

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і
технологій

**Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи**

(тип кваліфікаційної роботи)

магістра

(освітній ступінь)

на тему: **«Підвищення точності та багатофункціональності визначення
прозорості води на основі багатохвильового оптичного
випромінювання»**

ХАІ.502.560м.23О.172.1905078 ПЗ

Виконав: студент 6 курсу групи № 560м
Галузь знань 17 Електроніка та
телекомунікації

(код та найменування)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

(код та найменування)

Освітня програма Радіоелектронні
комп'ютеризовані засоби

(найменування)

Борейко С.С.

(прізвище та ініціали студентки)

Керівник: к.т.н., Бабаков М.Ф.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: д.т.н., проф. Невлюдов І.Ш

(прізвище та ініціали)

Харків – 2024

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 3	В.Ф. Бабаков, професор		

Нормоконтроль _____ В. М. Олійник « ____ » січень 2024 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
2	Аналітичний огляд методів вимірювання прозорості води	28.10.2023	
3	Аналітичний огляд приладів для вимірювання прозорості води	5.11.2023	
4	Аналітичний огляд методів підвищення точності	24.11.2023	
5	Аналітичний огляд методів підвищення багатфункціональності приладів для вимірювання прозорості води	28.11.2023	
6	Розробка методів підвищення точності вимірювання прозорості води	7.12.2023	
7	Розробка методів підвищення багатфункціональності приладів для вимірювання прозорості води	10.12.2023	
8	Подача матеріалів роботи на рецензування	18.12.2024	
9	Усунення зауважень	18.01.2024	
10	Подача матеріалів на нормоконтроль	22.01.2024	
11	Подача матеріалів на антиплагіат	23.01.2024	
12	Захист кваліфікаційної роботи	26.01.2024	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Борейко С.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Бабаков М.Ф.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи містить:: 102 с., 4 табл., 24 рис., 7 дод., 25 джерел.

АЛГОРИТМ, ВИМІРЮВАННЯ, ПРОЗОРИСТЬ, ТОЧНІСТЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ

Об'єкт дослідження – процес дослідження параметру прозорості води з використанням методів підвищення точності та багатофункціональності приладів вимірювання прозорості води.

Мета роботи – підвищення точності та багатофункціональності визначення прозорості води на основі багатохвильового оптичного випромінювання

Методи дослідження – математичне та цифрове моделювання процесів визначення прозорості води.

У даній кваліфікаційній роботі була проведена розробка методів підвищення точності та багатофункціональності приладів для вимірювання прозорості води. Були отримані результати моделювання методів підвищення точності та багатофункціональності визначення прозорості води.

Моделювання зроблено за допомогою системи Python.

Розробка призначення для фахівців в сфері контролю чистоти води.

ABSTRACT

Explanatory note for the qualification work includes: 102 pages, 4 tables, 24 figures, 7 appendices, 25 sources.

ALGORITHM, MEASUREMENT, TRANSPARENCY, ACCURACY, TURBIDIMETER, MODELING, MULTIFUNCTIONALITY

The object of the study is the process of investigating water transparency using methods to enhance the accuracy and multifunctionality of water transparency measurement devices.

The aim of the work is to enhance the accuracy and multifunctionality of water transparency determination based on multi-wavelength optical radiation.

Research methods include modeling the operation of methods using Python to obtain optimal approaches.

In this qualification work, methods were developed to increase the accuracy and multifunctionality of devices for measuring water transparency. Results of modeling methods to enhance accuracy and multifunctionality in determining water transparency were obtained.

Modeling was done using Python.

Development intended for professionals in the field of water purity control.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ВОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ.....	10
1.1 Основні показники води.....	10
1.2 Аналіз основних приладів для вимірювання прозорості води які можуть використовувати багатохвильові вимірювання	16
1.3 Методи фотометрії.....	21
1.4 Аналіз прикладів приладів які можуть використовувати багатохвильовий метод вимірювання прозорості води.....	27
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА МЕТОДІВ ОБ'ЄДНАННЯ ДАНИХ З ПРИЛАДУ.....	46
2.1 Методи збільшення точності.....	46
2.2 Методи підвищення точності	51
2.3 Методи збільшення багатофункціональності та методи об'єднання даних приладу для вимірювання прозорості води.	66
3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПРОЗОРСТІ ВОДИ.....	71
3.1 Аналіз методів фільтрації даних	72

3.2 Моделювання об'єднання даних методом зваженого усереднення.....	76
3.3 Моделювання поглинання спектру частинками різного розміру.....	76
3.4 Моделювання розрахунку розміру частинок за рахунок дифракції.....	79
3.5 Моделювання використання мультиплексування.....	80
3.6 Аналіз ефективності запропонованих рішень.....	82
ВИСНОВКИ.....	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	87
ДОДАТОК А Побудова графіків спектрів поглинання світла частками в залежності від їх розміру.....	90
ДОДАТОК Б Розрахунок розмірів часток за допомогою дифракції.....	92
ДОДАТОК В Моделювання зашумленого сигналу та роботи різних методів фільтрації.....	95
ДОДАТОК Г Моделювання 5 подібних зашумлених сигналів.....	98
ДОДАТОК І Результат роботи медіанного фільтру та фільтру Калмана...	99
ДОДАТОК Д Сигнал з використанням усереднення без фільтрації	100
ДОДАТОК Е Моделювання ефекту мультиплексування на сигнал з завадами.....	101

Вступ

Актуальність теми. Актуальність проблеми забруднення води та потреби в її якісному моніторингу на сьогоднішній день виявляються особливо загостреними через стрімкий розвиток промисловості та розширення каналізаційних систем. [1] Забруднення води може стати наслідком недостатньо ефективної очистки або викидів промислових підприємств та інших джерел, що породжує серйозні екологічні проблеми.

Одним із ефективних методів визначення забруднення води, особливо нерозчинними забруднювачами, є використання спеціальних приладів для вимірювання прозорості води. [3] Зазвичай такі прилади використовують дорогі та складні технології, а їхні габарити можуть ускладнювати їхнє використання в певних умовах.

Розробка та використання вдосконалених методів підвищення точності дозволить використати більш прості прилади більш ефективно. Також враховуючи особливості структури подібних приладів за їх допомогою можна визначити розмір дрібних частинок, що в подальшому може бути використано для збільшення якості фільтрації води.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності та багатофункціональності методів вимірювання прозорості води на основі багатохвильових оптичних випромінювань, аналіз методів підвищення точності, та пошук методів підвищення багатофункціональності приладів вимірювання прозорості води використовуючи багатохвильові вимірювання, та проведення моделювання методів підвищення точності, та моделювання методів підвищення багатофункціональності.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішення наступних завдань:

- провести аналітичний огляд методів вимірювання прозорості води;

- провести аналітичний огляд засобів вимірювання прозорості води;
- провести аналітичний огляд методів підвищення точності та багатофункціональності;
- провести моделювання роботи методів підвищення точності та багатофункціональності;
- оцінити результат роботи методів підвищення точності та багатофункціональності.

Об'єкт дослідження – процес дослідження методів підвищення точності та багатофункціональності приладів вимірювання прозорості води.

Предмет дослідження – методи підвищення точності та багатофункціональності приладів вимірювання прозорості води.

Методи дослідження – моделювання алгоритмів роботи методів з використанням системи Python з метою визначення найкращих з них.

Наукова новизна отриманих – отримано нові методи які підвищують багатофункціональність приладу для вимірювання прозорості води, та методи підвищення точності вимірювань.

Практична цінність отриманих – отримані методи підвищення точності та багатофункціональності дозволять використовувати прилади для вимірювання прозорості води з менш якісних компонентів не втрачаючи точності вимірювань. Також вони дозволять не вносячи конструкційних змін додати до приладу додаткові функції

1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ВОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

1.1 Основні показники води

Вода з хімічною формулою H_2O , яку ми називаємо хімічно чистою, залишається ідеалом, який у природних умовах ніколи не досягається. Головною характеристикою природної води є її властивість бути універсальним розчинником, і тому вона завжди містить різноманітні сполуки, елементи, іони та гази у розчиненому вигляді. Кількісний та якісний склад природної води залежить від географічних умов та геологічної будови водоносних шарів.

Наявність розчиненої вуглекислоти з ґрунту дозволяє воді взаємодіяти з мінеральними солями, ефективно розчиняючи їх у процесі свого руху. Таким чином, кожне джерело питної води має відповідати стандартам, визначеним у Державному стандарті України ДСТУ 7525:2014 "Вода питна. Вимоги та методи контролю якості".[1]

Показники якості води можна класифікувати на хімічні, фізичні та бактеріологічні. [1] Хімічні показники включають в себе різноманітні речовини та елементи, які можна виміряти та оцінити за їхньою концентрацією у воді. Фізичні показники описують фізичні властивості води, такі як температура, прозорість та кольоровість. Бактеріологічні показники вказують на наявність мікроорганізмів та бактерій у воді.

Загальний підхід до оцінки якості води враховує цей комплекс показників, щоб забезпечити воду, яка відповідає стандартам та безпеки для споживачів.

1.1.2 Біологічні властивості води

Мікроорганізми, що потрапляють у воду, можуть викликати різні захворювання, включаючи тиф, паратиф, амебіаз, гастроентерит, дизентерію, гепатит, холеру, поліомієліт, туберкульоз та інші. Організація охорони здоров'я наголошує, що до 80% захворювань у світі пов'язані з вживанням води низької якості. Пошкодження санітарних норм у системі водопостачання поглиблює цю проблему.

Кількість мікробів, особливо бактерій, у воді є ключовим мікробіологічним показником. Санітарні норми встановлюють, що кількість бактерій у 1 мл питної води не повинна перевищувати 100. Присутність бактерій кишкової палички (*E. coli*) також свідчить про забруднення води фекальними стоками та можливість потрапляння збудників різних захворювань.

Для оцінки мікробіологічної чистоти води використовують різні показники, такі як колі-титр та колі-індекс для бактерій кишкової палички. Колі-титр визначається методом бродіння при 37°C і вказує на мінімальний об'єм води, у якому виявлена одна бактерія кишкової палички. Колі-індекс вимірює кількість кишкових паличок у 1 л води, застосовуючи методи мембранних фільтрів чи безпосереднього посіву різних об'ємів води на щільних живильних середовищах.

Для отримання більш точної оцінки мікробіологічної чистоти води, крім колі-титру та колі-індексу, рекомендується аналізувати інші мікроорганізми, такі як ентерококи, спорові анаероби, кишкові бактеріофаги. Такий підхід дозволяє зрозуміти рівень забруднення та наявність різних мікроорганізмів у воді, що є важливим для забезпечення безпеки питної води.

1.1.3 Хімічні параметри якості води

Значними характеристиками якості води є рівень рН, окисненість, наявність азотних сполук, розчинені гази, сухий залишок, твердість, лужність, хлориди, сульфати, залізо, марганець, а також специфічні забруднювальні речовини, радіонукліди та важкі метали.

Рівень рН визначає кислотність води, розподілену на сильно кислі ($\text{pH} < 3$), кислі (3,0–5,0), слабо кислі (5,0–6,5), нейтральні (6,5–7,5), слабо лужні (7,5–8,5), лужні (8,5–9,5) та сильно лужні ($\text{pH} > 9,5$). Окисненість визначає споживання кисню при окисненні органічних речовин у воді, зазвичай коливається від 2 до 8 мг/л O_2 . Збільшена окисненість може вказувати на промислове забруднення, що потребує санітарних заходів.

Азотні сполуки (нітрити, нітрати, амоній) зазвичай утворюються під впливом стічних вод та промислових викидів. Вони можуть вказувати на забруднення води.

Сухий залишок відображає кількість розчинених солей у воді та ділить води на категорії за їхньою концентрацією.

Хлориди та сульфати, походженням з різних джерел, також впливають на якість води. Вони можуть викликати корозію та пошкодження бетонних конструкцій.

Лужність та твердість води можуть також впливати на її використання для побутових та технічних потреб, від органолептичних характеристик до ефективності мийних засобів та технічного обладнання.

Залізо та марганець у водах, хоча в низьких концентраціях не шкідливі для здоров'я, можуть впливати на смак, колір води та сприяти розвитку бактерій у водопровідних системах.

Розчинені гази, які часто зустрічаються у воді – кисень, сірководень, азот, метан, вуглекислий газ – можуть, за певних умов, сприяти корозії бетону і металевих конструкцій. Важкі метали та токсичні речовини, що потрапляють у воду переважно через промислові стічні води – свинець, цинк, мідь, арсен, анілін, ціаніди та інші, можуть суттєво нашкодити здоров'ю людини. Також воду можуть забруднювати радіоактивні речовини природного та штучного походження.

До біологічних показників якості води відноситься біохімічне споживання кисню (БСК). Його визначають за допомогою бактерій, які використовують забруднення води як джерело живлення. БСК – це кількість кисню, яку мікроорганізми використовують для синтезу клітин та енергії протягом циклу реакцій.

Оцінка якості води з позицій санітарної мікробіології включає визначення мікробного числа та кількості бактерій групи "Колі". Оптимальним санітарним показником є кишкова паличка. Воду вважають питною, якщо вона містить менше однієї кишкової палички на мілілітр (за "Колі–титром"). Кількість кишкових паличок виражається як "Колі–індекс".

Фізичні показники якості води включають температуру, прозорість, кольоровість та органолептичні характеристики, такі як смак і запах. Температура води залежить від її походження, а прозорість та каламутність – від наявності різних домішок. Кольоровість може бути обумовлена наявністю різних речовин у воді. Смак і запах води можуть бути природними або виникати через додавання промислових речовин.

Отже, якість води оцінюється за різними показниками, які вказують на її властивості. Кількість та вид показників, необхідних для оцінки якості води, може змінюватись в залежності від рівня забрудненості та призначення води.

1.1.4 Фізичні властивості води

1.1.4.1 Запах

Запах води є важливим органолептичним показником, який може бути показником якості. Інтенсивність запаху води може бути виміряна за певною шкалою, як описано:

0 – Відсутність запаху: Немає відчутного запаху води.

1 – Дуже слабкий запах: Слабкий запах, який може бути помічений лише фахівцем.

2 – Слабкий запах: Виявляється, якщо на нього звернути увагу, але не завдає неприємних відчуттів споживачеві.

3 – Помітний запах: Відчутний споживачем і може викликати неприємні відчуття під час пиття.

4 – Виразний запах: Запах, який змушує утриматися від вживання води.

5 – Сильний запах: Вода з таким запахом вважається непридатною для пиття.

Запах води може бути обумовлений різними факторами, такими як хімічний склад, температура, рівень забруднення та інші біологічні та гідрологічні фактори. Концентрація речовин у воді може впливати на її запах, і важливо визначити інтенсивність запаху для забезпечення безпеки та комфорту питної води.

1.1.4.2 Кольоровість

Платино–кобальтова шкала використовується для вимірювання кольоровості води. Цей показник відображає інтенсивність фарбування води і вимірюється в градусах цієї шкали. Води можуть мати різний рівень кольоровості, від одиниць до тисяч градусів, що відображає рівень забруднення чи наявність певних речовин у воді.

Наприклад, для питної води нормою є вміст кольоровості не більше 35 градусів за платино–кобальтовою шкалою. Це допомагає забезпечити воду, яка має прийнятний зовнішній вигляд і відповідає стандартам безпеки для споживання.

Також, якщо йдеться про рекреаційні зони водойм, кольоровість води важлива, оскільки вона не повинна бути візуально помітною в стовпчику води заввишки 10 см. Це важливо для комфортного та безпечного використання водних розваг. Наявність великої кольоровості може свідчити про проблеми з якістю води та наявність забруднень, що можуть бути несприятливими для здоров'я.

1.1.4.3 Мутність води

Каламутність води — це характеристика, яка вказує на присутність тонкодисперсних забруднювачів у воді, таких як різноманітні частки чи домішки, які можуть бути різних форм (наприклад, нерозчинні або колоїдні) та походження (органічні чи неорганічні). [3] Каламутність води може спостерігатися внаслідок різноманітних факторів, таких як частки глини,

піску, органічних решток та інших твердих часток, які можуть знаходитися у воді.

Під час лабораторних досліджень каламутність оцінюється візуально за такими ознаками як опалесценція (легке блискуче відображення світла), а також наявність слабкої, помітної або сильної каламутності.

У питній воді мутність не повинна перевищувати $1,5 \text{ мг/дм}^3$ по каоліну, вказуючи на те, що рівень каламутності не перевищує певних норм та стандартів якості. Метод визначення каламутності часто використовує турбідиметрію, що базується на вимірюванні оптичних властивостей розчинів. Результати вимірювань виражають у мг/дм^3 (для каоліну) або в одиницях мутності на кубічний дециметр (ЕМ/дм^3), якщо використовується суспензія формазиу як стандартний зразок.

1.2 Основні принципи роботи приладів для вимірювання прозорості води

Мутнометр – прилад, призначений для визначення каламутності води. Мутність води обумовлена вмістом завислих у воді дрібнодисперсних домішок – нерозчинних або колоїдних часток різного походження. Мутність є важливим параметром для питної та стічної води, напоїв, а також на хімічному виробництві.

Історія виміру каламутності має свій початок у 1900 році, коли Уіпл і Джексон спробували виміряти цей показник кількісно. Вони створили стандартну суспензію, у якій містилося 1000 мільйонних часток кізельгуру в дистильованій воді. Ця суспензія стала основою для "кремнеземної" шкали

каламутності, що використовувалась для калібрування турбідиметрів того часу.

Джексон використовував цю шкалу для свого діафанометра та створив "свічковий турбідиметр Джексона". Він опирався на одиниці ррт, вимірюючи каламутність за рахунок кількості кремнезему. Під час вимірювання зразок вливали в колбу, доки полум'я, спостережене зверху, не перетворювалося на безформне світіння.

Однак складність була в тому, що створення сталого стандарту виявилось проблематичним через використання різних природних матеріалів для їхнього формування, таких як сукнувальна глина, каолін, донні відкладення.

1.2.1 Нефелометр

Нефелометр – це прилад для аналізу хімічних речовин, що ґрунтується на вимірі інтенсивності розсіяного світла дисперсними системами. [7] Цей метод використовується для вимірювання концентрації частинок у суспензіях, туманах або емульсіях.

Нефелометрія – це метод оптичного аналізу, оснований на вимірюванні інтенсивності світла, яке розсіюється практично перпендикулярно падаючому світлу. Розсіювання відбувається, якщо розмір частинок перевищує довжину хвилі електромагнітного випромінювання. Чим більше каламутна дисперсія, тим сильніше вона розсіює світло.

Нефелометр вимірює кількість світла, розсіяного частинками у рідині. Оптимально використовувати його для розчинів з низькою концентрацією.

Проте, він має обмеження – визначення каламутності нижче 25 JTU було складним, інколи вимагало втручання людини.

Згодом, щоб поліпшити точність вимірювань, розробили нові турбідиметри з удосконаленими джерелами світла. Проте, нефелометр залишається найкращим для точного визначення каламутності у воді. Це важливий показник, який може сигналізувати про зміни у якості води.

У нефелометрії, коли зразок має однорідні частки або використовується джерело світла із відомими властивостями, можна застосовувати монохроматичне світло, наприклад, світлодіоди. Вони випромінюють у вузькому спектрі, що робить їх більш ефективними й потужніми для їхньої роботи меншою.

Результат взаємодії світла зі зразком реєструється за допомогою детектора. Сучасні нефелометри використовують різні типи детекторів: фотоелектронні помножувачі, вакуумні фотодіоди, кремнієві фотодіоди та фотоелементи на основі сульфідів кадмію. [4] Кожен з них має свою спектральну чутливість, залежну від довжини хвилі.

Оптична геометрія також впливає на результати. Кут детектування розсіяного світла, який у більшості випадків становить 90° , забезпечує меншу чутливість до зміни розміру частинок та мінімізує вплив стороннього світла.

Одним з важливих параметрів є довжина оптичного шляху: з її збільшенням зростає чутливість, але може постраждати лінійність показань через множинне розсіювання та поглинання. На відміну, скорочення оптичного шляху покращує лінійність, але знижує чутливість на низьких концентраціях.

Стандарти, такі як USEPA та ISO, рекомендують обмеження довжини оптичного шляху до 10 см для підтримки оптимальних умов вимірювань.

1.2.2 Турбідиметр

Турбідиметр – це пристрій для кількісного аналізу складу речовин на основі вимірювання поглиненого світла суспензією. Він визначає кількість розсіяного світла через колоїдний розчин, що містить частинки речовини. Чим більша каламутність зразка, тим більше світла розсіюється, що призводить до вищих показників.

Зразок проходить через мережу гасників для бульбашок, які затримуються чи піднімаються до поверхні. [5,8] Після цього зразок потрапляє в вимірювальну камеру турбідиметра і зливається через виріз у ринві.

1.2.3 Трансмиссометр

Трансмиссометр – це пристрій для вимірювання послаблення світла, що проходить через середовище, таке як повітря або вода. Зазвичай використовується для визначення видимості в атмосфері та каламутності в океані. Простірний апарат складається з джерела світла заданої частоти та інтенсивності (лампа, лазер або світлодіод), розташованого на відомій відстані від детектора. Детектор перетворює світло в електричну напругу, пропорційну інтенсивності світла. [9] Прозорість середовища визначається вимірюванням частки світла від джерела, що досягає детектора.

Послаблення світла газами і частинками в атмосфері виражається коефіцієнтом ослаблення, що є мірою втрати світла через розсіювання та поглиблення на одиницю відстані. Для отримання цього значення інтенсивність світла, виміряна детектором, порівнюється з очікуваною, якщо середовище було б без газів або частинок. Коефіцієнт екстинкції залежить від

довжини хвилі світла, оскільки різні гази та частинки поглинають і розсіюють світло різною мірою. У видимому діапазоні використовується довжина хвилі 550 нм для повітря і 665 нм для води, але для різних довжин хвиль можуть бути проведені окремі вимірювання.

Трансмиссометри можуть використовуватися для перевірки видимості на злітно–посадкових смугах аеропортів або для вимірювання непрозорості димового шлейфу на електростанціях. У водоймах світло може послаблюватися через зважений мул, порушені відкладення та мікроорганізми, і таку мутність можна виміряти за допомогою трансмиссометра з джерелом світла та детектором, розташованими на протилежних кінцях трубки.

1.2.4 Диск Секкі

Диск Секкі, запропонований Анджело Секкі, є класичним інструментом для визначення прозорості в глибоких водоймах. Використовуючи плоский диск білого або чорно–білого кольору діаметром 20–40 см, [2] його опускають на глибину до повного зникнення, що визначає показник прозорості в гідрології та океанології.

Два типи дисків Секкі використовуються для морських та прісноводних умов. Цей метод був вперше застосований у 1865 році капітаном Чіальді, але перші виміри прозорості морської води відбулися під час російської кругосвітньої експедиції у 1815–1818 роках.

Незважаючи на поширення електронних приладів для вимірювання прозорості води, диск Секкі залишається у використанні для рутинних вимірів. Максимальні значення прозорості були зафіксовані в різних морях: до 80

метрів в морі Уедделла біля Антарктиди в 1986 році, 66 метрів у Саргасовому морі (Атлантичний океан), 40–50 метрів у Індійському океані, 62 метри в Тихому океані та 53 метри в східній частині Середземного моря.

Теоретично, у дистильованій воді диск Секкі має зникати на глибині приблизно 80 метрів.

1.3 Методи фотометрії

Фотометрія представляє собою набір методів і теорій, які вивчають енергетику процесів випромінювання у всьому оптичному спектрі. Прилади, призначені для вимірювання енергетичних і світлових параметрів випромінювання, отримали назву фотометричних приладів.

Система фотометричних величин і одиниць дозволяє числово характеризувати параметри випромінювання в оптичному діапазоні. Ця система включає в себе величини та одиниці, розроблені для видимого випромінювання, а також для енергетичних вимірів як у видимій, так і в невидимій частині випромінювання оптичного діапазону.

Основною одиницею, до якої прив'язані одиниці вимірювання енергетичних і світлових величин, є ват (Вт) – одиниця потужності.

Енергетичні та світлові величини можуть бути виміряні різними одиницями, проте між ними існує зв'язок, що дозволяє виконувати відповідні конвертації.

Потік випромінювання – це середня потужність, яка передається оптичним випромінюванням протягом тривалого періоду, що суттєво перевищує час електромагнітних коливань. Спектральний склад випромінювання визначається спектральним розподілом потоку

випромінювання – функцією, яка описує залежність монохроматичного випромінювання від довжини хвилі.

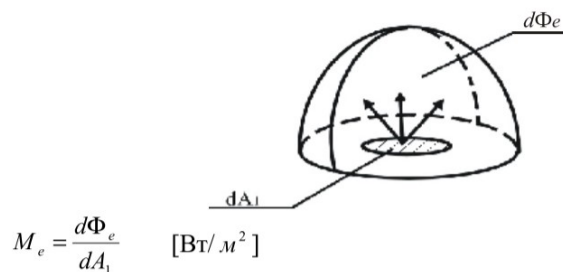
Добуток визначає потужність, що переноситься потоком в інтервалі довжин хвиль.

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad ; \quad (1)$$

Енергія випромінювання eQ – енергія, переносимо випромінюванням

$$Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt \quad ; \quad (2)$$

Енергетична світність eM – відношення потоку випромінювання $e d\Phi$, що випускається малим елементом поверхні в півсферу до площі цього елемента dA .



Рисуно 1.1 – Енергетична світність

Енергетична освітленість (опромінення) eE – відношення потоку випромінювання $e d\Phi$, що падає на малий елемент поверхні, до площі цього елемента dA .

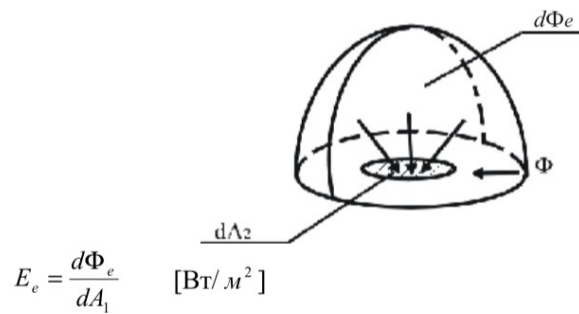


Рисунок 1.2 – Енергетична освітленість

Сила випромінювання I_e – відношення потоку випромінювання $d\Phi_e$ що поширюється від джерела в певному напрямку усередині малого тілесного кута, до цього тілесного кута.

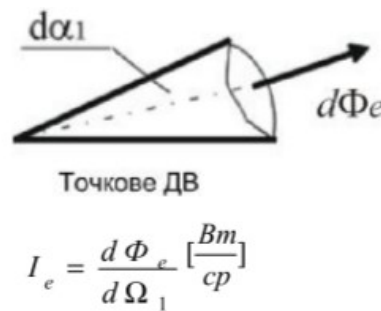
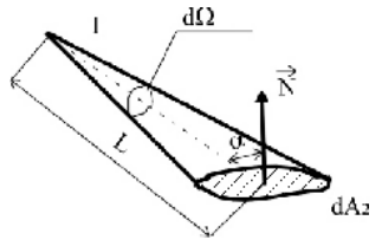


Рисунок 1.3 – Сила випромінювання

Концепція сили випромінювання відноситься до точкового джерела випромінювання, [21–24] розміри якого невеликі в порівнянні з відстанню, на якій аналізується його вплив.

Тілесний кут представляє собою частину простору, яка обмежена кінечною поверхнею довільної форми з вершиною в точці розташування джерела випромінювання. [21–24] Одиницею вимірювання тілесного кута є стерadian (ср.), який визначається як тілесний кут, вершина якого розташована в центрі сфери з радіусом 1 метр і який вирізає на поверхні сфери площу в один квадратний метр.



Для малих тілесних кутів:

$$d\Omega = \frac{dA_2}{l^2} \cos \alpha$$

Для будь-яких тілесних кутів:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\varphi)$$

Рисунок 1.4 – тілесний кут

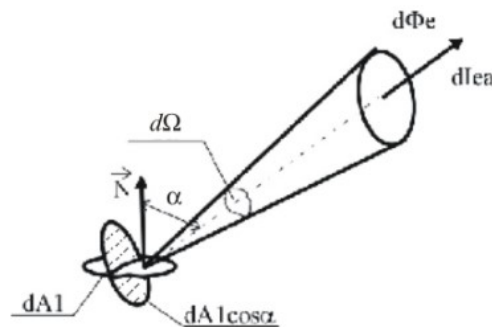
Якщо для точки, в якій розташоване джерело випромінювання, в різних напрямках визначити значення сили випромінювання, то поверхня, на яку наносяться кінці векторів \vec{I} , отриманих від цих значень, отримує назву фотометричного тіла випромінювача.

Розподіл інтенсивності в довільній площині, яка проходить через центр джерела випромінювання, визначається індикатрисою випромінювання.



Рисунок 1.5 – розподіл величин I

Енергетична яскравість L_y випромінюючої поверхні dA в даному напрямку α
 – відношення вимірюваної в цьому напрямку енергетичної сили світла до видимої площі випромінюючої поверхні.



$$L_{e\alpha} = \frac{dI_{e\alpha}}{dA_1 \cos \alpha} \frac{Bm}{cp \cdot m^2}$$

$$L_{e\alpha} = \frac{d^2 \Phi_{e\alpha}}{dA_1 d\Omega \cos \alpha}$$

Рисунок 1.6 – Енергетична яскравість

Енергетична яскравість описує розподіли потоку випромінювання по тілесному куту та по випромінюючій поверхні.

Світлові величини ґрунтуються на сприйнятті людським зором потужності випромінювання. [21] У цьому контексті використовують світловий потік і відповідні світлові величини для оцінки впливу потоку випромінювання на людське зорове сприйняття. Процес визначення світлових величин аналогічний визначенню енергетичних величин.

Перехід від енергетичних величин до світлових враховує факт, що людське око реагує по-різному на випромінювання різних довжин хвиль. Якщо виміряти потік випромінювання в невеликому діапазоні довжин хвиль $\lambda \dots \lambda + \Delta\lambda$ для певного джерела та визначити світловий потік у тому ж діапазоні, то відношення світлового потоку до потоку випромінювання (Φ) буде характеризувати світлову ефективність.

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} ; \quad (3)$$

Відношення K для будь-якої довжини хвилі випромінювання до максимального значення $K_{\lambda m}$ називається відносною спектральною світловою ефективністю (для поля зору 4°). [24]

$$V^0(\lambda) = \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda m}} ; \quad (4)$$

За одиницю світлового потоку прийнята незалежна величина – люмен, рівна 1/683 Вт на довжині хвилі 0,555 мкм.

Одиницею світлового потоку визначено незалежну величину – люмен, що дорівнює 1/683 Вт на довжині хвилі 0,555 мкм. Щодо одиниці сили світла, вона була змінена кілька разів у процесі розвитку фотометрії. Ці зміни були обумовлені потребою використання стабільних і відтворюваних джерел випромінювання для створення єдиної фотометричної системи. Початково сила світла відтворювалася парафіновими свічками, а потім використовувалися полум'яні випромінювачі, металеві поверхні, нагріті до температури плавлення платини, і, нарешті, електричні лампи накалювання. Кожен наступний метод забезпечував більш точну відтворюваність порівняно з попереднім.

На XVI Генеральній конференції мір і ваг (1979 р.) було прийнято визначення одиниці сили світла – кандела. Кандела представляє собою силу світла в конкретному напрямку від джерела, яке випромінює монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі 0,555 мкм, при цьому сила випромінювання в цьому напрямку дорівнює 1/683 Вт/порівн

З урахуванням цього визначення і того, що 1 люмен дорівнює 1/683 Вт при $\lambda=0,555$ мкм, одиниця сили світла тепер визначається як сила світла від точкового рівномірного джерела, світловий потік від якого в межах тілесного кута порівняння дорівнює 1 люмену.

1.4 Аналіз прикладів приладів які можуть використовувати багатохвильовий метод вимірювання прозорості води

Багатохвильовий метод вимірювання прозорості води є технікою, яка використовує різні довжини хвиль світла для визначення прозорості або проникнення світла через водне середовище. Цей метод дозволяє отримати більше інформації про властивості води, порівняно з традиційними методами вимірювання.

Основна ідея багатохвильового методу полягає в тому, щоб вимірювати прозорість води на різних довжинах хвиль світла. Водне середовище може взаємодіяти зі світлом різним чином в залежності від його довжини хвилі. Різні складові води, такі як солі, органічні речовини, планктон та інші частки, можуть поглиблювати або розсіювати світло різними способами. Вимірюючи прозорість на різних довжинах хвиль, дослідники можуть отримати інформацію про різні аспекти води, такі як концентрація розчинених речовин, турбідність, кількість планктону тощо. Цей метод дозволяє отримувати

детальну картину водного середовища і забезпечує більш точне вимірювання прозорості порівняно з використанням лише однієї довжини хвилі.

Багатохвильовий метод може використовувати різні типи сенсорів або приладів, такі як спектрофотометри, флуорометри, або інші пристрої, які здатні вимірювати і реєструвати світло при різних довжинах хвиль.

1.4.1 Аналізатори рідин турбідиметричні АЖТ–94

Аналізатори рідини АЖТ–94 використовуються для вимірювання каламутності різних типів води та контролю вмісту частинок у них. Вони застосовуються у різних сферах – від теплоенергетики до комунальної сфери та промисловості. Підход оснований на турбідиметричному методу, що вимірює ослаблення оптичного випромінювання, яке проходить через розчин, що містить частинки. Аналізатори доступні у чотирьох модифікаціях залежно від конструкції та умов вимірювання. Також, є різні варіанти виконання залежно від діапазону температур контрольованих рідин.

Ці аналізатори можуть бути налаштовані для різних діапазонів вимірювань та живуть від змінного струму мережі. Найважливіше, що вони не мають негативного впливу на навколишнє середовище та не викидають шкідливі речовини, що робить їх екологічно безпечними для використання.

Ці аналізатори можуть бути налаштовані для різних діапазонів вимірювань та живуть від змінного струму мережі. [11] Найважливіше, що вони не мають негативного впливу на навколишнє середовище та не викидають шкідливі речовини, що робить їх екологічно безпечними для використання.

Таблиця 1.1 – аналізатор турбідиметричний АЖТ–94

Діапазони вимірювань (за формазином, ЄМФ та/або коаліном, мг/дм ³), що встановлюються виробником на вимогу замовника на вибір (95–5) % шкал пропускання: – перший, ЄМФ – Третій. ЄМФ Третій. ЄМФ	1–501, 5–75 02–100–
Межа основної наведеної похибки від верхньої межі вимірювань. %	+2,5
Час встановлення уніфікованих вихідних електричних сигналів (для рівня 0,9). с, не більше	5
Тривалість одноразового виміру (при номінальному значенні витрати аналізованої проби через кювету 1,5 дм ³ /хв),	90 ±10
Середнє напрацювання на відмову, год, не менше	16000
Повний середній термін служби, роки, не менше	10
Діапазон температур контрольованої рідини, °С	190
Потужність, В–А, не більше	16
Маса (без додаткових пристроїв), кг, не більше	8
Габаритні розміри оптичного датчика, мм, не більше:	460x350x150
Довжина виносного кабелю, м	7,5 (до 50)

Габаритні розміри електронного блоку, мм	310x170x100
--	-------------

Ці аналізатори можуть бути налаштовані для різних діапазонів вимірювань та живуть від змінного струму мережі. Найважливіше, що вони не мають негативного впливу на навколишнє середовище та не викидають шкідливі речовини, що робить їх екологічно безпечними для використання.

1.4.2 Проточний турбідиметричний датчик каламутності та кольоровості (in-line) TurbiGuard

Мутномер TurbiGuard – це інноваційний пристрій, розроблений спеціально для постійного моніторингу рівня каламутності рідини. Його особливість полягає в здатності вимірювати значення загального оптичного поглинання проби, та передавати результати каламутності у різних одиницях вимірювання, таких як ЕВС (використовувана у харчовій промисловості), ЕФМ, NTU та мг/л.

Лазерний світлодіод з довгою хвилею 880 нм служить джерелом випромінювання, забезпечуючи ефективне використання електроенергії та довговічність пристрою, що перевищує 10 років. [12] Застосування сапфірових фотометричних вікон, щільно притертих до корпусу датчика, спрощує обслуговування та дозволяє пристрою працювати при різних температурах та агресивних умовах.

Пристрій має компактну конструкцію, де джерело, приймач та оптична схема об'єднані в одному корпусі, що уникне потреби в калібруванні після обслуговування. Цей мутномер може бути легко встановлений в стандартну вставку трубопроводу типу VARIVENT.

Таблиця 1.2 – технічні характеристики Проточного турбідиметричного датчик каламутності та кольоровості (in-line) TurbiGuard

Принцип вимірювання:	Світлопоглинання
Довжина хвилі джерела:	880 нм (лазерний світлодіод)
Товщина оптичного шару:	10 мм
Діапазон вимірювань:	0 .. 100 / 0 .. 1,000 EBC 0 .. 400 / 0 .. 4,000 NTU 0 .. 69,000 ASBC
Розширення:	0.5 EBC / 2 NTU / 34 ASBC
Час відповіді:	< 0.3 с при 0 часу накопичення (відгук на скачок → перемикання)
Температура проби:	-10 ... 100 °C
Тиск проби:	≤ 1 МПа (10 Бар) @ 100 °C
Установка в трубопровід:	Стандартна вставка VARIVENT DN 40 ... DN 125
Матеріал оптичних вікон:	Сапфір
Умови навколишнього середовища:	-10 .. +50 °C відн. Вологість 0.. 100%
Електроживлення:	9...30 В постійного струму, < 2 Вт
Клас захисту:	IP 66
Очищення:	CIP/SIP придатний до 120 °C @ 2h

Вага:	2,1 кг
-------	--------

Для налаштування та калібрування пристрою не потрібні додаткові пристрої – це можна зробити за допомогою ноутбука через вбудований USB–порт. Сигнал від датчика передається безпосередньо в центральний контролер через звичайну струмову петлю 0/4–20 мА. Такий пристрій дозволяє ефективно та точно контролювати рівень каламутності рідини в різних умовах експлуатації.

1.4.3 Датчик каламутності ТМА–31

Датчик мутності ТМА–31 компактний та економічний в обслуговуванні прилад. Призначений для визначення каламутності та завислих частинок у воді.

Мутномір ТМА–31 має міцний пластиковий корпус та надійний кабель спеціально для використання на очисних спорудах, водоканалах, у будь–яких установках водопідготовки та водоочищення як побутового, так і промислового призначення.

Датчик мутності ТМА–31 може працювати у складі станцій екологічного моніторингу на озерах, річках чи свердловинах. Завдяки низькому енергоспоживанню допускається застосовувати турбідиметр як сенсор до портативного приладу (для експрес–замірів), так для тривалої автономної роботи з даталоггером.

Датчик мутності ТМА–31 – це сучасний цифровий прилад, який використовується для вимірювання каламутності води в системах очищення та підготовки води. Оптичний сенсор датчика мутності ТМА–31 забезпечує надійні виміри в діапазоні від 0 до 4000 NTU (4500 мг/л). [10]Наявність

вбудованої пам'яті на 10 калібрувань полегшує експлуатацію та знижує витрати на обслуговування.

Таблиця 1.3 – технічні характеристики ТМА–31

Сенсор або Принцип вимірювання	Оптичний
діапазон вимірів	від 0 до 4000 NTU (4500 мг/л)
Точність	±5% від ВПІ
Сенсор температури	Є, термоопір. Автоматична температурна компенсація
Вихідний сигнал	RS485 (Modbus RTU) та SDI–12
Напруга живлення	від 5 до 12 В постійного струму
Ступінь пиловологозахисту	IP68
Енергоспоживання	У режимі очікування не більше 40 мкА У режимі вимірювання RS485 – 820 мкА У режимі вимірювання SDI12 – 4.2 мА
Матеріал корпусу	міцний промисловий пластик DELRIN

Корпус мутноміра ТМА–31 виконаний з міцного пластику, стійкого до агресивних середовищ та механічних впливів. Це важливо, тому що одне з найпоширеніших застосувань – контроль стічних вод. Кабель датчика міцно закріплений за допомогою армованого конектора. Матеріал зовнішнього обплетення кабелю – поліуретан (PU). Стійкий до агресивних середовищ

(стічні води) та механічних впливів. У холодну пору кабель не «дубеє» і залишається гнучким навіть при температурі $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 1.7 – Датчик каламутності ТМА–31

У корпусі датчика мутності знаходиться оптичний сенсор, принцип дії якого полягає в інфрачервоному розсіюванні під кутом 90° . Розсіювання відбувається на довжині хвилі 850 нм. Дана технологія дозволяє проводити калібрування датчика каламутності за допомогою стандартного розчину формазину.

Крім сенсора мутності у приладі також є датчик температури води (термоопір). Це параметр сервісу, але він допомагає отримати більш чітку картину при аналізі даних про якість води.

Мутнометр ТМА–31 має сучасний цифровий модуль обробки та перетворення сигналу. Електроніка отримує дані з сенсорів каламутності та температури води, перетворюючи їх на уніфіковані вихідні сигнали RS–485 (Modbus RTU) або SDI–12. Це дозволяє підключати датчик безпосередньо до

будь-якого промислового контролера. За рахунок відкритого протоколу передачі даних ТМА–31 сумісний із будь-яким промисловим контролером, до якого його можна підключити безпосередньо – Siemens, ОВЕН, Segnetics та інші. На ринку існує дуже небагато рішень із подібним функціоналом. Найчастіше інші виробники пропонують системи, що складаються з датчиків каламутності та зовнішніх перетворювачів (контролерів). При цьому датчики мають пропрієтарний протокол і не можуть бути підключені ні до чого іншого, крім «рідного» контролера.

Метод визначення забруднення води турбідиметром – оптичний 90 °. Прилад видає інформацію, виходячи з нефелометричного методу. Але датчик каламутності ТМА–31 може бути відкалібрований звичайнісіньким розчином формазину. Робоче тиск – до 5 бар, тобто. мутномір можна занурити під воду на 50 метрів.

Аналізатор мутності має п'ять діапазонів вимірювань з автоматичним або ручним перемиканням. Якщо ви точно знаєте в якому діапазоні необхідно вимірювати каламутність води, то ви можете вибрати потрібний з 5 відкаліброваних діапазонів. Якщо точних даних немає – виберіть "автоматичний" режим і датчик буде сам підлаштовуватися під якість середовища. Крім заводських калібрування в пам'ять сенсора можна записати до 10 користувачів. Все це можливо завдяки цифровій технології датчика мутності ТМА–31 та наявності інтерфейсу RS485.

ТМА–31 використовується як стаціонарний мутомер, але завдяки низькому енергоспоживанню та міцній конструкції його можна експлуатувати як портативний пристрій. Це дозволяє проводити виміри та дослідження в тих умовах, які перш за все необхідні користувачеві, без прив'язки до додаткового обладнання. Для портативного використання рекомендуємо підключати датчик ТМА–31 до аналізатора ПортаЛаб.

Основним напрямком застосування мутнометра є вимірювання каламутності води у водоканалах та на очисних спорудах з передачею даних у систему автоматики. Також застосовується для УЗВ та у відкритих водоймах як контролер при розведенні риб та аквакультур.

Другим напрямком (але не менш важливим) є використання датчика мутності ТМА–31 для проведення екологічного моніторингу у складі автоматизованих гідрологічних (гідрохімічних) станцій або у польових портативних лабораторіях. Він використовується як для регулярних спостережень за якістю води, так і в наукових періодичних дослідженнях у різних ВНЗ та НДІ.

Монтаж турбідиметра ТМА–31 полягає в його фіксації в нерухомому стані у відкритому водоймищі або в трубопроводі. Для цього є кілька додаткових опцій:

Адаптер для фіксації датчика на кінці пластикової труби для відкритого водоймища. Спеціальний адаптер розроблений таким чином, щоб надійно закріпити мутномір і залишити сенсор мутності у середовищі, що вимірюється;

Пластиковий адаптер ДУ50 із поліпропілену для монтажу всередині пластикового трубопроводу. Зазвичай використовується для установки датчика каламутності трубопровід на УЗВ;

Металевий адаптер із приварним ніпелем для монтажу мутноміра до металевого трубопроводу. Дозволяє «врізати» прилад у металевий трубопровід та забезпечити точку вимірювання каламутності.

Якщо вам потрібна закінчена система з датчика каламутності води, перетворювача з дисплеєм та контролера, то у нас є і таке рішення:

Для очисних споруд, водоканалів, промислових підприємств буде актуально мати один контролер із можливістю підключення кількох сенсорів та гнучкого керування ними. Ви отримаєте комплексну систему – підключення кількох датчиків якості води та відображення одночасно до 8 параметрів на сенсорному екрані. Керуйте всіма параметрами з меню на дисплеї без програмування. Також можна подати дискретний сигнал на керування насосом, клапаном або іншим пристроєм.

Якщо ваше завдання полягає у вимірюванні каламутності води з метою моніторингу навколишнього середовища і вам потрібна віддалена передача даних, то датчик мутності ТМА–31 легко інтегрується з нашою станцією Гідрометр Т–7. Завдяки низькому енергоспоживанню датчика станція може працювати тривалий час автономно.

1.4.4 Проточний турбідиметричний датчик (in–line) PhaseGuard

Зміна одного продукту в трубопроводі іншим, а також процес відстоювання з наступним поділом – досить поширений процес, що зустрічається практично на будь–якому виробництві, який часто пов'язаний з неконтрольованими виробничими втратами і, зрештою, зниженням рентабельності. У зв'язку з цим важливим завданням є безперервний контроль за кордоном поділу між продуктами або напівпродуктами у трубопроводі, що дозволяє знизити взаємне перемішування та навантаження на стічні води. Незамінним рішенням цього завдання є спеціально розроблений для цих цілей турбідиметричний датчик (фотометр) PhaseGuard. Поточний фотометр PhaseGuard випускається у трьох модифікаціях для різноманітного застосування (моделі С, Т та НТ). Фіксація межі розділу здійснюється за миттєвим стрибком фотометричного сигналу поглинання. На відміну від

інших фотометрів, присутніх на ринку, PhaseGuard дозволяє реєструвати «фотометричний стрибок» цілком незалежно від часу його виходу і точно визначати оптимальну точку відсікання, що дозволяє найефективніше проводити поділ. Швидкість виміру та чутливість найвища на ринку. Фотометр легко працює в екстремальних умовах, а саме з пробами до 19000 ЕВС за кольоровістю.

Таблиця 1.3 – технічні характеристики проточного турбідиметричного датчику (in-line) PhaseGuard

Принцип вимірювання:		Світлопоглинання
Довжина хвилі джерела:		265 нм, 285 нм, 880 нм , 430 нм (лазерний світлодіод)
Товщина оптичного шару:		10 мм (модель Т та С) 5 мм (модель НТ) 5 або 10 мм (модель UV)
Діапазон вимірювань:		0 .. 100 % Поглинання
Розширення		0.5 % поглинання
Час відповіді:		< 0.3 с при 0 часу накопичення (відгук на скачок → перемикання)
Температура проби:		-10 ... 100 °С

Продовження таблиці 1.3

Тиск проби:		≤ 1 МПа (10 Бар) @ 100 °С
Установка в трубопроводі:		Стандартна вставка VARIVENT DN 40 ... DN 125
Матеріал оптичних вікон:		Сапфір
Умови навколишнього середовища:		-10 .. +50 °С 0.. 100% відн. вологість
Електроживлення:		9...30 В постійного струму, < 2 Вт
Клас захисту: Очищення:		IP 66 CIP/SIP придатний до 120 °С @ 2h
Вага:		2,1 кг

Іншими словами, якщо йдеться про пивоваріння, то інструмент чудово працює навіть із таким темним пивом як Guinness і легко фіксує в ньому межу розділу, наприклад, пиво/дріжджі. Крім того, як джерело випромінювання використовується лазерний світлодіод з довгою хвилі 880 нм (відсікання по каламутності) і 430 нм (відсікання за кольоровістю), що забезпечує найнижче споживання електроенергії та надзвичайно тривалий термін служби самого джерела (більше 10 років). [13] Використання сапфірових фотометричних вікон щільно притертих до корпусу датчика та відсутність ущільнень у конструкції дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати та спростити обслуговування. Розміщення джерела, приймача та всієї оптичної схеми в

одному корпусі дозволяє виключити необхідність юстування під час встановлення датчика після обслуговування. При роботі при низьких температурах немає необхідності продувки оптичної схеми та електроніки. Для роботи та налаштування датчика необов'язково використовувати вторинний пристрій. Для калібрування та налаштування у датчика є вихід USB. Вимірюваний сигнал від датчика передається безпосередньо в центральний контролер звичайної струмової петлі 0/4–20 мА безпосередньо.

1.4.5 Датчики каламутності Endress+Hauser

Датчики мутності від компанії Endress+Hauser застосовуються в галузі очищення та підготовки води для використання в харчовій, хімічній, енергетичній та інших промислових галузях. Вибір конкретного датчика залежить від призначення: для середовищ з низькими показниками каламутності, таких як питна вода, використовують нефелометричні датчики. Для вимірювання високих рівнів каламутності, наприклад, у стічних водах, рекомендується використовувати датчики зважених твердих частинок.

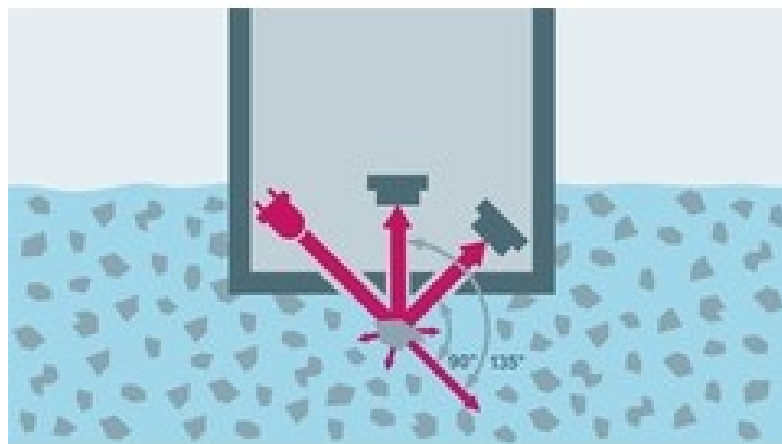


Рисунок 1.8 – принцип роботи датчику каламутності Endress+Hauser

У випадках, коли спостерігаються сильні коливання показників каламутності, використовують абсорбційні датчики, які дозволяють отримати точні виміри, наприклад, для достовірного визначення витоку продукту. Ці датчики обладнані світлодіодною лампою з двома приймачами, розташованими під кутами 90 та 135 градусів. Тверді частинки в середовищі викликають розсіювання падаючого променя, що випромінюється лампою. Рівень мутності або наявність твердих частинок визначається як сума розсіяного світла, яке фотоелементами поглиблюється. Перетворювач виводить кінцеве значення загальної або утримуваної кількості твердих частинок в необхідних одиницях вимірювання, таких як г/л або відсотки загальних твердих речовин.

Датчики на основі нефелометричного принципу вимірювання каламутності відповідають стандарту ISO 7027/EN 27027. Вони мають світлодіодну лампу і приймач світла під кутом 90 градусів. Лампа випромінює промінь в середовище, який розсіюється при зіткненні з твердою частинкою у визначеній області. Приймач перетворює отриману інтенсивність світла в електричний сигнал, який далі конвертується в кінцеве значення каламутності в одиницях вимірювання.

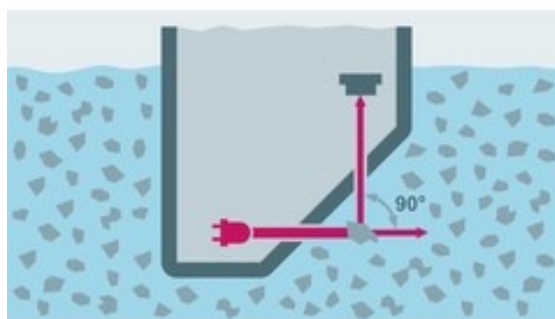


Рисунок 1.9 – принцип роботи нефелометричного датчику каламутності

Endress+Hauser

Абсорбційні датчики каламутності вимірюють поглиблення світла частинками у середовищі. Вони також використовують світлодіодну лампу і приймач, розташований навпроти лампи. Частинки у аналізованому середовищі приглушують світло між лампою та приймачем, що випромінюється. Цей ефект спочатку перетворюється приймачем в електричний сигнал, а потім в кінцеве значення каламутності. Вдосконалені датчики обладнані додатковою лампою та фотоелементом, які використовують інший шлях, що підвищує надійність вимірювань.

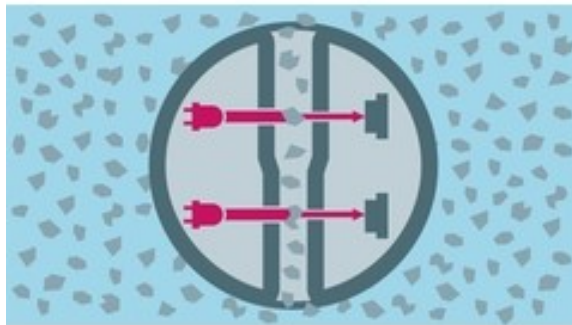


Рисунок 1.10 – принцип роботи абсорбційного датчику каламутності
Endress+Hauser

1.4.6 Датчик мутності DULCOTEST DULCO turb C

Вимірювання мутності за допомогою DULCOTEST® DULCO® turb C – це компактний вимірювальний прилад, який використовує розсіяне світло для визначення ступеня каламутності води в широкому діапазоні вимірювань. Пристрій доступний у різних конфігураціях, що відповідають стандартам ISO та EPA, і може бути з функцією автоматичного очищення або без неї.

Датчики DULCOTEST® DULCO® turb C (версії TUC 1, TUC 2, TUC 3 та TUC 4) є компактними засобами вимірювання мутності в режимі реального часу. Вони складаються з датчика, проточної арматури та вимірювального пристрою. Вимірювальний пристрій має функції відображення результатів, калібрування та передачі даних через сигнал 4–20 мА, а також сигналізацію випадків перевищення граничних значень та помилок пристрою. Оптичний пристрій вимірювання, вбудований у прилад, не контактує з вимірюваним середовищем, використовуючи вимірювальну кювету, що працює в байпасному режимі.

Пристрій ефективно застосовується для обробки питної води на всіх етапах, від неочищеної води до контролю фільтрації та вимірювання каламутності від дрібної суспензії у питній воді. Також, він може контролювати каламутність технічних та стічних вод, а також води, що використовуються у виробництві харчових продуктів та напоїв з рівнем каламутності до 1000 NTU.

Точки вимірювання TUC 3/TUC 4 мають функцію самоочищення за допомогою ультразвуку, що дозволяє зменшити інтервали технічного обслуговування, особливо при роботі з водою, що утворює осад. Принцип вимірювання базується на нефелометрії, де розсіяне світло вимірюється під прямим кутом (90°) відносно спрямованого променя світла.

Показники каламутності можуть відобразитися в NTU (Nephelometric Turbidity Unit – нефелометрична одиниця каламутності) або FNU (Нефелометрична одиниця за формазином). Вимірювання для типів TUC 1/TUC 3 (інфрачервоне світло) відповідає міжнародним стандартам ISO 7027 та DIN EN 27027, тоді як вимірювання для типів TUC 2/TUC 4 (білий світло) відповідає стандарту США USEPA 180.1.

Переваги цього приладу включають компактність, гнучкий діапазон вимірювань, стабільність протягом тривалого часу та здатність до ефективного контролю різних типів води з великими рівнями каламутності.

1.4.7 Мутнометри НАСН

Оптична схема турбідиметрів, що працюють на основі співвідношення сигналів, є важливим фактором для декількох технічних параметрів. Ці параметри включають стабільність, лінійність, чутливість, низький рівень впливу стороннього світла та нечутливість до змін кольору речовини. У пристроях 2100N, 2100AN, 2100AN IS і 2100N IS (де 2100N не має детектора зворотного розсіювання), оптична схема представлена на малюнку 11. Прилад 2100P має лише детектор під кутом 90° та детектор світла. 2100N IS має тільки детектор під кутом 90° .

Основний принцип роботи турбідиметрів 2100N та 2100AN полягає у пропорційній залежності між кількістю розсіяного світла та кількістю частинок у розчині. Галогенова лампа, яка працює при температурі 2700 К, випромінює світло, яке збирається трьома полікарбонатними лінзами. Ці лінзи розроблені для максимального збору світла та проектування зображення нитки на вимірювальну комірку. Додатковий фільтр зміщує пік чутливості детектора в область 400–600 нм згідно з вимогами ЕРА.

Фотодіоди знаходять зміну світла, що проходить через зразок та розсіяного ним. Великий детектор визначає кількість світла, що проходить через зразок. Фільтр із оптично нейтральною щільністю слабшить світло, що падає на детектор. Детектори розташовані під кутами для уникнення відбиття світла від їхніх поверхонь у вимірювальну комірку. Значення каламутності виводиться із співвідношення сигналів детекторів.

Турбідиметри 2100N, 2100AN та 2100AN IS використовують детектор прямого розсіювання для лінеаризації вимірювань при високій мутності. При правильному налаштуванні цей детектор забезпечує лінійні показання в широкому діапазоні, що дозволяє виводити результати в одиницях NTU. Такий пристрій демонструє високу стабільність у часі і не вимагає постійної калібрування.

Величина каламутності обчислюється за такою формулою:

$$T = I_{90} / (d_0 * I_t + d_1 * I_{fs} + d_2 * I_{bs} + d_3 * I_{90}) \quad ; \quad (5)$$

Де T – мутність в одиницях NTU d_1, d_2, d_3, d_4 – калібрувальні коефіцієнти I_{90} – струм нефелометричного детектора I_t – струм детектора світла I_{fs} – струм детектора переднього розсіювання I_{bs} – струм детектора заднього розсіювання.

Це забезпечує точні виміри, причому оптична схема та система співвідношення сигналів мають кілька переваг. Наприклад, у звичайних нефелометрах та інших оптичних пристроях лампи та детектори можуть стати джерелами шуму та дрейфу. Застосування покращених фотодетекторів на основі кремнію усуває ці проблеми, а система компенсації співвідношень уникнула таких проблем, як забруднення оптики чи температурні зміни. Це призводить до стабільності пристрою без необхідності частого калібрування.

Система екранів відокремлює нефелометричний детектор від зовнішнього світла, що підвищує точність вимірювань у випадку проб з низькою каламутністю. Детектор переднього розсіювання забезпечує лінійність в широкому діапазоні без втрати чутливості при малих значеннях каламутності. Це дозволяє отримувати точні цифрові дані, спрощує процес вимірювання і забезпечує високу роздільну здатність.

Співвідношення сигналів також забезпечує нечутливість пристроїв до фарбування. Оскільки світло та розсіяний сигнал проходять через пробу на

приблизно однаковій відстані, вплив фарби знижується, що сприяє точнішим результатам вимірювань. Крім того, детектор зворотного розсіювання має лінійну характеристику при дуже високих рівнях каламутності, розширюючи діапазон вимірювань до 4000 – 10000 NTU.

Висновки в цьому розділі був проведений аналітичний огляд основних параметрів якості води та методів їх визначення. Огляд надав розуміння загальної структури приладів для вимірювання прозорості води. В подальшому за допомогою особливостей загальних принципів побудови цих приладів буде розглянуто різні методи підвищення точності та багатофункціональності. Буде використано те що більша частина приладів використовує 2 датчики 1 під 90 градусів та під 135 градусів. Також буде використано основні діапазони випромінювань подібних приладів.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА МЕТОДІВ ОБ'ЄДНАННЯ ДАНИХ З ПРИЛАДУ

В цьому розділі проведено аналітичний огляд різних методів підвищення точності та багатофункціональності приладу. Обрано найбільш доцільні методи для подальшого математичного моделювання.

2.1 Методи підвищення точності

2.1.1. Використання високоякісних світлодіодів та фотодіодів

Високоякісні світлодіоди та фотодіоди є важливими складовими в будь-якій системі вимірювання, спрямованої на отримання точних результатів. Висока якість світлодіодів визначається їх ефективністю у випромінюванні світла та спектральною стійкістю. Забезпечення широкого діапазону хвильових довжин та мінімізація змін у спектрі дозволяє отримати стабільний сигнал від світлодіодів.

Фотодіоди, в свою чергу, повинні бути чутливими до світла в тому ж самому діапазоні, що і світлодіоди. Використання фотодіодів з високою квантовою ефективністю дозволяє отримувати точні вимірювання при низькому рівні шумів. Більше того, оптимізована геометрія діодів може допомогти уникнути перекривань між світлодіодами та фотодіодами, що може виникнути внаслідок розсіювання світла.

Важливо також враховувати тепловий режим, оскільки висока температура може впливати на ефективність діодів. Застосування високоякісних тепловідведення і систем охолодження дозволяє зберегти стабільність та ефективність світлодіодів та фотодіодів протягом тривалого часу.

2.1.2 Калібрування та корекція параметрів

Калібрування та корекція параметрів є критичним етапом для забезпечення точності та надійності вимірювань пристрою для вимірювання прозорості води. Калібрування передбачає встановлення точного відповідності між вимірюваннями пристрою та стандартними значеннями прозорості води.

Важливо враховувати зміни у властивостях елементів з часом, таким чином, регулярне калібрування може уникнути систематичних похибок та забезпечити сталу точність. Також важливо враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як температурні зміни, які можуть впливати на параметри пристрою.

Корекція параметрів дозволяє уникнути внутрішніх або систематичних похибок у вимірюваннях. Вона включає в себе аналіз та компенсацію будь-яких змін у характеристиках елементів, таких як діоди чи модулятори, що можуть виникнути внаслідок старіння або експлуатаційних умов. Забезпечення постійного моніторингу та автоматизація процесу корекції підвищить стабільність та точність пристрою протягом тривалого періоду експлуатації.

2.1.4. Удосконалення схеми модуляції світла

Удосконалення схеми модуляції світла може суттєво покращити точність вимірювань прозорості води. Це включає в себе оптимізацію методів модуляції, таких як амплітудна, фазова або частотна модуляція, для максимізації стійкості сигналу та мінімізації впливу шумів.

Наприклад, удосконалення алгоритмів модуляції може забезпечити оптимальну форму сигналу, що дозволяє зменшити спотворення та покращити читабельність сигналу. Також важливо враховувати частоту модуляції, оскільки правильний вибір частоти може зменшити вплив зовнішніх факторів та електромагнітних перешкод на сигнал.

Іншим аспектом удосконалення є вдосконалення системи детекції сигналу та його реконструкції. Це може включати в себе використання більш

точних методів фільтрації та аналізу сигналів для відновлення вихідної інформації, що дозволить отримати більш точні результати вимірювань.

2.1.4. Застосування оптимальних матеріалів та конструкцій

Використання оптимальних матеріалів та конструкцій у пристрої для вимірювання прозорості води може суттєво вплинути на точність вимірювань. Наприклад, застосування антирефлексійних покриттів на поверхні скляних елементів може допомогти зменшити втрати світла та спотворення сигналу, що важливо для отримання точних вимірювань.

Також важливо вибирати матеріали, які мають стабільні властивості під час експлуатації, що дозволить уникнути змін у параметрах пристрою. Наприклад, високоякісні пластмаси або композитні матеріали можуть мати меншу схильність до змін у характеристиках під впливом умов експлуатації, що забезпечить стабільність вимірювань.

Вибір оптимальної конструкції пристрою також грає важливу роль у покращенні точності вимірювань. Ергономічна та досконала конструкція може забезпечити надійність фіксації елементів та унікальний спосіб розташування діодів та фотодіодів для максимального зчитування сигналу.

Такі заходи можуть значно підвищити точність та надійність пристрою для вимірювання прозорості води, роблячи його більш ефективним у виконанні завдання.

Звісно, давайте розглянемо ще два пункти: контроль температурного режиму та використання точних модуляторів та провідних елементів для обчислень.

2.1.5. Контроль температурного режиму

Контроль температурного режиму виявляє величезний вплив на точність вимірювань пристрою для вимірювання прозорості води. Значення температури може впливати на характеристики електронних компонентів, зокрема на світлодіоди та фотодіоди, змінюючи їх ефективність та стійкість.

Забезпечення стабільного температурного режиму може досягатися за допомогою термостабілізації елементів, використанням термальних сенсорів та систем охолодження. Це дозволить уникнути відхилень у характеристиках елементів через зміни температури, забезпечуючи стабільність у вимірюваннях протягом тривалого періоду.

Крім того, система контролю температури може бути організована з метою автоматичної корекції параметрів пристрою в залежності від температурних змін, що дозволить підтримувати точність вимірювань при будь-яких умовах експлуатації.

2.1.6. Використання точних модуляторів та провідних елементів для обчислень

Точні модулятори та провідні елементи є ключовими складовими для отримання точних та стабільних вимірювань прозорості води. Використання точних модуляторів дозволяє керувати сигналом світла з високою точністю та стабільністю, що є критичним для отримання достовірних результатів.

Провідні елементи для обчислень виконують ключову роль у обробці даних та розрахунках, що базуються на сигналах, отриманих від світлодіодів та фотодіодів. Високоякісні провідні елементи забезпечують швидку та точну обробку сигналів, знижуючи час реакції системи та забезпечуючи точність результатів.

Окрім високої точності, важливо також враховувати стійкість та надійність цих елементів протягом тривалого часу експлуатації. Застосування елементів з великою стійкістю до впливу зовнішніх чинників допомагає підтримувати стабільність вимірювань протягом тривалого періоду роботи пристрою.

Ці два аспекти, контроль температурного режиму та використання точних модуляторів та провідних елементів, є ключовими для забезпечення точності та стабільності вимірювань прозорості води. Ефективне управління температурою та використання точних елементів можуть значно покращити якість вимірювань, забезпечуючи надійні та точні результати.

2.2 Методи підвищення точності

Сигнали можуть містити різноманітні перешкоди, шуми чи спотворення, що можуть впливати на коректність вимірювань та обробку інформації. Застосування фільтрації дозволяє виділити корисний сигнал, знизити рівень шуму та усунути непотрібні складові, що призводять до збільшення точності приладу.

2.2.1 Використання медіанного фільтру для підвищення точності вимірювань

Однією з характерних властивостей медіанного фільтру є його нелінійність. У багатьох випадках використання медіанного фільтру є більш ефективним порівняно з лінійними фільтрами. Це пояснюється тим, що лінійні обробки оптимальні при розподілі завад, як є рівномірним або гаусівським, що

у реальних сигналах мало ймовірно. [17] У випадках, коли зміни значень сигналів значні порівняно з дисперсією адитивного білого шуму, медіанний фільтр виявляється меншим за значенням середньоквадратичної помилки, ніж оптимальні лінійні фільтри. Особливо ефективним є використання медіанного фільтру для очищення сигналів від імпульсних шумів при обробці зображень, акустичних сигналів, передачі кодових сигналів і т.д.

Медіани вже давно використовуються та досліджуються в статистиці як альтернатива середнім арифметичним значенням при визначенні вибіркового середнього. Медіана послідовності при непарному значенні n є середнім значенням члена ряду, який визначається при впорядкуванні послідовності за зростанням (або спаданням). Для парного n медіана визначається як середнє арифметичне двох середніх інтервалів відліку впорядкованої послідовності.

Медіанний фільтр є віконним фільтром, який ковзає по масиву сигналу, повертаючи на кожному кроці один з елементів, що потрапили у вікно (апертуру) фільтру. Вихідний сигнал y_k ковзного медіанного фільтру шириною $2n+1$ для поточного відліку формується з вхідного часового ряду відповідно до визначеної формули:

$$y_k = \text{med}(x_{k-n}, x_{k-n+1}, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, x_{k+n-1}, x_{k+n}) \quad (6)$$

Де $\text{med}(x_1, x_m, x_{n+1}) = x_{n+1}, x_m$ – елементи варіаційного ряду, який ранжований за зростанням $x_1 = \min(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) \leq x_1 \leq x_2 \leq x_{n+1} = \max(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$. [17] Таким чином, медіанна фільтрація полягає в заміні значень відліку в центрі апертури медіанним значенням початкових інтервалів всередині апертури фільтру. На практиці, для спрощення алгоритмів обробки даних, апертура фільтру, як правило, встановлюється з непарною кількістю відліків.

Фільтри з одновимірною медіаною. Процедура медіанної фільтрації реалізується шляхом локальної обробки відліків у ковзному вікні, що включає певну кількість відліків сигналу. Для кожного положення вікна відліки, виділені в ньому, розташовані в порядку зростання або спадання значень. Середній елемент у впорядкованому списку відліків називається медіаною даної групи відліків. Цей відлік потім замінює центральний відлік у вікні оброблюваного сигналу.

Медіанний фільтр відноситься до категорії нелінійних фільтрів, який замінює аномальні точки та викиди медіанним значенням, і це робиться незалежно від їх амплітудних значень. Цей фільтр є стійким за визначенням і може анулювати навіть нескінченно великі відліки.

Завдяки цій особливості медіанні фільтри, при правильно вибраній апертурі, можуть зберігати чіткі межі об'єктів, ефективно пригнічуючи і перешкоджаючи слабко корелюючим завадам. На прикладі обробки сигналу з імпульсними шумами за допомогою медіанного та трикутного фільтрів із однаковими розмірами вікна $N=3$ ця перевага медіанного фільтру стає очевидною. Початкові та граничні умови фільтрації враховують кінцеві значення сигналів або медіану, яка вписується в межі апертури.

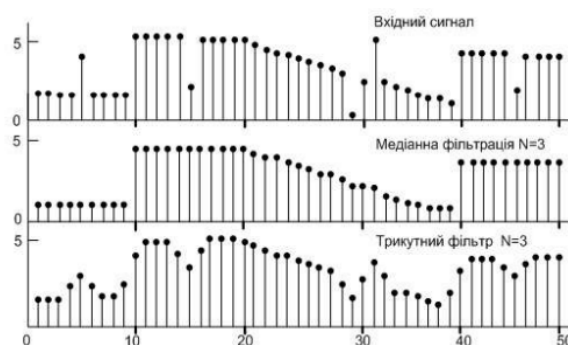


Рисунок 2.1 – приклади фільтрації

Усунення статистичних шумів за допомогою медіанних фільтрів розглядається лише на якісному рівні через їхню нелінійну природу. Важко чітко визначити вплив медіанних фільтрів на сигнал і шум .

Якщо значення елементів послідовності $\{x_i\}$ в апертурі фільтру є незалежними однаково розподіленими (НОР) випадковими величинами з середнім значенням $m_x = m + z$, то математичне сподівання $M\{z\} = 0$, а отже і $M\{x\} = m$.

Нехай $F(x)$ і $f(x) = F'(x)$ – функції розподілу і щільності ймовірності величин x . Згідно теорії ймовірності, розподіл $y = \text{med}(x_1, \dots, x_n)$ для великих n є приблизно нормальним $N(mt, \text{sign})$, де mt – теоретична медіана, визначена з умови $F(mt) = 0.5$, і дисперсія розподілу:

$$\sigma^2 = 1/(n4f^2(m_t)) . ; \quad (7)$$

Отримані результати вирішують як для одновимірної, так і для двовимірної фільтрації, якщо n обирається як кількість точок в апертурі фільтру. Якщо $f(x)$ симетрична щодо m , то розподіл медіан також буде симетричним щодо m , і справедлива формула:

$$M\{\text{med}(x_1, \dots, x_n)\} = M\{x_i\} = m \quad (8)$$

Якщо випадкові величини $x \in \text{НОР}$ і рівномірно розподілені на відрізку $[0,1]$, то можна знайти точне значення дисперсії медіани за формулою:

$$\sigma_n^2 = 1/(4(n+2)) = 3_x/(n+2) \quad \sigma_n^2 \approx \pi\sigma^2(2n - n + \pi); \quad (9)$$

Якщо випадкові величини $x \in$ незалежними, однаково розподіленими з нормальним розподілом $N(m, n)$. Модифікована формула дисперсії медіани для малих непарних значень n :

;

$$\sigma_n^2 \approx \pi \sigma^2 (2n - n + \pi) \quad (10)$$

Дисперсія шумів для випадкових величин в ковзному n -вікні арифметичного опосередкування (фільтр МНК першого порядку) має значення. Це означає, що для нормального білого шуму при рівних значеннях n вікон медіанного фільтру і фільтру ковзного опосередкування, дисперсія шумів на виході медіанного фільтру приблизно на 57% більша, ніж в ковзного фільтру. Щоб медіанний фільтр давав ту ж дисперсію, що і ковзне опосередкування, його апертура повинна бути на 57% більшою.

Ця ситуація змінюється, якщо щільність розподілу випадкових величин істотно відрізняється від нормальної і має довгі хвости, які ефективно пригнічуються медіанним фільтром, надаючи оптимальну та найправдоподібнішу оцінку поточних значень сигналу при мінімізації середньоквадратичного наближення. Таким чином, при експоненціальному (за модулем) розподілі щільності шумів:

$$f(x) = (\sqrt{2} / \sigma \exp(-\sqrt{2}|x - m| / \sigma)); \quad (11)$$

дисперсія шумів після медіанного фільтру на 50% менша, ніж після фільтру ковзного середнього.

Граничним випадком таких розподілів є імпульсний шум, випадковий за амплітудами і місцем появи, який найефективніше пригнічується медіанними фільтрами.

2.2.2 Фільтр Калмана

Фільтр Калмана є ефективним рекурсивним фільтром, який оцінює вектор стану динамічної системи, використовуючи послідовність неповних та зашумлених вимірювань. Названий на честь Рудольфа Калмана.

Застосовується широко в інженерних та економетричних застосуваннях, від радарів та систем технічного зору до оцінок параметрів макроекономічних моделей. Калманівське фільтрування є важливою частиною теорії управління та грає велику роль у розробці систем управління. Разом з лінійно–квадратичним регулятором, фільтр Калмана дозволяє вирішити задачу лінійно–квадратичного гауссівського управління, що робить його потенційним рішенням багатьох фундаментальних завдань у теорії управління.

У більшості випадків розмірність вектора стану об'єкта перевищує розмірність вектора спостережень. Фільтр Калмана, тим не менше, дозволяє оцінювати повний внутрішній стан об'єкта.

Фільтр Калмана призначений для рекурсивної оцінки вектора стану апріорно відомої динамічної системи. Іншими словами, для розрахунку поточного стану системи потрібно знати поточне вимірювання, а також попередній стан самого фільтра. [26] Таким чином, фільтр Калмана, подібно до інших рекурсивних фільтрів, працює в часовому, а не частотному представленні, але, на відміну від інших подібних фільтрів, фільтр Калмана оперує не лише оцінками стану, але і оцінками невизначеності (густини розподілу) вектора стану, використовуючи формулу умовної ймовірності за Байєсом.

Алгоритм працює на двох етапах. Під час етапу прогнозу фільтр Калмана екстраполює значення змінних стану та їх невизначеності. На другому етапі, за даними вимірювань (з отриманою певною похибкою), результат екстраполяції уточнюється. Благодаря поетапному характеру

алгоритму він може в реальному часі відстежувати стан об'єкта (без попереднього погляду вперед, використовуючи лише поточні вимірювання та інформацію про попередній стан та його невизначеність).

Існує помилкова думка, що для правильної роботи фільтра Калмана, суперечно деяким стереотипам, необхідний гаусівський розподіл вхідних даних. У початковій роботі Калмана результати щодо мінімізації коваріації фільтра були отримані на основі ортогональних проєкцій, без припущень про гаусівськість помилок вимірювань. Пізніше просто було показано, що для специфічного випадку розподілу помилок з Гауссовим розподілом фільтр дає точну оцінку умовної ймовірності розподілу стану системи.

Яскравий приклад можливостей фільтра – отримання оптимальних, постійно оновлюваних оцінок положення та швидкості об'єкта на основі послідовності неточних вимірювань його місцезнаходження. Наприклад, в радіолокації постає завдання супроводу цілі, визначення її місцезнаходження, швидкості

Фільтр Калмана є ефективним рекурсивним інструментом, що оцінює внутрішній стан лінійної динамічної системи, використовуючи послідовність зашумлених вимірювань. Він широко використовується в інженерних та економетричних застосуваннях, включаючи радары, системи технічного зору та оцінки параметрів макроекономічних моделей. [25] Калманівське фільтрування є важливою складовою теорії управління та відіграє ключову роль у розробці систем управління.

В більшості випадків розмірність вектора стану об'єкта перевищує розмірність вектора спостережень. Тим не менше, фільтр Калмана дозволяє оцінювати повний внутрішній стан об'єкта.

Цей фільтр розроблений для рекурсивної оцінки вектора стану динамічної системи, яка вже має певні апріорні відомості. Іншими словами, для розрахунку поточного стану системи потрібно знати поточне

вимірювання, а також попередній стан самого фільтра. Таким чином, фільтр Калмана, подібно до інших рекурсивних фільтрів, діє в часовому, а не частотному представленні. Відмінність полягає в тому, що він операційно визначає не лише оцінки стану, але й оцінки невизначеності (густини розподілу) вектора стану, використовуючи формулу умовної ймовірності за Байєсом.

Робота алгоритму включає два етапи. Під час етапу прогнозу фільтр Калмана екстраполює значення змінних стану та їхню невизначеність. На другому етапі результат екстраполяції уточнюється за даними вимірювань (з певною похибкою). Благодаря поетапному підходу, він може в реальному часі відслідковувати стан об'єкта, використовуючи лише поточні вимірювання та інформацію про попередній стан та його невизначеність.

Важливо відзначити, що існує поширене неправильне уявлення, яке вимагає гаусівського розподілу вхідних даних для правильної роботи фільтра Калмана. Навпаки, в оригінальній роботі Калмана результати щодо мінімізації коваріації фільтра отримані на основі ортогональних проєкцій, без припущень щодо гаусівськості помилок вимірювань. Далі було показано, що фільтр, навіть у випадку гаусівського розподілу помилок, надає точну оцінку умовної ймовірності розподілу стану системи.

Цей метод часто застосовується для отримання оптимальних, постійно оновлюваних оцінок положення та швидкості об'єкта, базуючись на послідовності неточних вимірювань його місцезнаходження. Наприклад, в радіолокації, де потрібно визначати місцезнаходження, швидкість та прискорення цілі на основі зашумлених вимірювань, фільтр Калмана використовує ймовірнісну модель динаміки цілі для зменшення впливу шуму та отримання точних оцінок стану об'єкта в реальному часі.

Фільтри Калмана ґрунтуються на дискретизованих у часі лінійних динамічних системах, які можуть бути описані як ланцюги Маркова. Ці системи моделюються за допомогою лінійних операторів, які піддавалися впливу помилками, включаючи можливість гаусівового шуму. Стан системи представляється вектором дійсних чисел. [25] На кожному кроці дискретного часу, до стану застосовується лінійний оператор для формування нового стану, де додається певний рівень шуму. Опціонально, інформація від систем управління може бути також врахована. Після цього ще один лінійний оператор, змішаний з додатковим шумом, застосовується до справжнього («прихованого») стану для отримання спостережуваних виходів.

Фільтр Калмана можна розглядати як аналог прихованої марковської моделі, з ключовою відмінністю у тому, що змінні прихованого стану приймають значення у безперервному просторі, на відміну від дискретного простору стану, як це має місце у прихованій марковській моделі. Між рівняннями фільтра Калмана та прихованою марковською моделлю існує виражена взаємозв'язок. Це обговорюється в роботах Ровейса та Гарамані (1999) та Гамільтона (1994), глава 13.

Для застосування фільтра Калмана для оцінювання внутрішнього стану процесу на основі послідовності зашумлених спостережень, необхідно відтворити процес відповідно до моделі фільтра Калмана. Це включає визначення матриць F_k (модель переходу станів), H_k (модель спостереження), Q_k (коваріація шуму процесу), R_k (коваріація шуму спостереження) та, за потреби, V_k (модель керування) для кожного моменту часу k .

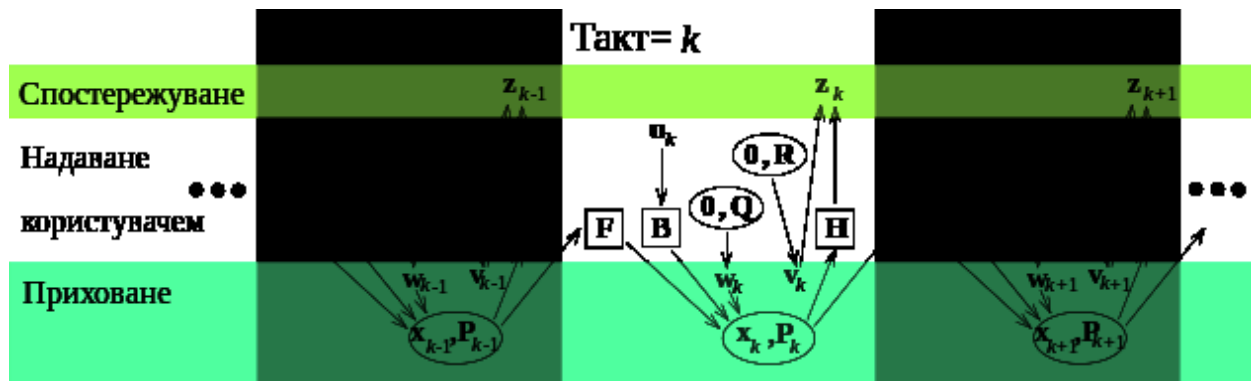


Рис 2.2 – Базова модель фільтру Калмана. Квадрати представляють матриці. Еліпси представляють багатовимірні нормальні розподіли (із включеними середніми значеннями та матрицями коваріацій). Не обведені значення є векторами. У цьому простому випадку різні матриці є незмінними в часі, й тому індекси пропущено, але фільтр Калмана дозволяє будь-якій з них змінюватися на кожному такті.

Фільтр Калмана є рекурсивним методом оцінки, що означає, що для розрахунку поточного стану використовується лише оцінка стану з попереднього кроку та поточні вимірювання. У відміну від пакетних методів, не потрібна історія спостережень або оцінок.

Далі, позначення \hat{x}_k вказує на оцінку в момент часу n при заданих спостереженнях з моменту часу m до n включно.

Стан фільтру представляється двома змінними:

$\hat{x}_{k|k}$, апостеріорною оцінкою стану в момент часу k при заданих спостереженнях по момент часу k включно;

$P_{k|k}$ апостеріорною коваріаційною матрицею помилок (мірою оцінки точності отриманої оцінки стану).

Стан фільтру визначається двома змінними. Фільтр Калмана може бути представлений як одне рівняння, але частіше його розглядають як дві окремі

стадії: передбачення та уточнення. Стадія передбачення використовує оцінку стану з попереднього моменту для отримання оцінки стану в поточний момент. Ця передбачена оцінка стану називається апіорною оцінкою стану, оскільки вона не містить інформації про поточне спостереження. У стадії уточнення поточне апіорне передбачення комбінується з поточною інформацією спостереження для отримання оновленої оцінки стану, відомої як апостеріорна оцінка стану.

[25,26] Зазвичай ці дві фази чергуються: передбачення просуває стан до наступного запланованого спостереження, а уточнення включає це спостереження. Проте, в деяких випадках може бути пропущено уточнення, якщо спостереження недоступне, або виконано декілька кроків передбачення. Також, якщо в один і той же момент доступні декілька незалежних спостережень, може бути виконано кілька кроків уточнення з різними матрицями спостереження \mathbf{H}_k .

Передбачення:

— Передбачена (апіорна) оцінка стану

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k ; \quad (12)$$

— Коваріація передбаченої (апіорної) оцінки

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k ; \quad (13)$$

Уточнення:

— Нововведення (відхилення) вимірювання

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} ; \quad (14)$$

— Коваріація нововведень (відхилення)

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k ; \quad (15)$$

— Оптимальний передавальний коефіцієнт Калмана

$$; \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}$$

— Оновлена (апостеріорна) оцінка стану

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{y}}_k \quad ;$$

— Коваріація оновленої (апостеріорної) оцінки

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad ; \quad (18)$$

2.2.3 Фільтр арифметичного середнього

Арифметичне середнє – це результат ділення суми всіх фіксованих значень в наборі на кількість елементів у цьому наборі. Якщо з контексту зрозуміло, про яке значення йдеться, часто просто зазначають "середнє". Вживають термін "середнє арифметичне", щоб виділити його від інших видів середніх величин, таких як середнє геометричне чи середнє гармонійне.

Середнє арифметичне має своїми частковими випадками загальне (для всієї сукупності) та вибіркоче (для підмножини) середні.

Вчені в галузях економіки, соціології та історії також користуються середнім арифметичним. Навіть у кожній академічній дисципліні в певний спосіб використовується цей термін. Наприклад, дохід на душу населення обчислюється як національний дохід, поділений на чисельність населення.

Важливо зазначити, що, хоча середнє значення часто використовується для визначення центральних тенденцій, воно може бути нестабільним через вплив граничних значень, особливо для асиметричних розподілів, таких як розподіл доходів. Для таких розподілів, де дохід кількох осіб значно вищий, ніж у більшості, медіана може бути більш надійною мірою центральної тенденції, ніж арифметичне середнє.

Позначимо множину даних $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, тоді вибіркоче середнє зазвичай позначається горизонтальною рисою над змінною (\bar{x} , вимовляється «х з рисою»), як середнє із n значень x_1, x_2, \dots, x_n .

Для позначення середнього арифметичного всієї сукупності використовується грецька літера μ . Для випадкової величини, для якої визначено середнє значення, μ є ймовірне середнє значення або математичне сподівання випадкової величини. Якщо множина X є сукупністю випадкових чисел із ймовірним середнім μ , тоді для будь-якої вибірки x_i із цієї сукупності $\mu = E\{x_i\}$ є математичне сподівання цієї вибірки.

На практиці різниця між μ і \bar{x} у тому, що μ є типовою змінною, тому що бачити можна скоріше вибірку, ніж всю генеральну сукупність. Тому, якщо вибірку представляти випадковим чином (у термінах теорії ймовірностей), X можна трактувати як випадкову змінну, котра має розподіл ймовірностей на вибірці (ймовірний розподіл середнього).

Обидві ці величини обчислюються одним і тим же способом: вони визначаються за формулою

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n); \quad (19)$$

Якщо X — випадкова змінна, тоді математичне сподівання X можна розглядати як середнє арифметичне значень величини X . Це є проявом закону великих чисел. Тому вибіркоче середнє використовується для оцінки невідомого математичного сподівання.

У елементарній алгебрі доведено, що середнє $n + 1$ чисел більше середнього n чисел тоді і тільки тоді, коли нове число більше ніж старе середнє, менше тоді і тільки тоді, коли нове число менше середнього, і не

змінюється тоді і тільки тоді, коли нове число дорівнює середньому. Чим більше n , тим менша різниця між новим і старим середніми значеннями.

Зауважимо, що існує кілька інших «середніх» значень, в тому числі середнє степеневе, квазі-арифметичне середнє, середнє гармонійне, і різноманітні середньо-зважені величини.

Арифметичне середнє не менше від геометричного середнього.

2.2.4 Фільтр ковзаного середнього

Ковзне середнє, відоме також як рухоме середнє або процес ковзного середнього (англ. moving average), представляє собою інструмент аналізу випадкових процесів та часових рядів, який включає в себе обчислення середнього значення підмножини даних. Відзначте, що ковзне середнє не є просто скаляром, а представляє собою випадковий процес. Розмір підмножини, з якої обчислюється середнє значення, може бути як постійним, так і змінним. Крім того, ковзне середнє може використовувати вагові коефіцієнти, наприклад, для надання більшого важелю новішим даним порівняно зі старішими.

В аналізі часових рядів ковзне середнє застосовується для згладжування раптових коливань та виділення довгострокових трендів або циклів. З математичної точки зору, ковзне середнє можна розглядати як різновид згортки та порівняти з фільтром низьких частот у обробці сигналів.

Нехай $\{x_t\}$ — часовий ряд, рухоме середнє $\{y_t\}$ обчислюється як результат лінійного перетворення:

$$y_t = \sum_{r=-q}^{+s} a_r x_{t+r} ; \quad (20)$$

2.25 Мультиплексування

Мультиплексування (Multiplexing) – це техніка передачі декількох сигналів або потоків даних через один і той самий канал передачі. Це дозволяє ефективно використовувати обмежені ресурси та оптимізувати передачу інформації. Мультиплексування може бути використане в різних областях, таких як телекомунікації, комп'ютерні мережі, аудіо та відео передача, а також в оптичних та радіочастотних системах.

[25] Існує кілька видів мультиплексування, серед найпоширеніших – часове (Time Division Multiplexing – TDM), частотне (Frequency Division Multiplexing – FDM), просторове (Space Division Multiplexing – SDM) та довжинно–хвильове (Wavelength Division Multiplexing – WDM).

Часове мультиплексування (TDM)

У TDM різні сигнали висилаються в різні моменти часу. Кожен сигнал займає свій власний часовий інтервал, і повторення циклу надає вигляд послідовності сигналів. Це ефективно для передачі даних в цифровому форматі.

Частотне мультиплексування (FDM):

У FDM різні сигнали висилаються на різних частотах. Кожен сигнал займає свою унікальну частотну смугу. Це часто використовується у радіо та телекомунікаційних системах для одночасної передачі різних каналів через один канал передачі.

Просторове мультиплексування (SDM):

SDM використовується для подолання обмежень в області простору. Наприклад, у багатоканальних радіо– або супутникових системах

використовуються різні антени для одночасної передачі різних сигналів у різних напрямках.

Довжинно–хвильове мультиплексування (WDM):

У WDM різні сигнали висилаються на різних довжинах хвиль в оптичних волоконних лініях. Це широко використовується в оптичних телекомунікаційних системах, де декілька сигналів передаються одночасно через одне волокно.

Висновки в данному розділі було розглянуто основні методи підвищення точності та багатофункціональності приладів для вимірювання прозорості води. Було обрано найбільш доречні методи, які можна реалізувати на наявних приладах, наприклад, визначення розміру частинок за рахунок використання дифракції, що буде використовувати два датчики світла. Та мієве розсіювання яке буде використовувати різні довжини хвиль датчику для подальшого уточнення розмірів частинок.

2.3 Методи збільшення багатофункціональності та методи об'єднання даних приладу для вимірювання прозорості води.

В данному розділі буде оглянено методи збільшення багатофункціональності, а саме додавання можливості вимірювання розміру часток забруднювача в воді. Буде проаналізовано метод об'єднання даних за допомогою методу зваженого усереднення який дозволить поєднати данні з датчику з використанням коефіцієнтів які враховують особливості даних різних світлодіодів.

2.3.1 Використання Мієвого розсіювання для визначення розміру часток

Дисперсія світла сферичною часткою – класична задача електродинаміки, вирішена в 1908 році Густавом Мі для сферичної частки будь-якого розміру. Задача розглядає розсіювання електромагнітної хвилі з напруженістю електричного поля.

Розсіювання залежить від співвідношення розмірів частки та довжини хвилі світла в матеріалі частки. Релеєвське розсіювання є частковим випадком Мієвого розсіювання у випадку, коли частка значно менша за довжину хвилі. У цьому випадку зовнішня електромагнітна хвиля поляризує частку, збуджуючи в ній змінний дипольний момент. Дипольний момент, що коливається в такт з частотою зовнішньої хвилі, переізлучає світло з характерною для дипольного моменту діаграмою напрямку. Якщо ігнорувати частотну залежність діелектричної проникливості частки, інтенсивність розсіювання залежить від частоти в четвертій ступені, що призводить до сильного розсіювання коротких хвиль. У розсіяному білому світлі переважає синій відтінок, а в нерозсіяному – червоний.

У випадку близькості розмірів частки до довжини хвилі світла діаграма напрямку розсіювання стає складною. Виявляється інтерференція хвиль, відбитих від різних частин поверхні частки. Інтенсивність розсіяного під певним кутом світла залежить від того, скільки разів хвиля укладається на діаметрі частки, тому вона сильно залежить від розмірів частки. [20,19] Коли кілька довжин хвилі укладається в розміри частки, чергування максимумів і мінімумів на діаграмі напрямку стає настільки частим, що при падінні білого світла на, наприклад, колоїдний розчин, спостерігач бачить білий розсіяний світло. У результаті речовина з великою кількістю таких часток стає непрозорою. У цьому причина білого кольору хмар на небі, білого кольору молока і т. д. Розчин колоїдних часток може бути забарвлений у випадку, коли

речовина частини вибірково поглиблює світло в певному спектральному діапазоні.

Якщо розміри сфери значно перевищують довжину хвилі світла, то поверхня сфери буде вести себе як плоска поверхня. Відбувається заломлення і відбиття світла, які описуються формулами Френеля.

Задача розсіювання сферичною наночастинкою розв'язується точно незалежно від розміру частинки. Розглянемо розсіювання плоскої хвилі, яка поширюється вздовж осі z і поляризована по x . Діелектрична та магнітна проникливості частинки відповідно. Для вирішення задачі розсіювання спочатку запишемо розв'язки векторного рівняння Гельмгольца в сферичних координатах, оскільки поля всередині та поза частинкою повинні задовольняти йому. Рівняння Гельмгольца

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad ; \quad (21)$$

доповнюють умови $\nabla E = \nabla H = 0$ та $\nabla \times E = i\omega\mu H$, $\nabla \times H = -i\omega\varepsilon E$, якими повинні також задовольняти поля. Всі необхідні властивості мають векторні сферичні гармоніки, введені наступним чином:

$$\mathbf{M}_{\sigma mn}^{\varepsilon} = \nabla \times (\mathbf{r}\psi_{\sigma mn}^{\varepsilon}) \quad ; \quad (22)$$

$$\mathbf{N}_{\sigma mn}^{\varepsilon} = \frac{\nabla \times \mathbf{M}_{\sigma mn}^{\varepsilon}}{\mathbf{k}} \quad ; \quad (23)$$

$$\psi_{\varepsilon mn} = \cos m\varphi P_n^m(\cos \vartheta) z_n(kr) \quad ; \quad (24)$$

$$\psi_{\sigma mn} = \sin m\varphi P_n^m(\cos \vartheta) z_n(kr) \quad ; \quad (25)$$

P_n^m – поліноми Лежандра, що долучені, та $z_n(kr)$ – будь-яка із сферичних функцій Бесселя.

$$\mathbf{E}_{inc} = E_0 e^{ikr \cos \theta} \mathbf{e}_x = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(\mathbf{M}_{o1n}^{(1)}(k, \mathbf{r}) - i \mathbf{N}_{e1n}^{(1)}(k, \mathbf{r}) \right); \quad (26)$$

$$\mathbf{H}_{inc} = \frac{-k}{\omega \mu} E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(\mathbf{M}_{e1n}^{(1)}(k, \mathbf{r}) + i \mathbf{N}_{o1n}^{(1)}(k, \mathbf{r}) \right); \quad (27)$$

Тут верхній індекс вказує на те, що в радіальній частині функцій ψ_0^{elm} – використовуються сферичні функції Бесселя. Коефіцієнти розкладу отримуються під час взяття інтегралів такого виду

$$\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \mathbf{E}_{inc} \cdot \mathbf{M}_{o^{elm}}^{(1)} \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\mathbf{M}_{o^{elm}}^{(1)}|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}; \quad (28)$$

При цьому всі коефіцієнти при $m \neq 1$ обнулюються, оскільки в чисельнику

Потім накладаються :

1) граничні умови на межі між сферою та навколишнім середовищем (що дозволяє пов'язати коефіцієнти розкладу падаючого, внутрішнього та розсіяного полів),

2) умова обмеженості рішення в початку координат (тому в радіальній частині породжуючих ψ_0^{elm} функцій для внутрішнього поля вибираються сферичні функції Бесселя),

3) для розсіяного поля асимптотика на нескінченності відповідає розходженню сферичної хвилі (у зв'язку з цим для розсіяного поля в радіальній частині породжуючих функцій ψ_0^{elm} вибираються сферичні функції Ханкеля першого виду).

Розсіяні поля записуються у вигляді розкладу за векторними гармоніками таким чином:

$$\mathbf{E}_s = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(ia_n \mathbf{N}_{e1n}^{(3)}(k, \mathbf{r}) - b_n \mathbf{M}_{o1n}^{(3)}(k, \mathbf{r}) \right) ; \quad (29)$$

$$\mathbf{H}_s = \frac{k}{\omega\mu} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(a_n \mathbf{M}_{e1n}^{(3)}(k, \mathbf{r}) + ib_n \mathbf{N}_{o1n}^{(3)}(k, \mathbf{r}) \right) ; \quad (30)$$

тут верхній індекс вказує на те, що в радіальній частині функцій ψ_0^{etn} – сферичні функції Ханкеля, та $E_n = \frac{iE_0(2n+1)}{n(n+1)}$ а внутрішні :

$$\mathbf{E}_1 = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(-id_n \mathbf{N}_{e1n}^{(1)}(k_1, \mathbf{r}) + c_n \mathbf{M}_{o1n}^{(1)}(k_1, \mathbf{r}) \right) ; \quad (31)$$

$$\mathbf{H}_1 = \frac{-k_1}{\omega\mu_1} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(d_n \mathbf{M}_{e1n}^{(1)}(k_1, \mathbf{r}) + ic_n \mathbf{N}_{o1n}^{(1)}(k_1, \mathbf{r}) \right) ; \quad (32)$$

$k = \frac{\omega}{c}n$ – вектори хвиль ззовні частинки, $k_1 = \frac{\omega}{c}n_1$ – вектор хвиль у середовищі з матеріалу частинки, n та n_1 – це коефіцієнти преломлення середовища та частинки. Після застосування граничних умов отримуємо вирази для коефіцієнтів де $p = ka$, $p_1 = k_1a$, де a – радіус наночастини, j_n та h_n – сферичні функції Бесселя та Ханкеля першого виду відповідно.

$$c_n(\omega) = \frac{\mu_1 [\rho h_n(\rho)]' j_n(\rho) - \mu_1 [\rho j_n(\rho)]' h_n(\rho)}{\mu_1 [\rho h_n(\rho)]' j_n(\rho_1) - \mu [\rho_1 j_n(\rho_1)]' h_n(\rho)} ; \quad (33)$$

$$d_n(\omega) = \frac{\mu_1 n_1 n [\rho h_n(\rho)]' j_n(\rho) - \mu_1 n_1 n [\rho j_n(\rho)]' h_n(\rho)}{\mu n_1^2 [\rho h_n(\rho)]' j_n(\rho_1) - \mu_1 n^2 [\rho_1 j_n(\rho_1)]' h_n(\rho)} ; \quad (34)$$

$$b_n(\omega) = \frac{\mu_1 [\rho j_n(\rho)]' j_n(\rho_1) - \mu [\rho_1 j_n(\rho_1)]' j_n(\rho)}{\mu_1 [\rho h_n(\rho)]' j_n(\rho_1) - \mu [\rho_1 j_n(\rho_1)]' h_n(\rho)} ; \quad (35)$$

$$a_n(\omega) = \frac{\mu n_1^2 [\rho j_n(\rho)]' j_n(\rho_1) - \mu_1 n^2 [\rho_1 j_n(\rho_1)]' j_n(\rho)}{\mu n_1^2 [\rho h_n(\rho)]' j_n(\rho_1) - \mu_1 n^2 [\rho_1 j_n(\rho_1)]' h_n(\rho)} ; \quad (36)$$

2.3.2 Зважене середнє арифметичне

Зважене середнє арифметичне – це статистичний показник, який обчислюється на основі сукупності чисел, присвоюючи кожному числу вагу відповідно до його важливості чи частоти. Зазвичай це використовується для обчислення середнього значення величини, де деякі значення мають більшу вагу, ніж інші.

Формула для зваженого середнього арифметичного виглядає наступним чином:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} ; \quad (37)$$

де: n – кількість елементів у вибірці, x_i – значення елемента з позначкою i , ω_i – вага, присвоєна елементу з позначкою i . У цій формулі числа помножуються на їх ваги, потім сумуються, і результат ділиться на суму ваг.

3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПРОЗОРОСТІ ВОДИ

В данному розділі буде проведено моделювання для отримання наглядних даних які дозволять оцінити якість результату використання різних фільтрів та обрати більш конкретні методи фільтрації. Що в подальшому може використовуватись для збільшення точності приладу.

Також в цьому розділі буде проведено розрахунок спектрів поглинання за допомогою Мієвого розсіювання які будуть фіксуватись на двох датчиках світла розташованих під кутом 90 та 135 градусів . Спектр поглинання це діапазон довжин хвиль які , в нашому випадку, будуть поглинати частки різних розмірів.

Та буде проведено моделювання розрахунку розміру часток за допомогою дифракції. Буде розраховано приблизний розмір часток за допомогою кута відзеркалення світла. Що в подальшому, разом з методом вимірювання завдяки мієвому розсіюванню, може використовуватись для збільшення багатofункціональності приладу.

Буде проведено моделювання використання мультиплексації сигналу, а саме одночасне вимірювання з використанням двох, чи більшої кількості світлодіодів одночасно, з ціллю підвищення завадостійкості приладу.

3.1 Аналіз методів фільтрації даних

За допомогою Python та бібліотеки matplotlib буде проведено моделювання роботи різних фільтрів для подальшого аналізу їх ефективності.

Для початку експерименту був використан синусоїдальний сигнал, зашумлений білим гаусівським шумом та оброблений імпульсами. Це створило реалістичні умови для аналізу роботи різних фільтрів.

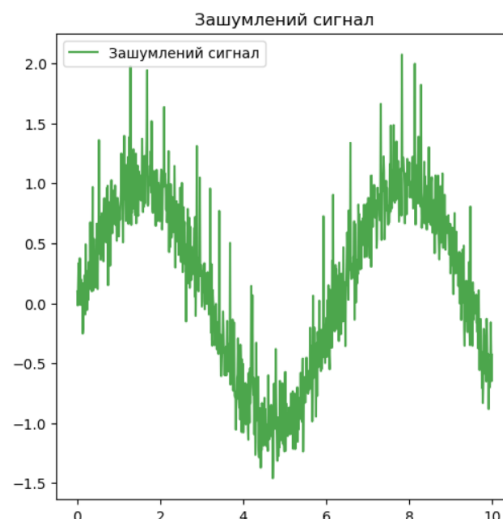


Рисунок 3.1 – моделювання синусоїди з гаусівським шумом , та з викидами

Пишемо функцію для використання фільтра калмана. Ініціалізуються параметри фільтра (оцінка стану, коваріація, матриця переходу та ін.). Проходиться кожне значення зашумленого сигналу, виконуються прогноз та оновлення за формулами фільтра Калмана. Отримується відфільтрований сигнал.

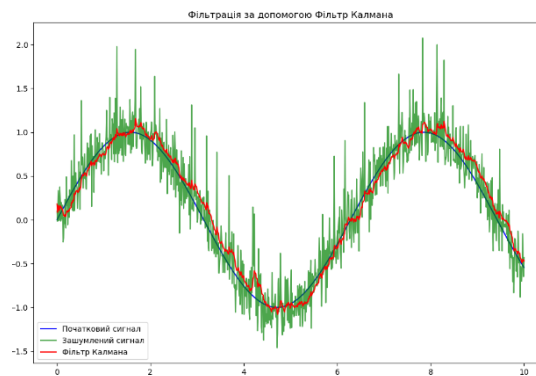


Рисунок 3.2 – моделювання фільтрації Калмана

Пишемо функцію для використання медіанного фільтра. За допомогою `sci.py` та функції `medfilt` було зроблено медіанну фільтрацію , та було отримано відфільтрований варіант.

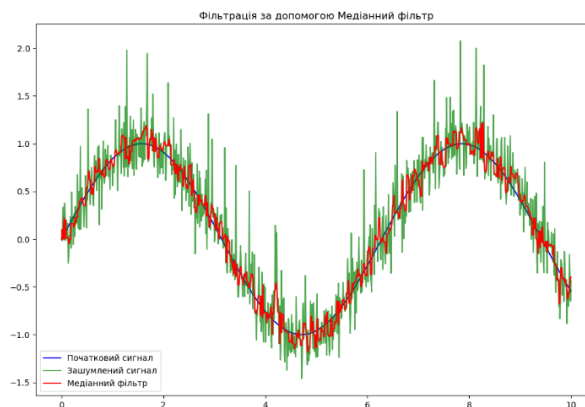


Рисунок 3.3 – моделювання медіанного фільтру

За допомогою функції `pr.convolve` проводимо фільтрацію середнього арифметичного, отримуємо відфільтрований варіант

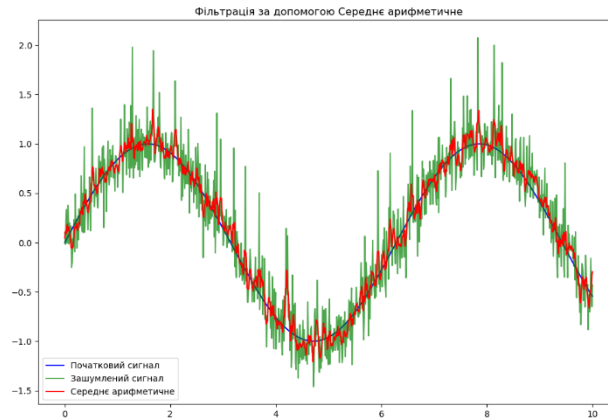


Рисунок 3.4 – моделювання фільтру середнього арифметичного

Пишемо функцію для використання експоненційного ковзаного середнього. Проводимо фільтрацію і отримуємо відфільтрований варіант.

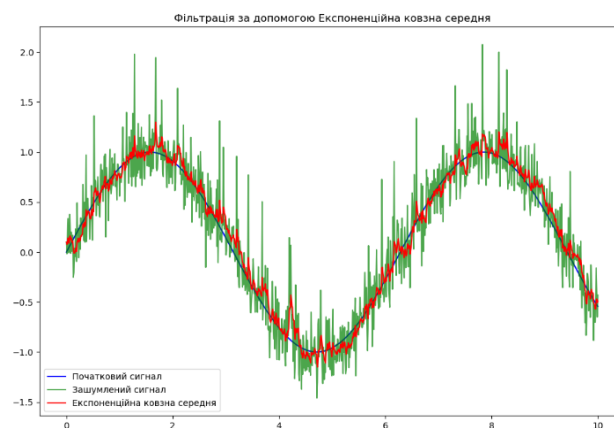


Рисунок 3.5 – моделювання фільтру експоненційного ковзаного середнього

Для кращого аналізу ми виведемо всі графіки та шуми в окремому вікні.

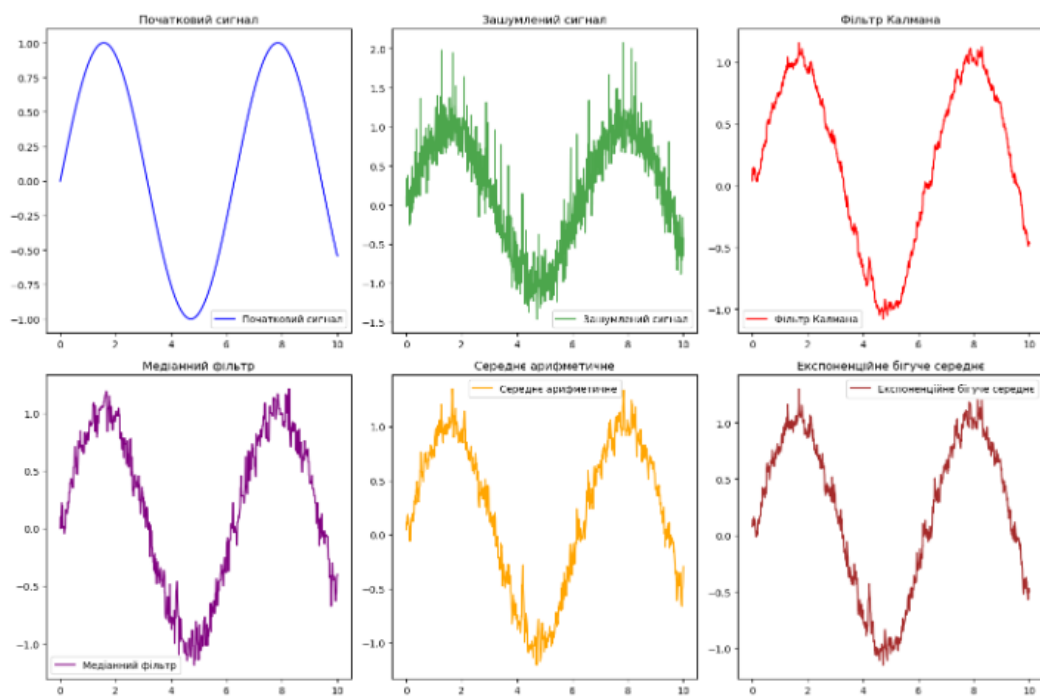


Рисунок 3.6 – всі результати фільтрацій

З цих результатів вимірювання ми можемо побачити, що фільтр Калмана краще за інші впорався з фільтрацією, відфільтрований ним сигнал має найнижчий рівень дисперсії також він краще підходить для роботи саме в динамічних системах. Але його недоліками є досить складне налаштування для оптимальної роботи та великі затрати при обчислюванні.

Наступним ми розглянемо алгоритм експоненційного ковзаючого середнього. Фільтр досить якісно фільтрує сигнал і підходить для адаптивної фільтрації. Він досить легко налаштовується за рахунок лише одного параметру. Але цей параметр може мати нетривалий ефект, також фільтр погано працює з різкими змінами сигналу.

Медіанний фільтр досить непогано працює з аномаліями або викидами у сигналі. Також має легку реалізацію та не потребує багато обчислювальних ресурсів. Але має проблеми з видаленням низькоамплітудного шуму. Цей фільтр краще за все буде працювати разом з іншим фільтром.

Фільтр середнього арифметичного найпростіший у реалізації та потребує мінімум обчислювальних ресурсів. Досить неефективний у випадках коли в сигналі багато шуму. Краще за все підходить для вимірювань стаціонарних сигналів.

З цих чотирьох методів фільтрації використаємо спочатку медіанний фільтр для початкової фільтрації сигналу. Потім використаємо фільтр Калмана для остаточної обробки. В результаті ми отримаємо графік

На цьому графіку ми можемо бачити, що значно знизилась викиди у сигнали, які ми могли попередньо бачити після фільтрації самим лише фільтром Калмана. [18]

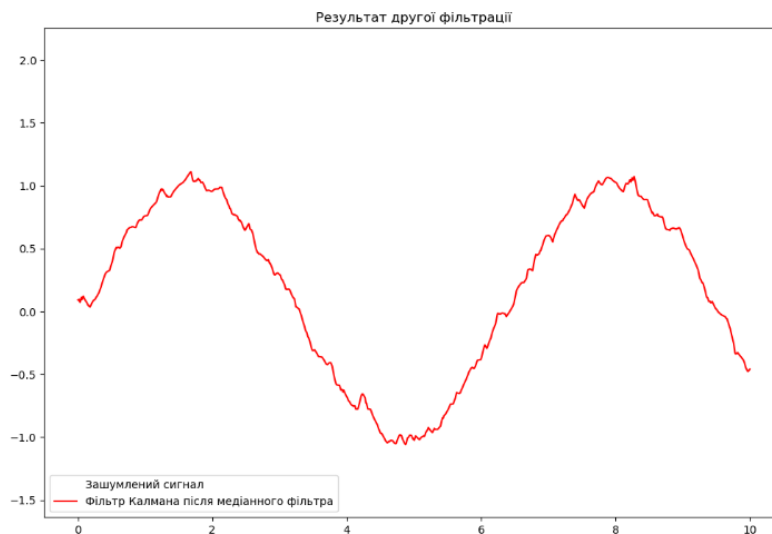


Рисунок 3.7 – результат сумісної фільтрації медіанного фільтру та фільтру Калмана

3.2 моделювання об'єднання даних методом зваженого усереднення

Для моделювання вимірювання з різних датчиків ми використаємо синусоїдальні схожі сигнали з незначними відмінностями, обумовленими

різними характеристиками джерел світла. Після чого накладемо на них гаусівський шум з викидами для моделювання сигналу отриманого з датчику з досить високим рівнем шуму. Додаток Г

Після чого відфільтруємо ці 5 сигналів за допомогою , спочатку , медіанного фільтра, після чого додамо фільтр Калмана Додаток Г

Потім використаємо зважене середнє арифметичне поєднаємо всі графіки у один.



Рисунок 3.12 – результат складання сигналів за допомогою зваженого середнього

Після чого отримаємо середній результат. Остаточне усереднене значення: 0.265. Подібну фільтрацію та метод поєднання даних можна буде використовувати для реального приладу. Зробивши цю фільтрацію та використавши метод зваженого середнього ми отримали результат який наглядно показує як фільтрація та усереднення за допомогою зваженого середнього допомагають збільшити точність порівняно зі звичайним усередненням без фільтрації початкового сигналу. Додаток Д

3.3 моделювання поглинання спектру частинками різного розміру

Для визначення розмірів частинок на основі даних, отриманих з фотодіодів під різними кутами, можна скористатися формулами, що описують дифузне розсіяння світла. Одним з підходів до аналізу таких даних є використання теорії Мі, яка описує розсіяння електромагнітного випромінювання сферичними частинками. I_0 – інтенсивність падаючого світла, а $I(\theta)$ – інтенсивність світла, розсіяного під кутом θ . Тоді залежність інтенсивності розсіяного світла від кута задається формулою Мі:

$$I(\theta) = I_0 \left| \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(\exp(i\chi_n) - 1)P_n(\cos(\theta))}{\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(\exp(i\chi_n) - 1)} \right|^2; \quad (39)$$

де $P_n(\cos(\theta))$ – поліноми Лежандра, i – уявна одиниця, $i\chi_n$ – фазовий зсув для n -ої моди Мі, який залежить від розміру частинки та довжини хвилі світла.

Для побудови спектра поглинання для частинок різного розміру можна скористатися мовою програмування Python та бібліотекою matplotlib для створення графіків. Додаток А – приклад коду, який генерує спектри поглинання для частинок різного розміру на основі теорії Мі.

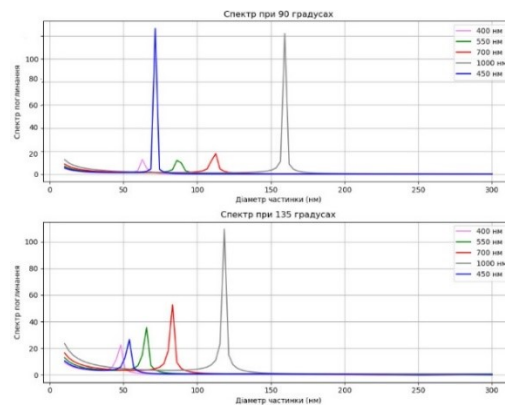


Рисунок 3.13 – результат розрахунку поглинання спектру в залежності від розміру частинок

Поглинна частинками різного розміру при відзеркаленні світла на 2 різних датчику світла. Мієве розсіювання описує розсіювання світла сферичними частками у різних напрямках. Інтенсивність розсіюваного світла залежить від кута розсіювання, довжини хвилі та розміру частки. Під час обробки результатів вимірювання ми зможемо отримати фактичні спектри розсіювання, які в подальшому можуть порівнюватись з отриманими під час моделювання теоретичними результатами, збіги у яких дозволять отримати розмір часток. Наприклад, з отриманого графіку ми можемо побачити, що поглинання світла з довжиною 1000 нм на датчику під кутом 135 градусів, та поглинання світла з довжиною хвиль 700 нм буде свідчити про наявність часток розміром приблизно у 110 нм.

3.4 моделювання розрахунку розміру частинок за рахунок дифракції

Для моделювання вимірювання розміру взвісі у воді з використанням дифракції, вам слід враховувати інтерференцію світла при проходженні через водний простір з взвіссю. Ефект дифракції світла можна моделювати за допомогою відповідних формул. У даному випадку можна використовувати формулу дифракції Фраунгофера для щіли $d \sin(\theta) = m\lambda$. Де: d – розмір взвісі, θ – кут спостереження, m – порядок дифракційного максимуму, λ – довжина хвилі світла.

Проводимо моделювання завдяки коду з додатку В. Отримуємо результат:

Measurement for violet light:

Sensor at 90 degrees measures particle size: $4e-07$ meters

Sensor at 135 degrees measures particle size: $9.080541145381116e-08$ meters

Measurement for blue light:

Sensor at 90 degrees measures particle size: $4.5e-07$ meters

Sensor at 135 degrees measures particle size: $1.0215608788553755e-08$ meters

Measurement for green light:

Sensor at 90 degrees measures particle size: $5.5e-07$ meters

Sensor at 135 degrees measures particle size: $1.2485744074899035e-08$ meters

Measurement for red light:

Sensor at 90 degrees measures particle size: $7e-07$ meters

Sensor at 135 degrees measures particle size: $1.5890947004416953e-08$ meters

Measurement for infrared light:

Sensor at 90 degrees measures particle size: $8e-07$ meters

Sensor at 135 degrees measures particle size: $1.816108229076223e-08$ meters

3.5 Моделювання використання мультиплексування

Можливість одночасно використовувати декілька світлодіодів одночасно дозволяють скористатись мультиплексуванням сигналу, що в свою чергу дозволить збільшити завадостійкість приладу. Для аналізу цього методу проведемо моделювання за кодом наданим в Додаток Е.

Для початку створимо 2 сигнали з декількома значними викидами. Подібні сигнали можуть з'являтися у приладах для вимірювання прозорості води з чисельних причин. Від індивідуальних особливостей поглинання світла з конкретними довжинами хвиль. До з'явлення завад через світлове забруднення

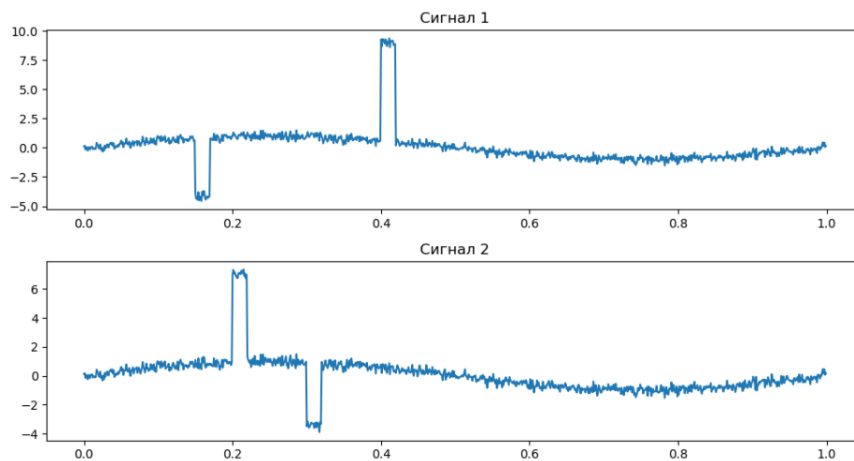


Рисунок 3.14 – результат моделювання сигналів з декількома значними викидами

Після цього проведемо моделювання мультиплексного вимірювання з використанням обох світлодіодів одночасно та отримаємо графік у вигляді

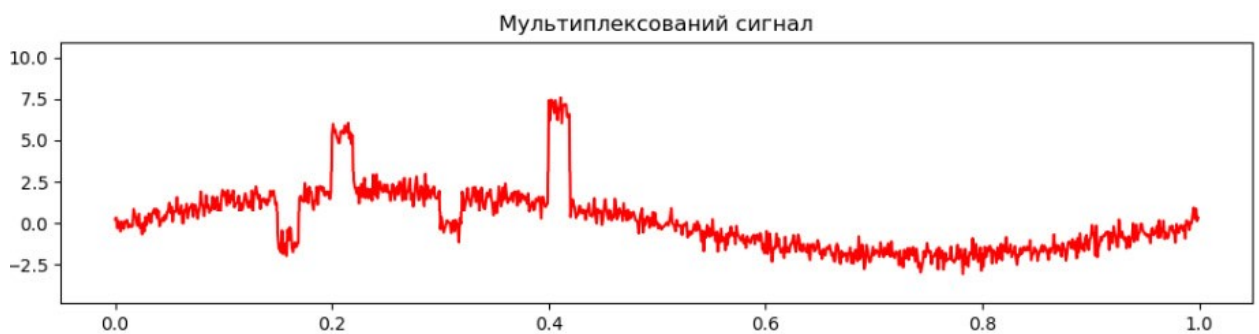


Рисунок 3.15 – результат вимірювання того ж сигналу, але двома світлодіодами одночасно

На отриманому графіку, ми можемо побачити що мультиплексне вимірювання дозволяє зменшити амплітуду викидів майже в 2 рази. Враховуючи що до цього сигналу не було використано ніякого методу фільтрації метод мультиплексного використання світлодіодів показав себе досить ефективним методом боротьби з завадами.

3.6 Аналіз ефективності запропонованих рішень

Як ми можемо побачити мультиплексація з використанням декількох світлодіодів одночасно дозволяє значно знизити викиди ще до фільтрації сигналу. Для більш якісного використання цього методу можна не змінюючи кількість вимірювань отримати більш точні результати використовуючи різні комбінації світлодіодів.

Після первинного замірювання ми отримаємо сигнал який треба буде відфільтрувати для отримання більш точних результатів. Аналізуючи отримані результати фільтрації можна прийти до висновку, що краще за все використовувати фільтр Калмана, але без достатнього налаштування він не так якісно гасить аномалії та викиди, для боротьби з ними краще за все буде використовувати саме медіанний фільтр, після якого вже, краще за все, буде використовувати фільтр Калмана. Інші розглянені фільтри не є актуальними, бо фільтр середнього арифметичного якісно працює лише на сигналах без великоамплітудного шуму, та викидів, що не актуально в нашому випадку. А фільтр ковзаного експоненційного середнього є досить ефективним, але його особливість за непостійною актуальністю корегуючого коефіцієнту робить його недоцільним в подібних приладах

Об'єднання даних методів зваженого усереднення дозволяє поєднати отримати данні з різних та поєднати зважаючи на особливості випромінювачів та приймачів дозволяє вводити коефіцієнти які будуть коригувати вимірювання виникаючих через ці особливостей.

Запропоноване рішення використовує моделювання поглинання світла різної довжини хвиль частинками різних розмірів. За допомогою отриманих графіків можна визначити перетини в поглинанні різних довжин світла

частинками одного розміру, які зафіксовані датчиками світла під різним кутом. Це відкриває можливість для подальшого уточнення розміру часток. Зокрема, використання цього методу в приладах з лазерними світлодіодами може допомогти отримати більш точні та надійні результати вимірювань.

Додатково, було розглянуто ще один метод вимірювання розміру часток за допомогою дифракції. Цей метод базується на різних кутах спостереження між двома датчиками, що дозволяє отримати більш точні виміри розмірів забруднювача. Зауважимо, що обидва запропоновані методи сильно залежать від конкретних довжин хвиль, тому їх ефективність може бути вищою в системах, де використовуються лазерні світлодіоди.

Висновки в даному розділі було проведено моделювання та аналіз методів підвищення точності вимірювань, та моделювання з аналізом методів багатофункціональності. В якості основних методів фільтрації було обрано медіанний фільтр для боротьби з викидами та аномаліями, після чого буде використано фільтр Калмана це дозволить досить якісно відтворити сигнал особливо враховуючи, що фільтр Калмана найкраще працює саме в динамічних системах. Але використання лише медіанного фільтру призведе до низькоякісної обробки сигнали, а без нього фільтр Калмана буде потребувати більш точного та важкого налаштування.

Було проведено моделювання поглинання світла різної довжини хвиль частинками різних розмірів. З отриманих графіків ми можемо побачити перетини в поглинання різних довжин світла частинками одного розміру, які було зафіксовано датчиками світла під різним кутом. Це може використовуватись для подальшого уточнення розміру часток. Також було проведено розрахунки для методу вимірювання розміру часток за допомогою дифракції. Цей метод спирається на різний кут спостереження між двома датчика за рахунок чого можна вивести більш точні розміри забруднювача. Обидва ці методи досить сильно спираються на конкретні довжини хвиль,

отже , найкраще ці методи покажуть себе саме у приладах з лазерними світлодіодами.

Під час моделювання використання мультиплексування для підвищення завадостійкості приладу було отримано графік сигналу , на якому ми можемо побачити ефективність використання цього методу. Він дозволяє значно знизити вади, які виникають під час експлуатації приладу і мають найрізноманітніші причини , від особливостей світлодіоду до особливостей матеріалу забруднювача.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістрської роботи було проведено аналіз та дослідження найбільш доцільних методів підвищення точності та багатофункціональності приладів для вимірювання води, для чого було проаналізовано загальну структуру подібних приладів, в ході якої було виявлено спільні конструкційні риси у вигляді декількох датчиків світла, та використання багатьох довжин хвиль, що було використано для досягнення цілей точності та багатофункціональності.

У розділі присвяченому аналізу найбільш доцільних методів методів підвищення точності та багатофункціональності були розглянені основні методи фільтрації та поєднання даних, що в подальшому може бути використано не лише на прикладі подібних приладів, та дає загальне розуміння як відбувається фільтрація. Також були розглянені методи оптичного визначення розміру малих частин, що в подальшому може бути критичним для покращення існуючих методів очищення води.

Розділ присвячений моделюванню, у ньому було виконано роботу щодо моделювання та аналізу методів підвищення точності вимірювань та багатофункціональності. Основні методи фільтрації, такі як медіанний фільтр і фільтр Калмана, були ретельно вивчені та оцінені в контексті їхнього застосування для відтворення сигналів. Виявлено, що комбінація цих методів може забезпечити якісну обробку сигналів, забезпечуючи при цьому оптимальне управління викидами та динамічними системами.

Моделювання поглинання світла частинками різних розмірів дозволила отримати графіки перетинів поглиблення різних довжин світла, що може служити основою для подальшого уточнення розміру часток. Крім того, розрахунки для методу вимірювання розміру часток за допомогою дифракції

виявили його потенціал для точних вимірювань розмірів забруднювачів, особливо в пристроях з лазерними світлодіодами.

Отже, отримані результати не лише вказують на ефективність обраних методів, але й відкривають перспективи для їхнього використання в подальших дослідженнях та розробках, зокрема в сфері удосконалення точності вимірювань і контролю розміру часток у пристроях із застосуванням лазерних світлодіодів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЬ

1. Показники якості води веб-сайт. URL:

https://pidru4niki.com/68489/ekologiya/pokazniki_yakosti_vodi (дата звернення

2 Gieskes, W. W. C., Veth, C., Woehrmann, A., Graefe, M. [Secchi disc visibility world record shattered](#) (англ.) / EOS. Transactions, American Geophysical Union. — 1987. — 123 с. (дата звернення 20.10.2023) 10.10.2023)

3. Каламутність води : веб-сайт. URL:

https://ua.wikipedia.org/wiki/Каламутність_води (дата звернення 20.10.2023)

4. Нефелометр : веб-сайт. URL: <https://ua.wikipedia.org/wiki/Нефелометр>

5. Турбидиметрія: веб-сайт. URL: <https://ua.wikipedia.org/wiki/Турбидиметрія>

6. Морський турбидиметр : веб-сайт. URL :

<https://findpatent/patent/243/2430354.html> (дата звернення 20.10.2023)

7. Нефелометрія, турбидиметрія: веб-сайт. URL:

<https://studfile.net/preview/6886654/page:4/> (дата звернення 20.10.2023)

8. Міністерство освіти і науки України Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара Нефелометрія, турбидиметрія (імунотурбидиметрія : веб-сайт. URL: <https://res.in.ua/ministerstvo-osviti-i-nauki-ukrayini-dnipropetrovsekij-naciona.html?page=8> (дата звернення 25.10.2023)

9. Трансмиссометр : веб-сайт. URL:

<https://ua.wikipedia.org/wiki/Трансмиссометр> (дата звернення 1.11.2023)

10. Датчик мутності ТМА-31 : веб-

сайт. URL: <https://datchiki.com/product/datchik-mutnosti-tma-31> (дата звернення 1.11.2023)

11 Аналізатори рідини турбидиметричні АЖТ-94 : веб-сайт. URL: <http://td-str/file.aspx?id=2954> (дата звернення 14.11.2023)

12 Проточний турбидиметричний датчик каламутності та кольоровості (in-line) TurbiGuard : веб-сайт. URL:

<https://www.sigrist.com/catalog/avtomaticheskij-kontrol-mutnosti-i-vzveshennykh-chastits-v-zhidkostyakh/protochnyy-turbidimetricheskij-datchik-in-line-turbiguard/> (дата звернення 14.11.2023)

- 13 Проточний турбідиметричний датчик (in-line) PhaseGuard : веб-сайт.URL: <https://www.sigrist.com/catalog/avtomaticheskiiy-kontrol-mutnosti-i-vzveshennykh-chastits-v-zhidkostyakh/protochnyy-turbidimetricheskiiy-datchik-in-line-phaseguard/> (дата звернення 16.11.2023)
- 14 Турбідиметричний і нефелометричний методи аналізу об'єктів навколишнього середовища: веб-сайт.URL: <https://xreferat.com/108/1363-1-turbidimetricheskiiy-i-nefelometricheskiiy-metody-analiza-ob-ektov-okruzhayusheiy-sredy.html> (дата звернення 20.11.2023)
- 15 Турбідиметричний і нефелометричний методи аналізу об'єктів навколишнього середовища : веб-сайт.URL: <https://xreferat.com/108/1363-1-turbidimetricheskiiy-i-nefelometricheskiiy-metody-analiza-ob-ektov-okruzhayusheiy-sredy.html> (дата звернення 25.11.2023)
- 16 Merman, T., Walline, P. D., Schneller, A. [Secchi disk depth record: A claim for the eastern Mediterranean](#) (англ.) / Limnology and Oceanography. — 1985. — Vol. 30(2). — P. 447с. (дата звернення 1.12.2023)
- 17 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕДІАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ОДНОВИМІРНИХ СИГНАЛІВ /Видмиш А. А. к.т.н., доцент Возняк О. М. к.т.н., доцент Купчук І. М. к.т.н., ст. викладач Бойко Д. Л. студент – Вінницький національний аграрний університет, 2020. – 15 с. (дата звернення 5.12.2023)
- 18 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПОХИБОК МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до практичної і самостійної роботи та виконання ДКР / М.Д.Гомеля, д-р техн. наук, проф. 2012. – 51 с. (дата звернення 5.12.2023)
- 19 Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity/[Ahmad Fairuz Bin Omar](#) :2009 – 25с (дата звернення 5.12.2023)
- 20 К. А. Fuller, Scattering and absorption cross sections of compounded spheres. I. Theory for external aggregation, J. Opt. Soc. Am. A 11, 3251–3260 (1994) (дата звернення 5.12.2023)
- 21 Воробйова О. М., Іванченко В. Д. Основи схемотехніки: У двох частинах: [Навчальний посібник](#). — [Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова](#). — 2004, Ч. 2. — 172с (дата звернення 25.12.2023)
- 22 Міхеєнко Л.А. Учебный посібник з дисципліни «Оптичні вимірювання». Частина II. Геометричні вимірювання. (дата звернення 25.12.2023)

23 Міхеєнко Л.А. Учбовий посібник з дисципліни «Оптичні вимірювання». Частина III. Хвильові вимірювання. (дата звернення 5. 01.2024)

24 Міхеєнко Л.А. Навчальний посібник з дисципліни: «Оптичні вимірювання» частина IV: Радіометричні вимірювання — Київ, 2011. —120с. (дата звернення 5.01.2024)

25 Г. Ф. Савинов "Про деякі особливості алгоритму оптимальної фільтрації Калмана — Бьюсі" // Авіакосмічне приладобудування № 6, 2007 р. (дата звернення 6.01.2024)

26 Peter Joseph «INTRODUCTORY LESSON: The one-dimensional Kalman Filter»: веб-сайт URL:

<https://web.archive.org/web/20080606091749/http://ourworld.compuserve.com/homepages/pdjoseph/kalman.htm>

ДОДАТОК А

Побудова графіків спектрів поглинання світла частками в залежності від їх розміру

Код програми

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def mie_spectrum(wavelength, particle_diameter):
    k = 2 * np.pi / wavelength
    chi = k * particle_diameter
    intensity = np.abs((2 * chi / (chi**2 - 1)) * (np.cos(chi) - 1/chi**2))
    return intensity

particle_diameters = np.linspace(10, 300, 100) # Змінено діапазон розмірів
частинок

wavelengths = {
    'Violet': 400,
    'Blue': 450,
    'Green': 550,
    'Red': 700,
    'Infrared': 1000
}

fig, axes = plt.subplots(nrows=2, ncols=1, figsize=(10, 8))

for wavelength, color in zip(wavelengths.values(), ['violet', 'green', 'red', 'gray',
'blue']):
```

```
absorption_spectrum_90 = [mie_spectrum(wavelength, diameter) for diameter
in particle_diameters]
```

```
absorption_spectrum_135 = [mie_spectrum(wavelength, diameter * 1.35) for
diameter in particle_diameters]
```

```
axes[0].plot(particle_diameters, absorption_spectrum_90, label=f'{wavelength}
нм', color=color)
```

```
axes[1].plot(particle_diameters, absorption_spectrum_135,
label=f'{wavelength} нм', color=color)
```

```
axes[0].set_title('Спектр при 90 градусах')
```

```
axes[0].set_xlabel('Діаметр частинки (нм)')
```

```
axes[0].set_ylabel('Спектр поглинання')
```

```
axes[0].legend()
```

```
axes[0].grid(True) # Додаємо сітку
```

```
axes[1].set_title('Спектр при 135 градусах')
```

```
axes[1].set_xlabel('Діаметр частинки (нм)')
```

```
axes[1].set_ylabel('Спектр поглинання')
```

```
axes[1].legend()
```

```
axes[1].grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

Додаток Б

Код програми

Розрахунок розмірів часток за допомогою дифракції

```
import math

def calculate_particle_size(angle, wavelength):
    # Угол в радіанах
    theta = math.radians(angle)

    # Порядок дифракційного максимуму (може бути 1, 2, 3 і т. д.)
    m = 1

    # Угловий розподіл інтенсивності (наприклад, гауссівський профіль)
    intensity_distribution = math.exp(-((theta - math.radians(90)) /
    math.radians(10))**2)

    # Розрахунок розміру частки за формулою дифракції Фраунгофера з
    # урахуванням углового розподілу
    particle_size = (m * wavelength) / math.sin(theta) * intensity_distribution

    return particle_size

def simulate_measurement(sensor_angles, wavelengths):
    # Зберігаємо результати вимірювань для обох датчиків
    sensor1_measurements = []
    sensor2_measurements = []

    for color, wavelength in wavelengths.items():
```

```

print(f"\nMeasurement for {color} light:")
for angle in sensor_angles:
    particle_size = calculate_particle_size(angle, wavelength)
    print(f"Sensor at {angle} degrees measures particle size: {particle_size}
meters")

# Розділяємо вимірювання для обох датчиків
if angle == 90:
    sensor1_measurements.append(particle_size)
elif angle == 135:
    sensor2_measurements.append(particle_size)

# Об'єднуємо дані розміру частки з обох датчиків
combined_measurements = [sum(x) for x in zip(sensor1_measurements,
sensor2_measurements)]

# Обчислюємо середнє значення розміру частки
average_particle_size = sum(combined_measurements) /
len(combined_measurements)

return average_particle_size

# Довжини хвиль для різних кольорів
wavelengths = {
    'violet': 400e-9,
    'blue': 450e-9,
    'green': 550e-9,
    'red': 700e-9,

```

```
'infrared': 800e-9
}

# Угли для датчиків (90 і 135 градусів)
sensor_angles = [90, 135]

# Симулюємо вимірювання та обчислюємо середнє значення розміру частки
average_size = simulate_measurement(sensor_angles, wavelengths)

# Виводимо результат
print(f"\nAverage Particle Size: {average_size} meters")
```

ДОДАТОК В

Моделювання зашумленого сигналу та роботи різних методів фільтрації

Код програми

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import medfilt, butter, filtfilt

def generate_signal(t):
    return np.sin(2 * np.pi * 0.1 * t) + 0.5 * np.sin(2 * np.pi * 0.5 * t)

def add_noise(signal, noise_level=0.5):
    noise = noise_level * np.random.randn(len(signal))
    return signal + noise

def add_outliers(signal, outlier_prob=0.1, outlier_magnitude=5):
    outliers = np.random.rand(len(signal)) < outlier_prob
    signal[outliers] += outlier_magnitude
    return signal

t = np.linspace(0, 10, 1000, endpoint=False)
signals = [add_outliers(add_noise(generate_signal(t)), outlier_prob=0.05) for _ in
range(5)]

# Відображення сигналів та сигналів з викидами на окремих підграфіках
plt.figure(figsize=(15, 10))

for i, signal in enumerate(signals):
```

```
plt.subplot(3, 2, i+1)
plt.plot(t, signal, label=f'Signal {i + 1}')
plt.title(f'Signal {i + 1}')
plt.legend()
```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
# Фільтрація та відображення результатів на окремих підграфіках
filtered_signals_median = [medfilt(signal, kernel_size=5) for signal in signals]
filtered_signals_kalman = [butter_lowpass_filter(signal, cutoff_freq=0.05,
sample_rate=1.0) for signal in signals]
```

```
plt.figure(figsize=(15, 10))
```

```
for i, signal in enumerate(filtered_signals_median):
    plt.subplot(3, 2, i+1)
    plt.plot(t, signal, label=f'Median Filtered {i + 1}')
    plt.title(f'Median Filtered {i + 1}')
    plt.legend()
```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
plt.figure(figsize=(15, 10))
```

```
for i, signal in enumerate(filtered_signals_kalman):
    plt.subplot(3, 2, i+1)
```



```
plt.plot(t, signal, label=f'Kalman Filtered {i + 1}')
plt.title(f'Kalman Filtered {i + 1}')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()

# Зважене середнє
weights = np.array([0.2, 0.3, 0.1, 0.2, 0.2])
weighted_average = np.average(filtered_signals_kalman, axis=0,
weights=weights)

# Відображення результатів
plt.figure(figsize=(15, 5))

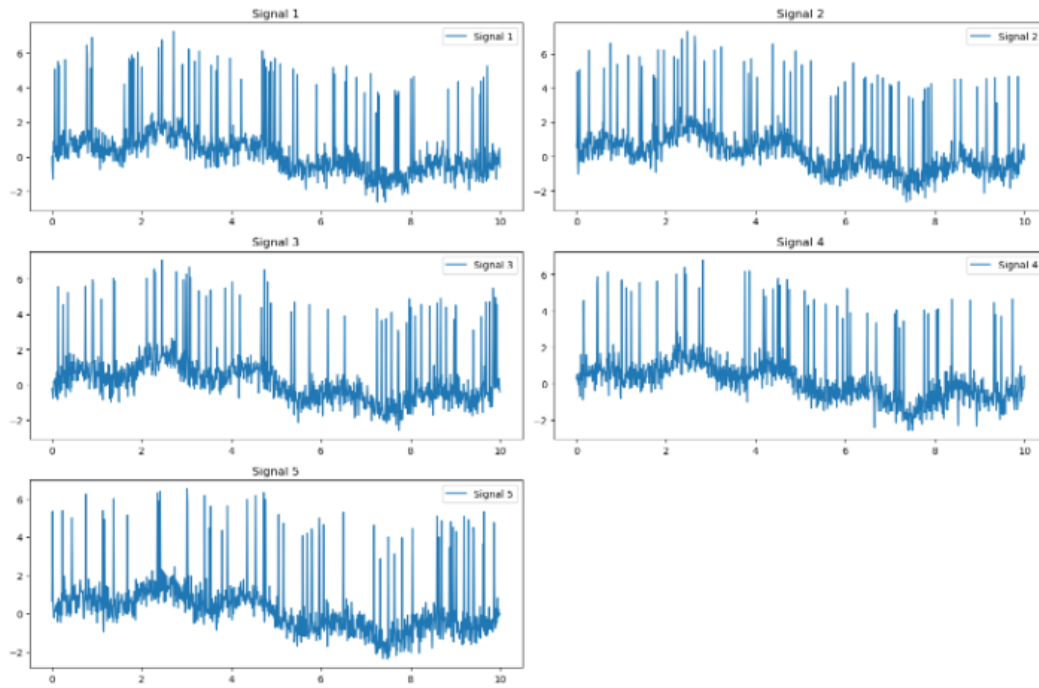
plt.plot(t, weighted_average, label='Weighted Average', linewidth=2,
color='black')
plt.title('Усереднене значення зваженого середнього')
plt.legend()

plt.show()

print(f"Остаточне усереднене значення: {final_result}")
```

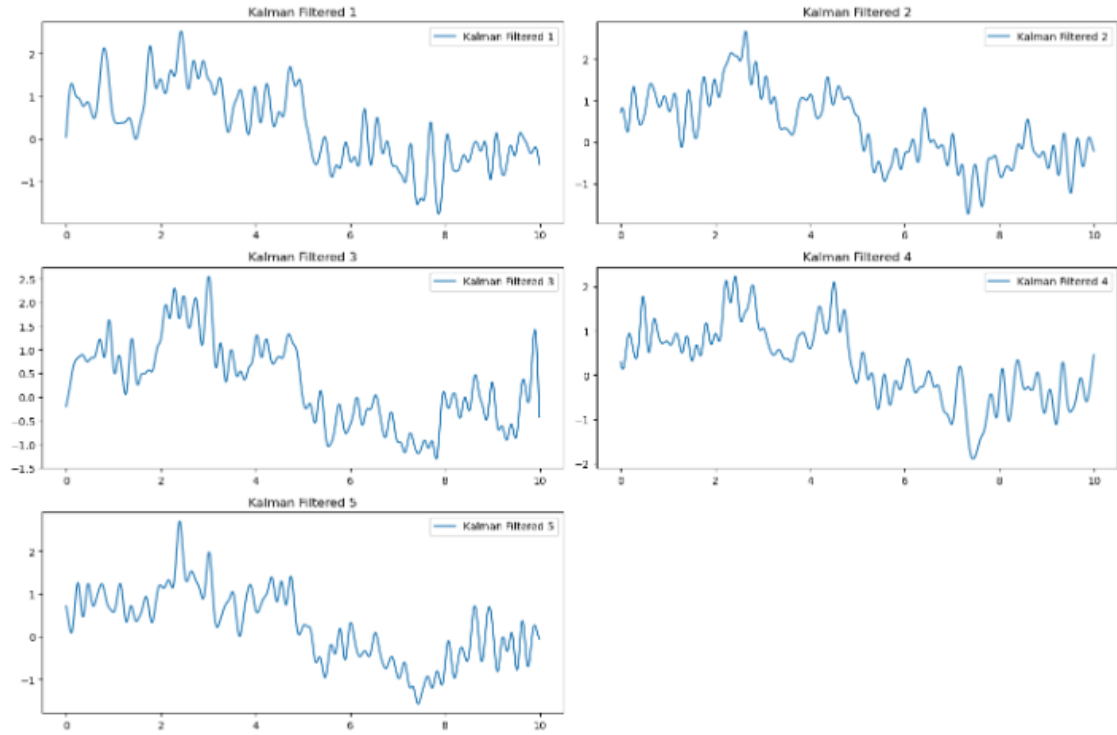
Додаток Г

МОДЕЛЮВАННЯ 5 ПОДІБНИХ ЗАШУМЛЕНИХ СИГНАЛІВ



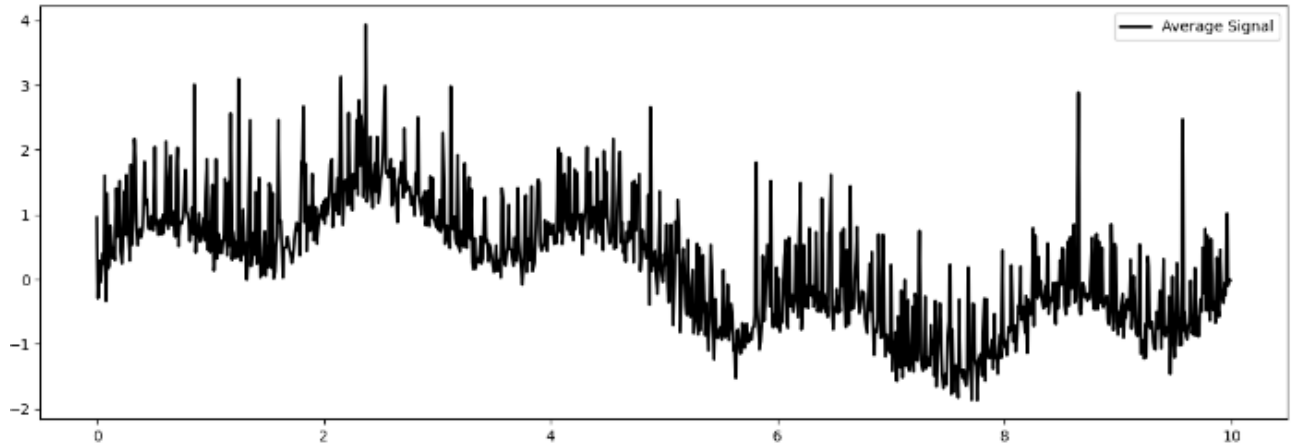
Додаток Г

Результат роботи медіанного фільтру та фільтру Калмана



Додаток Д

Сигнал з використанням усереднення без фільтрації



ДОДАТОК Е

Моделювання ефекту мультиплексування на сигнал з завадами

Код програми

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Функція для генерації сигналу з викидами
def generate_signal(t):
    signal = np.sin(2 * np.pi * 1 * t) # Синусоїдальний сигнал
    noise = 0.2 * np.random.normal(size=len(t)) # Додамо шум
    outliers1 = np.zeros_like(t)
    outliers2 = np.zeros_like(t)

    # Додамо викиди для сигналу 1
    outliers1[150:170] = 8.5 # Позитивний викид
    outliers1[300:320] = -5 # Негативний викид

    # Додамо викиди для сигналу 2
    outliers2[200:220] = 6 # Позитивний викид
    outliers2[400:420] = -4.5 # Негативний викид

    signal_with_outliers1 = signal + noise + outliers1
    signal_with_outliers2 = signal + noise + outliers2

    return signal_with_outliers1, signal_with_outliers2
```

```
# Задамо параметри сигналу
Fs = 1000 # Частота дискретизації
T = 1 / Fs # Період дискретизації
t = np.arange(0, 1, T) # Вектор часу

# Згенеруємо два сигнали з викидами
signal1, signal2 = generate_signal(t)

# Накладемо один сигнал на інший
multiplexed_signal = signal1 + signal2

# Візуалізація результатів
plt.figure(figsize=(10, 8))

plt.subplot(3, 1, 1)
plt.plot(t, signal1, label='Сигнал 1')
plt.title('Сигнал 1')

plt.subplot(3, 1, 2)
plt.plot(t, signal2, label='Сигнал 2')
plt.title('Сигнал 2')

plt.subplot(3, 1, 3)
plt.plot(t, multiplexed_signal, label='Мультиплексований сигнал', color='red')
plt.title('Мультиплексований сигнал')

plt.tight_layout()
plt.show()
```