.3	7
1.4.5	Аналіз результатів	1.4.3	7
1.4.6	Підготовка технічного звіту	1.4.5	8

### 5.3 Робоча структура проекту - WBS

WBS (Work Breakdown Structure) будується в результаті декомпозиції робіт. Вона визначає об'єм робіт, виконання яких призводить до досягнення мети проекту [32]. Структура наведена на рис. 5.1.

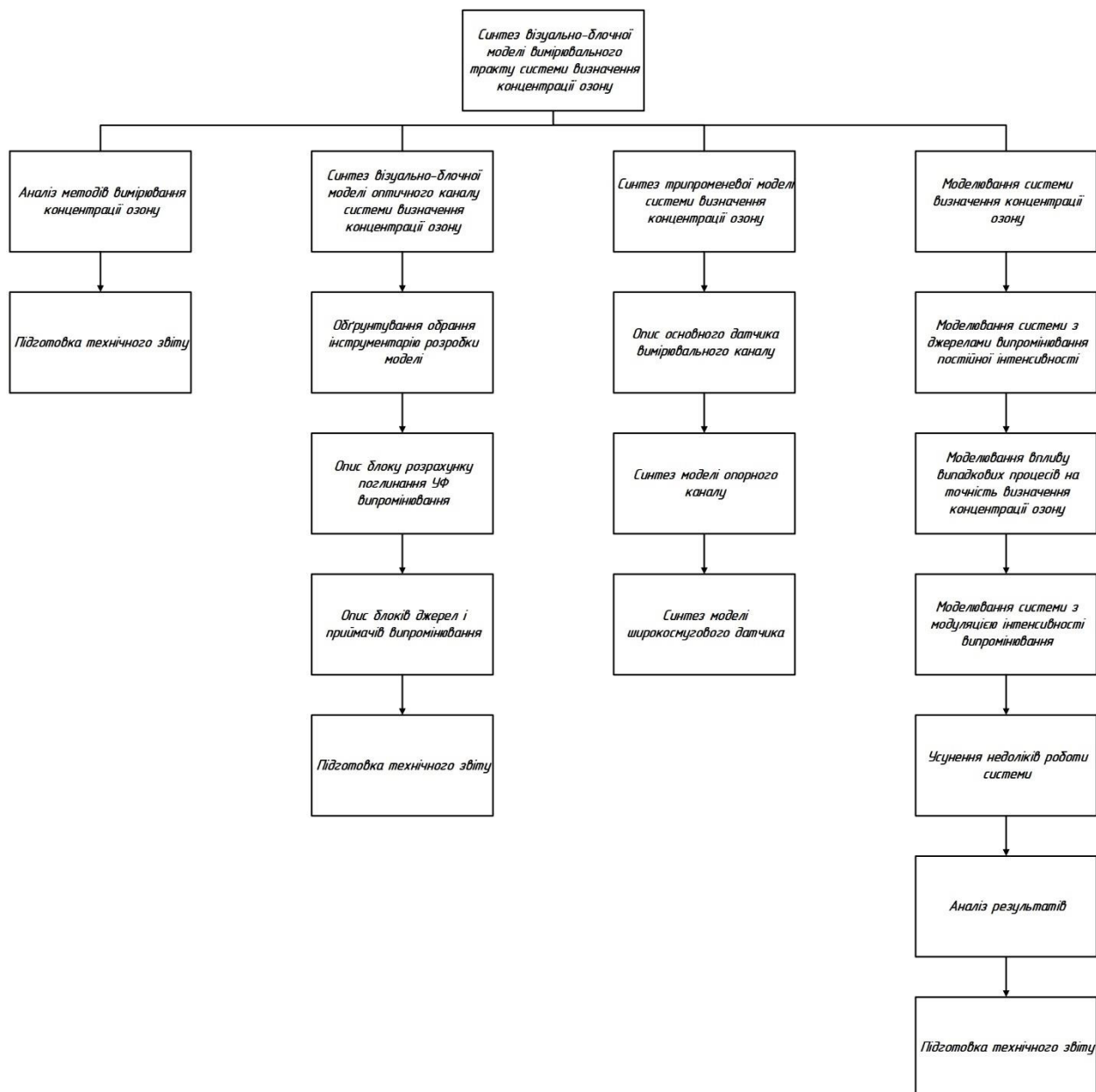


Рисунок 5.1 – Робоча структура проекту – WBS

#### 5.4 Організаційна структура проекту - OBS

OBS (Organization Breakdown Structure) визначає виконавців проекту та встановлює систему підпорядкованості. OBS має вигляд ієрархічної системи. Структура OBS визначається структурою проектної організації [32]. Структура наведена на рис. 5.2.

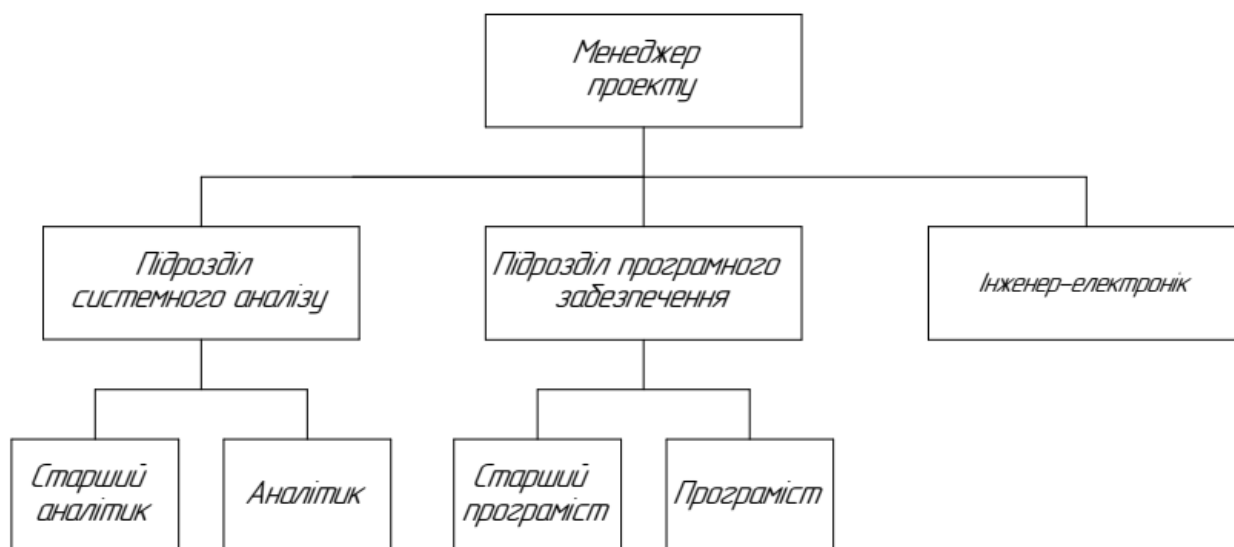


Рисунок 5.2 – Організаційна структура проекту - OBS

### 5.5 Структура затрат проекту - CBS

CBS (Cost Breakdown Structure) будується в результаті декомпозиції загальних витрат на проект. Структура CBS наведена на рис. 5.3.



Рисунок 5.3 – Структура затрат проекту - CBS

## 5.6 Матриця відповідальності

Матриця відповідальності закріплює роботи за виконавцями та встановлює їх міру відповідальності. Вона пов'язує WBS та OBS. Вона наведена у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 - Матриця відповідальності

Виконавці	Роботи														
	Аналіз методів вимірювання концентрації озону	Підготовка технічного звіту	Обґрунтування обрання інструментарію розробки моделі	Опис блоку розрахунку поглинання УФ випромінювання	Опис блоків джерел і приймачів випромінювання	Підготовка технічного звіту	Опис основного датчика вимірювального каналу	Синтез моделі опорного каналу	Синтез моделі ширококутового датчика	Моделювання системи з джерелами постійної інтенсивності	Моделювання впливу випадкових процесів на точність	Моделювання системи з модуляцією	Усунення недоліків роботи системи	Аналіз результатів	Підготовка технічного звіту
Менеджер проекту				p	p				p					p	p
Старший аналітик	p	p	p	s	s		p	p	s		p	p	p	s	s
Аналітик	s	s	s	+	+	p			+	p		s	s		+
Старший програміст			+			+	s	s			s	+	+	+	
Програміст							+	+		+	+				
Інженер електронік	+	+	+			s				s					

p - первинна відповідальність, s - вторинна відповідальність, + - виконавець

### 5.7. Система кодування проекту

Система кодування дозволяє структурувати проект, встановити взаємовідносини WBS та OBS. У кодуванні використовуються багатозначні коди. Структуру коду введено за допомогою наступної форми:

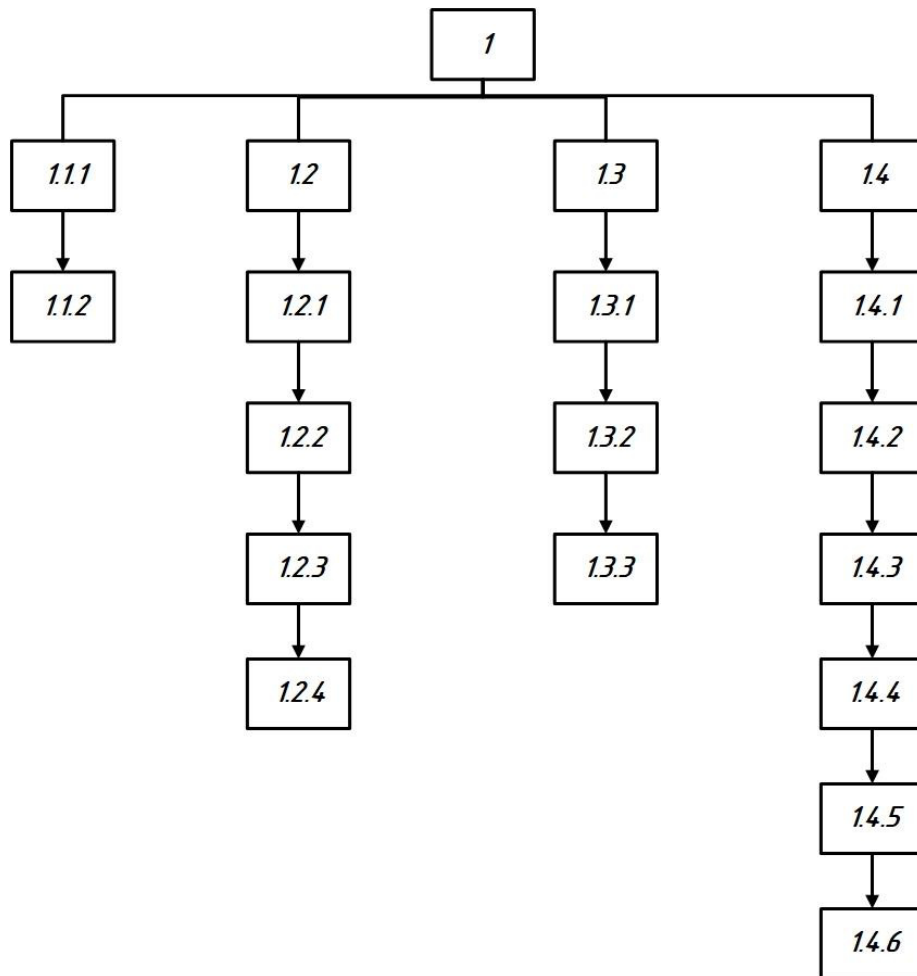
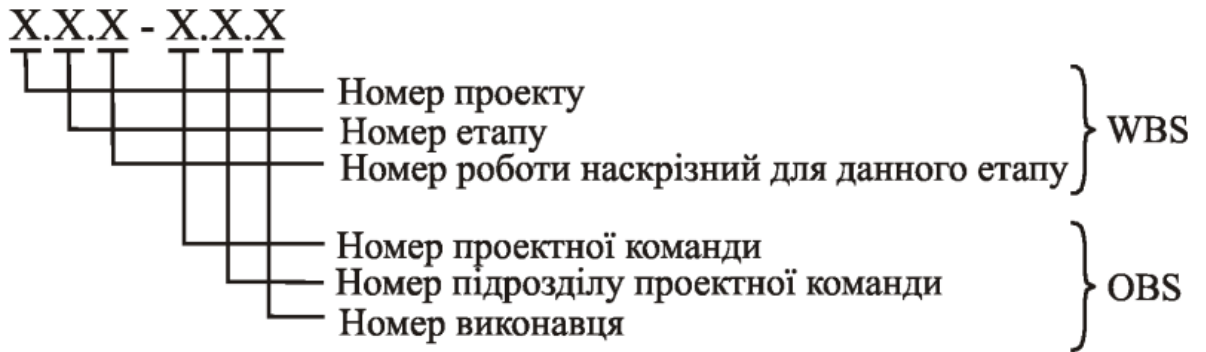


Рисунок 5.4 - Система кодування WBS

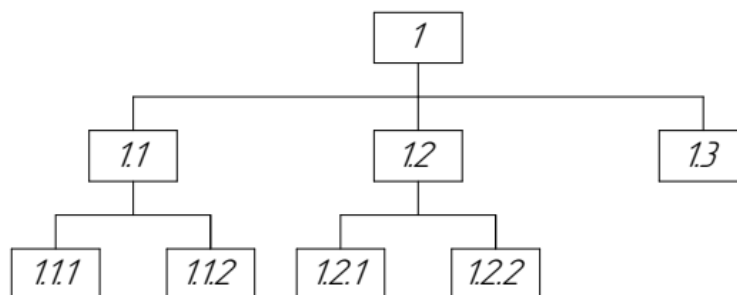


Рисунок 5.5 - Система кодування OBS

### 5.8 CTR - каталог

Після створення системи кодування було зроблено словник (табл. 5.4), який визначає елементи й облік затрат та гарантує розуміння усім залученим до проекту зміст і значення елементів WBS та OBS [33].

Таблиця 5.4 - CTR - каталог

№	Код роботи	Назва чи зміст роботи	Затрати, грн	Тривалість, дні	Необхідні ресурси
1	2	3	4	5	6
1	1.1.1-1.1	Аналіз методів вимірювання концентрації озону	10500	5	Аналітик 2 особи Електронік 1 особа
2	1.1.2-1.1	Підготовка технічного звіту	8400	4	Аналітик 2 особи Електронік 1 особа
3	1.2.1-1.1	Обґрунтування обрання інструментарію розробки моделі	16800	6	Аналітик 2 особи Програміст 1 особа Електронік 1 особа
4	1.2.2-1.2.1	Опис блоку розрахунку поглинання УФ випромінювання	8400	4	Аналітик 2 особи Електронік 1 особа
5	1.2.3-1.2.1	Опис блоків джерел і приймачів випромінювання	4200	2	Аналітик 2 особи Електронік 1 особа



Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4	5	6
6	1.2.4- 1.2.1	Підготовка технічного звіту	8400	4	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 1 особа
7	1.3.1- 1.2.1	Опис основного датчика вимірювального каналу	6300	3	Аналітик 1 особа Програміст 2 особи
8	1.3.2.- 1.2.2	Синтез моделі опорного каналу	4200	2	Аналітик 1 особа Програміст 2 особи
9	1.3.3- 1.2.2	Синтез моделі широкопasmового датчика	10500	5	Електронік 1 особа Аналітик 2 особи
10	1.4.1- 1.3	Моделювання системи з джерелами постійної інтенсивності	10500	5	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 1 особа
11	1.4.2- 1.3	Моделювання впливу випадкових процесів на точність	31500	15	Програміст 2 особи Аналітик 1 особа
12	1.4.3- 1.3	Моделювання системи з модуляцією	21000	10	Програміст 1 особа Аналітик 2 особи
13	1.4.4- 1.3	Усунення недоліків роботи системи	14700	7	Програміст 1 особа Аналітик 2 особи
14	1.4.5- 1.3	Аналіз результатів	14700	7	Електронік 1 особа Програміст 1 особа Аналітик 1 особа
15	1.4.6- 1.3	Підготовка технічного звіту	16800	8	Електронік 1 особа Аналітик 2 особи

### 5.9 Стрілчастий графік

Стрілчастий графік являє собою граф, вузлам якого відповідають події, а стрілкам – роботи [34]. При побудові стрілчастого графіку використовуються позначення приведені на рис. 5.6. Стрілчастий графік представлено на рис. 5.7.

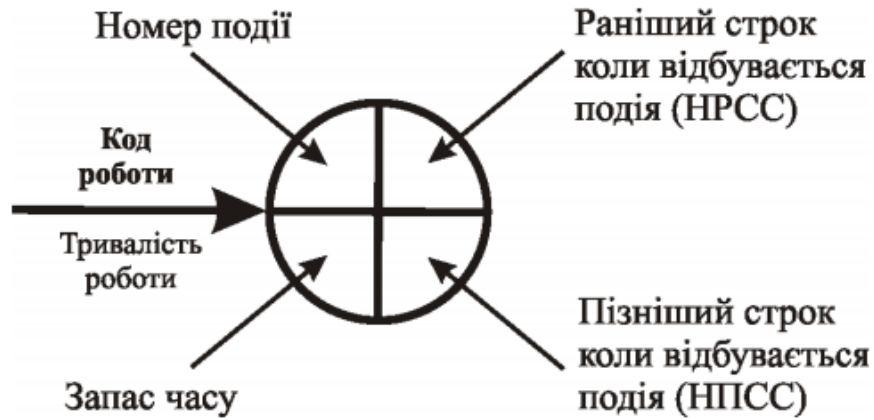


Рисунок 5.6 - Позначення для стрілкового графіку

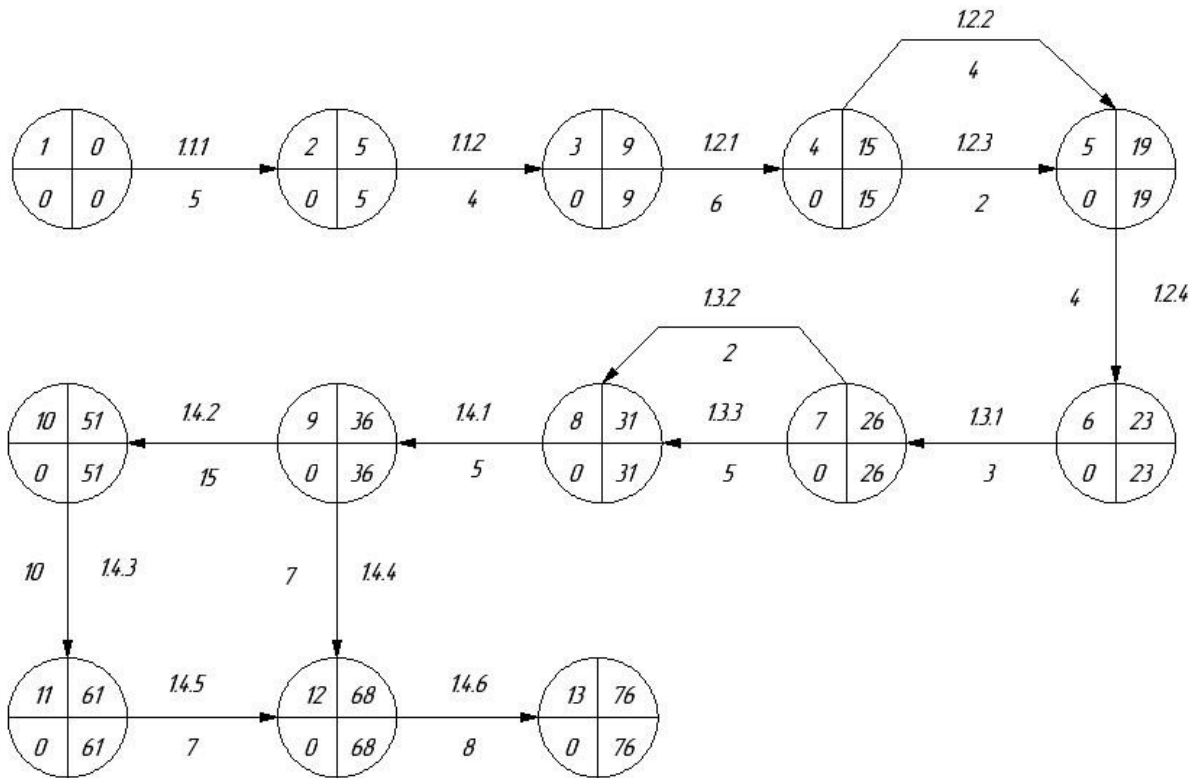


Рисунок 5.7 - Стрілчастий графік

### 5.10 Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу

Більшість реальних проектів виконуються в умовах невизначеності стосовно строків виконання деяких робіт. Тому при визначенні загального

терміну виконання проекту потрібно враховувати імовірнісний характер визначення термінів виконання робіт. Для визначається три оцінки для кожної і-ї роботи, що входять до критичного шляху, за допомогою експертної оцінки:

- $a_i$  - оптимістичний прогноз тривалості і-ї роботи;
- $b_i$  - песимістичний прогноз тривалості і-ї роботи ;
- $m_i$  - найбільш ймовірний прогноз тривалості і-ї роботи.

Далі було проведено розрахунок дисперсної тривалості і-ї роботи за допомогою формули [32]:

$$\sigma^2_i = \left( \frac{b_i - a_i}{6} \right)^2 \quad (5.1)$$

Після цього було розраховано математичне очікування тривалості і-ї роботи за допомогою формули [32]:

$$t_i = \frac{a_i + 4 \cdot m_i + b_i}{6} \quad (5.2)$$

Математичне очікування проекту визначається за допомогою формули:

$$t = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (5.3)$$

де  $n$  - кількість робіт, що належать до критичного шляху.

Стандартне відхилення терміну виконання проекту визначено через формулу [32]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2_i} \quad (5.4)$$

Результати занесено в табл. 5.5

Таблиця 5.5 - Тривалість проекту з урахуванням запасів часу

Код роботи	$a_i$	$m_i$	$b_i$	$\sigma_i^2$	$t_i$
1.1.1	4	5	8	0,44	5,33
1.1.2	3	4	10	1,36	4,83
1.2.1	4	6	10	1	6,33
1.2.2	3	4	7	0,44	4,33
1.2.4	2	4	6	0,44	4
1.3.1	2	3	6	0,44	3,33
1.3.3	4	5	9	0,69	5,50
1.4.1	4	5	9	0,69	5,50
1.4.2	10	15	18	1,78	14,67
1.4.3	8	10	12	0,44	10
1.4.5	5	7	9	0,44	7
1.4.6	5	8	12	1,36	8,17
				$\sigma$	$t$
				4,78	79

Ймовірність виконання проекту було прийнято в 0,9. Тоді величина  $\varphi$  визначається як:

$$\varphi = F - 0.5 = 0.9 - 0.5 = 0.4 \quad (5.5)$$

По таблиці нормального розподілу  $\varphi(z)$  [32] було визначено  $z = 1,29$ . Далі було проведено розрахунок необхідного терміну виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90%:

$$Q = z \cdot \sigma + t = 1,29 \cdot 4,78 + 79 = 86 \quad (5.6)$$

Отже, термін виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90%, становить 86 робочих днів.

## 6 ВИМОГИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ У НАУКОВО-ДОСЛІДНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ

### 6.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Згідно до [35], при моделюванні вимірювального тракту системи визначення концентрації озону у науково-дослідній лабораторії можуть виникнути наступні потенційно небезпечні та шкідливі фактори:

- підвищена влітку та понижена взимку температура повітря в приміщенні;
- понижена рухомість повітря;
- недостатня освітленість робочого місця;
- підвищений рівень шуму та вібрації, що викликані роботою устаткування (наприклад, озонатором);
- підвищена запиленість внаслідок особливостей виготовлення модуля.

Висока температура повітря викликає інтенсивне потовиділення, що приводить до згущування крові, порушення водно-сольового балансу, зміни шлункової секреції, розвитку вітамінного дефіциту. Висока температура викликає пришвидшення дихання, послаблення уваги, погіршення координації рухів, уповільнення реакції. Понижена рухомість повітря призводить до погіршення самопочуття. З'являється головний біль, втома, виникає підвищена дратівливість та агресивність. При недостатній освітленості може виникати зниження працездатності зору і викликає його стомлення. Підвищений рівень вібрації призводить до вібраційної хвороби, що відрізняється різноманітністю клінічної симптоматики.

Також при дослідженнях можуть виникати психофізіологічні фактори, що пов'язані із монотонністю виконання роботи, постійним напруженням

зору, стресами. В результаті відбувається розсіяння уваги працівників лабораторії. Це може привести до зниження продуктивності праці і часто є причиною травматизму.

## 6.2 Заходи з поліпшення умов праці

Для регулювання температури повітря необхідно застосовувати систему центрального кондиціонування, що повинна не лише охолоджувати повітря, але й нагрівати. Це дозволить забезпечити персоналу комфортні умови для покращення їх фізичного стану, що безпосередньо відображається на рівні їх працездатності.

Рухливість повітря в приміщеннях забезпечується конвекційними потоками за рахунок різниці температур усередині приміщення та зовні. Оскільки з використанням систем клімат-контролю ця різниця не завжди є суттєвою, то необхідне устанавлення механічної вентиляції. Це дозволить забезпечити постійне поповнення свіжого повітря в робочому приміщенні.

Проведення досліджень і комп'ютерного моделювання є точною роботою. Тому, згідно [36], достатня освітленість робочого місця має забезпечуватись комбінованою системою штучного освітлення. При цьому передбачається використання світильників загального та місцевого освітлення з непросвічуючими відбивачами.

При розробці заходів для захисту від шуму та вібрації слід посилатися на ГОСТ 12.1.029-80 [37]. При цьому для зниження рівня шуму та вібрації необхідно виконати ряд заходів. По-перше, необхідно зменшити шум та вібрацію безпосередньо в джерелі їх утворення. По-друге, слід застосувати системи шумо-, віброізоляції, а також шумо-, вібропоглинання. По-третє, необхідно заздалегідь передбачити раціональність розміщення технологічного устаткування та провести акустичну обробку приміщень. По-четверте, необхідно упровадити вживання засобів індивідуального захисту.

Для зниження рівня запиленості слід використовувати сучасні аспіраційні системи, що забезпечить ефективне знепилювання і надійне очищення повітря від дрібних часток пилю на території виробничих приміщень. Т. ч., забезпечується чистота повітря за рахунок утилізації пилових викидів з мінімальним експлуатаційним та капітальним затратами.

Для послаблення дії психофізіологічних факторів необхідно розробити графік роботи з максимально можливою кількістю перерв. В результаті має покращитися фізичний стан та працездатність працюючих у лабораторії.

### 6.3 Виробнича санітарія

Істотний вплив на рівень працездатності людини має мікроклімат, показниками якого є [37]:

- 1) температура повітря;
- 2) відносна вологість повітря;
- 3) швидкість руху повітря;
- 4) інтенсивність теплового випромінювання.

Для проведення досліджень необхідні аналітики, інженери – електроніки, програмісти. Наприклад, робота інженера – електроніка відноситься до категорії робіт середньої тяжкості II а. В холодну пору року оптимальною для нього є температура 18-20°C, а швидкість руху повітря – 0,2 м/с. В теплий період року температура повітря в приміщенні має сягати 21-23°C, а повітря має рухатись зі швидкістю 0,3 м/с. Оптимальне значення відносної вологості має складати 40-60% протягом всього року. Інтенсивність теплового випромінювання не повинна перевищувати 35 Вт/м<sup>2</sup>.

Приміщення має бути обладнане механічною загальною вентиляцією з метою регулювання рухливості повітря, припустимої температури та відносної вологості повітря. Тому за напрямом руху повітря вентиляція має бути припливно-витяжною, а механізм дії повинен здійснюватися за допомогою



теплого напору. Для підтримання гранично припустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони необхідно установити локальний тип вентиляції із витяжним напрямом руху повітря. Механізм дії такої вентиляції має бути найбільш ефективним. Тому необхідно застосовувати ежектори. За механізмом спонукання центральна та локальна вентиляційні системи мають бути механічними, бо є ефективнішими за штучні.

Згідно до п. п. 4.4, розміри приймачів і випромінювачів системи визначення концентрації озону становлять до 5 мм. Тому, згідно до СНиП П-4-79 [38], у приміщенні лабораторії виконуються зорові роботи високої точності класу III б.

Природне освітлення в приміщенні має бути комбінованим, тобто здійснюватися за допомогою віконних прорізів та світових ліхтарів. При цьому КПО повинен становити 5%.

Значення комбінованого штучного освітлення має становити 1000 лк. При цьому використовуються світильники з газорозрядними лампами високого тиску типу ДРЛ. Це пояснюється їх високою надійністю, високими показниками освітленості та невеликими кількостями спожитої енергії.

#### 6.4 Електробезпека

Значення відносної вологості робочого приміщення лабораторії має не перевищувати 60%. Т. ч., воно є сухим [39]. Лабораторне приміщення не характеризується наявністю струмопровідної підлоги, високої температури, хімічно активного чи органічного середовища, територією відкритих електроустановок. Тому такий об'єкт не має підвищеної небезпеки ураження електричним струмом.

Основними споживачами електроенергії є робоче устаткування та газорозрядні лампи. Електрична мережа характеризується змінним струмом та напругою до 1 кВ. Електромережа має ізольовану нейтраль джерела живлен-

ня, оскільки в нормальному режимі роботи є значно безпечнішою порівняно з мережею з глухозаземленою нейтраллю.

Захист дослідників від ураження електричним струмом при дотику до струмоведучих частин має забезпечуватися виконанням наступних заходів захисту:

- дотриманням відповідних відстаней до струмоведучих частин або шляхом закриття, обгороджування струмоведучих частин;
- застосуванням блокування апаратів та загороджуючих пристроїв для запобігання помилкових операцій та доступу до струмоведучих частин;
- використанням попереджуючої сигналізації, написів і плакатів;
- застосуванням пристроїв для зниження напруженості до допустимих значень;
- створенням ізоляції струмоведучих частин.

## 6.5 Пожежна та техногенна безпека

Причинами пожеж на об'єкті може бути виникнення статичного струму, коротке замикання, «людський фактор», несправність обладнання. Потенційними джерелами загорання є синтетичні тверді речовини, горючі розчини, електроустаткування.

В робочому приміщенні лабораторії присутні горючі та важкогорючі рідини, тверді речовини та матеріали. Згідно СНіП 2.01.02-85 [40], основні приміщення об'єкту мають категорію пожежонебезпечності В. Оскільки робоче приміщення лабораторії знаходиться всередині будівлі і в ньому знаходиться горюча речовина з температурою спалаху більше 61°C, то це є пожежонебезпечна зона класу П І. При вірогідності пожежі на об'єкті є вірогідність загорання рідких нерозчинних у воді речовин. Т.ч., клас вірогідності пожеж – В2. Будівля має несучі та загороджуючі конструкції з бетону та за-

лізобетону з наявністю листових та плитних негорючих матеріалів. В покриттях споруди є незахищені сталеві конструкції. Тому будівля відноситься до II ступені вогнестійкості, а межа вогнестійкості її основних конструкцій – до 1 год.

Для своєчасного гасіння пожежі до моменту прибуття служби пожежної безпеки необхідна наявність пожежного водопроводу – внутрішнього та зовнішнього. Він має бути підключений до побутової системи водопостачання. Згідно до [41], кількість затраченої води на пожежу при зовнішньому гасінні має становити 10 л/с, а максимальний термін відновлення пожежного об'єму води складає не більше 36 год. При застосування внутрішнього водопроводу затрати становлять не менше 2-5 л/с [42]. При цьому кожен приміщення слід зрошувати двома струменями - по одному струменю з двох різних пожежних шаф.

Згідно [42], у приміщенні мають бути в наявності переносні ВП-8 та пересувні ВП-50 вогнегасники. Оскільки мають місце електроустановки, то обрано порошкові вогнегасники, кожен з яких має свій обліковий номер. Переносні вогнегасники розміщені шляхом навішування за допомогою кронштейнів на вертикальні конструкції на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника і на відстані від дверей, достатній для їх повного відчинення. Для зазначення місцезнаходження вогнегасників на об'єкті встановлені вказівні знаки, що розташовуються на видних місцях на висоті 2,25 м від рівня підлоги як у середині, так і поза приміщенням.

Згідно до [43], на території всієї будівлі встановлюється два пожежних стенди. До комплекту засобів пожежогасіння, які розміщуються на одному стенді, слід включати: вогнегасники - 3 шт., ящик з піском - 1 шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу розміром 2 x 2 м - 1 шт., гаки - 3 шт., лопати - 2 шт., лопати - 2 шт., сокири - 2 шт.

Для швидкого повідомлення про пожежу облаштовано електричну пожежну сигналізацію, яка виявляє займання на початковій стадії, що забезпечує успішну боротьбу з вогнем. Обрано універсальну комбіновану автомати-

чну систему, що одночасно реагує на підвищення температури у приміщенні та на появу диму. Пожежні оповіщувачі встановлені на висоті 15 м.

У будівлі, де розміщено лабораторію, встановлено протипожежний режим, що включає наступне:

- порядок проведення тимчасових пожежонебезпечних робіт ;
- порядок прибирання відходів, зберігання забрудненого спецодягу та ганчір'я;
- порядок відключення від мережі електрообладнання у разі пожежі;
- порядок огляду й зачинення приміщень після закінчення роботи;
- порядок проходження посадовими особами навчання й перевірки знань з питань пожежної безпеки;
- проведення з працівниками протипожежних інструктажів та занять з пожежно-технічного мінімуму з призначенням відповідальних за їх проведення;
- створення схеми евакуації;
- порядок організації експлуатації і обслуговування наявних технічних засобів протипожежного захисту;
- порядок проведення планово-попереджувальних ремонтів та оглядів електроустановок, опалювального, вентиляційного, технологічного та іншого інженерного обладнання.

При виникненні пожежі необхідно здійснити негайну евакуацію людей з лабораторії у найкоротші терміни. Безпека евакуації досягається в тому випадку, якщо тривалість евакуації людей з лабораторії не перевищує тривалості пожежі. Евакуаційні шляхи і виходи утримуються вільними і у разі виникнення пожежі забезпечують безпеку під час евакуації всіх людей, які перебувають у лабораторії. У робочому приміщенні лабораторії з проведення досліджень наявний один евакуаційний вихід, що відповідає нормі [43]. Двері на шляху евакуації відчиняються в напрямку виходу з будівлі. Шляхи евакуації, що не мають природного освітлення, постійно освітлюються електричним світлом. Евакуаційні виходи позначені світловими покажчиками з напи-

сом «Вихід» білого кольору на зеленому фоні, підключеними до джерела живлення.

## 6.6 Розробка блискавкозахисту

Для запобігання небезпечних проявів атмосферної електрики для захисту будівлі, де розміщено лабораторію, від пожеж та руйнувань застосовують блискавко захист. Оскільки будівля з лабораторією відноситься до пожежо-небезпечного класу П-І, а середня тривалість грози складає понад 20 год на рік, то категорія блискавко захисту III [44]. Від прямих ударів блискавки будівля захищена блискавковідводом, що відводять струм блискавки у землю. Оскільки будівля має не горизонтальну покрівлю, то раціональним є використання стержневого або тросового блискавковідводу. Для цього обрано подвійний стержневий блискавковідвід. В ньому блискавко приймач розташований вертикально відносно поверхні землі. Вихідні дані для розрахунку типу та розмірів зони захисту та висоти блискавковідводу наведені в табл. 6.1

Таблиця 6.1 – Вихідні дані для розрахунку блискавкозахисту

1	Висота будівлі, $h_x$	6 м
2	Ширина будівлі, $S$	60 м
3	Довжина будівлі, $L$	144 м
4	Параметр зони захисту, $h_c$	24 м
5	Питома густина ударів блискавки в землю, $n$	$7 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$

Для визначення типу зони захисту розраховуємо очікувану кількість  $N$  ударів блискавкою на рік у будівлю прямокутної форми:

$$N = [(S + 6 h_x)(L + 6 h_x) - 7,7 h_x^2] 10^{-6} n \approx 0,108 \quad (6.1)$$

Оскільки  $0,1 N \leq 2$ , то тип зони захисту при використанні стрижневого блискавковідводу – Б. Це означає, що розглянута зона має надійність 95% та вище.

Зона захисту одиночних стержневих блискавковідводів висотою  $h \leq 150$  м являє собою круговий конус з вершиною  $h_0 \approx h$ , що визначається як:

$$h_0 = 0,92 h . \quad (6.2)$$

На рівні землі зона захисту утворює круг радіусом  $r_0$ :

$$r_0 = 1,5 h . \quad (6.3)$$

Горизонтальний переріз зони захисту на висоті захисної споруди  $h_x$  являє собою коло радіусом  $r_x$ :

$$r_x = 1,5(h - h_x / 0,92). \quad (6.4)$$

Зона захисту подвійного стержневого блискавковідводу висотою  $h \leq 150$  м представлено на рис. 6.1. Торцеві області зони захисту визначаються згідно (6.2) – (6.4) для обох типів зон захисту.

Блискавковідводи розташовуються на відстані  $L=75$  м. Тоді за допомогою номограми (рис. 6.2) визначимо їх висоту.

Згідно рис. 6.2, значення висоти становить 30 м. Оскільки  $h L \leq 6h$ , то внутрішні області зон захисту подвійного стержневого блискавковідводу мають наступні габаритні розміри:

$$r_c = r_0 = 45 \text{ м}; \quad (6.5)$$

$$r_{cx} = r_0 (h_c - h_x) / h_c = 33,75 \text{ м}. \quad (6.6)$$

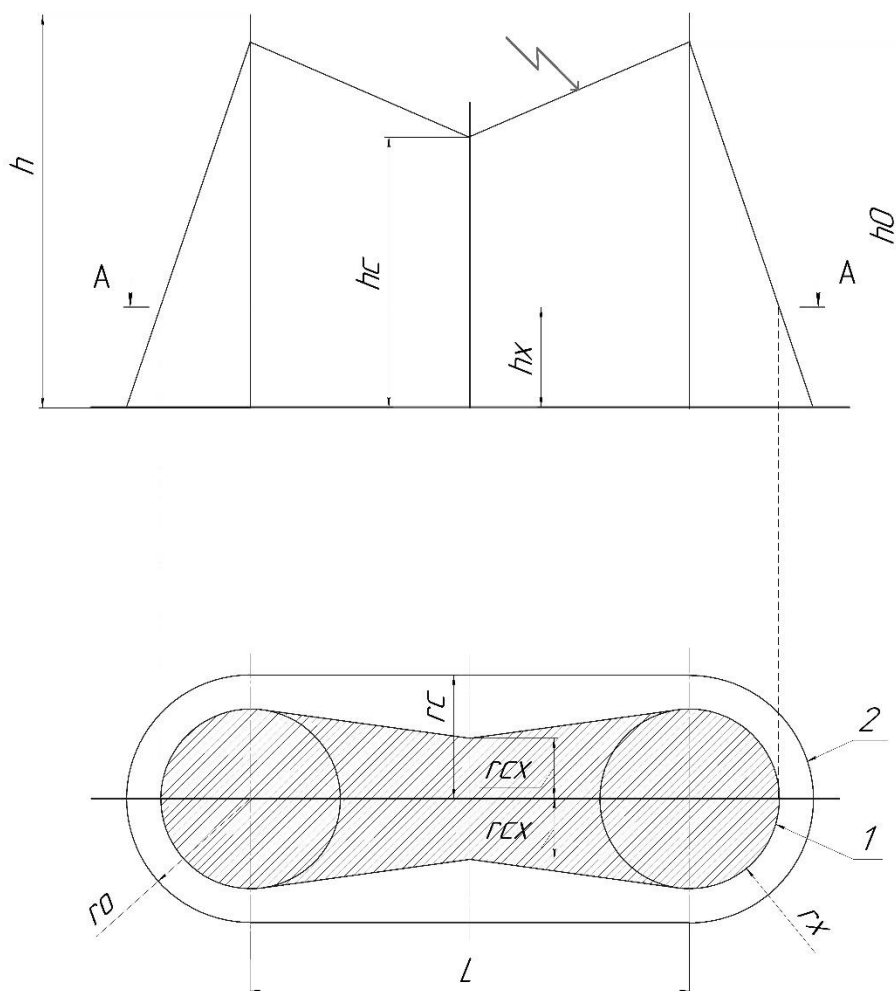


Рисунок 6.1 – Зона захисту подвійного стержневого блискавковідводу на висоті  $h_x$  (1) та на рівні землі (2)

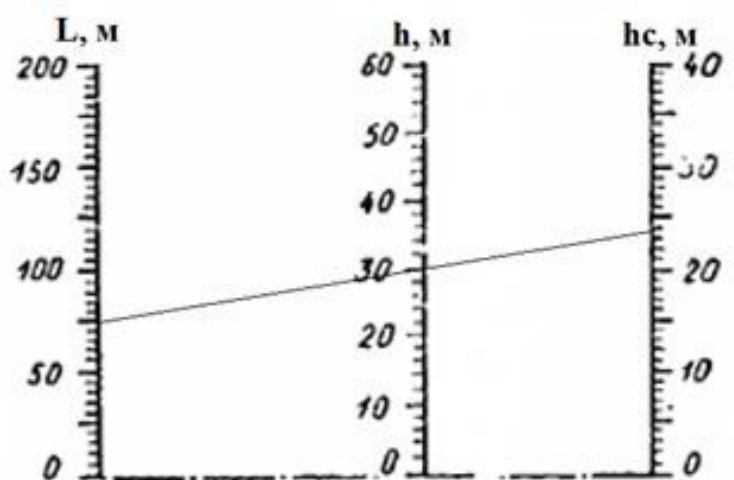


Рисунок 6.2 – Номограма для визначення висоти подвійного стержневого блискавковідводу в зоні Б

Згідно (6.1), (6.3),  $h_0 = 27,6$  м;  $r_{x1,2} = 35,2$  м.

Т. ч., проаналізовано потенційні небезпечні та шкідливі фактори у приміщенні лабораторії з моделювання системи визначення концентрації озону. При цьому розроблено заходи з поліпшення умов праці. Проаналізовано електричну, пожежну та техногенну безпеку середовища лабораторії. Розроблено блискавкозахист, де у якості приймача розряду обрано подвійний стрижневий блискавковідвід із розрахованою висотою 30 м.



## ВИСНОВКИ

1. Показано, що існує потреба у точних, надійних і специфічних відносно озону методах прямого вимірювання та датчиках для вимірювання концентрації озону в озонованій воді

2. На основі методу аналізу ієрархій встановлено, що для реалізації моделей вимірювального тракту системи визначення концентрації озону найбільший глобальний пріоритет має пакет програм Matlab Simulink.

3. Розроблено фільтр Чебишева першого типу для моделі поглинання випромінювання молекулами озону у оптичному каналі датчика.

4. Розроблено візуально – блочну модель оптичного каналу абсорбційного датчика озону.

5. Запропоновано трипроменеву структуру датчика озону, для дослідження якої розроблено моделі основного, опорного та широкосмугового каналів.

6. Визначено структуру блоку обробки сигналів датчиків і режимів проведення вимірювання, що дозволяє мінімізувати величину похибки під дією випадкових завад.

7. Показано, що у діапазоні модуляції від 0,1 Гц до 11 Гц похибка вимірювання концентрації озону зростає від 0,1 % до 2,75 % за поліноміальним залежністю п'ятого ступеню від частоти.

8. Встановлено, що термін виконання проекту, який необхідно прийняти для того, щоб не зірвати строки виконання з ймовірністю 90%, становить 86 робочих днів.

9. Визначені потенційні небезпечні та шкідливі фактори у приміщенні лабораторії з моделювання системи визначення концентрації озону і розроблено заходи з поліпшення умов праці.

10. Результати роботи пройшли апробацію на двох науково-технічних конференціях [23, 31].

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Majewski J. Methods for measuring ozone concentration in ozone-treated water. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012. Vol. 88, No 9b. P. 253–255.
2. Izdebski T., Dors M., Mizeraczyk J. River Water Remediation Using Electrohydraulic Discharges or Ozonation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011. Vol. 39, No 3. P. 953–959.
3. Грудинкин А. П., Пискарева В. М. Технологические и технические особенности метода обеззараживания воды ультрафиолетом. *Сантехника*. 2016. № 5. С. 52–56.
4. Blondeau R. Metallurgy and mechanics of welding: processes and industrial applications. John Wiley & Sons, 2013. 512 p.
5. Критська Т. В., Туришев К. О., Таранець А. В. Екологічні та технічні перспективи застосування кисню й озону. *Металургія*. 2016. № 2. С. 119–122.
6. Baba S., Satoh S., Yamabe C. Development of measurement equipment of half life of ozone. *Vacuum*. 2002. No 65. P. 489–495.
7. Yershov B. G. et al. Kinetic Regularities of Ozone Decomposition in Water. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2009. Vol. 31, No 6. P. 381–388.
8. Cullen P. J. et al. Modelling approaches to ozone processing of liquid foods. *Trends in Food Science and Technology*. 2009. No 20. P. 125–136.
9. Jun-Seok Oh et al. In-situ UV Absorption Spectroscopy for Observing Dissolved Ozone in Water. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2016. Vol. 29, No 3. P. 427–432.
10. Marcus T. C. E. et al. Transmittance optimization for high sensitivity ozone concentration measurement. *Sensors and Actuators by Chemistry*. 2016. No 229. P. 528–533.

11. Gordon I. E. et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. No 203. P. 3–69.
12. Devkota J., Ohodnicki P., Greve D. SAW Sensors for Chemical Vapors and Gases. *Sensors*. 2017. No 17. P. 801.
13. Garcia G., Allen A. G., Cardoso A. A. A New and Simple Visual Technique Based on Indigo Dye for Determination of Ozone in Ambient Air. *Water Air Soil Pollution*. 2014. No 225. P. 1836.
14. АСТ Компонентс : Электрохимические газовые датчики и сенсоры : Озон O<sub>3</sub> : Электрохимические газовые датчики и сенсоры. Озон O<sub>3</sub>. URL: <http://www.gassensor.ru/ru/gas/ozon-o3> (дата звернення 01.12.2020).
15. Бобков Ю. В. Дослідження електрохімічних сенсорів озону для малогабаритного переносного індикатора / вимірювача концентрації озону. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2016. № 15. С. 5–11.
16. Кісельов Є. М., Алексієвський Д. Г., Туришев К. О. Датчик озону для дезінфектора рідини та повітря. *III Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи та технології в медицині» (ISM–2020)* : збірник наукових праць Харків: Національний аерокосмічний університет, 2020. С. 186–187.
17. Li Y. et al. High power deep UV - LEDs for analytical optical instrumentation. *Sensors and Actuators by Chemistry*. 2018. No 255. P. 1238–1243.
18. Khan S., Newport D., Le Calvé S. Development of a Toluene Detector Based on Deep UV Absorption Spectrophotometry Using Glass and Aluminum Capillary Tube Gas Cells with a LED Source. *Micromachines*. 2019. No 10. P. 193.
19. Light & Radiation Sources | Hamamatsu Photonics. URL : <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/light-and-radiation-sources/index.html> (дата звернення 01.12.2020).

20. Venugopalan H. UVC LEDs enable cost-effective spectroscopic instruments. *Laser Focus World*. 2015. No 51. P. 81–85.

21. Khan S., Newport D., Le Calvé S. Gas Detection Using Portable Deep-UV Absorption Spectrophotometry : A Review. *Sensors*. 2019, No 19. P. 5210.

22. Total UV solution provider : Seoul VIOSYS SETi - UV LED Product Catalog download. URL: <http://www.s-et.com/en/product/SETi.pdf>. (дата звернення: 01.12.2020).

23. Масленников Д. Розробка структури системи визначення концентрації озону. *III Молода наука - 2020 : збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених : том V : «Секція Інженерного інституту ЗНУ»*. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. С. 63–64.

24. UV Sensor Module GUVVC-T21GH. URL: <http://www.geni-uv.com/download/products/GUVVC-T21GH.pdf>. (дата звернення: 01.12.2020).

25. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. Москва : Горячая линия – Телеком. 2007. 464 с.

26. Макаренко В. Программа моделирования Multisim Blue и ее основные возможности. *ЭКиС*. 2014. № 10. С. 12.

27. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и VisSim по элементам телекоммуникационных систем. Москва : Солон-Пресс. 2010. 481с.

28. Курбатова Н. В., Пустовалова О. Г. Основы MatLab в примерах и задачах : учебно-методическое пособие. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет. 2017. 69 с.

29. Швець Є. Я., Головка О. П. Техніко-економічне обґрунтування проектно-конструкторських робіт : методичні вказівки до самостійної роботи та виконання дипломних і контрольних робіт. Запоріжжя : ЗДІА. 2010. 17 с

30. Александров С. Е. и др. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра. *Журнал технической физики*. 2009. Том 79, Вып. 6. С. 112–118.

31. Кісельов Є. М., Масленников Д. А. Моделювання оптичного каналу датчика озону. *Матеріали XXV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів. Енергетика, електроніка та інформаційні технології*. Запоріжжя : ІННІ ЗНУ. 2020. Т. 3. С. 53.

32. Алексєєв О. Г., Алексієвський Д. Г., Шмалій С. Л., Таранець А. В. Підсумкова атестація здобувачів вищої освіти другого рівня «магістр» : методичні рекомендації до виконання дипломних робіт з напрямку підготовки 171 «Електроніка». Запоріжжя : 2018. 30 с.

33. Батенко Л. П., Загородних О. А., Ліщинська В. В. Управління проектами : навчальний посібник. Київ : КНЕУ. 2003. 231 с.

34. Бэ́гьюли Ф. Управление проектом. Москва : ФАИРПРЕСС. 2002. 208 с.

35. Малишева І. В. Охорона праці та техногенна безпека : методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та техногенна безпека» дипломного проекту (роботи). Запоріжжя : ЗДІА. 2011. 24с

36. Девясилов В. А. Охрана труда. Москва : Форум. 2009. 496с.

37. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Введение 1989-01-01]. Москва : Стандартинформ, 2006. 48 с.

38. СНиП II-4-79. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Ч. II. Естественное и искусственное освещение. [Введение 1980-01-01]. Москва : Стройиздат, 1980. 48 с.

39. Правила устройства электроустановок. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 648 с.

40. СНиП 2.01.02.-85. Строительные нормы и правила. Противопожарные нормы. [Введение 1987-01-01]. Москва : Издательство стандартов, 1991. 22 с.

41. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. [Введение 1985-01-01]. Москва : Стройиздат, 1985. 133 с.

42. СНиП 2.04.01-85. Строительные нормы и правила. Внутренний водопровод и канализация зданий. [Введение 1986-01-07]. Москва : Госстрой, 1986. 55с.

43. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні. URL : [http://leonorm.com.ua/portal/P/NL\\_DOC/UA/200401/Nakaz\\_126.htm](http://leonorm.com.ua/portal/P/NL_DOC/UA/200401/Nakaz_126.htm) (дата звернення 01.12.2020).

44. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций / Электронная электротехническая библиотека. URL : <http://electrolibrary.info/molniya.pdf>. (дата звернення 01.12.2020).

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	кп	Примітка
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д1	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Характеристика методів вимрювання		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д2	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Модель оптичного каналу		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.С1	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Схема електрична принципова		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д3	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Модель основного датчика озону		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д4	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Модель опорного каналу		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д5	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Модель широкопугавого каналу		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д6	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Модель вимрювального тракту		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д7	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Модель системи з постійними джерелами		
A1			ЕС М.191531.00.00.00.00.Д8	Синтез моделі вимрювального тракту	1	
				системи визначення концентрації озону		
				Моделювання впливу завод		

ЕС М.191531.00.00.00.00				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підп.	Дата
Розроб.		Масленников		11.2.20
Перевір.		Кісельов		11.2.20
Н.контр.		Туришев		
Затверд.		Критська		
Синтез моделі вимрювального тракту				
системи визначення концентрації озону				
Літ.	Арк.	Арк.шів		
		1		
ІННІ ЗНУ 8.1719				