

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

**Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Володимир ЄРЕМЕНКО
«__» _____ 2024 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології»
зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
на тему: «Система визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами на
основі плазмонного резонансу»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ПІ-21мп
Романенко Анна Юріївна _____

Керівник:

ст. вик., доктор філософії (PhD)
Дорожинська Ганна Василівна _____

Консультант з розділу «Розробка СТАРТАП-проектів»:
професор, д.е.н.

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

професор, д.п.н.

Протасов Анатолій Георгійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію здобувачу

Романенко Анна Юріївна

1. Тема дисертації «Система визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами на основі плазмонного резонансу», затверджена наказом по університету від «__» _____ 2023 р. № _____.
2. Термін здачі здобувачем оформленої дисертації « 3 » січня 2024 р.
3. Об'єкт дослідження – явище поверхневого плазмонного резонансу на межі середовищ метал - суспензія.
4. Предмет дослідження – процес визначення нерозчинних домішок у воді сенсором поверхневого плазмонного резонансу (ППР).
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: виконати чисельне моделювання впливу концентрації оксиду кремнію і заліза та фізичної природи домішок у воді на умови виникнення ППР; провести експериментальне дослідження резонансних характеристик сенсорів на основі ППР з різними концентраціями домішок у воді; розробка схемних рішень та конструкції системи для визначення нерозчинних домішок у воді; розробити стартап-проєкт.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу – презентація.
7. Орієнтовний перелік публікацій – доповідь на науково-технічній конференції з публікацією тез.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 4.СТАРТАП-ПРОЄКТ	Бояринова К.О., д.е.н., проф.; завідувач кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського		

9. Дата видачі завдання: 1.09.2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз існуючих методів визначення нерозчинних домішок у воді	04.09.2023 – 22.09.2023	
2	Чисельне моделювання впливу концентрації оксиду кремнію і заліза та фізичної природи нерозчинних домішок у воді на умови виникнення плазмонного резонансу	25.09.2023 – 06.10.2023	
3	Експериментальне дослідження зразків води з різними концентраціями нерозчинних домішок сенсорами плазмонного резонансу	09.10.2023 – 20.10.2023	
4	Розробка схемних рішень та конструкції системи для визначення нерозчинних домішок у воді	23.10.2023 – 01.12.2023	
5	Розробка стартап-проекту	04.12.2023 – 15.12.2023	
6	Оформлення розділів дисертації та підготовка до її захисту	16.12.2023 – 5.01.2024	
7	Захист МД	Січень 2024	

Здобувач

Анна РОМАНЕНКО

(підпис)

Науковий керівник

Ганна ДОРОЖИНСЬКА

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація складається з 113 сторінок, в тексті зазначено 27 рисунків. В роботі використано 44 найменування бібліографічних посилань.

Метою роботи є створення системи з підвищеною точністю для визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами на основі плазмонного резонансу.

Об'єктом дослідження є явище поверхневого плазмонного резонансу на межі середовищ метал - суспензія.

Предмет дослідження – процес визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами поверхневого плазмонного резонансу.

В роботі проведено аналіз існуючих методів визначення нерозчинних домішок у воді та визначено їх недоліки та переваги. Недоліком найбільш розповсюджених методів визначення домішок у воді є висока вартість вимірювального обладнання, необхідність підготовки проби води та великий її об'єм. В результаті проаналізованих даних прийнято рішення розробити систему визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами поверхневого плазмонного резонансу. Проведено чисельне моделювання впливу характеристик відбиття для довжин хвиль збудження поверхневих плазмонів в діапазоні від 650 нм до 1550 нм. Було визначено оптимальну довжину хвилі (980 нм), оптимальну товщину плівки золота (47нм) та робочий кут падіння світла від лазера на межу метал-суспензія (58 градуси). За результатами моделювання розраховано чутливість для суспензії оксиду кремнію та оксиду заліза, відповідно: 7,45 мкВ/NTU (55 (мкВ·л/мг) або 0,11 мВ/ppm) та 27,75 мкВ/NTU (208 (мкВ·л/мг) або 0,42 мВ/ppm).

Експериментально підтверджено можливість застосування явища поверхневого плазмонного резонансу для визначення нерозчинних домішок у воді на приладі серії «Плазмон». Розроблено схемні рішення, обрано електронні компоненти системи. В ході розрахунків вихначено загальний струм споживання

приладом, а саме, 72 мА і сумарну споживану потужність 0,36 Вт. Розраховано основну відносну похибку вимірювання вихідної напруги приладу системи – 1,0%. Розрахована межа визначення нерозчинних домішок у воді, а саме, наночастинок оксиду кремнію та оксиду заліза. Мінімальна концентрація оксиду заліза становила 0,23 мг/л (1,8 NTU). Мінімальна концентрація оксиду кремнію становила 0,68 мг/л (5 NTU). Діапазон вимірювання концентрації наночастинок оксиду заліза у воді для лінійного діапазону вимірювання вихідної напруги становив 3,52 г/л, що задовольняє вимоги існуючих стандартів.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що було запропоновано та створено систему визначення нерозчинних домішок у воді на основі явища поверхневого плазмонного резонансу, яка використовує джерело інфрачервоного випромінювання для збудження поверхневих плазмонів.

Апробація роботи. Результати роботи висвітлені в наступних публікаціях:

1. Романенко А. Ю., Дорожинська Г. В. Чисельне моделювання концентрації нерозчинних домішок у воді за умови виникнення плазмонного резонансу / XIX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні». – Київ, Україна. – 20-21 грудня, 2023.

2. Романенко А. Ю., Дорожинська Г. В. Підвищення чутливості сенсора для визначення нерозчинних домішок у воді / XIX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні». – Київ, Україна. – 20-21 грудня, 2023.

Ключові слова: сенсор, поверхневий плазмонний резонанс, нерозчинні домішки у воді, чутливість, межа детектування.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 113 pages, 27 are indicated in the text drawings 44 titles of bibliographic references are used in this work.

The aim of the work is to create a system with increased accuracy for determining insoluble impurities in water using sensors based on plasmon resonance.

The object of the research is phenomenon of surface plasmon resonance at interface of metal-suspension media.

The subject of research is the process of determining insoluble impurities in water by surface plasmon resonance sensors.

The paper analyzes the existing methods of determining insoluble impurities in water and identifies their disadvantages and advantages. The disadvantage of the most common methods of determining impurities in water is the high cost of measuring equipment, the need to prepare a water sample, and its large volume. As a result of the analyzed data, it was decided to develop a system for determining insoluble impurities in water using surface plasmon resonance sensors. Numerical modeling of the influence of reflection characteristics for excitation wavelengths of surface plasmons in the range from 650 nm to 1550 nm was carried out. The optimal wavelength (980 nm), the optimal thickness of the gold film (47 nm) and the working angle of light incidence from the laser on the metal-suspension interface (58 degrees) were determined. Based on the simulation results, the sensitivity was calculated for silicon oxide and iron oxide suspensions, respectively: 7.45 $\mu\text{V}/\text{NTU}$ (55 ($\mu\text{V} \cdot \text{l}/\text{mg}$) or 0.11 mV/ppm) and 27.75 $\mu\text{V}/\text{NTU}$ (208 ($\mu\text{V} \cdot \text{l}/\text{mg}$) or 0.42 mV/ppm).

The possibility of using the phenomenon of surface plasmon resonance to determine insoluble impurities in water was experimentally confirmed using the "Plasmon" series device. Schematic solutions were developed, electronic components of the system were selected. During the calculations, the total current consumption of the device was calculated, namely, 72 mA and the total power consumption of 0.36 W. The main relative error of measuring the output voltage of the system device was

calculated - 1.0%. The limit of detection of insoluble impurities in water, namely nanoparticles of silicon oxide and iron oxide, is calculated. The minimum iron oxide concentration was 0.23 mg/l (1.8 NTU). The minimum silicon oxide concentration was 0.68 mg/l (5 NTU). The measurement range of the concentration of iron oxide nanoparticles in water for the linear range of the output voltage measurement was 3.52 g/L, which meets the requirements of existing standards.

The scientific novelty of the work is that a system for determining insoluble impurities in water was proposed and created based on the phenomenon of surface plasmon resonance, which uses a source of infrared radiation to excite surface plasmons.

Approbation of work. The results of the work are covered in the following publications:

1. Romanenko A. Yu., Dorozhynska G. V. Numerical modeling of the concentration of insoluble impurities in water under the condition of plasmon resonance / XIX Scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation". - Kyiv, Ukraine. – December 20-21, 2023.

2. Romanenko A. Yu., Dorozhynska G. V. Increasing the sensitivity of the sensor for determining insoluble impurities in water / XIX Scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists "Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation". - Kyiv, Ukraine. – December 20-21, 2023.

Key words: sensor, surface plasmon resonance, insoluble impurities in water, sensitivity, detection limit.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	11
1.1 Параметри якості питної води	11
1.2 Домішки у воді та їх різновиди	13
1.3 Методи та засоби визначення нерозчинних домішок у воді	15
1.4 Поверхневий плазмонний резонанс для аналізу колоїдних розчинів	26
Висновок до розділу 1	30
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕРОЗЧИННИХ ДОМІШОК.....	32
2.1 Теоретичне підґрунтя математичних моделей.....	32
2.2 Наближення ефективних середовищ для опису колоїдних розчинів	38
2.3 Вплив концентрації колоїдних розчинів на відгук сенсора	43
Висновок до розділу 2	50
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛОЇДІВ	52
3.1 Об'єкт, аналітичне обладнання та методика експерименту	52
3.2 Виміряні спектри пропускання та резонансні характеристики	57
3.3 Експериментальне обґрунтування концепції дисертаційної роботи	60
Висновки до розділу 3	65
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА.....	66
4.1 Часткове технічне завдання на проєктування приладу.....	66
4.2 Розроблення схеми електричної принципової приладу системи.....	67
4.3 Розрахунок елементів схеми електричної принципової	73
4.4 Розрахунок похибок вимірювання	79
4.5. Розрахунок межі детектування та діапазону вимірювання	81
Висновок до розділу 4	83
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «ЕКО-ПЛАЗМОН»	84
Висновки до розділу 5	104
Список використаних джерел	108

ВСТУП

Водна ресурсна система планети є життєво важливою для усіх аспектів життя на Землі, від забезпечення водою живих істот до підтримки екосистем та промислового розвитку. Однак ця ціннісна природна ресурсна система може чинити ряд загроз. Адже забруднення води стає все більшою проблемою, що вимагає невідкладної уваги та досліджень. Однією з ключових складових забруднення води є нерозчинні домішки, такі як важкі метали, хімічні речовини, мікропластик тощо.

Виявлення та визначення нерозчинних домішок у воді має вирішальне значення для убезпечення водних ресурсів та охорони навколишнього середовища. Точні методи аналізу та надійні системи моніторингу води є критично важливими для ефективного управління водними ресурсами та надання вчасної реакції на забруднення. Саме у цьому контексті з'являється нова галузь наукових досліджень і технологічних розробок – системи визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами на основі плазмонного резонансу.

Плазмонний резонанс – це фізичне явище, яке виникає при взаємодії світла з металевою поверхнею або наночастинками. Явище плазмонного резонансу має великий потенціал у застосуванні в сенсорних системах, так як зміни в ньому можна використовувати для визначення хімічних і фізичних характеристик речовин. Завдяки поєднанню властивостей наноматеріалів та плазмонного резонансу, системи на основі цієї технології виявилися надзвичайно чутливими і точними для аналізу водних зразків. До найбільш важливих переваг оптичних сенсорів варто віднести: можливість неруйнівного безконтактного виявлення, високу чутливість, швидкість відгуку, нечутливість до електромагнітного (неоптичної частоти) і радіаційного полів, а також здатність передавати аналітичний сигнал без спотворення на більші відстані та зручність застосування.

Дана робота присвячена розробці системи визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами на основі плазмонного резонансу з підвищеною

точністю шляхом збільшення довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів та застосування діелектричної підкладки сенсора з матеріалу, який має малий показник заломлення.

Завдяки поєднанню сучасних технологій з науковими знаннями, системи визначення нерозчинних домішок у воді на основі плазмонного резонансу можуть стати одними з ключових інструментів у вирішенні проблем водного забруднення та підвищенні якості водних ресурсів, що надважливо для майбутніх поколінь.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Параметри якості питної води

Воду можна вважати якісною, коли її властивості відповідають нормам і вимогам Міжнародної організації здоров'я (МОЗ) для конкретного призначення. Якщо характеристики питної води збігаються з цими стандартами, тільки тоді її можна вважати придатною до використання [1].

Якість води можна оцінювати за допомогою різних параметрів та показників, які визначаються в ході аналізу.

Наприклад, хімічні властивості включають в себе концентрації шкідливих речовин в цілому і важких металів, зокрема, сліди органічних сполук та загальну мінералізацію води. Хімічні параметри стосуються ризику шкоди здоров'ю людини через накопичення в організмі важких металів, переважна більшість яких при перевищенні гранично допустимих концентрацій негативно впливає на здоров'я людини та життя в цілому [2].

В свою чергу мікробіологічні показники безпеки стосуються коліформних бактерій, кишкової палички, а також конкретних видів патогенних бактерій (наприклад, холерний вібріон), вірусів і найпростіших паразитів, перевищення яких призводить до виникнення інфекційних хвороб.

Фізичні властивості води визначаються органолептичними показниками, такими, як смак та присмак, забарвленість, запах і каламутність питної води, що сприймаються органами чуття. Відповідно до стандартів якості питної води України кожен органолептичний показник не має перевищувати встановлену граничну цифру у балах, градусах чи нефелометричних одиницях каламутності (НОК) [2].

Вимоги до якості питної води встановлені ДСанПіН 2.2.4-171-10 поширюються на воду, що подається централізованими системами господарсько-питного водопостачання і використовується для питних та побутових цілей,

виробництва харчових продуктів. Обов'язковою складовою таких вимог є нешкідливий хімічний склад води [3].

Вміст у питній воді шкідливих речовин, не зазначених у Санітарних нормах, не повинен перевищувати їх ГДК, які визначені санітарними нормами для підземних і поверхневих вод.

Органолептичні властивості води поділяються на 2 підгрупи: фізикоорганолептичні (запах, смак і присмак, кольоровість, каламутність, температура) та хіміко-органолептичні (сухий залишок, водневий показник, хлориди, сульфати, загальна мінералізація) [4].

Хімічні речовини, які надходять у воду внаслідок промислового, сільськогосподарського чи побутового забруднення – це важкі метали (наприклад, кадмій, ртуть, нікель, олово чи хром), детергенти (синтетичні миючі засоби), пестициди (хлорофос, метафос тощо), синтетичні полімери та їх мономери (фенол, формальдегід, капролактамі тощо). Їх вміст у воді мусить бути безпечним для здоров'я людей при постійному вживанні такої води протягом життя. Важлива відсутність не тільки гострих чи хронічних отруєнь, а і відсутність неспецифічної шкідливої дії, пов'язаної з пригніченням загальної резистентності організму. Він має забезпечувати збереження репродуктивного здоров'я, гарантувати відсутність мутагенної, канцерогенної, ембріотоксичної, тератогенної, гонадотоксичної дії та інших віддалених наслідків [5].

Загальні гігієнічні вимоги до питної води включають:

- хороші органолептичні властивості (прозорість, відносно низька температура, хороший освіжаючий смак, відсутність запахів, неприємних присмаків, забарвлень, видимих неозброєним оком включень та ін.);
- оптимальний природний мінеральний склад, який забезпечує хороші смакові якості води, отримання деяких необхідних організму макро- і мікроелементів;

- токсикологічна нешкідливість (відсутність токсичних речовин в шкідливих для організму концентраціях);
- епідеміологічна безпечність (відсутність збудників інфекційних захворювань, гельмінтозів тощо);
- радіоактивність води – в межах встановлених рівнів.

1.2 Домішки у воді та їх різновиди

Домішки води – це будь-які компоненти, які містяться в ній. Домішки не обов'язково шкідливі, наприклад, у джерельній воді містяться природні електроліти та мінерали, які покращують як смак, так і загальну якість води.

Однак у воді є й негативні домішки, які погіршують якість води, включаючи пил, бруд, шкідливі хімічні речовини, біологічні забруднювачі, радіологічні забруднювачі та загальну кількість завислих речовин (TSS). Усі домішки в питній воді є розчинними або нерозчинними [6].

Розчинні домішки

Розчинні домішки (або просто домішки) – це речовини або частки речовин, які добре розчиняються в воді, утворюючи гомогенний розчин. Розчинні домішки можуть бути різного типу і походити як з природних, так і з штучних джерел. Ці домішки можуть бути розчинними в різних розчинниках, та ми говоримо саме про розчинні домішки у воді.

Прикладами розчинних домішок у воді є солі, кислоти, луги, цукри, спирти, амінокислоти, гази (якщо розчинені у воді), барвники та інші речовини, які можуть створювати розчини з водою.

Нерозчинні домішки

Нерозчинні домішки – це речовини або частки речовин, які не розчиняються в розчиннику (в даному випадку у воді) або мають дуже обмежену розчинність. У контексті хімії, розчинність – це властивість речовини розчинятися в іншій речовині, утворюючи розчин.

Основна ознака нерозчинних домішок полягає в тому, що після спроби розчинити їх у розчиннику вони залишаються у вигляді твердого осаду або часток, які не розчинилися. Нерозчинні домішки можуть бути різних типів і походити як з природних, так і з синтетичних джерел. Вони грають важливу роль в хімії, промисловості, геології, медицині та інших галузях науки і технології.

Наприклад, нерозчинні домішки можуть включати речовини, такі як нерозчинні солі, органічні сполуки, нерозчинні гази, оксиди металів та багато інших речовин, які не взаємодіють з розчинником і не розчиняються в ньому. Важливою рисою нерозчинних домішок є їхні обмежені можливості розчинності, які залежать від хімічних і фізичних властивостей речовини та умов розчинення.

Мутність води викликана присутністю тонкодисперсних суспензій органічного та неорганічного походження. Зважені речовини потрапляють у воду внаслідок змиву твердих частинок (наприклад, глини, піску, мулу) верхнього покриву землі дощами або талими водами під час сезонних паводків, а також розмиву русла річок. Найменша каламутність водойм спостерігається взимку, найбільша – навесні в період паводків та влітку, в період дощів, танення гірських льодовиків та розвитку найдрібніших живих організмів та водоростей, що плавають у воді. Також підвищення каламутності води може бути викликане виділенням деяких карбонатів, гідроксидів алюмінію, високомолекулярних органічних домішок гумусового походження, появою фіто- та ізопланктону, а також окисленням сполук заліза та марганцю киснем повітря.

Зважені речовини мають різний гранулометричний склад, що характеризується гідравлічною крупністю, що виражається як швидкість осадження частинок при температурі 10°C у нерухомій воді.

Таблиця 1.1 Параметри зважених частинок

Зважені частинки	Розмір, мм	Гідравлічна крупність, мм/с	Час осадження частинок на глибину 1 м
Колоїдні частинки	$2 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-6}$	7×10^{-6}	4 роки
Тонка глина	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4} - 17 \times 10^{-5}$	0.5 - 2 місяця
Глина	27×10^{-4}	5×10^{-3}	2 доби
Мул	$5 \times 10^{-2} - 27 \times 10^{-3}$	1.7 - 0.5	10 - 30 хв
Пісок:			
Дрібний	0.1	7	2.5 хв
Средній	0.5	50	20 с
Крупний	1.0	100	10 с

Мутність негативно впливає на зовнішній вигляд води, але головним негативним наслідком високої каламутності є те, що вона захищає мікроорганізми при ультрафіолетовому знезараженні та стимулює зростання бактерій. Тож у всіх випадках, коли проводиться дезінфекція води, каламутність має бути мінімальною для забезпечення високої ефективності цієї процедури.

1.3 Методи та засоби визначення нерозчинних домішок у воді

Мутність – показник, який характеризує природну властивість води, зумовлену наявністю у воді завислих речовин органічного та неорганічного походження. Мутність води визначають фотометричним шляхом порівняння проб води, що досліджується, зі стандартними суспензіями. Результат вимірів виражають у мг/дм^3 при використанні основної стандартної суспензії каоліну, або в ОМ/дм^3 (одиниці мутності на дм^3) при використанні основної стандартної суспензії формазину. Останню одиницю виміру називають також Одиниця

Мутності з Формазин (ОМФ) або в західній термінології FTU (Formazine Turbidity Unit) [7], і тоді $1\text{FTU}=1\text{ОМФ}=1\text{ОМ/дм}^3$.

Останнім часом, як основна, у всьому світі утвердилася фотометрична методика вимірювання каламутності по формазину, що знайшло своє відображення в стандарті ISO 7027 (Water quality – Determination of turbidity) [8]. Відповідно до цього стандарту одиницею вимірювання каламутності є FNU (Formazine Nephelometric Unit). Агентство з охорони навколишнього середовища США (U.S. EPA) та Всесвітня Організація Охорони Здоров'я (ВООЗ) використовують одиницю вимірювання каламутності NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Співвідношення між основними одиницями виміру каламутності наступне: $1\text{FTU(ОМФ)}=1\text{FNU}=1\text{NTU}$.

ВООЗ за показаннями впливу на здоров'я мутність не нормує, проте з погляду зовнішнього вигляду рекомендує, щоб каламутність була не вищою за 5 NTU (нефелометрична одиниця каламутності), а для цілей знезараження – не більше 1 NTU.

В свою чергу ISO 7027-1:2016 [8] визначає два кількісні методи з використанням оптичних мутномірів або нефелометрів для визначення каламутності води:

а) нефелометрія, процедура вимірювання дифузного випромінювання, застосовна до води з низькою мутністю, наприклад, питної води (каламутність, виміряна цим методом, представлена в нефелометричних одиницях каламутності NTU);

б) турбідиметрія, процедура вимірювання ослаблення радіаційного потоку, більш застосовна до сильно каламутних вод, наприклад, стічних вод або інших каламутних вод (каламутність, виміряна цим методом, виражається в одиницях ослаблення формазину (FAU), результати зазвичай коливаються від 40 FAU до 4000 FAU).

Як вже згадувалося вище, нефелометрія застосовується для води з низьким рівнем каламутності, а турбідиметрія більш застосовується до сильно каламутної води. Результати типово становлять між $<0,05$ NTU і 400 NTU, що в залежності від діапазона концентрації – від 50 мг/мл до 400 мг/мл і для суспензії діоксиду кремнію – від 6,5 мг/мл до 52 мг. Існує числова еквівалентність одиниць NTU і FNU. Для визначення зважених твердих частинок застосовують стандарт ISO 11923:1997 [9]. Цей стандарт міститься в методі для визначення завислих речовин в стічних водах з фільтрацією через скловолокнисті фільтри. Мінімальна величина значення визначається приблизно 2 мг/мл. За даними агентства з охорони навколишнього середовища США, допустимий вміст твердих домішок у питній воді становить 500 мг/мл [10]. ВООЗ регламентує значення каламутності питної води менше 0,2 NTU (приблизно 0,2 мг/мл) і значення загальної кількості розчинених твердих речовин менше 600 мг/мл [11]. Відповідно до вимог стандартів України [12], що визначають каламутність та сухий залишок, вміст механічних частинок у воді має бути в діапазоні від 200 до 500 мкг/мл, а концентрація колоїду, що визначає каламутність води, від 1 до 20 мкг/мл.

Існуючі методи контролю концентрації суспензій дозволяють визначати розміри наночастинок та розподіл їх за розмірами [13, 14]. Найбільше практичне застосування отримали методи контролю концентрації та дисперсності, засновані на вимірюванні розсіювання світлового потоку та зважуванні сухого залишку: оптична та електронна мікроскопія, ультразвукова та електроакустична спектрометрія, дегідратації та ін. Більшість з цих методів вимагають значних витрат часу та підготовки досліджуваного зразка [15].

Оптичні сенсори мають ряд переваг перед ультразвуковими та механічними методами. Основною їх перевагою є висока швидкодія, точність вимірювання параметрів колоїду, висока чутливість та широкий діапазон застосування [16]. Найбільш широко використовувані оптичні методи: абсорбція та флуоресценція. Флуоресцентні сенсори використовують явище

флуоресценції, котре полягає в емісії вторинних фотонів продуктами реакції взаємодії аналіту з рецептором під впливом збуджуючого випромінювання. Флуоресценція є результатом процесу переходу електронів у збуджений стан, що відбувається в деяких молекулах, котрі отримали назву флуорофорів або флуоресцентних барвників. Тривалість флуоресценції залежить від тривалості життя електронів у збудженому стані. Флуоресцентний барвник має молекулу, білок, або квантову точку, яка може маркувати досліджувані аналіти як білки, нуклеїнові кислоти, ліпіди, тощо. Наявність високочутливих вибірковою люмінесцентних методів маркування робить флуоресценцію оптичним методом молекулярного зондування в мікромініатюрних вимірювальних системах, котрий широко використовується. Флуоресцентний сенсор має наступні складові елементи: джерело збуджуючого випромінювання; флуорофор; фільтри на довжину хвилі випромінювання вторинних фотонів, щоб ізолювати їх від фотонів збудження; фотодетектор, котрий реєструє вторинні фотони і виробляє відповідний електричний сигнал, пропорційний інтенсивності емісії вторинних фотонів. Для збільшення чутливості вимірювання та зниження межі детектування сенсор роблять з двома вимірювальними оптичними каналами: опорним і реєструючим (рис. 1.1) [17].

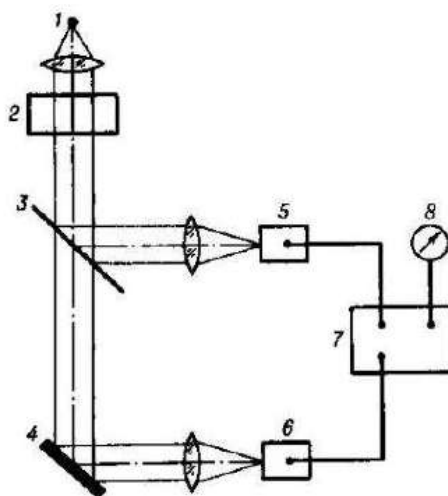


Рис.1.1. Структурна схема двохканального флуорометра [17].

Від джерела збуджуючого випромінювання 1 світло через модулятор інтенсивності 2 падає на поділяючу пластинку 3, котра розділяє оптичний сигнал на дві рівні складові: одна йде на фотодетектор опорного каналу 5, а друга складова, відбившись від досліджуваного зразку 4, йде на фотодетектор реєструючого каналу 6. Сигнали порівнюються в компараторі 7, різниця опорного та реєструючого сигналів змінює стан індикатора 8. Інформативним сигналом є або відношення амплітуд інтенсивностей цих складових, або фазовий зсув між ними. Незважаючи на широке коло застосування флуоресцентних сенсорів основним їх недоліком є неможливість вимірювати низькорівневі сигнали. Крім того для визначення нерозчинних домішок у воді необхідно застосовувати спеціальні флуоресціюючі мітки, зокрема барвники та наночастинки [17].

Абсорбційні сенсори використовують методи вимірювання оптичної щільності, котрі передбачають визначення концентрації аналіту шляхом вимірювання ослаблення інтенсивності світла певної довжини хвилі, що пройшло через аналіт. В лабораторних дослідженнях ослаблення світла зазвичай вимірюється за допомогою УФ-спектроскопії. Ультрафіолетове поглинання вперше було використано Густафссоном [18]. Основним недоліком методів виявлення поглинання на основі мікрофлюїдики, є те, що при зменшенні об'ємів зразків, довжина оптичного шляху через зразок зменшується, а це знижує чутливість, відповідно до закону Ламберта. Тому основним недоліком адсорбційних сенсорів є великі габарити та вузький спектральний діапазон вимірювання.

До абсорбційних сенсорів для дослідження каламутних середовищ відносяться нефелометри та турбідиметри. У якості джерела випромінювання застосовують, або широкосмугове джерело (вольфрамова лампа, білий світлодіод) з діапазоном випромінювання 400...680 нм, відповідно до стандарту

US EPA180.1 [19], або інфрачервоне монохроматичне джерело з діапазону випромінювання 780...900 нм, відповідно до стандарту ISO 7027.

Нефелометрія

Нефелометричний метод застосовують для аналізу суспензій, емульсій та інших мутних середовищ. Інтенсивність пучка світла, що проходить через таке середовище, зменшується за рахунок розсіювання, а також за рахунок інших процесів взаємодії світла з вагомими частинками. Вимірювання інтенсивності світла, яке розсіюють вагомні частинки – те, на чому ґрунтується нефелометричний метод.

Розсіювання світла частинками, розміри яких перевищують довжину хвилі світла, яке проникло через мутне середовище, називають розсіянням Мі (це прізвище вченого, який власне і розробив дане явище у 1908 р.). Згідно із законом Релея інтенсивність світла, розсіяного цими частинками, дорівнює [20]:

$$I = I_0 \frac{n_1^2 - n_2^2 NV_i^2}{n_2^2 \lambda^4 r^2} (1 + \cos^2 \beta), \quad (1.1)$$

де n_1 і n_2 – показники заломлення світла частинками та середовищем відповідно; N – загальне число частинок, що розсіюють світло; V_i – об'єм даної частинки; λ – довжина хвилі світла, що падає; r – відстань до приймача розсіяного світла, β – кут між світлом, що падає, і тим, що розсіюється. Якщо в наявності крупні частинки, діаметр яких вимірюється, наприклад, десятками нанометрів, закон Релея не виконується, однак це не викликає особливих труднощів в аналітичній роботі. Адже зв'язок концентрації з інтенсивністю встановлюють за градувальним графіком. У дослідженнях заданої системи показники заломлення n_1 і n_2 – залишаються сталими, r і β – залежать від конструкції приладу й теж не змінюються. За таких умов залежність переходить у наступне рівняння [20]:

$$I = k I_0 \frac{NV_i^2}{\lambda^4}, \quad (1.2)$$

Множник $\frac{1}{\lambda^4}$ вказує на швидке зростання інтенсивності розсіяного світла зі зменшенням довжини хвилі світла, що падає, а концентрація – характеризує число частинок в одиниці об'єму [20].

За умови достатнього розведення розчину інтенсивність світла I_t , яке пройшло через суспензію або інше каламутне середовище, описується рівнянням, яке має за сталості певних умов вигляд, аналогічний закону Бугера – Ламберта – Бера [20].

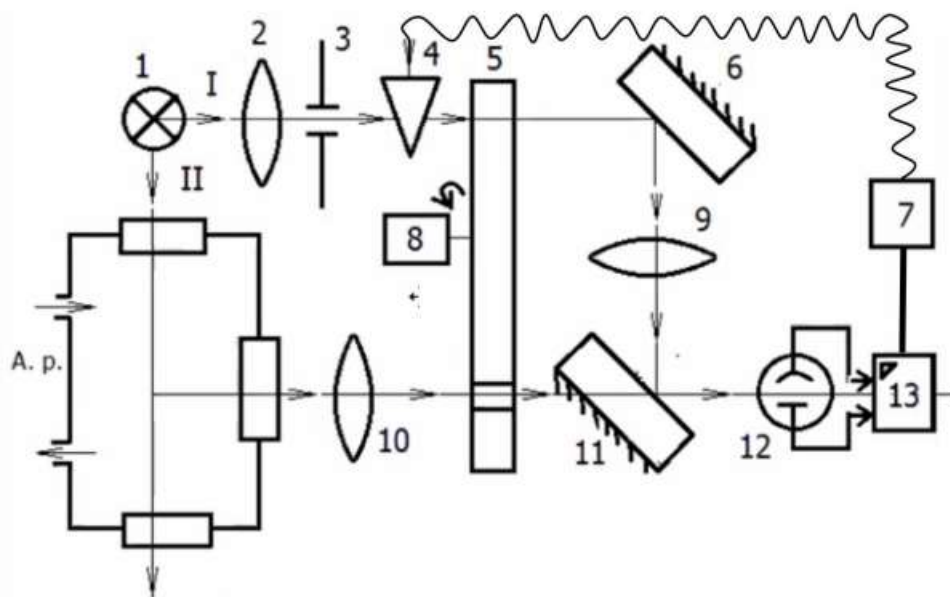


Рис. 1.1. Схема нефелометричного аналізатора [21].

Розглянемо вказану вище схему нефелометричного аналізатора детальніше. Від джерела випромінювання 1 формується два промені – I і II. Промінь II проходить крізь аналізуючу речовину, розсіюється під кутом 90° через об'єктив 10, напівпрозоре дзеркало 11 і направляє на фотоприймач 12. Промінь I через об'єктиви 2 і 9, дзеркала 6 і 11, а потім так само направляє на фотоприймач 12. Потoki I і II по черзі перекриваються модулятором 5, який обертається з постійною швидкістю синхронним двигуном 8. Світлові потоки порівнюються між собою на фотоприймачі 12, і у випадку їх відмінності після підсилювача з фільтром 13 сигнал керування направляє на двигун 7, після чого оптична заслінка (або ж клин 4) механічно зміщується до тих пір, поки не

відновиться рівність світлових потоків на фотоприймачі 12. Зі зміною положення клину 4 змінюються і положення індикаторної стрілки приладу [21].

Розглянемо недоліки нефелометричного методу на прикладі схеминефелометричного аналізатора:

- такі схеми використовуються лише до монодисперсних систем;
- при дослідженні концентрованих розчинів вторинне розсіювання може вносити додаткові похибки;
- при роботі з дуже розбавленими системами необхідно ретельно видалити домішки і урахувати розсіювання на флуктуаціях густини розчину [21].

Турбідиметрія

Турбідиметрія – метод кількісного аналізу, який базується на вимірюванні інтенсивності світла, яке поглинається суспензією твердої речовини (важливо, що джерело і приймач випромінювання знаходяться на одній лінії). Величину, яку називають мутністю (S), при застосуванні турбідиметричного вимірювання визначають за рівнянням, яке має вигляд, аналогічний рівнянню Бугера – Ламберта – Бера [22]:

$$S = \lg \frac{I_0}{I} = K * C * l, \quad (1.3)$$

де I та I_0 – інтенсивність світлового потоку, який пройшов крізь суспензію, що падає на неї, відповідно; K – молярний коефіцієнт мутності розчину; l – товщина шару розчину, що поглинає; C – концентрація часток, які поглинають [22].

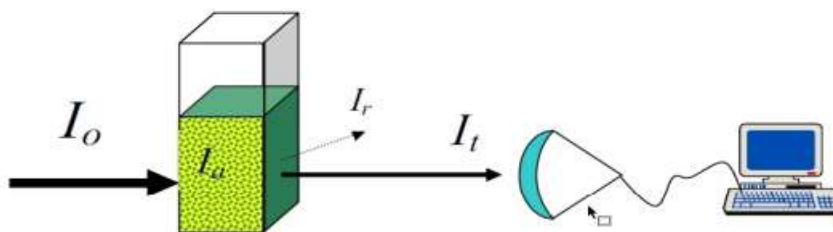


Рис. 1.2. Принцип турбідиметричного дослідження зразка [23].

У турбідиметричних дослідженнях використовуються як правило короткі довжини хвиль – 340 нм. Так як частина розсіяного світла збільшується прямопропорційно четвертій степені довжини хвилі, відповідно при меншій довжині хвилі світло складатиме більшу частину від падаючого, а отже – буде інтенсивнішим. В той самий час оптичні системи працюють в ближньому ультрафіолетовому діапазоні при 340 нм, якщо ж використовувати дальній ультрафіолетовий діапазон – треба використовувати спеціальну оптику. Саме використання набору світлодіодів, що випромінюють світло в повному оптичному спектрі і спеціальних світлофільтрів дозволяє добитись вимірювального діапазону від 0,05 до 3,5 одиниць оптичної густини на всіх довжинах хвиль [23].

Для турбідиметричних вимірювань придатні колориметри, фотоколориметри, спектрофотометри (як правило, використовують синій світлофільтр). Порядок вимірювань збігається з порядком колориметричних вимірювань. Кількісні визначення проводять з використанням калібрувальної кривої.

Турбідиметричний метод має високу чутливість, але має й недоліки. Одним з головних недоліків є те, що застосування даного методу дещо обмежене і це пов'язано з тим, що на світлорозсіювання дуже впливає розмір часток, тому при порівнянні стандартів і проб необхідне суворе дотримання ідентичності умов. Труднощі, пов'язані із впливом різних факторів на властивості суспензій, зменшуються при фототурбідиметричному титруванні, коли точку еквівалентності визначають за максимумом помутніння.

Фототурбідиметричне титрування можна виконувати візуально або з використанням абсорбційного фотометра [22].

Седиментація

Седиментація – процес осідання часток під дією сили тяжіння. Седиментаційна стійкість тісно пов'язана із процесом осідання частинок,

зумовлена лише їх розміром. У будь-якій суспензії тверді частки речовини будуть седиментуватися (осідати) зі швидкістю, що залежить від ступеня дисперсності твердих часток і деяких інших факторів. При радіусі часток дисперсної фази $<0,5$ мкм вона непридатна, оскільки броунівський рух перешкоджає їх осіданню (відображено у формулі Стокса) [24]:

$$V = \frac{2r^2(d_1 - d_2)g}{9\nu}, \quad (1.4)$$

де V – швидкість руху (осідання), см/с; r – радіус часток дисперсної фази; d_1 – густина часток дисперсної фази, г/см³; d_2 – густина дисперсійного середовища, г/см³; ν – абсолютна в'язкість дисперсійного середовища, г/см · с; g – прискорення сили тяжіння, см/с². Швидкість осідання (рис. 1.3) прямо пропорційно залежить від радіуса дисперсної фази та дисперсійного середовища і обернено пропорційна в'язкості дисперсійного середовища [24].

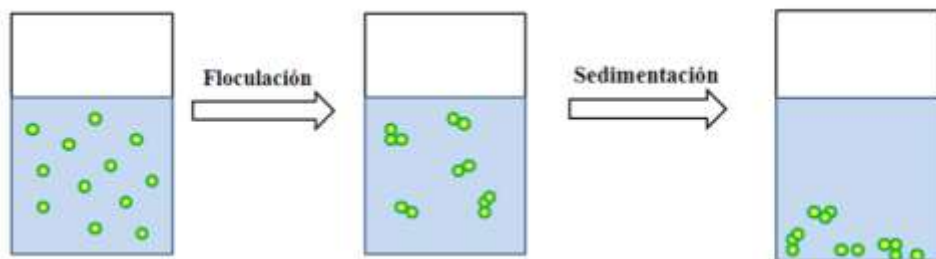


Рис. 1.3. Осідання колоїдних частинок.

При застосуванні формули Стокса треба мати на увазі, що частинки дисперсної фази повинні бути кулястої форми, абсолютно тверді й гладенькі; крім того, формула Стокса не відображує явищ, що відбуваються на межі розподілу фаз, які залежать від того, є речовини гідрофобними чи гідрофільними. Оскільки стійкість – величина за своїм значенням обернена до швидкості S ., формулу Стокса можна перетворити і одержати [24]:

$$U = \frac{1}{V} = \frac{9 + \nu}{2r^2(d_1 - d_2) * g}, \quad (1.5)$$

де U – стійкість суспензії.

Стійкість суспензії буде тим більша, чим менший радіус часток дисперсної фази, чим подібніша густина фази і середовища, чим більша в'язкість дисперсійного середовища [24].

Основні характеристики існуючих турбідиметрів та нефелометрів наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Характеристики існуючих нефелометрів та турбідиметрів

Назва	Ціна, грн	Джерело	Діапазон, NTU	Роздільна здатність, NTU	Похибка відносна, %	Межа, NTU	проба, мл
HI 93703	77 346,00	LED890nm	0...50	0,01	5	0,0100	18
TB-200	34 800,00	LED850nm	0...100	0,01	5	0,0100	18
TN500	44 280,00	W лампа	0,01...20	0,01	2	0,0100	18
TN400	34 800,00	LED850nm	0,01...20	0,01	2	0,0100	18
TN 100	43 200,00	LED850nm	0,01...20	0,01	2	0,0100	10
TB100	22 600,00	LED850nm	0...100	0,01	2	0,0100	18
2100Q 01	89 200,00	LED860nm	0,01...20	0,01	2	0,0100	18
TUB-430T	24 700,00	LED860nm	0...20	0,01	3	0,0100	18
ST-731	60 080,00	whiteLED	0...10	0,05	2	0,0500	проток
ST-730	64 920,00	whiteLED	0...100	0,1	2	0,1000	проток
LT-736	72 800,00	whiteLED	0,002...40	0,0020	2	0,0020	проток
LT-736B	72 800,00	LED860nm	0,002...40	0,0020	2	0,0020	проток
LT739	69 440,00	whiteLED	0,001...40	0,0010	2	0,0010	проток
LT739B	69 440,00	LED860nm	0,001...40	0,0010	2	0,0010	проток
TB300 IR	77 447,00	LED860nm	0,01...10	0,01	2	0,0100	проток

Оптичні сенсори мають ряд переваг перед вищезгаданими сенсорами, основними серед яких є висока швидкодія, точність вимірювання параметрів аналіту, чутливість та широкий діапазон застосування. Недоліком є висока вартість вимірювального обладнання та необхідність підготовки проби (дегазація) та великий її об'єм (понад 10 мл), вимірювального оснащення (кювети мають бути дуже чисті та оброблені попередньо спеціальними розчинниками) та робочої зони (відсутність пилу, вологи у повітрі, тощо). Крім того тривалість одного вимірювання складає понад 6 секунд, а в більшості приладів від 10 секунд.

Метод на основі поверхневого плазмонного резонансу (ППР) є найбільш ефективним, оскільки не потребує використання міток, та видає результат в реальному часі [25].

1.4 Поверхневий плазмонний резонанс для аналізу колоїдних розчинів

Поверхневий плазмонний резонанс (ППР) – це явище порушення умови ПВВ на межі поділу двох середовищ: більш оптично щільного та менш оптично щільного. Під час виникнення ППР значна частина енергії падаючого світла на поверхню металевої плівки чутливий елемент ППР-сенсору перетворюється в енергію плазмонів, внаслідок чого інтенсивність відбитого від її поверхні світла різко знижується. При цьому електричне поле цієї хвилі спадає за експонентою у напрямку, котрий перпендикулярний межі поділу [25].

Вивчення й використання явища резонансного збудження поверхневих плазмонів на межі середовищ становить невід’ємну частину фізики поверхні. Спектроскопія поверхневих плазмонів дозволяє досліджувати властивості поверхонь твердих тіл з одно- і багат шаровими покриттями за умови сумісності товщини шарів з довжиною хвилі оптичного випромінювання, а також приповерхневих областей у різних середовищах.

Методика поверхневого плазмонного резонансу дозволяє вивчати процеси молекулярної взаємодії в реальному часі без хімічного приєднання до досліджуваних об’єктів різних міток. При цьому експериментатор одержує додаткову інформацію про кінетику досліджуваних процесів з високою чутливістю, витрачаючи на проведення аналізу малі кількості проби (мікролітри).

Поверхневі плаزمони існують на межі розподілу між діелектриком та металом. Резонансне зв’язування поверхневих плазмонів із фотонами світла, лінійно поляризованого у площині падіння, за допомогою призми приводить до порушення сильної електромагнітної хвилі.

Наявність поверхневих плазмонів визначається діелектричними властивостями металу і контактуючого з металом аналіта, а проявляється як

різкий мінімум у спектрі відбиття світла. Таким чином, ППР-сенсор є дуже чутливим тонкоплівковим рефрактометром, що вимірює зміни коефіцієнта заломлення, який виникає при адсорбції молекул на металевій поверхні сенсора.

За рахунок вимірювання величини зсуву мінімуму характеристики відбиття і залежності її кутового положення від часу, за допомогою ППР-сенсора можливо:

1. Визначати наявність в розчинах хімічних, біохімічних речовин і мікрочастинок (вірусів, бактерій, антитіл, токсинів тощо);
2. Визначати концентрацію в розчинах хімічних, біохімічних речовин і мікрочастинок (вірусів, бактерій, антитіл, токсинів...);
3. Вивчати кінетику біохімічних взаємодій і її залежність від різних чинників [25].

Таким чином ППР-сенсори можна використовувати для наукових досліджень в біохімії, для визначення небезпечних забруднень, отруйних і шкідливих домішок в питній воді, для контролю різних інгредієнтів в молоці, пиві, вині, інших напоях, в бензині, моторних маслах і т.п. З'явилась можливість швидко визначати шкідливі віруси, бактерії, токсини, генетично модифіковані організми, біохімічні речовини в рідинах, як в лабораторних, так і в польових умовах [25].

У роботі [26] наведені результати чисельного моделювання та експериментального підтвердження залежності відгуку сенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу від малих концентрацій водних наносупензій частинок алмазів, діоксиду кремнію, заліза та властивостями. Показано ефективність застосування підходу Максвелла-Гарнетта та формалізму матриць розсіювання Джонса для розрахунку відгуку ППР-сенсора. На основі чисельного аналізу та експериментального підтвердження показано, що ППР-сенсор з межею детектування 3 кут. сек. дозволяє контролювати концентрації наночастинок у суспензії від 35 до 115 мкг/мл (залежно від природи часток). При

цьому найменша межа детектування встановлена для наночастинок алмазу, а найбільша – для діоксиду кремнію. За технічними характеристиками найбільш поширених комерційних ППР-приладів та результатами чисельного моделювання визначено можливість контролю методом поверхневого плазмонного резонансу концентрації наночастинок у суспензії від 0,12 до 3,8 мкг/мл. Як матрицю розглядали дистильовану воду, а як наповнювач наночастинки алмазів. Також як наповнювачі розглядалися наночастинки діоксиду кремнію SiO_2 , заліза Fe та його оксиду Fe_2O_3 , оскільки вони найчастіше присутні у питній воді. Вихідними даними для моделювання були відносні діелектричні проникності матриці та наповнювача для відповідної довжини хвилі. Для визначення мінімальної концентрації наночастинок, яку може виявити метод ППР у водній суспензії (межі детектування (LOD – limit of detection)), задавалися величиною шуму базової лінії (baseline noise) найбільш поширених та найбільш чутливих комерційних ППР-приладів Biacore T200 та Reichert SR700. Додатково проведено експериментальне дослідження водної суспензії наночастинок алмазів на ППР-рефрактометрі «Плазмон-71», розробленого в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України [27]. Джерелом порушення поверхневих плазмонів у плівці золота товщиною 50 нм використовувався р-поляризоване світло від напівпровідникового лазерного діода з довжиною хвилі 850 нм.

В цій роботі [26] досліджувалась водна суспензія синтетичних алмазних порошків з розмірами частинок менше мікрона, які використовуються при обробці матеріалів деталей оптичних та електронних приладів. Показано вплив різних концентрацій алмазних порошків у дистильованій воді на величину відгуку сенсора на основі явища плазмонного поверхневого резонансу (ППР). Експериментальні результати показали високу чутливість методу ППР (840 кут. хв·мкг-1·мл) до малих концентрацій порошку від 2 до 50 мкг/мл. Кондуктометрический метод виявився не інформативним, оскільки виміряна

провідність була однакова для досліджуваних суспензій: 5 ± 1 мкСм/см. Експериментальні результати добре узгоджуються з математичною моделлю суспензії з урахуванням підходу Максвелла-Гарнетта і математичного формалізму матриць розсіяння Джонса (відносна похибка результату виміру 5%). Авторами було поведено вимірювання кутового зсуву мінімуму характеристики відображення для 7 зразків суспензій вода-алмаз з різною концентрацією наночастинок алмазу, а саме: 2,5, 5, 10, 20, 30, 40 і 50 мкг/мл (ppm). Середній розмір частинок становив менше одного мікрона. Додатково було проведено вимірювання кондуктометричним методом питомої провідності кожної суспензії.

Експериментальна установка складалася з ППР-рефрактометра «Плазмон-б», перистальтичного насосу та термостату, розроблених в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. Робочу поверхню чутливого елемента ППР-рефрактометр формує плівка золота товщиною 50 ± 2 нм на скляній підкладці з оптичного скла Ф1. Джерелом порушення поверхневих плазмонів у плівці золота є р-поляризоване світло від напівпровідникового інжекційного лазерного діода з довжиною хвилі 650 нм. Необхідні умови збудження поверхневого плазмона забезпечуються зміною кута падіння на поверхню чутливого елемента променя світла від лазера.

Висновок до розділу 1

Так як водна ресурсна система планети є життєво важливою для усіх аспектів життя на Землі, але в той же час забруднення води стає все більшою проблемою, у першому розділі даної роботи було розглянуто ключові складові забруднення води, в тому числі нерозчинні домішки, такі як важкі метали, хімічні речовини, мікропластик тощо. Розглянуто методи визначення нерозчинних домішок у воді, серед яких нефелометрія, турбідиметрія, седиментація. Також розглянуто системи визначення нерозчинних домішок у воді сенсорами на основі плазмонного резонансу, які можуть стати одними з ключових інструментів у вирішенні проблем водного забруднення та підвищенні якості водних ресурсів, що дуже важливо для майбутніх поколінь.

Підсумовуючи основні відомості першого розділу, виділимо основні моменти:

1. Для визначення нерозчинних домішок у питній воді застосовують переважно такі оптичні абсорбційні методи, як нефелометрію та турбідиметрію. Недоліком цих методів є висока вартість вимірювального обладнання (понад 20 тис.грн.) та необхідність підготовки проби води (дегазація) та великий її об'єм (понад 10 мл), вимірювального оснащення (кювети мають бути дуже чисті та оброблені попередньо спеціальними розчинниками) та робочої зони (відсутність пилу, вологи у повітрі, тощо). Крім того зазначені методи є відносно довготривалими: одне вимірювання потребує понад 6 секунд, а в більшості приладів вимагає часу від 10 секунд.

2. Незважаючи на низьке значення межі визначення каламутності (0,001...0,01 NTU), існуючі прилади мають велике означення відносної похибки вимірювання понад 2%. Та в реальних умовах така межа є непотрібною, оскільки відповідно до стандартів (ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014), наприклад, питна бутильована вода повинна мати каламутність менше 0,5 NTU, а вода з системи водопостачання та колодязів в межах 1...3,5 NTU.

3. Альтернативним методом для виявлення нерозчинних домішок у воді є метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу. Існуючі роботи показали можливість застосування цього методу для визначення нерозчинних домішок у воді, зокрема діоксиду кремнію, заліза та його оксиду. В роботах застосовані різні довжини хвиль для збудження поверхневих плазмонів та одну товщину чутливого золотого елементу.

4. Тому для розробки системи визначення нерозчинних домішок у воді методом ППР необхідно визначити оптимальну довжину хвилі збудження поверхневих плазмонів, оптимальну для цієї довжини хвилі товщину металевого шару чутливого елементу та оцінити можливу межу детектування і чутливість на прикладі наночастинок оксидів кремнію та заліза, які основними нерозчинними забруднювачами питної води.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕРОЗЧИННИХ ДОМІШОК

2.1 Теоретичне підґрунтя математичних моделей

За результатом літературного огляду було встановлено, що для виявлення нерозчинних домішок у воді можна застосовувати метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР). В наведених роботах автори застосовували дві різні довжини хвиль – 650 нм та 850 нм для збудження поверхневих плазмонів в тонкій плівці золота товщиною 50 нм, хоча відомо, що для різних довжин хвиль треба застосовувати різні оптимальні товщини металу [28]. Тому спочатку необхідно визначити оптимальну довжину хвилі збудження поверхневих плазмонів та оптимальну для цієї довжини хвилі товщину металевого шару. Оптимізація полягатиме у виборі такої довжини хвилі, яка забезпечить найбільшу чутливість ППР-сенсора для визначення нерозчинних домішок у воді. Також треба буде оцінити можливу межу визначення нерозчинних домішок на прикладі наночастинок оксидів кремнію та заліза, які є основними нерозчинними забруднювачами питної води.

Правильний вибір довжини хвилі та товщини металу забезпечить необхідні умови для розповсюдження поверхневих плазмонів на межі метал-суспензія. При цьому явище ППР спостерігається за умови падіння світла поляризованого паралельно площині падіння (р-поляризованого) під кутом θ , що є більшим за кут повного внутрішнього відбиття (ПВВ) зі сторони оптично більш щільного середовища з діелектричною проникністю ϵ_p у менш оптичне щільне середовище (аналіт) з діелектричною проникністю ϵ_a , наприклад зі скла у воду, на тонкий шар металу з діелектричною проникністю ϵ_m (рис. 2.1, а). Наявність резонансу визначають по характеристиці відбиття $R_p(\theta)$, яка є залежністю нормованої інтенсивності (коефіцієнта відбиття) відбитого від межі метал-суспензія від кутів падіння цього світла (рис. 2.1, б). Під час резонансного поглинання енергії фотонів падаючого світла поверхневими плазмонами металевої плівки,

реєструють мінімум інтенсивності на характеристиці відбиття за певного кута – кут мінімуму ППР θ_{min} . Зміни в аналіті внаслідок фізичних, хімічних, біологічних явищ чи процесів, призводять до зміни його показника заломлення ΔN_a (рис.2.1, б) та, як наслідок, до кутового зсуву $\Delta\theta$ характеристики відбиття та/або її мінімуму, що дозволяє відслідковувати ці процеси в реальному часі.

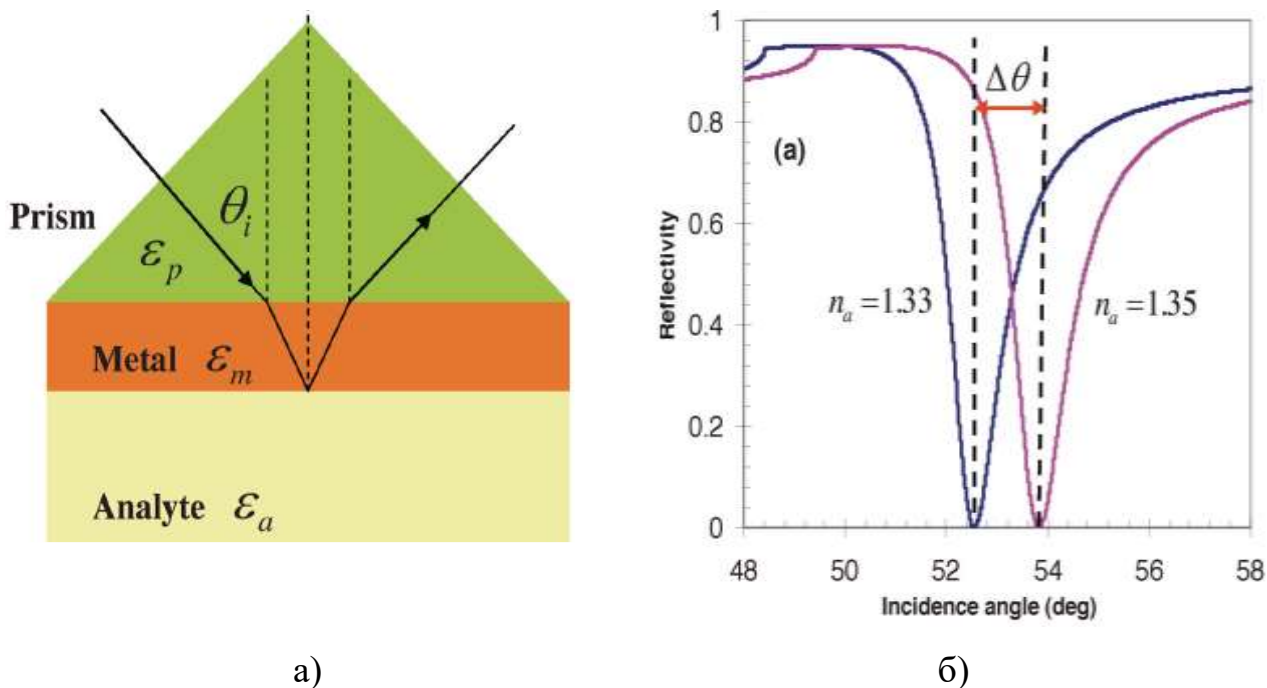


Рис. 2.1. Геометрія Кречмана (а) та резонансна характеристика відбиття (б) [29].

Вимірюючи параметри характеристики відбиття (кут мінімуму, кут повного внутрішнього відбиття, значення коефіцієнту відбиття в мінімумі, напівширину характеристики, тощо) та їх зміну під час протікання об'ємних чи поверхневих процесів в аналіті, можна розрахувати, як оптичні характеристики металевого шару (показник заломлення n_m , коефіцієнт екстинції k_m і товщина d_m) та аналіту (показник заломлення N_a і коефіцієнт екстинції K_a), так і параметри самих процесів (коефіцієнти асоціації, дисоціації, швидкість протікання реакції, тощо). Особливістю методу ППР є те, що навіть при зміні показника заломлення лише на поверхні металу (в нанорозмірному шарі) та сталому значенні в усьому об'ємі аналіта, спостерігається зсув мінімуму характеристики відбиття. При цьому кут ПВВ залишається сталим. Ця особливість відрізняє метод ППР від

рефрактометричного методу, який застосовують для визначення показника заломлення рідинних середовищ за допомогою оптичних рефрактометрів. Тому ППР-прилади є найбільш чутливими до змін, що відбуваються безпосередньо на межі між двома середовищами з різною щільністю. У переважній більшості приладів використовують призмий метод збудження поверхневих плазмонів із використанням геометрії Кречмана [28], оптична схема якої складається з джерела р-поляризованого випромінювання, призми ПВВ, чутливого елемента з наношаром провідного матеріалу й фотоприймача, який перетворює інтенсивність відбитого світла від межі метал-суспензія у пропорційний за амплітудою електричний сигнал.

Чутливість ППР-приладів з призмий збудженням за схемою Кречмана в конфігурації сканування кута з механічною розгорткою (у газподібному і рідкому середовищах) при фіксованій довжині хвилі визначається як відношення між зсувом кута мінімуму характеристики відбиття $\Delta\theta_{min}$ та зміною показника заломлення аналіту ΔN_a , котра викликала цей кутовий зсув [29]. Формула 2.1 визначає чутливість в режимі вимірювання кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття. В режимі вимірювання зміни інтенсивності відбитого світла при фіксованому куті його падіння вираз чутливості приймає інший вигляд (формула 2.2).

$$S_{\theta} = \frac{\Delta\theta_{min}}{\Delta N_a} \quad (2.1)$$

$$S_R = \frac{\Delta R}{\Delta N_a} \quad (2.2)$$

Оцінку впливу довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів на величину чутливості ППР-сенсору було виконано за допомогою чисельного моделювання шляхом побудови теоретичної характеристики відбиття $R_p(\theta)$ для багат шарової системи “призма (скло) – металева плівка – суспензія (аналіт)” і р-

поляризованого монохроматичного падаючого випромінювання [30]. Характеристику відбиття $R_p(\theta)$ розраховували як функцію кута падіння, використовуючи формули Френеля і математичний формалізм матриць розсіювання Джонса [31]. В якості моделі розглядалась оптична система з 3 плоскопаралельних шарів з оптичними параметрами n , k , d для довжин хвиль комерційно доступних напіпровідникових лазерів: 650, 780, 850, 980, 1064, 1310 та 1550 нм. Перший шар моделював призму ПВВ з показником заломлення n_p для двох типів скла: флінту (марка Ф1) та кварцу (марка КУ-2). Показники заломлення скла призми для різних довжин хвиль було взято з табличних даних [32]. Другий шар – металевий шар з параметрами n_m , k_m , d_m у якому збуджувались поверхневі плазмони. Для моделювання в якості матеріалу металевої плівки було обрано золото, оскільки золото забезпечує найменшу півширину характеристики відображення (після срібла) через свою високу провідність. Срібло швидко окислюється у воді, тому використовується у ППР-сенсорах лише для повітряних сумішей. Значення показника заломлення та коефіцієнту екстинції для відповідної довжини хвилі обирали з табличних даних [33]. Третій шар описував суспензію: наночастинки оксиду кремнію чи оксиду заліза у воді. Для визначення оптичних параметрів третього шару n_e , k_e була застосована одна з моделей модель ефективного середовища (розділ 2.2). Значення показників заломлення та коефіцієнтів екстинції води, оксидів кремнію та заліза для відповідної довжини хвилі обирали з табличних даних [34].

При моделюванні розглядався випадок, коли поляризоване світло з довжиною хвилі λ відбивається від багат шарової структури, чи проходить через неї [35]. Було зроблено припущення, що всі шари структури є плоско паралельними і розташовані між напівнескінченим зовнішнім середовищем і напівнескінченою підкладкою. Для дослідження відбиття і пропускання поляризованого світла багат шаровою структурою, розташованою між напівнескінченими середовищем і підкладкою, при похилому падінні

використовується 2×2 матриця розсіювання S (формула 2.3) для багатошарової планарної структури [30], що складається з 1, 2, 3, ..., j , m рівнобіжних шарів, розміщених між двома напівнескінченими середовищами: навколишнім середовищем (0) і підкладкою ($m+1$). Приймаємо, що середовища лінійні, однорідні і ізотропні, комплексний показник заломлення (ПЗ) j -го шару дорівнює N_j , а його товщина d_j . Показники заломлення середовища і підкладки N_0 і N_{m+1} .

$$S = I_{10} L_1 I_{12} L_2 \dots I_{(j-1)j} L_j \dots L_m I_{m(m+1)} \quad (2.3)$$

Матриця розсіювання визначається як добуток матриць для межі поділу I_{ab} між сусідніми шарами a і b та матриць відповідних шарів L (формула 2.4) [31].

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} 1 & r_{ab} \\ r_{ab} & 1 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} e^{i\beta_j} & 0 \\ 0 & e^{-i\beta_j} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

де, r_{ab} – коефіцієнт відбиття для відповідної межі поділу;

β_j – фазова товщина [31] відповідного шару (формула 2.5);

$$\beta = 2 N_j \pi \frac{d}{\lambda} \cos \theta_j \quad (2.5)$$

$N_j = n_j - ik_j$ означає комплексний коефіцієнт заломлення шару, що розглядається, θ_j – кут падіння всередині j -го шару, λ – довжина хвилі, d_j – товщина шару. Інтегральний коефіцієнт відбиття Френеля шаруватої структури для p -поляризації визначається елементами першого стовпця матриці розсіювання (формула 2.6) [31]:

$$R_p = \frac{S_{21p}}{S_{11p}} \quad (2.6)$$

Френелівські коефіцієнти відбиття і пропускання для границі розподілу, що фігурують у виразі (формула 2.4), повинні бути розраховані, виходячи зі значень комплексних показників заломлення розглянутих середовищ, що утворюють

границю розділу, і значень кута падіння на границі цих середовищ, послідовно застосовуючи закон Снеліуса (формула 2.7.) [31].

$$N_0 \sin \phi_0 = N_1 \sin \phi_1 = \dots = N_j \sin \phi_j = \dots N_{m+1} \sin \phi_{m+1} \quad (2.7)$$

Використовуючи вираз для інтегрального коефіцієнту відбиття R_p можна на основі чисельного моделювання побудувати характеристику відбиття $R(\theta)$, котра в подальшому буде використана для чисельного аналізу чутливості ППР-сенсора для різних довжин хвиль збудження плазмонів [31].

Також моделювались характеристики відбиття для води без нерозчинних домішок, для визначення таких параметрів, як ΔN_a та $\Delta \theta_{min}$. Це необхідно було для розрахунку чутливості ППР-сенсорів з різними довжинами хвиль збудження ППР. Через малу концентрацію нерозчинних речовин в воді характеристика відбиття моделювалась з малим кроком 0,0001 градус. Моделювання виконувалось у пакеті програми MathCad 14. Фіксований кут падіння для визначення чутливості S_R визначався шляхом диференціювання характеристики відбиття при кутах більших за критичний, тобто в зоні ПБВ) та знаходження на отриманій залежності $R'(\theta)$ максимуму, якому і відповідало кутове положення шуканого кута. Оптимальну товщину шару золота визначали шляхом послідовної зміни товщини металу в моделі з кроком 1 нм в діапазоні 30...55 нм. Оптимальній товщині відповідало мінімальне значення нормованої інтенсивності відбитого світла R_{min} в мінімумі характеристики відбиття для кута падіння світла θ_{min} . Крім чутливості в двох режимах вимірювання (рис.2.2) визначали ще крутизну лівого схилу характеристики, що було необхідно для перерахунку безрозмірних значень коефіцієнту відбиття у відповідну напругу на виході фотоприймача ППР-сенсора.

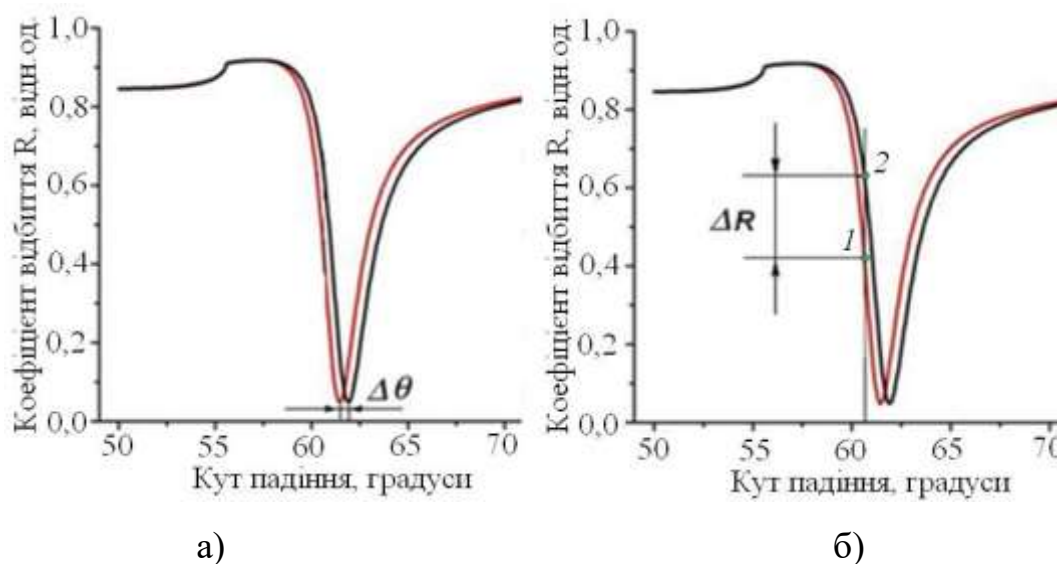


Рис. 2.2. Режими вимірювання ППР-сенсором до (червона лінія) та після (чорна лінія) зсуву характеристики відбиття через зміну показника заломлення аналіта: а – зсуву мінімуму $\Delta\theta_{min}$ характеристики відбиття, б – зміни інтенсивності відбитого світла при фіксованому куті падіння [30].

Крутизна лівого схилу S характеристики визначалась з співвідношення для чутливостей: $S_R = S \cdot S_0$.

Тепер підсумуємо основні умови для виникнення ППР:

- світло, що падає на поверхню металу, р-поляризоване, тобто вектор напруженості електричного поля лежить в площині падіння, а вектор магнітної індукції паралельний поверхні металу;
- проекція хвильового вектору фотонів світла на площину металевої плівки повинна приблизно дорівнювати дійсній частині хвильового вектора поверхневого плазмону (фазовий синхронізм);
- світло має падати зі сторони оптично більш щільного середовища під кутом більшим, ніж кут ПВВ [25].

2.2 Наближення ефективних середовищ для опису колоїдних розчинів

Для визначення концентрації водної суспензії з наночастинками оксиду кремнію або оксиду заліза було застосовано модель гетероструктури [36].

Модель гетероструктури складалася з рідкої матриці та твердофазного дисперсного наповнювача. При відомих значеннях відносної діелектричної проникності матриці та наповнювача можна визначити відсотковий склад гетероструктури. В якості матриці було взято дистильовану воду, а в якості наповнювача – наночастинки оксиду. Найпоширенішими підходами для опису такої системи є межі Вінера, підходи Максвелла-Гарнетта та Бруггемана. Для такої моделі вводиться поняття ефективного середовища з ефективною діелектричною проникністю, значення якої знаходиться в межах між значеннями діелектричних проникностей матриці та наповнювача. Межі Вінера [37] описують граничні значення ефективною відносної діелектричної проникності для моделі шаруватої структури [31]. Оскільки у водній суспензії наночастинки оксидів розташовані хаотично, даний підхід застосовується лише для визначення діапазону можливих значень ефективного показника заломлення суспензії. Більш ефективними підходами є підходи Максвелла-Гарнетта та Бруггемана, які описують середовища з хаотичним розташуванням наповнювача у матриці. Головною умовою застосування підходу Максвелла-Гарнетта [38] є малий розмір a наночастинок порівняно з відстанню між ними b і, як наслідок, їх мала об'ємна концентрація f в основній масі речовини (рис. 2.3).

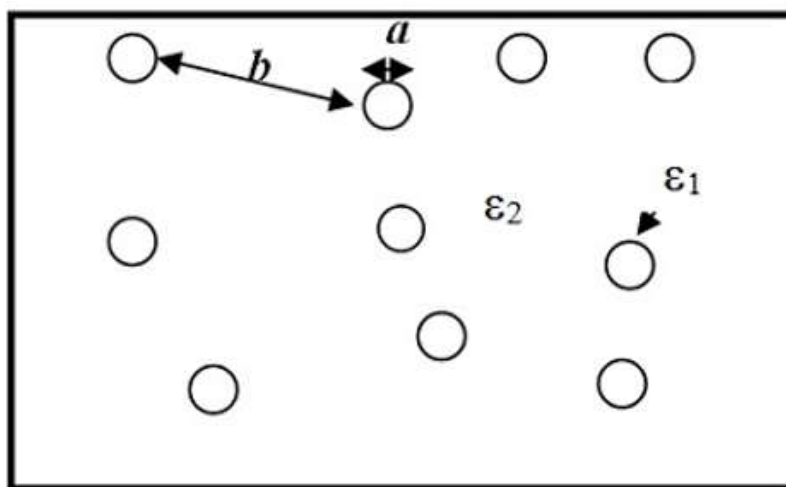


Рис. 2.3. Модель композита для підходу Максвелла-Гарнетта [31].

Середовище в межах моделі Максвелла-Гарнетта має діелектричну проникність, що пов'язані з проникностями компонент виразом (формула 2.8). Модель на основі підходу Бруггемана застосовується в тому випадку, якщо об'ємні частки компонент f_1 і f_2 знаходяться у співвідношенні від 1/3 до 2/3, тобто для великих концентрацій [39].

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_2}{\varepsilon + 2\varepsilon_2} = f \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}, \quad (2.8)$$

де, f – об'ємна частка наночастинок у суспензії;

ε – відносна діелектрична проникність суспензії;

ε_1 і ε_2 – відносні діелектричні проникності матеріалу наночастинок та матриці, відповідно [39].

Діелектрична проникність металевого шару визначалась комплексно як $\varepsilon_M = \varepsilon_{MR} + i \cdot \varepsilon_{MI}$, де ε_{MR} та ε_{MI} , відповідно, дійсна та уявна складові діелектричної проникності ε_M [30]. Складові діелектричної проникності металу пов'язані з його показником заломлення [31] через співвідношення (формула 2.9):

$$\varepsilon_{MR} = n_M^2 - k_M^2 \quad (2.9,a)$$

$$\varepsilon_{MI} = 2 \cdot n_M \cdot k_M \quad (2.9,b)$$

Вихідними параметрами побудови характеристик відбиття були показники заломлення призми, золота, води та суспензії. Показник заломлення суспензії визначався з її ефективної діелектричної проникності розрахованої за формулою (2.8). Для підходу Максвелла-Гарнетта діелектричні проникності матриці та наповнювача визначались з показників заломлення води та оксиду, відповідно. Об'ємна доля наночастинок в суспензії визначалась з відповідної концентрації та значень густини відповідних речовин, які є табличними даними. Так густина оксиду кремнію залежить від структури і для наночастинок становить значення 2,634 г/см³. Густина оксиду заліза становить 5,25 г/см³. Для переходу від нефелометричних одиниць до концентрації було застосовано відомі значення наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Нефелометричні величини та концентрація

	JTU	FTU(NTU/FNU)	Каолін (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
JTU	1	19	11,02	2,47
FTU(NTU/FNU)	0,053	1	0,58	0,13
Каолін (mg/l)	0,091	1,724	1	
SiO ₂ (mg/l)	0,4	7,5		1

Різні нефелометричні одиниці (FTU, NTU, FNU) використовуються в залежності від стандарту. Параметр FNU (Formazine Nephelometric Unit – одиниця мутності по формазіну), або FTU (Formazine Turbidity Unit) застосовується згідно стандарту ISO 7027, коли вимірюється пропускання чи розсіяння наночастинками при опроміненні суспензії інфрачервоним монохроматичним світлом. Параметр NTU (Nephelometric Turbidity Unit – нефелометрическая одиниця каламутності) застосовуються згідно стандарту US EPA180.1 [19], коли вимірюється розсіяння наночастинками при опроміненні суспензії білим світлом. Розраховані значення концентрацій, ефективного показника заломлення суспензії оксиду кремнію у воді та відповідну зміну показника заломлення води для довжини хвилі 650 нм для різних значень каламутності в діапазоні 1...5000 NTU наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Розраховані концентрації суспензії оксиду кремнію

NTU	SiO ₂ (mg/дм ³)	f(SiO ₂) (см ³ /см ³)	ϵ_{eff}	n_{eff}	Δn
5000	650	0,000246773	1,772718896000	1,331434901150	3,49011E-05
1000	130	4,93546E-05	1,772644576839	1,331406991434	6,99143E-06
500	65	2,46773E-05	1,772635289000	1,331403503450	3,50345E-06
100	13	4,93546E-06	1,772627857678	1,331400712662	7,12662E-07
50	6,5	2,46773E-06	1,772626929000	1,331400363903	3,63903E-07
10	1,3	4,93546E-07	1,772626185768	1,331400084786	8,47859E-08
5	0,65	2,46773E-07	1,772626093000	1,331400049947	4,99474E-08
1	0,13	4,93546E-08	1,772626018577	1,331400021998	2,19982E-08

Залежність каламутності води від відносної зміни показника заломлення аналіту при заміщенні дистильованої води на відповідну суспензію добре описується лінійною функцією (рис. 2.3).

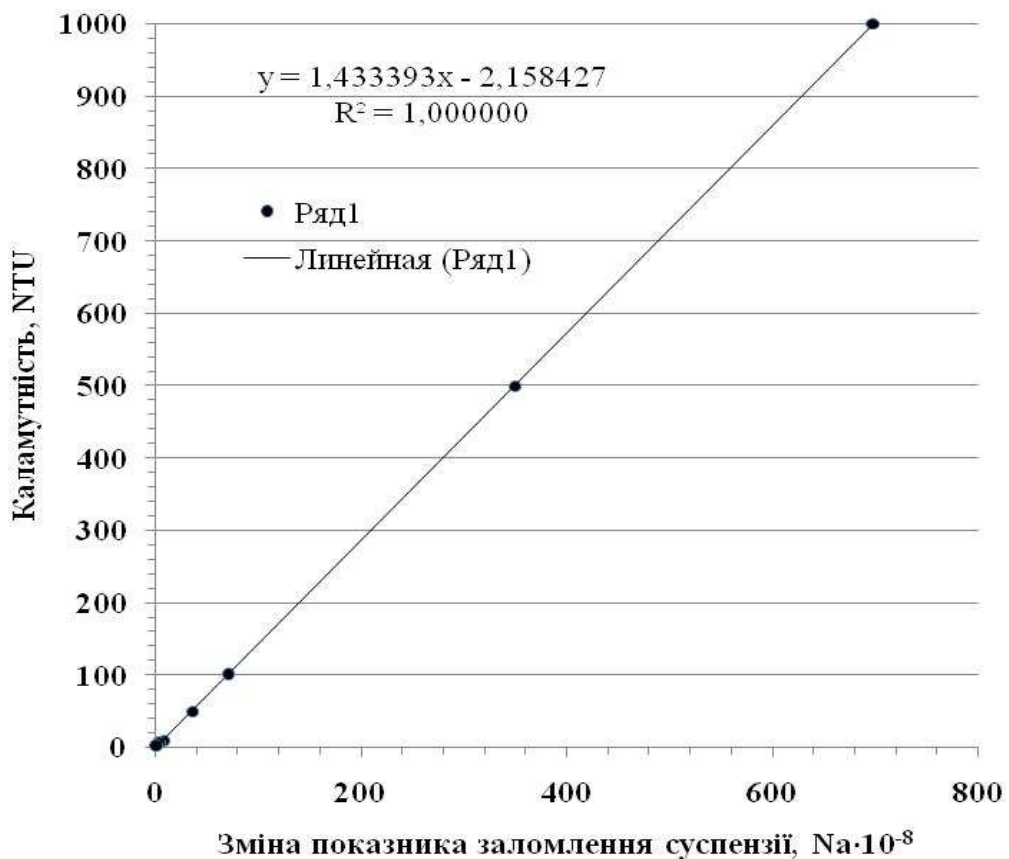


Рис. 2.3. Розрахована залежність каламутності водної суспензії з наночастинками оксиду кремнію від відповідної різниці показника заломлення води та суспензії.

Розраховані значення концентрацій, ефективного показника заломлення суспензії оксиду заліза у воді та відповідну зміну показника заломлення води для довжини хвилі 650 нм для різних значень каламутності в діапазоні 1...5000 NTU наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Розраховані концентрації суспензії оксиду заліза

NTU	Fe ₂ O ₃ (мг/дм ³)	f(Fe ₂ O ₃) (см ³ /см ³)	ϵ_{eff}	n_{eff}	Δn
5000	650	0,00012381	1,773014992942	1,331546091182	0,000146091
1000	130	2,47619E-05	1,772703794	1,331429229708	2,92297E-05
500	65	1,2381E-05	1,772664896734	1,331414622397	1,46224E-05
100	13	2,47619E-06	1,772633779270	1,331402936481	2,93648E-06
50	6,5	1,2381E-06	1,772629889648	1,331401475757	1,47576E-06
10	1,3	2,47619E-07	1,772626777926	1,331400307168	3,07168E-07
5	0,65	1,2381E-07	1,772626388965	1,331400161095	1,61095E-07
1	0,13	2,47619E-08	1,772626077793	1,331400044236	4,42364E-08

Оскільки зміна показника заломлення незначна, для моделювання характеристик відбиття виберемо одну концентрацію 1000 NTU.

2.3 Вплив концентрації колоїдних розчинів на відгук сенсора

У процесі моделювання спочатку було збільшено і проаналізовано отримані результати іншими вченими. Автори статті [26] стверджують, що межа детектування ППР-сенсорів при рівні шуму базової лінії на рівні 3 кутові секунди становить для наночастинок оксиду кремнію 115 мкг/мл, а для оксиду заліза 38,5 мкг/мл, що відповідає значенням каламутності води 885 NTU та 296 NTU. Наведені величини каламутності значно перевищують допустимі межі каламутності встановлені вітчизняним законодавством. Для визначення низьких концентрацій домішок необхідно зменшувати межу детектування, яка пропорційна рівню шуму у вимірювальній системі. Одним з технічних прийомів зменшення рівня шуму є усереднення результату вимірювання та зменшення рівня шуму до величини 0,5 кутових секунд (відповідно 1,5 мВ на виході сенсора). Проте цього недостатньо, оскільки чутливість ППР-сенсора з довжиною хвилі збудження 850 нм становить 56,3 (мкВ·мл)/мкг, або 7,3 мкВ/NTU, що забезпечує межу детектування 205 NTU.

Тому було запропоновано підвищити чутливість ППР-сенсора для визначення нерозчинних домішок у воді шляхом збільшення довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів та застосування діелектричної підкладки

сенсора з матеріалу, що має менший показник заломлення, ніж у прототипі. Довжину хвилі було збільшено у 1,8 рази з 850 нм до 1550 нм, а показник заломлення зменшено з 1,6085 (скло флінт марки Ф1) до 1,444 (кварцове скло марки КУ-2). Розраховані характеристики відбиття для довжин хвиль 850 нм та 1550 нм наведено на рисунку 1, з якого видно, що перехід у більш довгохвильову область спектру не тільки збільшує діапазон вимірювання резонансного кута, а також зменшує похибку вимірювання точного кутового його положення через звуження характеристики [40].

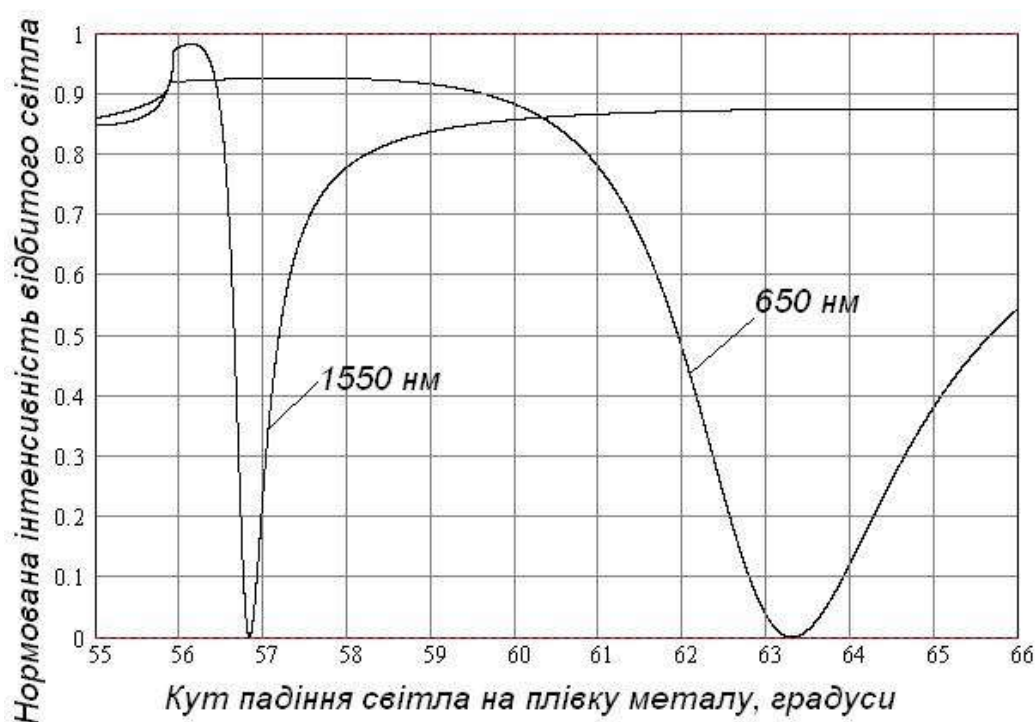


Рис. 2.5. Розраховані характеристики відбиття ППР для довжин хвиль збудження поверхневих плазмонів 650 нм та 1550 нм у дистильованій воді [40].

Розрахунок чутливості виконували для режиму вимірювання «на схилі», коли робоча точка під час вимірювання часового зсуву характеристики відбиття знаходиться не в мінімумі, а на лівому схилі у місці, де найбільша крутизна, тобто похідна функції має найбільше значення. Для порівняння розрахунок виконували і для довжини хвилі 650 нм, оскільки ця довжина хвилі широко застосовується у наукових дослідженнях, пов'язаних з ППР. Розрахована чутливість ППР-сенсора

до зміни показника заломлення (RIU – refractive index unit) досліджуваного середовища при збільшенні довжини хвилі з 850 нм до 1550 нм зросла у 1,7 рази з 771 В/RIU до 1328 В/RIU, а при збільшення довжини хвилі з 650 нм до 1550 нм зросла у 5,6 рази з 236 В/RIU до 1328 В/RIU при застосуванні фотоприймача з максимальним значенням вихідної напруги +5 В. При рівні шумової доріжки величиною 0,5 кутових секунди (відповідно 3,2 мВ на виході сенсора) чутливість ППР-сенсора з довжиною хвилі 1550 нм становить 500 (мкВ·мл)/мкг або 66 мкВ/NTU, що забезпечує межу детектування 48,5 NTU. При застосуванні підкладинки з кварцу чутливість можна підвищити на 10% до 550 (мкВ·мл)/мкг (73 мкВ/NTU), а рівень шуму знизити до 1,8 мВ через меншу крутизну схилу характеристики відбиття і більший її питомий кутовий зсув. Застосування кварцової діелектричної підкладинки та довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів 1550 нм забезпечує межу детектування 24,7 NTU. Розрахована величина межі детектування у 8,3 рази менша за величину для прототипу [40].

Таким чином моделювання показало ефективність збільшення довжини хвилі для підвищення чутливості та зниження межі детектування. Оскільки останнім часом через розвиток та інтеграцію електроніки лазери з довжиною хвиль 1550 нм, які використовуються для оптичного зв'язку, стали важко доступні, треба обирати для розроблюваного сенсора системи лазер з меншою довжиною хвилі. Для цього було проведено чисельне моделювання для довжин хвиль від 650 нм до 1310 нм. В таблиці 2.4. наведені оптичні константи багатошарової системи “призма (скло) – металева плівка – суспензія (аналіт)” та розраховані значення резонансних кутів чистої води. також в таблиці наведені оптимальні значення товщини плівки золота.

Таблиця 2.4. Параметри багат шарової системи для моделювання

λ , нм	$N_p(\Phi 1)$	$N_p(KY-2)$	N_a	$d_m(\Phi 1)$, нм	$d_m(KY-2)$, нм	$\theta_{min}(\Phi 1)$, град	$\theta_{min}(KY-2)$, град
1550	1,5882	1,444	1,3154	34	37	56,8227	66,9274
1310	1,5914	1,4468	1,32	37	40	57,3063	67,6717
1064	1,5952	1,4496	1,3239	47	49	57,9916	68,8548
980	1,5969	1,4507	1,3252	47	50	58,1708	69,182
850	1,6	1,4525	1,3272	46	48	58,7608	70,2423
780	1,6023	1,4537	1,3285	47	49	59,4465	71,4759
650	1,6085	1,4565	1,3314	50	47	63,2957	78,8357

З таблиці видно, що застосування у якості більш щільного середовища кварцового скла суттєво зсуває положення мінімуму характеристики відбиття у сторону більших кутів, при цьому збільшення довжини хвилі збудження повертає характеристику у сторону менших кутів. Тобто збільшуючи довжину хвилі можна частково компенсувати кутовий зсув, який є небажаним, оскільки зменшує кутовий діапазон вимірювання, а значить і діапазон показників заломлення досліджуваних речовин. В таблиці 2.5 наведено розраховані значення кута падіння в режимі вимірювання інтенсивності відбиття (рисунк 2.2.,б), значення чутливості S_R та S_θ , а також розраховану крутизну характеристик відбиття S для відповідних довжин хвиль.

Таблиця 2.5. Розраховані режими роботи та чутливості ППР-сенсора

λ , nm	Кут падіння світла, град		Чутливість S_θ , град/RIU		Чутливість S_R , RIU ⁻¹		Крутизна, град ⁻¹	
	$\Phi 1$	KY-2	$\Phi 1$	KY-2	$\Phi 1$	KY-2	$\Phi 1$	KY-2
1550	56,68	66,74	57,14	114,29	265,71	294,29	4,65	2,58
1310	57,13	67,42	71,43	114,29	204,29	225,71	2,86	1,98
1064	57,83	68,61	85,71	114,29	210,00	217,14	2,45	1,90
980	58,01	68,95	71,43	128,57	212,86	231,43	2,98	1,80
850	58,53	69,89	71,43	114,29	154,29	162,86	2,16	1,43
780	59,15	71,00	71,43	128,57	120,00	128,57	1,68	1,00
650	62,35	76,94	100,00	228,57	47,14	50,00	0,47	0,22

З таблиці видно, що застосування кварцу замість флінту дозволяє підвищити кутову чутливість щонайменше вдвічі для усього діапазону розглянутих довжин хвиль. При цьому чутливість на схилі суттєво не відрізняється для флінту і кварцу через те, що зменшення крутизни схилу при переході від матеріалу з більшим показником заломлення до матеріалу з меншим

нівелює приріст кутової чутливості. В таблиці 2.6 наведені розрахункові дані кутової чутливості, функції перетворення та значення вихідної напруги на виході фотоприймача ППР-сенсору з максимальним значенням сигналу +5 В, тобто, коли значення коефіцієнту відбиття 1 відповідає напрузі +5 В. Розрахунки проведені для концентрації оксиду кремнію рівною 1000 NTU, тобто 130 мг/л. Відповідно до таблиці 2.2 така концентрація суспензії змінює показник заломлення дистильованої води для довжини хвилі 650 нм ($N_a = 1,3314$) на величину приблизно $\Delta N_a = 7 \cdot 10^{-6}$. Така незначна зміна показника заломлення не може бути визначена існуючими ППР-сенсорами, зокрема в приладі «Плазмон-б», межа визначення якого, згідно до літературних джерел, становить $\Delta N_a = 5 \cdot 10^5$. Тому і необхідно розробити новий ППР-сенсор з покращеними характеристиками.

Таблиця 2.6. Розраховані чутливості ППР-сенсора при напрузі +5В

λ , nm	Вихідна напруга, мВ		Чутливість S_R , В/RIU		Крутизна, В/град	
	Ф1	КУ-2	Ф1	КУ-2	Ф1	КУ-2
1550	9,30	10,30	1328,57	1471,43	23,25	12,88
1310	7,15	7,90	1021,43	1128,57	14,30	9,88
1064	7,35	7,60	1050,00	1085,71	12,25	9,50
980	7,45	8,10	1064,29	1157,14	14,90	9,00
850	5,40	5,70	771,43	814,29	10,80	7,13
780	4,20	4,50	600,00	642,86	8,40	5,00
650	1,65	1,75	235,71	250,00	2,36	1,09

З таблиці видно, що і значення вихідної напруги, і значення чутливості на схилі суттєво не відрізняються (так само як в таблиці 2.5). Крутизна так само більша для скла типу Ф1, тому його і будемо застосовувати у проектуванні. Якщо не враховувати значення для довжини хвилі 1550 нм, то найбільше значення вихідної напруги і чутливості на схилі визначено для довжини хвилі 980 нм. Варто відзначити, що лазери з такою довжиною хвилі зараз більш комерційно доступні, ніж на довжини хвиль 1310 нм та 850 нм.

Оскільки зміна показника заломлення для наночастинок оксиду заліза для відповідних концентрацій більше, ніж для оксиду кремнію, а саме щонайменше у 3 рази, то значення вихідної напруги фотоприймача сенсора буде також більше, що дозволить покращити межу визначення. Так для обраної довжини хвилі 980 нм напруга на виході зросте з 7,45 мВ до 28 мВ при максимальній вихідній напрузі фотоприймача сенсора рівній +5В.

Тому для проектування приладу системи визначення нерозчинних домішок у воді будемо застосовувати лазер з довжиною хвилі 980 нм. ППР-сенсор приладу системи буде працювати в режимі на схилі, тобто при фіксованому куті падіння світла, котрий для обраної довжини хвилі та призми зі скла марки Ф1 становить приблизно 58 градуси. Товщина плазмон-носійної плівки золота становитиме 47 нм. Чутливість сенсора складатиме 1064,3 В/RIU, або 1,06 мВ/ μ RIU. Тобто для суспензії оксиду кремнію зміна показника заломлення на величину $\Delta N_a = 1 \cdot 10^{-6}$ створить напругу на виході фотоприймача сенсора рівну 1,06 мВ. Відповідно заміщення води дистильованої на воду з каламутністю 1000 NTU створить сигнал на виході сенсора величиною 7,45 мВ. В перерахунку на одиницю каламутності чутливість складає 7,45 мкВ/NTU, або відповідно до таблиці 2.1. чутливість складає 55 (мкВ·л/мг), або 0,11 мВ/ppm. Для суспензії оксиду заліза зміна показника заломлення на величину $\Delta N_a = 1 \cdot 10^{-6}$ створить напругу на виході фотоприймача сенсора рівну 3,96 мВ. Відповідно заміщення води дистильованої на воду з каламутністю 1000 NTU створить сигнал на виході сенсора величиною 27,75 мВ. В перерахунку на одиницю каламутності чутливість складає 27,75 мкВ/NTU, або відповідно до таблиці 2.1. чутливість складає 208 (мкВ·л/мг), або 0,42 мВ/ppm.

Межа детектування визначатиметься рівнем шуму вимірювального каналу приладу системи. Для рівня шуму 1,5 мВ (як в приладі «Плазмон-71» при усередненні результату вимірювання та зменшення рівня шуму до величини 0,5

кутових секунд [26]) межа детектування складатиме 201 NTU (26 мг/л) для суспензії оксиду кремнію та 54 NTU (7 мг/л) для суспензії оксиду заліза. Хоча розраховані величини перевищують допустимі концентрації для води колодязної (3,5 NTU), води системи водопостачання (2,6 NTU) та води бутильованої (0,5...1 NTU) згідно стандартів ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014, зменшуючи шум вимірювального каналу можна покращити метрологічні характеристики створюваного приладу системи застосовуючи сучасну елементну базу, зокрема підсилювачі з низьким рівнем шуму та аналогово-цифрові перетворювачі високої розрядності.

Висновок до розділу 2

У другому розділі даної роботи було проведено чисельне моделювання характеристик відбиття для довжин хвиль збудження поверхневих плазмонів в діапазоні від 650 нм до 1550 нм, та встановлено оптимальні товщини плазмон-збуджуючих плівок золота ППР-сенсора для цих довжин хвиль. Також можна виділити наступні моменти:

1. Застосування кварцової діелектричної підкладки та довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів 1550 нм забезпечує межу детектування 24,7 NTU. Розрахована величина межі детектування у 8,3 рази менша за величину для довжини хвилі 650 нм та скла флінт.

2. Для проектування приладу системи визначення нерозчинних домішок у воді обрано довжину хвилі 980 нм, оскільки лазери з довжиною хвилі 1550 нм комерційно майже не доступні. Для обраної довжини хвилі розрахована найбільша кутова чутливість 1064,3 В/RIU та найбільше значення вихідного сигналу фотоприймача, ніж для довжин хвиль в діапазоні 650...1310 нм.

3. Для довжини хвилі 980 нм значення фіксованого кута падіння світла в режимі на схилі та призми зі скла марки Ф1 становить 58 градуси, а оптимальна товщина плазмон-носійної плівки золота 47 нм.

4. Розрахована чутливість для суспензії оксиду кремнію становить 7,45 мкВ/NTU (55 (мкВ·л/мг) або 0,11 мВ/ppm), а для оксиду заліза 27,75 мкВ/NTU (208 (мкВ·л/мг) або 0,42 мВ/ppm).

5. Розрахована межа детектування для рівня шуму 1,5 мВ вимірювального каналу приладу становить 201 NTU (26 мг/л) для суспензії оксиду кремнію та 54 NTU (7 мг/л) для оксиду заліза.

6. Для зменшення межі детектування розроблюваного приладу системи визначення нерозчинних домішок у воді та досягнення регламентованих стандартом значень (2,6...3,5 NTU) необхідно при проектуванні застосовувати

сучасну елементну базу, зокрема підсилювачі з низьким рівнем шуму та аналогово-цифрові перетворювачі високої розрядності.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛОЇДІВ

3.1 Об'єкт, аналітичне обладнання та методика експерименту

Для експериментального підтвердження впливу концентрацій нерозчинних домішок у воді на відгук системи визначення на основі явища поверхневого плазмонного резонансу, було досліджено зразки дистильованої води з різним вмістом дрібнодисперсного оксиду кремнію і заліза у вигляді колоїдного розчину. Нерозчинні домішки використовувались в наступних концентраціях: 0,25, 1,06 та 3,96 мг/мл, що дорівнює 250, 1060 та 3960 NTU (нефелометричних одиниць) відповідно.

Отже, для вимірювання показників заломлення зразків застосовували ППР-прилад «Плазмон-6» (рис. 3.1) з довжиною хвилі збудження поверхневих плазмонів 650 нм, розроблений в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, оптична схема якого заснована на геометрії Кречмана (рис. 3.1).

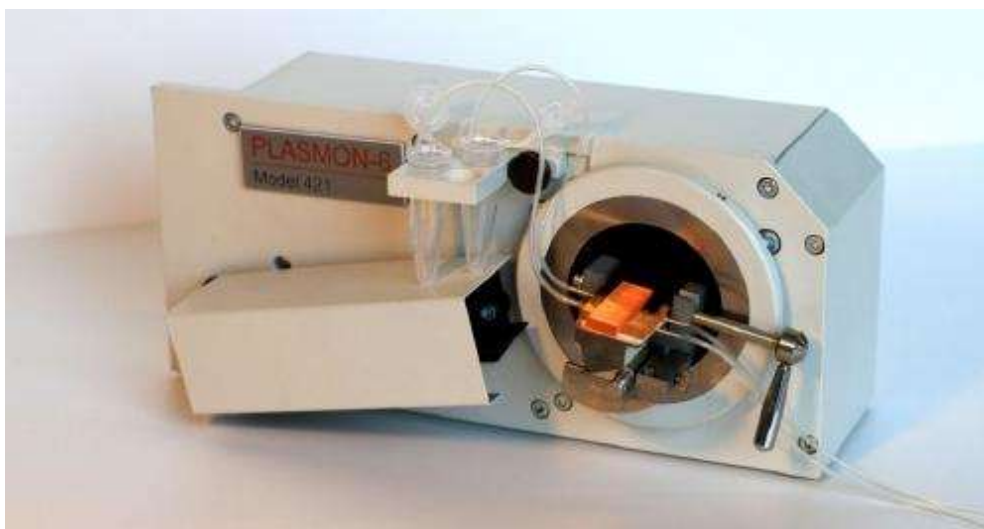


Рис. 3.1. «ПЛАЗМОН-6» [41].

У роботі [41] більш детально описано будову та принцип дії даного приладу. Оптична схема приладу складається з лазерного діоду, чутливого елемента, напівпентапризми зі скла марки К8 або Ф1, та двох фотоприймачів. Світло від лазерного діоду проходить через напівпентапризму, відбивається від

поверхні металевого шару чутливого елемента, дзеркала на задній грані призми, додаткового дзеркала та потрапляє на фотоприймач. Скляна пластинка з'єднана з ретропризмою через імерсійну рідину для забезпечення оптичного контакту.

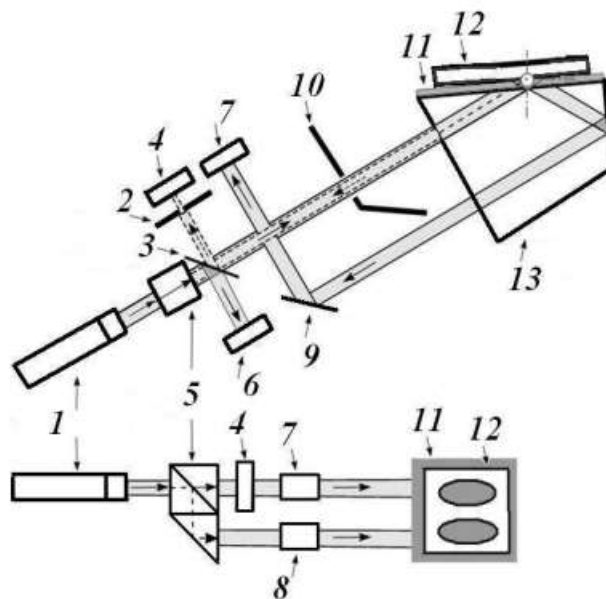


Рис. 3.2. Спрощена оптична схема приладу «ПЛАЗМОН-6» [42].

Також вимірювальні канали містять вимірювальну кювету з поліметилметакрилату, яка встановлюється на поверхню металевого шару через силіконову прокладку. Для збудження поверхневих плазмонів в обох каналах світло від лазерного діоду розділяється на два промені призмою. Контроль та стабілізація інтенсивності лазера забезпечуються фотоприймачем та електронікою приладу відповідно. Калібрування абсолютного кута виконується фотоприймачем з діафрагмою через вимірювання інтенсивності відбитого світла від передньої грані призми. Вимірювання інтенсивності лазера та калібрування кута забезпечують поділяюча пластинка та діафрагма. Всі елементи оптичної схеми, окрім призми, чутливого елемента та вимірювальної кювети, формують окремий вузол – оптичний блок [42].

Необхідні умови для збудження плазмону створюються спеціальною призмою, яка може обертатися на контрольований комп'ютером кут. Крива поверхневого плазмонного резонансу (ППР-крива) є основною вихідною

характеристикою приладу. Її форма та кутова позиція резонансного мінімуму дозволяють робити оцінку показника заломлення та товщини шару досліджуваного об'єкта. Ефективне загасаюче електричне поле поверхневого плазмону розповсюджується на відстань близько 200 нм від поверхні плівки чутливого елемента приладу, що обмежує товщину досліджуваного шару. Кутова позиція ППР змінюється при найменших змінах оптичних характеристик середовища, при цьому прилад фіксує зміни в режимі реального часу [42].

При вимірюванні показників заломлення було застосовано технічні характеристики приладу «Плазмон – 6», що наведені нижче у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Технічні характеристики приладу «Плазмон – 6»

Діапазон вимірювання показника заломлення	1,0 – 1,43
Роздільна здатність при вимірюванні показника заломлення	0.00005
Роздільна здатність по куту падіння	10 кутових сек.
Максимальний кут сканування	17°
Час вимірювання повної ППР-кривої	≤ 3 сек.
Мінімальний час одного виміру: Вимірювання в режимі частини ППР-кривої Вимірювання в режимі фіксованого кута	1 сек. 0,2 сек.
Кількість оптичних каналів	2
Додатковий канал електричних вимірів	± 5V
Джерело випромінювання – GaAs напівпровідниковий лазер	$\lambda = 650$ нм
Зв'язок з комп'ютером	COM порт, USB

Для зважування нерозчинних домішок, які додавали у воду для проведення експерименту, використовували ваги лабораторні ТВЕ-0.21 (рис. 3.3) з

діапазоном вимірювання ваги від 1 мг до 200 г та абсолютною похибкою вимірювання 2 мг.



Рис. 3.3. Ваги лабораторні ТВЕ-0.21.

Перед використанням ваг лабораторних ТВЕ-0.21 ознайомилися з їх технічними характеристиками, що також наведено нижче у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Основні технічні характеристики ваг лабораторних ТВЕ-0.2 [43]

НГЗ	210 м
Дискретність	0,001 г
Нмгз	0,02 м
Діаметр	120 мм
Градуювання	Зовнішнє, необхідна гиря еталонна F2 200 г
Клас точності згідно ДСТУ EN 45501	2
Ступінь захисту	IP 40
Робоча температура	Від +10 до +35°C

Для того, щоб кожна з домішок, які ми додавали у воду в ході експерименту, швидко не осідали, потрібно було застосувати прилад для інтенсивного перемішування рідин. В даному випадку було використано

магнітну мішалку з цифровим керуванням, ЖК дисплеєм, з керамічною робочою поверхнею і виносною термопарою (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Магнітна мішалка [44].

Технічні характеристики магнітної мішалки, яку використали в ході проведення експериментального дослідження, наведено нижче у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Технічні характеристики магнітної мішалки [44]

Макс. Об'єм	5 л
Продуктивна потужність приводу	5,6 Вт
Споживана потужність приводу	30 Вт
Індикатор швидкості	Дисплей
Швидкість обертання заважавки	0 – 1500 об/хв
Макс. Довжинамагнітного якоря	70 мм
Потужність нагрівання	600 Вт
Температура нагрівання	35 – 350°C
Контроль нагрівання	+
Коливання температур нагрівання	± 10°C
Контроль діапазону швидкостей	Цифровий
Матеріал нагрівальної пластини	Алюмінієвий сплав
Розмір нагрівальної пластини	130x130 мм

Розміри	191x283x120 мм
Вага	2,4 кг
Допустима температура довкілля	Від +5 до +35°C
Допустима відносна вологість	< 80 %
Напруга	220 V
Частота	50 Hz
Термопара	—

3.2 Виміряні спектри пропускання та резонансні характеристики

ППР-прилад «Плазмон» містить призму зі скла марки Ф1 (флінт-скло) з нанесеним тонким шаром золота товщиною близько 50 нм, яке зі сторони призми опромінювалось світлом від напівпровідникового малопотужного лазера (5...7 мВт) під різними кутами падіння світла на межу скло-золото-вода. Відбите від межі скло-золото-вода світло падало на кремнієвий фотодіод BPW-34, на виході якого фотострум пропорційний інтенсивності відбитого світла підсилювався трансімпедансним підсилювачем. Змінюючи кут падіння світла вимірювалась характеристика відбиття, яку при наявності ППР називають ППР-кривою. Досліджуване середовище контактувало з зовнішньою стороною металевої плівки та зсувало ППР-криву при зміні власного показника заломлення, наприклад при заміщенні дистильованої води на розчин з домішками. Показник заломлення матеріалу призми становив $n_D=1,6128$ RIU, а для довжини хвилі 650 нм $n_{650}=1,6085$ RIU. Для визначення товщини та оптичних параметрів (показника заломлення n та коефіцієнта поглинання k) плівки золота було попередньо виміряно ППР-криву при контакті повітря ($n_D \approx 1$) з металевою плівкою. для цього використовували спеціальну призму для дослідження газоподібних середовищ з оптичного скла марки K8 (крон-скло) з показником заломлення $n_D=1,5163$ RIU для довжини хвилі 650 нм показник заломлення скла становив

$n_{650}=1,5141$ RIU. Потім за допомогою спеціального програмного забезпечення виконували підгонку виміряної ППР-кривої для межі скло-золото-повітря під теоретичну (рис.3.5).

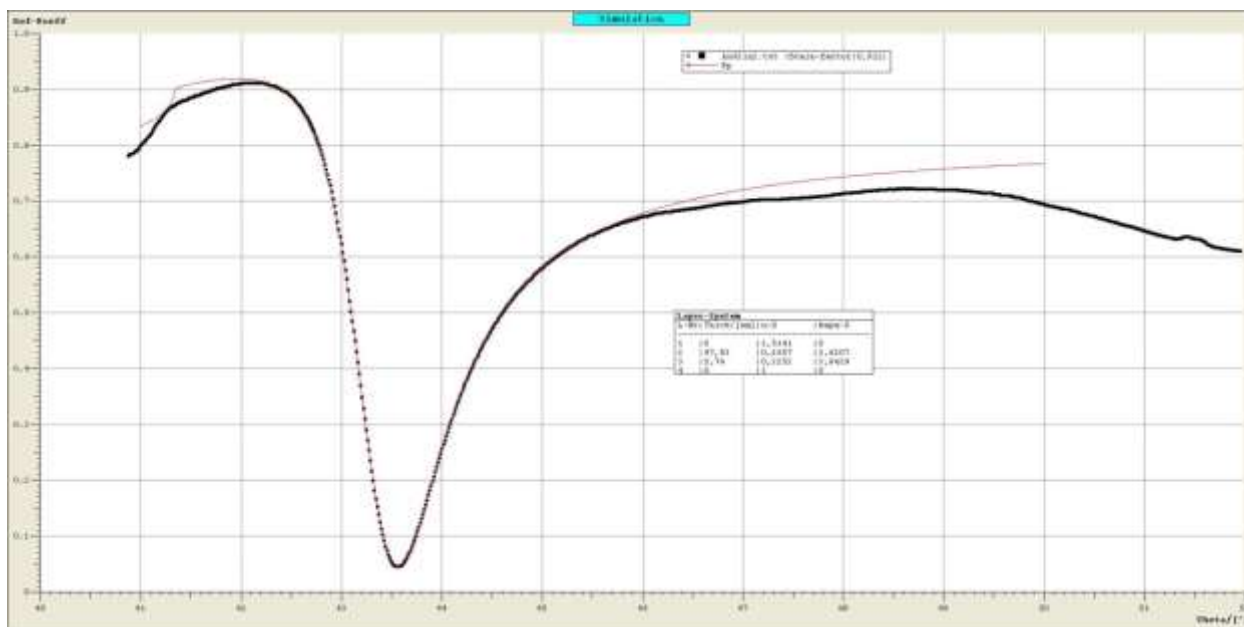
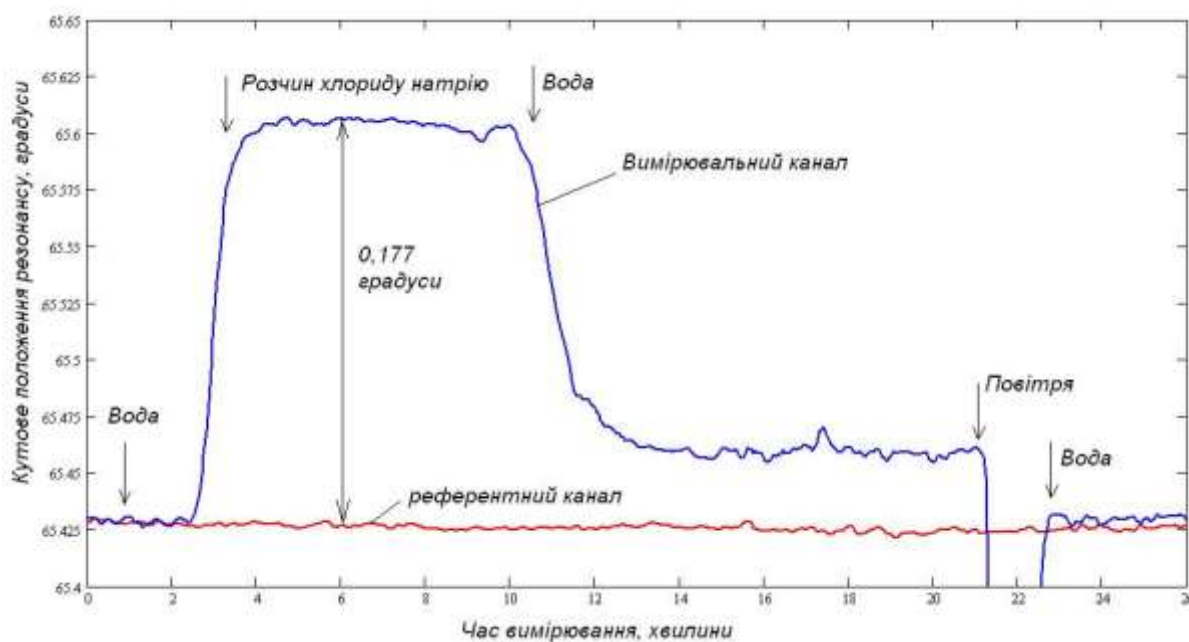


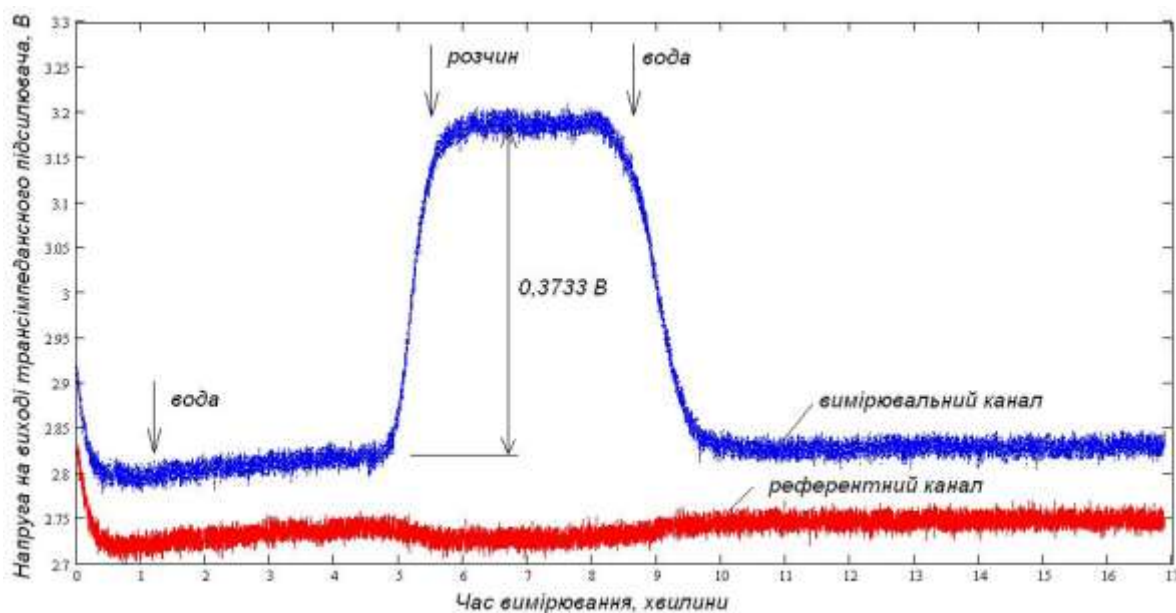
Рис.3.5. Виміряна (чорні квадрати) та підігнана теоретична (червона лінія) характеристики відбиття і розраховані програмою оптичні параметри та товщина плівки золота ППР-сенсора.

За результатами підгонки було встановлено, що товщина плівки золота становила 47,4 нм та мала верхній перехідний шар золото-повітря товщиною 0,74 нм, який визначав шорсткість поверхні плівки, тобто її неоднорідність. Показник заломлення золота становив $n = 0,2657$ RIU та коефіцієнта поглинання $k = 3,6207$. Для визначення чутливості ППР-сенсора змінювали показник заломлення контактуючого з золотом середовища та вимрювали зсув мінімуму характеристики відбиття. У якості контактуючих середовищ застосовували дистильовану воду та розчин хлориду натрію. Показники заломлення цих речовин вимірювали на рефрактометрі RL3. Виконували заміщення дистильованої води ($n_D=1,3330\pm0,0002$ RIU) на розчин хлориду натрію з концентрацією 9 мг/мл ($n_D=1,3345\pm0,0002$ RIU). Різниця у показниках заломлення становила $\Delta n_D=0,0015$ RIU. Для довжини хвилі 650 нм показник

заломлення води $n_{650}=1,3314$ RIU, але через малу концентрацію хлориду натрію дисперсією показника розчину можна знехтувати, тоді $\Delta n_{650} = \Delta n_D = 0,0015$ RIU. Використовували призму для рідинних середовищ зі скла марки Ф1. Вимірювання виконували на приладі «Плазмон» в двох режимах: для робочої точки в мінімумі характеристики відбиття та на схилі в місці з найбільшою крутизною при фіксованому куті падіння світла на межу скло-золото-вода. Після заміщення дистильованої води на розчин натрію хлориду виконували промивання вимірювальної кювети приладу дистильованою водою, що призводило до зворотнього зсуву мінімуму ППР в сторону менших кутів (рис.3.6, а) та зменшенні інтенсивності відбитого світла (рис.3.6, б). Відгук сенсора для режиму вимірювання зсуву резонансного кута становив $\Delta\theta=0,177$ градуси при рівні шуму $\Delta\theta_{\text{ш}}=0,004$ градуси. Чутливість у цьому випадку становила $S=0,177/0,0015=118$ град/RIU. Межа детектування для відношення сигнал/шум рівний двом становила $\Delta n_{\text{мін}} = 2 \cdot \Delta\theta_{\text{ш}} / S = 2 \cdot 0,004 / 118 = 7 \cdot 10^{-5}$ RIU. Відгук сенсора для режиму вимірювання напруги на виході сенсора становив $\Delta U=0,3733$ В при рівні шуму $\Delta U_{\text{ш}}=0,02$ В. Чутливість у цьому випадку становила $S=0,3733/0,0015=249$ В/RIU. Межа детектування для відношення сигнал/шум рівний двом становила $\Delta n_{\text{мін}} = 2 \cdot \Delta U_{\text{ш}} / S = 2 \cdot 0,02 / 249 = 2 \cdot 10^{-4}$ RIU. Враховуючи частоту вимірювання у 10 Гц та можливість усереднення по 16 вимірам, рівень шуму можна знизити вчетверо, тобто до значення $\Delta U_{\text{ш}}=0,005$ В. У цьому випадку межа детектування становитиме величину $\Delta n_{\text{мін}} = 4 \cdot 10^{-5}$ RIU.



а)



б)

Рис. 3.6. Зсув кута ППР (а) та зміна напруги на виході сенсора (б) для $\lambda=650$ нм при заміщенні дистильованої води на розчин хлориду натрію з концентрацією 9 мг/мл.

3.3 Експериментальне обґрунтування концепції дисертаційної роботи

В результаті вимірювання спектрів пропускання та резонансних характеристик вийшло, що в режимі вимірювання при фіксованому куті падіння

можна досягнути кращих метрологічних показників, крім того відсутня складова загальної похибки вимірювання, що утворюється не ідеальністю механізмів обертання призми приладу «Плазмон».

В ході експерименту було заміщено дистильовано воду на колоїдні частинки дрібнодисперсного оксиду кремнію з концентрацією 0,25 мг/мл та 1,06 мг/мл, що вплинуло на ППР-криву. Зсув кута ППР в результаті заміщення зразків відображено на рисунку 3.7.

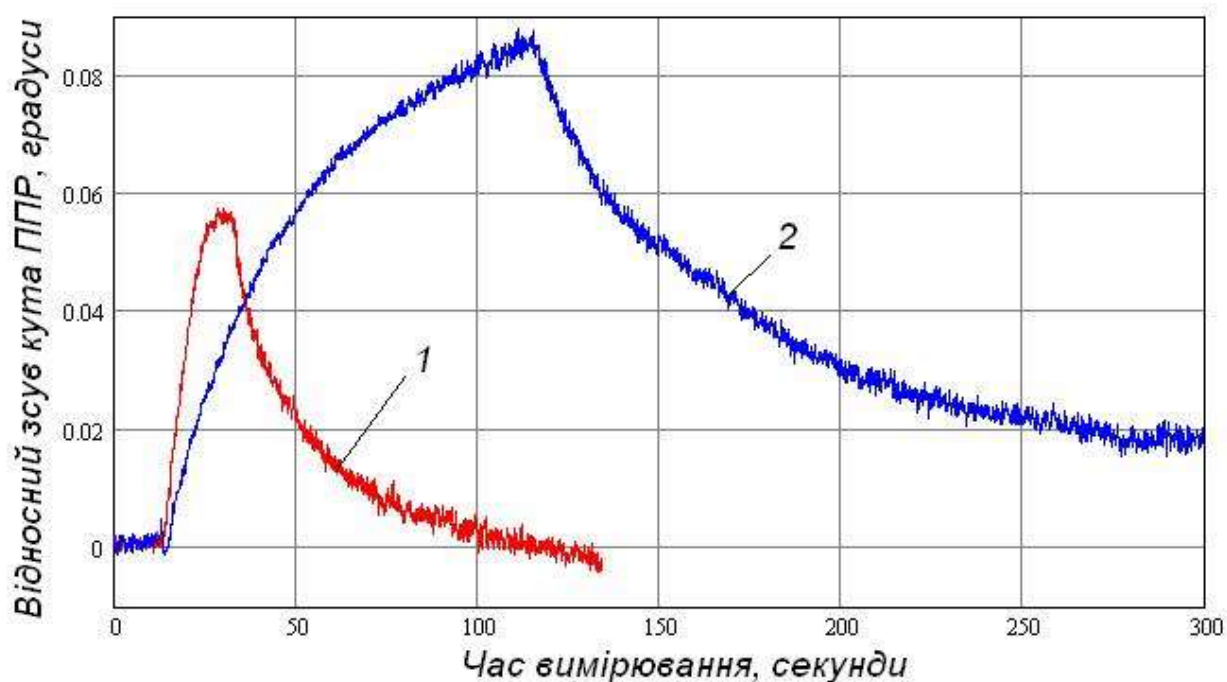


Рис. 3.7. Зсув кута ППР при заміщенні дистильованої води на колоїдні розчини дрібнодисперсного оксиду кремнію з концентрацією 0,25 мг/мл (1) та 1,06 мг/мл (2).

Відносний зсув становив 0,057 градуси для концентрації 0,25 мг/мл та 0,087 градуси для 1,06 мг/мл. Через малий кутовий зсув характеристики відбиття практично не відрізнялись за формою, тому для визначення зміни показника заломлення досліджуваного середовища було побудовано теоретичну характеристику відбиття для дистильованої води по визначеним оптичним константам.

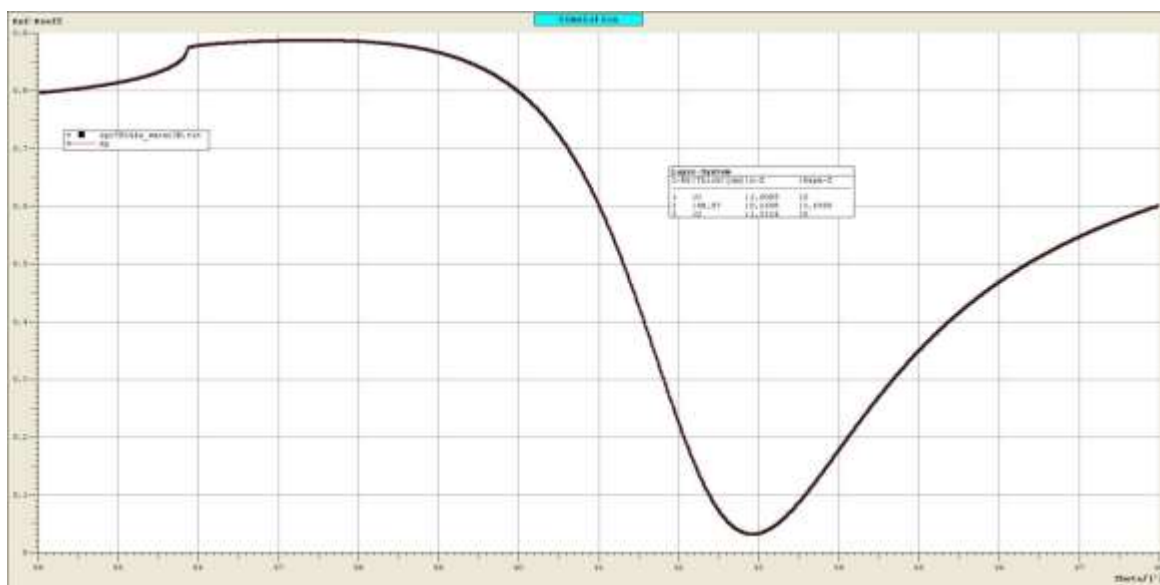


Рис. 3.8. Виміряна (чорні квадрати) та підігнана теоретична (червона лінія) характеристики відбиття і розраховані програмою оптичні параметри та товщина плівки золота ППР-сенсора.

За результатами підгонки було встановлено, що товщина плівки золота трохи відрізнялась від попередніх результатів 48,07 нм (було 47,4 нм). Показник заломлення золота становив $n = 0,2658$ RIU (було $n = 0,2657$ RIU) та коефіцієнта поглинання $k = 3,6395$ (було $k = 3,6207$). За визначеними оптичними параметрами були побудовані теоретичні характеристики та зсунуті зміною показника заломлення досліджуваного середовища на попередньо виміряні зсуви резонансу (0,057 градуси та 0,087 градуси). Було визначено, що концентрації 0,25 мг/мл відповідає ефективний показник заломлення середовища $n_{eff} = 1,33199$, а концентрації 1,06 мг/мл ефективний показник заломлення середовища $n_{eff} = 1,33233$. За відомими значеннями ефективних показників заломлення середовищ, показників заломлення води (H_2O) та оксиду кремнію (SiO_2) можна розрахувати реальну концентрацію нерозчинної домішки в області чутливості ППР за формулою Максвелла-Гарнета (2.8), згідно якої ефективні показники заломлення треба перевести в діелектричну проникність. Для цього [39]:

$$\varepsilon = n_{eff}^2. \quad (3.1)$$

Таблиця 3.7 Ефективні показники заломлення та діелектрична проникність H_2O та SiO_2 в різних концентраціях

Речовина	n_{eff}	ϵ
SiO_2	1,4565	2,1214
H_2O	1,3314	1,7726
SiO_2 0,25 мг/мл	1,33199	1,7742
SiO_2 1,06 мг/мл	1,33233	1,7751

З формули Максвелла-Гарнета (2.8) виводимо значення f – об’ємна частка наночастинок в суспензії. Виходить:

$$f = \frac{\epsilon - \epsilon_2}{\epsilon + 2\epsilon_2} * \frac{\epsilon_1 + 2\epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \quad (3.2)$$

Підставляємо у формулу відповідні значення. Розрахунок для концентрації 0,25 мг/мл – $f_1 = 0,0048$ мл/мл; для 1,06 мг/мл – $f_2 = 0,0076$ мл/мл. Таким чином ми знайшли об’ємну частку кварцу плавленого [39].

Тепер наведемо показник заломлення для SiO_2 у вигляді нанорозмірних плівок. Беремо дані показників заломлення кварцу у вигляді нанорозмірних плівок в межах від 1,4632 до 1,4757 знаходимо середнє значення – це 1,4669. Переведемо цей індекс в діелектричну проникність за формулою (3.2) – виходить 2,1517. Підставляємо це значення у формулу (3.3) і рахуємо об’ємну частку для нанорозмірної плівки. Для концентрації 0,25 мг/мл – $f_3 = 0,0045$ мл/мл; для 1,06 мг/мл – $f_4 = 0,0075$ мл/мл [39].

Такі ж розрахунки проведемо для кварцу кристалічного. Так само дивимося індекс заломлення речовини у базі та переводимо його в діелектричну проникність – 2,3778. Значення підставляємо у формулу (3.3). В результаті отримаємо для концентрації 0,25 мг/мл – $f_5 = 0,0029$ мл/мл, а для концентрації 1,06 мг/мл – $f_6 = 0,0075$ мл/мл.

Тепер необхідно всі значення f перевести з мл/мл в мг/мл. Для цього треба знати густину оксиду кремнію. Для наночастинок вона становить $2,634 \text{ г/см}^3$.

В результаті отримуємо об'ємні частки наночастинок в мг/мл, значення яких наведено в таблиці 3.8 [39].

Таблиця 3.8 Об'ємна частка наночастинок в мг/мл [39]

f_n	f , мл/мл	f , мг/мл
f_1	0,0048	12,6
f_2	0,0081	20
f_3	0,0045	11,9
f_4	0,0075	19,8
f_5	0,0029	7,6
f_6	0,0075	19,8

Висновки до розділу 3

В третьому розділі даної роботи було експериментально підтверджено можливість застосування явища поверхневого плазмонного резонансу для визначення нерозчинних домішок у воді. Експеримент було проведено з трьома різними концентрації оксиду кремнію: 0,25, 1,06 та 3,96 мг/мл. За виміряними характеристиками відбиття для водних суспензій з відповідними концентраціями було розраховано оптичні константи багатошврових системи «скло-золота-суспензія». За величиною кутового зсуву резонансних характеристик при заміщенні дистильованої води на відповідні суспензії оксиду кремнію було визначено їх ефективну діелектричну проникність. Було визначено, що концентрації 0,25 мг/мл відповідає ефективний показник заломлення середовища – $n_{\text{eff}} = 1,33199$, а концентрації 1,06 мг/мл ефективний показник заломлення середовища – $n_{\text{eff}} = 1,33233$. За формулою Максвелла-Гарнетта було розраховано об'ємні концентрації приготовлених суспензій, значення яких були більші за задані, що пов'язано з процесами конгломерації та седиментації наночастинок суспензій.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА

4.1 Часткове технічне завдання на проєктування приладу

Розроблений прилад має відповідати вимогам, вказаним у нормативній документації галузевих стандартів, санітарних норм та правил України, а також бути безпечним в експлуатації.

Прилад системи (ПС) призначений для визначення нерозчинних домішок у воді має складатися з двох окремих складових: оптичної та електричної. До оптичної має входити ППР-сенсор, що включає вимірювальну кювету для закачування досліджуваного зразку води, чутливий елемент (скляна пластинка з манометровим шаром золота оптимальної товщини $d = 47$ нм), прохідна призма ПВВ зі скла марки Ф1, напівпровідниковий лазер з обраною довжиною хвилі та фотоприймач. Розроблений ПС має відповідати вимогам вказаним у нормативній документації галузевих стандартів та санітарних норм та правил України, а також бути ергономічним та безпечними для експлуатації. Він має бути малогабаритним та портативним, а також повинен забезпечувати:

- проведення аналізу зразку води, зокрема в протоці.
- надсилати на персональний комп'ютер, котрий є складовою системи, цифровий сигнал, рівень якого пропорційний концентрації нерозчинних домішок у воді, для обробки та виведення на екран результату вимірювання.
- мінімум органів керування, регулювання та індикації.

Виходячи з вищенаведеного ПС повинен задовольняти наступним вимогам (ЧТЗ):

Діапазон концентрацій нерозчинних домішок, мг/л	5...500
Межа визначення нерозчинних домішок, мг/л	3
Кількість проточних вимірювальних каналів кювети	1
Об'єм вимірювального каналу кювети, мл	0,1
Мінімальний об'єм досліджуваного зразка води, мл	1
Довжина хвилі джерела випромінювання, нм	980

Потужність оптичного випромінювання, мВт, не більше	10
Кут падіння випромінювання на зразок, градуси	58
Спектральний діапазон фотоприймача, нм	850...1100
Максимальний рівень вихідного аналогового сигналу, В	+3,3
Розрядність АЦП макету, не гірше	10
Напруга живлення постійного струму, В	+5
Споживана потужність, Вт, не більше:	1
Габаритні розміри, см (ВШГ), не більше:	20×20×5
Вага макету, г, не більше:	100
Тип зв'язку з комп'ютером:	USB TypeC

Деталі вимірювальної кювети ПС котрі будуть мати безпосередній контакт з досліджуванним зразком води, тому мають бути виготовлені з інертного матеріалу.

4.2 Розроблення схеми електричної принципової приладу системи

Структурно-оптична схема ПС для визначення нерозчинних домішок у воді наведена на рисунку 4.1. Прилад складається з наступних елементів: джерела живлення 1, джерело монохроматичного випромінювання (лазерний модуль з стабілізатором напруги) 2, прохідної призми ПВВ 3 з встановленою на робочу грань через імерсійну рідину скляної пластинки з наночаром золота 4, протічної вимірювальної кювети, фотоприймача 5, мікроконтролера з АЦП 6 та персонального комп'ютера 4.

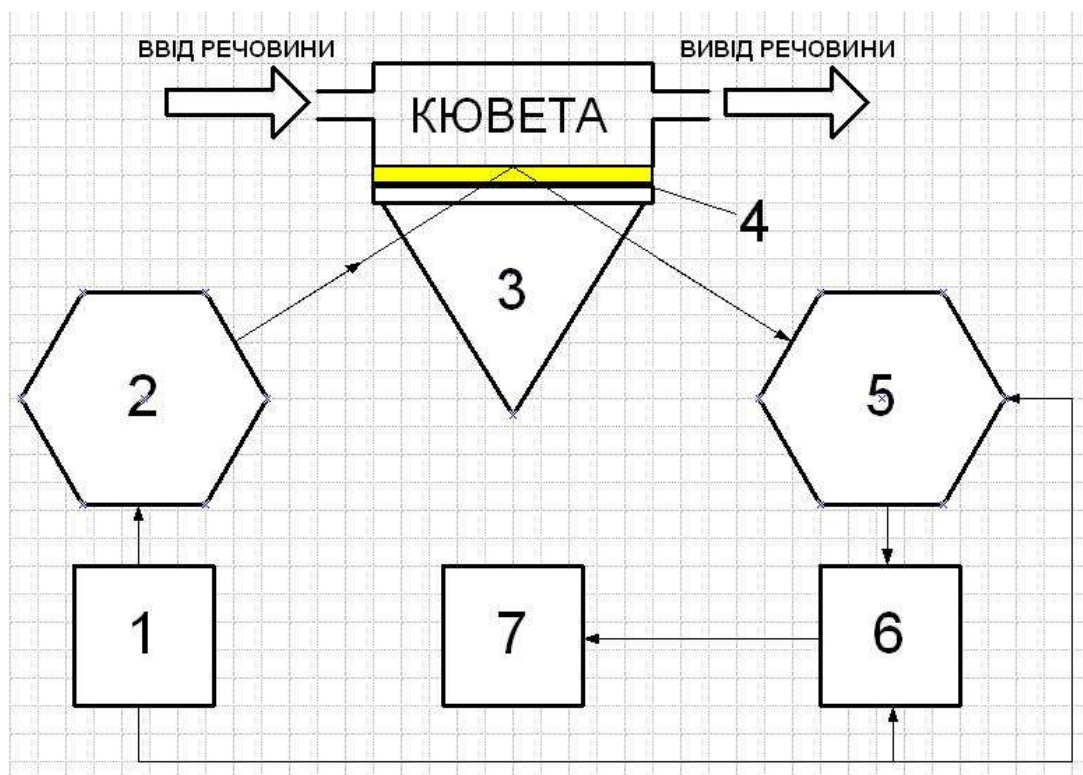


Рис. 4.1. Структурна схема приладу системи для визначення нерозчинних домішок у воді.

Об'єкт дослідження (зразок води) знаходиться на поверхні нанометрової плівки золота розташованої на скляній підкладці оптично з'єднаній з прохідною призмою ПВВ імерсійною рідиною. Монохроматичне р-поляризоване світло від лазера з довжиною хвилі 980 нм під кутом 58 градусів до нормалі до поверхні золота падає на границю середовищ золото-вода та відбивається від неї. Відбите світло потрапляє на чутливу поверхню фотоприймача, після чого на його виході з'являється різниця потенціалів, пропорційна інтенсивності падаючого світла. Ця різниця потенціалів переводиться у цифровий код за допомогою АЦП та відправляється через USB порт на персональний комп'ютер де прийнята інформація проходить обробку та візуалізується. Спеціально розроблена програма розраховує концентрацію нерозчинних домішок за калібровочною характеристикою.

Функційна схема приладу системи для визначення нерозчинних домішок у воді наведена на рисунку 4.2.

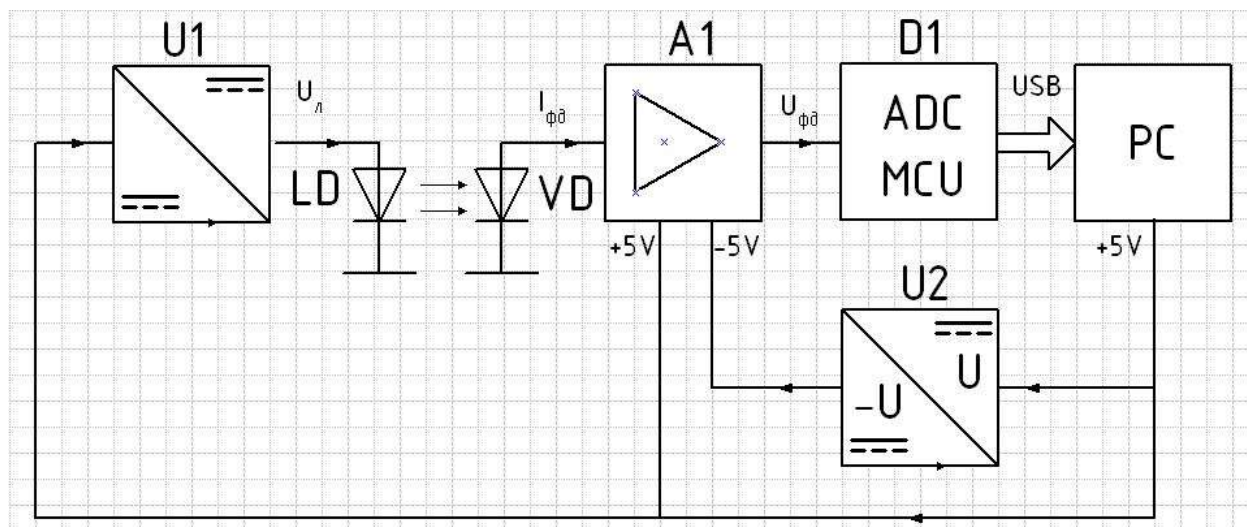


Рис. 4.2. Функційна схема приладу системи для визначення нерозчинних домішок у воді.

U1 – стабілізатор напруги лазера, U_L – напруга живлення лазера;

U2 – інвертор полярності напруги живлення підсилювачів;

LD – світлодіодний лазер;

VD – фотодіод фотоприймача, що генерує фотострум $I_{фд}$;

A1 – підсилювач (перетворювач струм-напруга: $I_{фд} \rightarrow U_{фд}$);

D1 – аналогово-цифровий перетворювач з мікроконтролером;

PC – персональний комп'ютер.

Принцип роботи приладу системи наступний: вторинне джерело живлення U1 перетворює змінну напругу (230 В, 50 Гц) у постійну меншої амплітуди $U_{вдж} = +5$ В. У якості такого вторинного джерела живлення використовується USB порт персонального комп'ютера (PC), який також входить до складу інформаційно-виміральної системи. Як відомо напруга на виході USB порту має величину +5 В. Перетворювач U1 понижує напругу +5 В до величини U_L , яка необхідна для живлення лазера LD в заданому режимі роботи за постійним струмом. Лазерне світло потрапляючи на чутливу поверхню фотодіоду VD

створює фотострум $I_{\text{фд}}$, котрий підсилювачем A1 перетворюється у пропорційну за величиною напругу $U_{\text{фд}}$. Так як підсилювач потребує двох полярного живлення використовується інвертор полярності напруги U1, який живиться також від USB порту РС. Так формується вихідна напруга фотоприймача приладу системи, котра потім подається на аналого-цифровий перетворювач мікроконтролеру, після чого проходить цифрову обробку. Попередньо оброблена цифрова інформація через USB порт поступає на персональний комп'ютер.

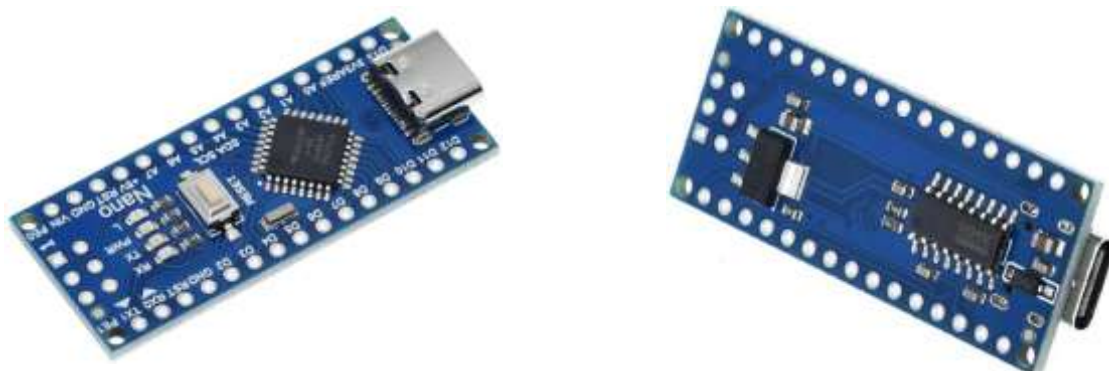
Для побудови схема електричної принципової була залучена сучасна елементна, зокрема високопродуктивні мікроконтролери та високо економічні перетворювачі напруги. Розроблена схема електрична принципова складається з трьох окремих складових частин:

- 1) приймальної;
- 2) передавальної;
- 3) обчислювальної.

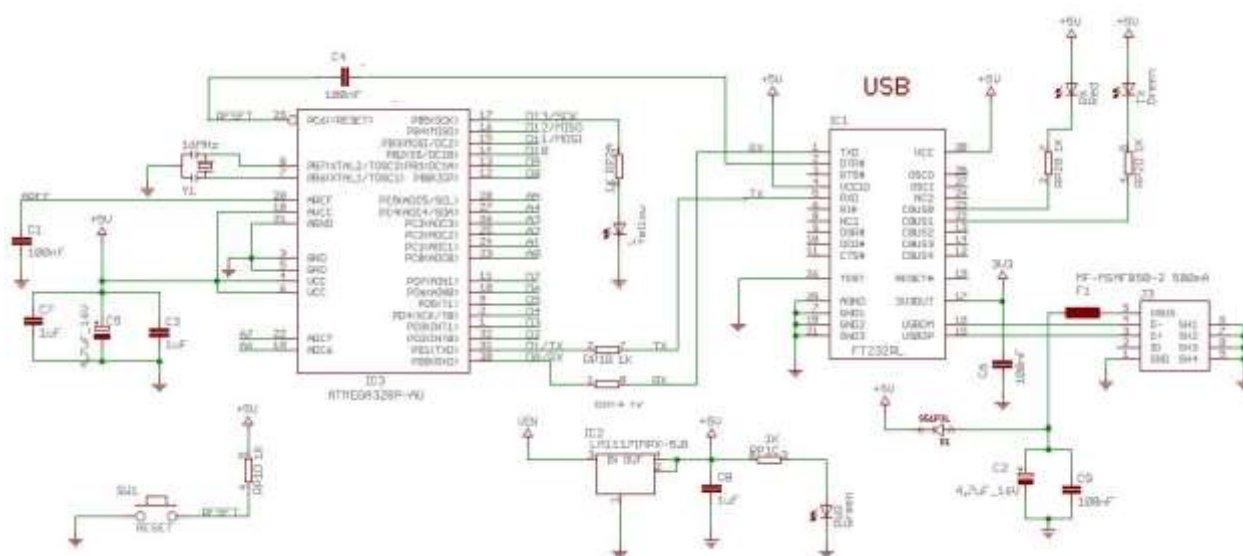
До складу передавальної частини приладу, згідно схеми функційної, відноситься напівпровідниковий лазерний діод та його стабілізатор напруги. До складу приймальної частини – фотодіод, підсилювач-перетворювач струм-напруга з буферним каскадом та інвертор полярності напруги живлення підсилювача, оскільки він має двох полярне живлення. Обчислювальна частина складається з мікроконтролера з вбудованим 18-ти розрядним аналогово-цифровим перетворювачем.

Всі частини приладу виконані на окремих друкованих платах. Обчислювальна частина виконана на модулі ARDUINO NANO V3.0 AVR ATmega328P TYPE-C (рис. 4.3) з робочою частотою 16 МГц. Вбудований АЦП мікроконтролера є 18 розрядним та при граничній вхідній напрузі +2 В забезпечує крок квантування рівний +15,625 мВ. Напруга живлення модуля ARDUINO NANO V3.0 AVR ATmega328P становить від +7 В до +12В, а також може живитись від напруги +5 В безпосередньо через порт USB. Струм

споживання модулем ARDUINO NANO без врахування його навантажень не перевищує 24 мА.



а)



б)

Рис. 4.3. Зовнішній вигляд модулі ARDUINO NANO V3.0 AVR ATmega328P TYPE-C (а) та схема електрична принципова (б).

Схема електрична принципова приймально-передавальної частини приладу системи наведено на рисунку 4.4. Живиться схема від напруги +5 В, яка поступає з відповідного роз'ємну на платі модуля ARDUINO NANO.

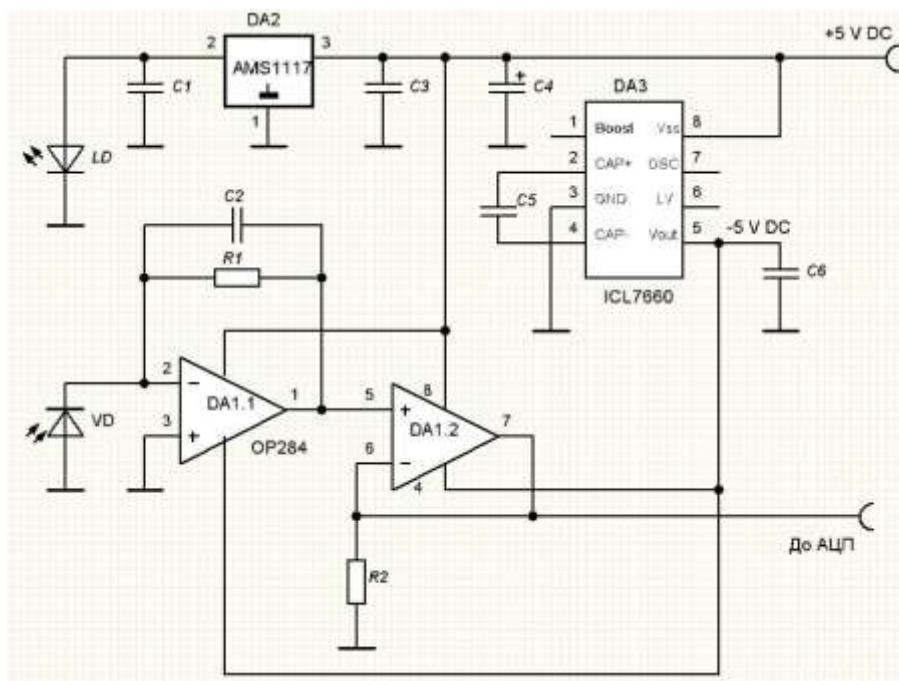


Рис. 4.4. Схема електрична принципова приймально-передавальної частини приладу системи для визначення нерозчинних домішок у воді.

Стабілізатор напруги лазерного модуля LD виконаний на аналоговій мікросхемі DA2, вхід якої через фільтруючі конденсатори C3 та C4 підключений до джерела +5 В. Між лазерним модулем та мікросхемою стабілізатором напруги включений додатковий фільтруючий конденсатор C1 для додаткового згладжування напруги живлення та для стабілізації роботи мікросхеми DA1. Інвертор полярності напруги живлення підсилювачів виконаний на мікросхемі DA3. Конденсатори C5, C6 визначають режими роботи мікросхеми DA3, зокрема робочу частоту. Підсилювач (перетворювач струм-напруга) виконаний на зведеному операційному підсилювачі DA1. Перший канал мікросхеми DA1.1 виконує функцію перетворення струм-напруга, а другий канал DA1.2 узгоджує з навантаженням перший канал, тобто забезпечує високий вхідний опір по відношенню до DA1.1 та низький вихідний опір по відношенню до входу АЦП мікроконтролера модуля ARDUINO NANO.

4.3 Розрахунок елементів схеми електричної принципової

Лазер випромінювача та фотодіод фотоприймача

У якості випромінювача з довжиною хвилі 980 нм обираємо малопотужний (30 мВт макс.), малогабаритний (діаметр корпусу 8 мм, довжина 18 мм), напівпровідниковий лазерний модуль (рисунок 4.4) з вбудованим стабілізатором струму споживання (40 мА) та діапазоном напруг живлення $+1,2...+5$ В. Лазер має вбудовану лінзу для налаштування фокусу променя. Корпус лазера виготовлений з латуні, що забезпечує його ефективний відвід тепла під час роботи і не дає йому перегрітись.

Фотодіод фотоприймача обираємо кремнієвий, оскільки верхня границя робочого діапазону кремнію становить 1100 нм, що відповідає ТЗ. Германієві фотодіоди більш коштовні та важко доступні, хоча мають ширший спектральний діапазон. Крім того слід обирати фотодіод з вбудованим фільтром, який не пропускав би видимий спектр до 850 нм (згідно ТЗ). Таким вимогам відповідає фотодіод ВР104 від Vishay. Його робочий спектральний діапазон становить 870...1050 нм, центральна довжина хвилі 950 нм (Рис.3.5). Максимальна зворотна напруга фотодіоду становить $U_r = 60$ В, що на порядок вище за напругу живлення приладу, темновий струм не перевищує 30 нА, напруга холостого ходу при освітленості 1 мВт/см^2 становить 350 мВ для 950 нм, а струм короткого замикання при такій освітленості 47 мкА.



Рис. 4.4. Зовнішній вигляд лазера на довжину хвилі 980 нм.

Для визначення необхідної напруги живлення лазерного модуля, було проведено наступний експеримент. Лазерний модуль з'єднали непрозорою трубкою з фотодіодом та вимірювали фотострум при різній величині опору навантаження, при цьому змінюючи напругу живлення лазерного модуля в межах від 0 до 3,4 В. Величина опору навантаження була наступна: 72кОм, 105кОм та 300кОм. Виміряні графіки залежностей фотоструму від напруги живлення лазерного модуля наведені на рисунку 4.6.

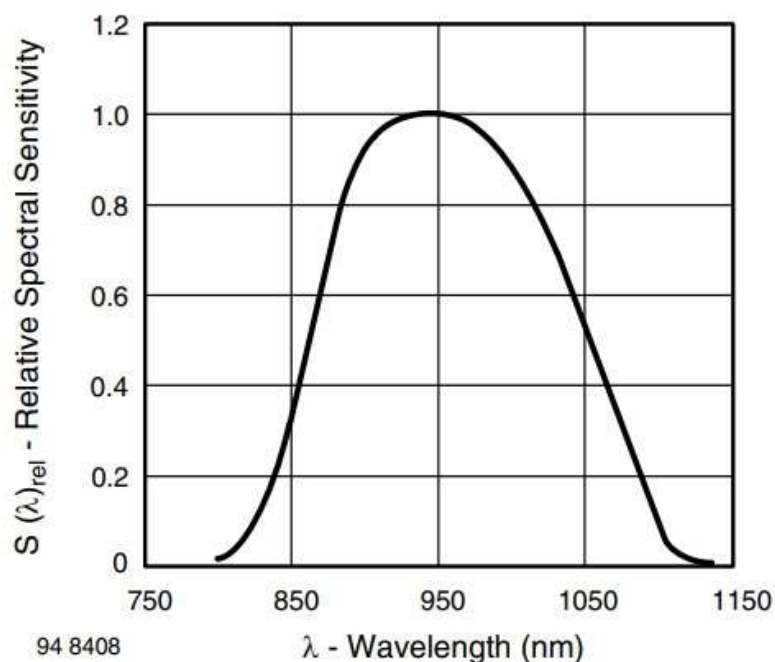


Рис.4.5. Залежність відносної спектральної чутливості від довжини хвилі для фотодіоду BP104 від Vishay.

Результати досліджень показали, що не залежно від опору навантаження режим стабілізації струму наступає при напругах більших за +2,18 В. Величина опору навантаження тільки впливає на величину фотоструму, який при вище наведених значеннях опорів навантаження приймав величину 8,6 мкА, 5,9 мкА та 2 мкА, відповідно. Тому із запасом було обрано трохи більшу величину напруги живлення лазерного модуля з ряду напруг існуючих комерційно доступних стабілізаторів, а саме +2,5 В.

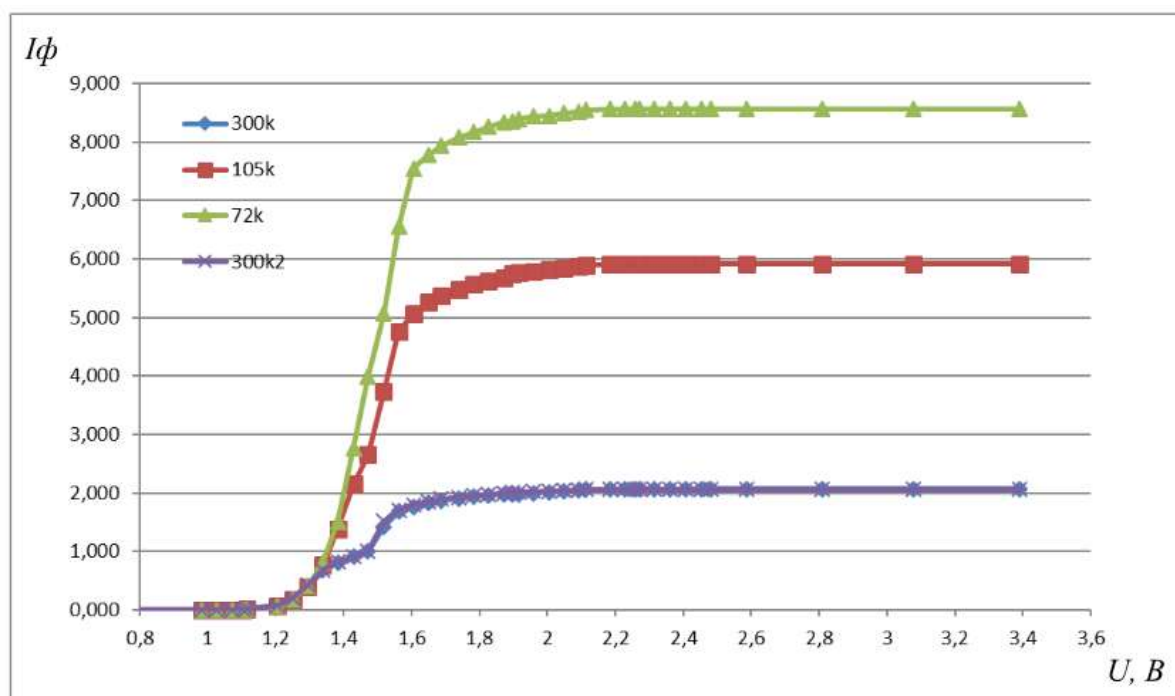


Рис. 4.6. Виміряні графіки залежностей фотоструму від напруги живлення лазерного модуля для трьох різних опорів навантаження.

Остаточно обирати величину опору навантаження будемо при розрахунках підсилювача-перетворювача струм-напруга.

Стабілізатор напруги лазера

Обираємо мікросхему AMS1117 (рисунок 4.4.) з вихідною напругою $2,5 \pm 0,012$ В. Діапазон вхідних напруг цієї мікросхеми становить від +4В до +12В, а діапазон струмів навантаження від 10 до 800 мА. Струм споживання цієї мікросхемою становить 5 мА. Максимальне значення напруги, що падає на мікросхемі, становить $U_{\text{drop}} = 1,3$ В, тому вхідна напруга цієї мікросхеми має бути вища за $1,3 + 2,5 = 3,8$ В, що задовольняє вимоги ТЗ. Коефіцієнт згладжування пульсацій становить щонайменше 60 дБ. Мікросхема має вбудований захист від перевантаження за струмом, а саме, максимальний вихідний струм, при якому спрацює захист, становить не більше 1,5 А.

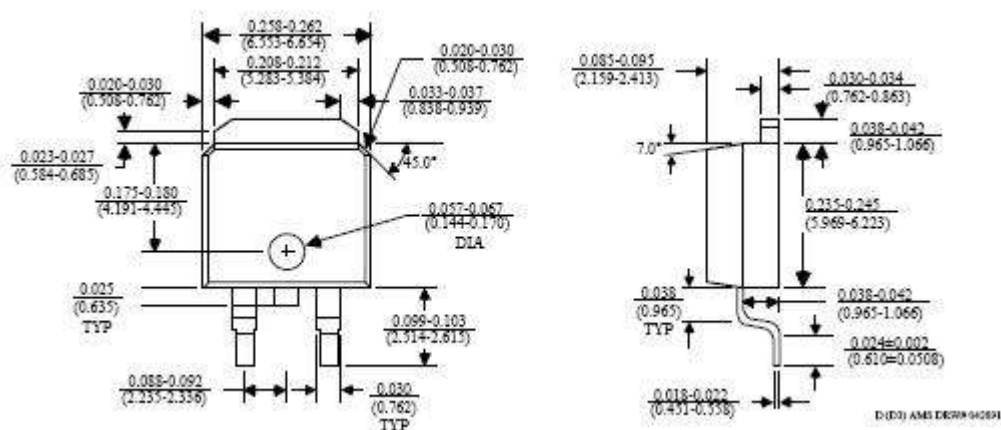


Рис. 4.5. Зовнішній вигляд та розміри мікросхеми AMS1117.

Діапазон входних напруг від +4В до +12В, а діапазон струмів навантаження від 10 мА до 800 мА, що задовольняє вимоги ТЗ ($U_{st} = +5\text{ В}$) та характеристики лазера ($I_L = 40\text{ мА}$). Струм споживання не більше $I_D = 5\text{ мА}$. Максимальне значення напруги, що падає на мікросхемі $U_{drop} = 1,3\text{ В}$, тому входна напруга цієї мікросхеми має бути вища за величину $U_{drop} + U_{st} = 1,3 + 2,5 = 3,8\text{ В}$, що задовольняє вимоги ТЗ ($3,8\text{ В} < 5\text{ В}$). Коефіцієнт згладжування пульсацій становить щонайменше 60 дБ. Мікросхема має вбудований захист від перевантаження за струмом, а саме, максимальний вихідний струм, при якому спрацює захист, становить не більше 1,5 А. Конденсатори С1 та С3 обираємо ємністю 0,1 мкФ та 0,33 мкФ, відповідно, на напругу не менше 8 В. Для обраного струму лазера потужність, що розсіюється на мікросхемі становить $P_{DA2} = (I_L + I_D) \cdot U_{drop} = (40+5) \cdot 1,3 = 58,5\text{ мВт}$. Розрахована величина потужності не перевищує допустиму для типорозмірів корпусів такої мікросхеми при температурі довкілля +25°C, а саме: TO-252 (1,8 Вт) та SOT-223 (1,8 Вт). Тому для забезпечення мінімальних габаритів та маси приладу обираємо тип корпусу мікросхеми SOT-223.

Інвертор полярності напруги живлення підсилювачів

У якості інвертора полярності напруги живлення підсилювача DA1 обираємо мікросхему DA3 типу ICL7660A виробника InterSil (рис.3.8.) з вихідною від'ємною напругою -5 В.

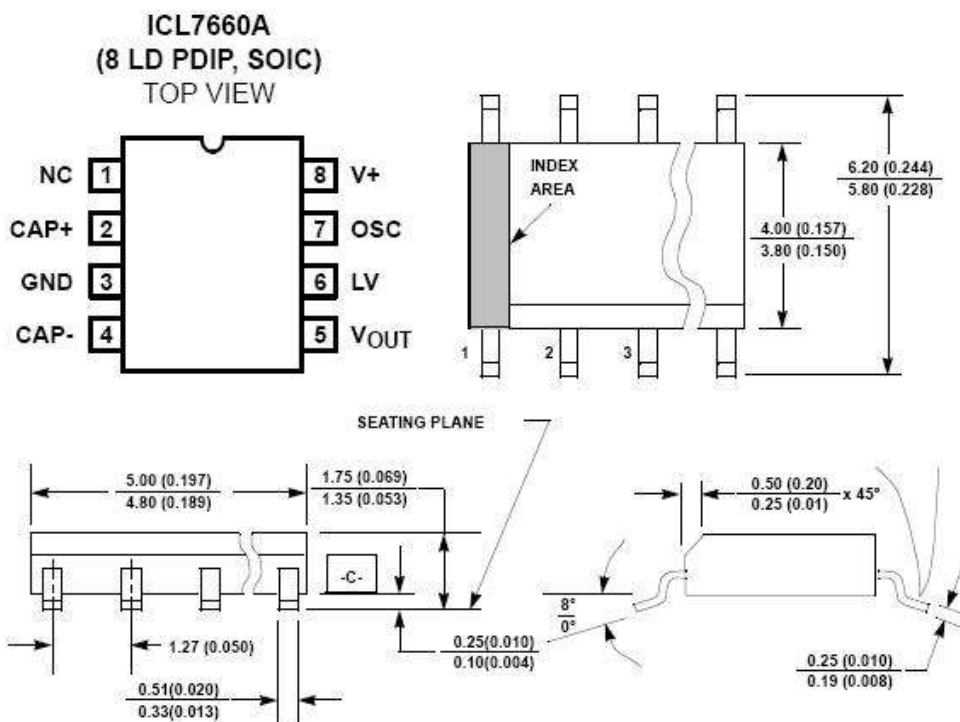


Рис. 3.8. Перетворювач полярності ICL7660A.

Відхилення вихідної напруги відповідає відхиленню вхідної, тобто нестабільністю напруги порту USB. Діапазон вхідних напруг від +1,5 В до +12В, а діапазон струмів навантаження до 10 мА при коефіцієнті конвертації ККД>95%. При цьому струм споживання не перевищує 20 мА. Вихідний опір мікросхеми як джерела живлення при струмі навантаження до 20 мА становить не більше 100 Ом. Мікросхема виготовлена в корпусі типу SOIC. Для номінального значення робочої частоти у 10 кГц відповідно до паспорту ємності конденсаторів С5 та С6 мають бути по 10 мкФ напругою понад 8 В. Обираємо танталові конденсатори, що є вимогою виробника мікросхеми ICL7660A, типу smd фірми Samsung ємністю 10 мкФ точністю 10% типорозміром size-A (3,2×1,6×1,6 мм) з максимальною напругою 10 В.

Підсилювач-перетворювач струм-напруга

У якості підсилювача DA1.1 та буферного каскаду DA1.2 обираємо двоканальну мікросхему OP284 (Рис.3.9.). Особливістю цієї мікросхеми є низький рівень напруги зміщення 65 мкВ, швидкодія 4 В/мкс та низький рівень

власних шумів 3,9 нВ/√Гц. Діапазон напруг живлення цієї мікросхеми становить від ± 2 В до ± 18 В. Струм споживання кожним каналом мікросхеми при напрузі живлення ± 5 В не перевищує 1,45 мА, а амплітудне значення шуму вихідної напруги не перевищує 0,3 мкВ.

Вихідна напруга підсилювача $U_{\text{фд}}$ визначається як добуток фотоструму фотодіода $I_{\text{фд}}$ на опір резистора зворотного зв'язку R_1 . Величину фотоструму була визначена експериментально та становила приблизно 10 мкА. Конденсатор C_2 служить для фільтрації завад та стабільної роботи підсилювача. Ємність такого конденсатора може бути від десятків до сотень піко фарад.

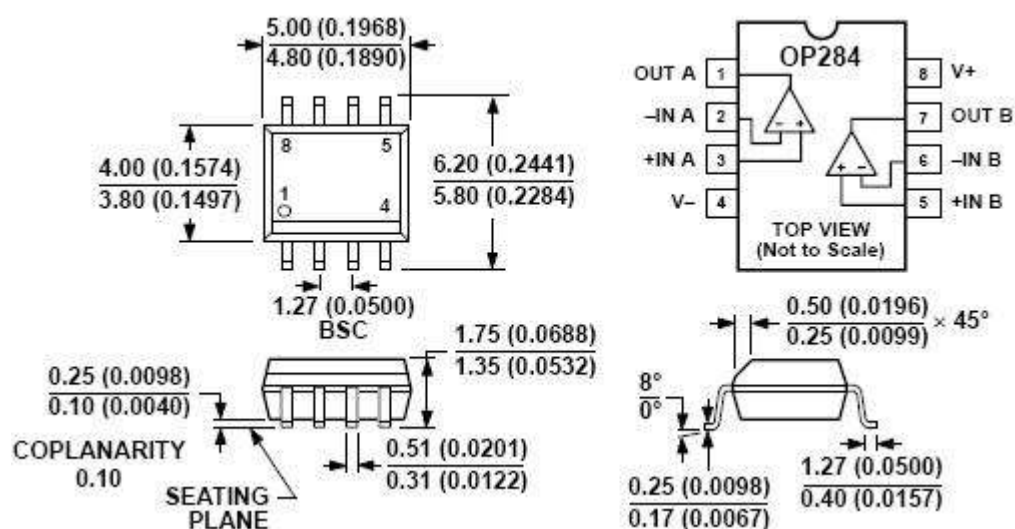


Рис. 3.9. Підсилювач-перетворювач на мікросхемі OP284.

Для розрахунку опору зворотного зв'язку задамо напругу на виході підсилювача рівною максимальному аналоговому сигналу, а саме +2 В.

Розраховуємо опір резистора зворотного зв'язку за визначеним значенням фотоструму та вихідної напруги: $R_1 = U_{\text{фд}} / I_{\text{фд}} = 2 / (10 \cdot 10^{-6}) = 200$ кОм. Обираємо номінал R_1 , а також опір R_2 , із запасом резистор smd марки Hitano опором 200 кОм точністю 1% типорозміром 1206 (3,2×1,6 мм) з номінальною розсіюванням потужністю 0,25 Вт та максимальною робочою напругою 200 В. Конденсатор C_2 обираємо ємністю 10 пФ. Додатковий фільтруючий конденсатор C_4 обираємо

також танталовий типу smd фірми Vishay ємністю 100 мкФ точністю 10% типорозміром size-C (6×3,2×2,6 мм) з максимальною напругою 10 В.

Сумарну потужність споживання схемою приладу системи визначаємо по протікаючим струмам та напругою живлення. За першим законом Кірхгофа сума всіх струмів, що сходяться у вузол, дорівнює сумі всіх струмів, що випливають із вузла. Струм споживання схемою визначається сумою струмів споживання:

1. Лазер – 40 мА;
2. Стабілізатор напруги лазера – 5 мА;
3. Модуль ARDUINO NANO – 24 мА;
4. Модуль АЦП MCP3421 – 0,2 мА;
5. Підсилювачі – 3 мА;

Звідси знаходимо сумарний струм споживання:

$$I_{\text{сум.}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (3.6)$$

$$I_{\text{сум.}} = 40 + 5 + 24 + 3 = 72 \text{ мА}$$

Струм 72 мА надходить із вторинного джерела (порту USB) на схему.

Сумарна споживана потужність дорівнює:

$$P_{\text{сум}} = I_{\text{сум.}} \cdot U_{\text{ж.}} = 0,072 \cdot 5 = 0,36 \text{ Вт}$$

Отже, сумарна розрахункова споживана потужність 0,36 Вт задовольняє вимоги ТЗ, оскільки менша за задану у 0,5 Вт.

4.4 Розрахунок похибок вимірювання

Аналіз сумарної похибки включає в себе також аналіз похибки складових кожного елемента схеми розроблюваного приладу. Фактори впливу, які складають похибку вихідної величини (яка перетворюється у значення напруги або концентрації нерозчинних домішок у воді, що відображається на моніторі персонального комп'ютера), діють послідовно. Однак, першим інформативним параметром є напруга на виході підсилювача-перетворювача, яка пропорційна струму фотодіода, а також інтенсивності світла, що відбивається від чутливого

елементу ППР-сенсору. Необхідно враховувати невизначеність інтенсивності світла, що падає на чутливий елемент, яка залежить від струму лазерного модуля і визначається параметрами стабілізатора напруги. Загальну похибку також збільшує процес аналого-цифрового перетворення в мікроконтролері. Тому при проходженні сигналу через нові каскади значення похибки поступово зростає.

Оскільки напруга живлення лазерного модуля 2,5 В перевищує мінімальну напругу 2,18 В, коли модуль починає стабілізувати струм і відповідно інтенсивність випромінюваного монохроматичного світла, то похибкою зміни інтенсивності випромінювання лазера через коливання вихідної напруги стабілізатора можна знехтувати. Тому відповідно і фотострум генерований фотодіодом буде мати стабільне значення за амплітудою (Рис.4.6). Першим каскадом схеми, що вносить похибку у вихідний сигнал є підсилювач-перетворювач через неточність опору резистора зворотного зв'язку R1. Визначимо абсолютну похибку напруги на виході підсилювача:

$$\begin{aligned}\Delta U_{\Pi} &= (I_{\text{фд}})(R_{\text{зз}} + \Delta R_{\text{зз}}) - U_{\Pi} = (10 \cdot 10^{-6}) \cdot ((200 + 2,0) \cdot 10^3) - 2 = \\ &= 2,02 - 2 = 0,02 \text{ В} \approx 20 \text{ мВ.}\end{aligned}\quad (4.1)$$

Відносна похибка у цьому випадку складає 1%.

Модуль МСР3421 є 18 розрядний АЦП, що відповідає 131071 градаціям вихідного коду. Загальна похибка перетворення АЦП включає в себе інтегральну та похідну нелінійність, похибку квантування, похибку коефіцієнта перетворення та похибку зсуву нуля. Загальна похибка АЦП складається з похибок квантування $\gamma_{\text{кв}}$ і нелінійності $\gamma_{\text{нл}}$. У більшості випадків ці похибки мають однакові величини. Відносні значення цих похибок можна апроксимувати наступним рівнянням:

$$\gamma_{\text{нл}} = \gamma_{\text{кв}} = \frac{1}{2^n} \cdot 100\% = \frac{1}{131071} \cdot 100\% = 0,00076\% \quad (4.2)$$

де n – розрядність перетворювача.

$$\gamma_{\text{кв}} = \gamma_{\text{нл}};$$

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \gamma_{\text{кв}} + \gamma_{\text{нл}} = 0,0015\%;$$

Якщо за похибку аналого-цифрового перетворення взяти значення молодшого розряду, оскільки похибка квантування становить 15,625 мкВ, а нелінійна похибка перетворення має таке ж значення, то вихідна напруга АЦП стає $2000 + 20 + 2 \cdot 0,015625 = 2020,03$ мВ для 18-розрядного АЦП. У цьому випадку абсолютна похибка вихідного значення АЦП дорівнюватиме $2020,03 - 2000 = 20,03$ мВ, відносна похибка матиме значення 1,0%.

Межі основної відносної похибки вимірювання вихідної напруги ППР-сенсора приладу системи визначено 1,0%, що не більше 3%, що відповідає вимогам ТЗ.

4.5. Розрахунок межі детектування та діапазону вимірювання

Межа детектування концентрації нерозчинних домішок на прикладі наночастинок оксиду кремнію може бути визначена з розрахованої у 2 розділі кутової чутливості сенсора, крутизни лівого схилу рефрактометричної характеристики для фіксованого кута падіння світла та за величиною лінійної області лівого схилу рефрактометричної характеристики, яка визначає діапазон вимірювання. Для ППР-сенсора з товщиною плазмон-носійного шару 47 нм та довжиною хвилі лазера 980 нм кутова чутливість становить 71,4 градуси/RIU, крутизна лівого схилу рефрактометричної характеристики приблизно рівна 3 град⁻¹. Для максимального значення вихідної напруги фотоприймача рівної 2 В, функція перетворення для режиму «на схилі» має значення 6 В/град. Величина лінійної області лівого схилу рефрактометричної характеристики становить 0,122 у величинах коефіцієнту відбиття і відповідає кутовому зсуву мінімуму рефрактометричної характеристики 0,043 градуси. Така лінійна область відповідає зміні вихідної напруги фотоприймача на величину 244 мВ.

За результатами моделювання, виконаними в 2 розділі магістерської дисертації, для концентрації нерозчинних домішок оксиду кремнію величиною 130 мг/л (1000 NTU) відгук сенсора складав 1,8 кутові секунди або $5 \cdot 10^{-4}$ град.

Такому кутовому зсуву відповідає зміна інтенсивності відбиття $1,5 \cdot 10^{-3}$, що в перерахунку на величину вихідного сигналу фотоприймача становить 3 мВ. Приймаючи, що залежність вихідної напруги фотоприймача від концентрації є лінійною, можна визначити мінімальну концентрацію, яка відповідає роздільній здатності АЦП, тобто 15,625 мкВ. Такою концентрацією є 0,68 мг/л, що в перерахунку на нефелометричні одиниці каламутності становить 5 NTU. Для наночастинок оксиду заліза, які також присутні у воді, чутливість ППР-сенсору майже в 3 рази більша. Тобто для аналогічної концентрації оксиду заліза у воді рівної 130 мг/л (1000 NTU) відгук сенсора складав 5,4 кутові секунди або $15 \cdot 10^{-4}$ град. Такому кутовому зсуву відповідає зміна інтенсивності відбиття $4,5 \cdot 10^{-3}$, що в перерахунку на величину вихідного сигналу фотоприймача становить 9 мВ. Приймаючи, що залежність вихідної напруги фотоприймача від концентрації є лінійною, можна визначити мінімальну концентрацію, яка відповідає роздільній здатності АЦП, тобто 15,625 мкВ. Такою концентрацією є 0,23 мг/л, що в перерахунку на нефелометричні одиниці каламутності становить приблизно 1,8 NTU. Розрахована величина межі детектування задовольняє вимоги ТЗ.

Діапазон вимірювання концентрації наночастинок оксиду заліза у воді для лінійного діапазону вимірювання вихідної напруги становить 3,52 г/л, що задовольняє вимоги згаданих у роботі стандартів ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014.

Висновок до розділу 4

1. Було сформоване технічне завдання на проектування приладу системи для визначення нерозчинних домішок у воді.
2. Для побудови схеми електричної принципової залучено сучасні елементи, зокрема високопродуктивні мікроконтролери та високо економічні перетворювачі напруги. Розрахована схема живиться від напруги +5 В, яка поступає з відповідного роз'ємну на платі модуля ARDUINO NANO.
3. Було обрано схемні рішення, електронні компоненти, як активні , так і пасивні. Проведено розрахунок номінальних значень пасивних компонентів. В ході розрахунків вихначено загальний струм споживання приладом, а саме, 72 мА і сумарну споживану потужність 0,36 Вт.
4. В результаті розрахунку похибок вимірювання встановлено основну відносну похибку вимірювання вихідної напруги ППР-сенсора приладу системи – 1,0%, що не більше 3%, а отже – відповідає вимогам ТЗ.
5. Було розраховано межа визначення нерозчинних домішок у воді, а саме, наночастинок оксиду кремнію та оксиду заліза. Мінімальна концентрація оксиду заліза становила 0,23 мг/л, що в перерахунку на нефелометричні одиниці каламутності становить приблизно 1,8 NTU. Мінімальна концентрація оксиду кремнія становила 0,68 мг/л, що в перерахунку на нефелометричні одиниці каламутності становить приблизно 5 NTU. Діапазон вимірювання концентрації наночастинок оксиду заліза у воді для лінійного діапазону вимірювання вихідної напруги становив 3,52 г/л, що задовольняє вимоги згаданих у роботі стандартів. Отже, створена система може бути застосована для контролю якості води при наявності в ній наночастинок, зокрема оксидів кремнію і заліза, а також підготовки та транспортування води для потреб людини.

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «ЕКО-ПЛАЗМОН»

5.1 Опис та технологічний аудит ідеї проєкту

В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проєкту «Еко-Плазмон», ідея якого – допомогти різним підприємствам та бізнесам організувати свою роботу екологічно і з користю для здоров'я людей. Особливо, що стосується водних ресурсів, адже водна ресурсна система є життєво важливою для усіх аспектів життя на Землі, від забезпечення водою живих істот до підтримки екосистем та промислового розвитку. І оскільки забруднення води стає все більшою проблемою, що вимагає невідкладної уваги, розвиток і втілення цього стартап проєкту є надважливим.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Екологічна модернізація бізнесів/підприємств	Екологічний аудит і консалтинг	Життя в соціально відповідальному середовищі, де дбають про забезпечення високої якості питної води і не тільки
	Консультаційні послуги з питань очищення води	
	Розробка та погодження екологічної документації (дозвільної в тому числі)	
	Лабораторні дослідження	
	Проектування та установка рішення	

Отже, пропонується супровід компаній / підприємств / бізнесів, які зацікавлені в послугах екологічної модернізації, що стосується очищення води. Головне завдання полягає в тому, щоб зібрати різні види екологічних послуг (від аудиту забруднення вод до установки) – в одному місці. Очікуваними

результатами є поліпшення якості питної води, загального екологічного стану водних ресурсів, покращення здоров'я споживачів та, можливо, навіть знаходження нових рішень.

Далі проведемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно з пропозиціями конкурентів, що проілюстровано в таблиці 5.2. W – слабка сторона, N – нейтральна (такі ж показники, як і у конкурентів), S – сильна сторона.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проєкт	Інженерна компанія «Ecosoft»	Компанія «Венкон»	Центр Очищення Води у м. Біла Церква			
1	Вартість обладнання	200 тис. грн	100 тис. грн	200 тис. грн	200 тис. грн		•	
2	Диференціація послуг	Всі перелічені послуги	Виробництво фільтрів, встановлення власних систем	Системи контролю забруднення води та очищення	Підбір та установка систем контролю забруднення води			•
3	Система інформації та реклами	Сайт, публікації на сайтах партнерів, фейсбук, інстаграм та тіток	Сайт + партнерські публікації	Зручний сайт, чат в телеграм	Зручний сайт, фейсбук, інстаграм (не ведеться регулярно)			•

4	Способи комунікації	Телефон, пошта, телеграм, ватсап, вайбер	Телефон, пошта, зворотній зв'язок	Телефон, пошта, телеграм	Телефон, пошта, телеграм, вайбер		•	
5	Масштаби	Проекти в Україні та інших країнах Європи	Проекти в Україні, 30% експорту в країни Європи	Проекти в Україні	Проекти в Україні			•
6	Розмір капіталу	500 тис. грн	300 тис. грн	400 тис. грн	400 тис. грн	•		

Отже, таблиця 5.2 показує, що дві характеристики з шести є нейтральними, одна характеристика є слабкою стороною і три – сильними. Слабкою характеристикою є розмір вкладень, так як цей показник значно вищий, ніж у конкурентів. «Еко-Плазмон» – проєкт, в якому об'єднано декілька вже існуючих ідей, а це від початку потребує більше вкладень, і фінансових у тому числі.

Оскільки ідея мого стартапу вміщує в собі декілька різних послуг у сфері екологічної безпеки, будувати компанію «з нуля» доволі складно. На мою думку, в такому випадку буде доречним розглянути наступні способи реалізації проєкту, які наведено у таблиці 5.3, а саме – партнерство між декількома компаніями.

Таблиця 5.3 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Технології її реалізації	Принцип технології	Доступність технології
1	Обмежене партнерство	Кожна зі сторін відповідальна	Можлива, проте не достатньо лояльна для

		виключно за раніше обговорені деталі	ефективного просування стартапу
2	Повне партнерство	Відповідальність усіх сторін цього співробітництва	Можлива
3	Бізнес-об'єднання	Має на меті об'єднати різні компанії зі спільним інтересом	Можлива і підходить не тільки для ефективного ведення бізнесу, але і для виведення ідеї на більш широкий ринок
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: бізнес-об'єднання			

Виходячи з даних в таблиці, можна зробити висновок, що для проекту «Еко-Плазмон» найбільш ефективною і вигідною реалізацією, як один з варіантів, може стати технологія бізнес-об'єднання, адже це не тільки позбавить від конкурентів, але й дасть можливість вийти на міжнародний рівень.

Тепер, коли описано ідею стартап-проекту і проведено її аналіз, можна сформуванати наглядну інформаційну карту, яку відображено у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 Інформаційна карта проекту «Еко-Плазмон»

Назва блоку	Характеристика
1	2
Загальна характеристика стартап-проекту	
Назва стартап-проекту	Еко-Плазмон
Проблематика, яку вирішує стартап-проект	Забезпечення чистою питною водою і не тільки
Головні цілі та завдання проекту	Допомога в правильній та екологічній бізнес діяльності – корпоративній соціальній відповідальності

Головні цільові групи, на які спрямований проєкт	Компанії, які займаються виготовленням продуктів харчування / наданням послуг у сфері харчування / аграрним бізнесом і не впевнені в якості водного ресурсу, але хочуть це виправити
Автори та команда стартап-проєкту	
Автори стартап-проєкту	Романенко Анна
Команда стартап-проєкту	Візіонер - оформлення цінності ідеї та її просування в маси; генеральний директор – підбір команди, спілкування з інвесторами, відстеження основних показників успіху; фахівець із здійснення екологічної модернізації; комерційний директор – відповідальність за продажі послуг; бухгалтер; діджитал експерт – сайт і т.п.
Опис продукту стартап-проєкту	
Назва та коротка характеристика мінімального життєздатного продукту стартапу (MVP)	Можливість аналізу якості води; зібрані знання по визначенню найбільш розповсюджених домішок у воді, що впливає на якість надання послуг компаній-клієнтів
Сфера застосування та функціональне призначення продукту	Сфери, пов'язані з харчуванням / обслуговуванням /аграрним господарством; усунення цієї проблеми
Опис унікальних властивостей продукту стартапу	Супровід компанії, яка зацікавлена в послугах модернізації і поїдвищенні якості води (питної і не тільки)

Стадія розробки продукту стартапу	Ідея; подальший її розвиток більше, ніж можливий
Технічні характеристики	Послуга

Супровід продукту	У разі необхідності наводиться інформація про сервісне обслуговування продукту, додаткові послуги. Розкриваються вимоги до контролю якості, до підготовки користувачів, до гарантійного та післягарантійного обслуговування
Забезпечення стартап-проєкту	
Необхідні ресурси	Фінансові, інтелектуальні (компанії-помічники для співпраці)
Потреба в інвестиціях	500 000 грн
Інтелектуальна власність	Немає, адже це не про прибуток, а про просування ідеї; і чим більше буде однодумців і наслідувачів – тим краще споживачів
Результати стартап-проєкту	
Термін реалізації стартап-проєкту	22 березня 2023 р. – 22 березня 2024р. (22 березня – міжнародний день водних ресурсів)
Плановані кількісні показники стартаппроєкту	Принаймні 5 модернізованих компаній
Якісні показники стартап-проєкту	Компанія буде чітко сформована (учасники та компанії-помічники)
Загальні очікувані результати	Підвищення якості питної (і не тільки) води, гарантії безпеки споживачів та, знаходження інших, досі ще невідомих, рішень

5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проєкту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє сформувати уявлення про потреби клієнтів, пропозиції конкурентів, попит на такі послуги і зробити висновок про доцільність стартап ідеї.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	30
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2 млрд
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	-
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	-
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20

З даних таблиці видно, що обрана ніша є досить привабливою для входження на сьогоdnішній ринок. По-перше, поки гравців на ринку не так багато, по-друге, динаміка зростає, що можна пояснити все більшою стурбованістю людства станом водних ресурсів, зокрема якістю питної води.

Для оцінювання потенціалу продажу необхідно визначити обсяг ринку та його зрілість. Розрахунок можна виконати за методикою РАМ, ТАМ, САМ, СОМ. Це зручний спосіб оцінки обсягу ринку, популярний у стартапах і бізнесі. Його використовують, коли хочуть зрозуміти перспективи масштабування, і взагалі,

чи варто вкладати гроші у проєкт. Доволі часто ці розрахунки вимагає інвестор перед тим, як почати обговорення майбутніх вкладень у проєкт.

PAM, TAM, SAM та SOM – це показники, кожен з яких відповідає певному сегменту ринку. PAM (Potential Available Market) – потенційно доступний ринок; цем весь обсяг ринку з урахуванням змін за певний проміжок часу.

TAM (Total Addressable Market) – загальний обсяг ринку, де можна продати послуги. Показник включає всіх потенційних клієнтів (тих, хто вже купує в наших конкурентів або навіть не купує товари-аналоги).

SAM (Served/Serviceable Available Market) – доступний обсяг ринку, частка від TAM. Показує скільки грошей вже витрачається на схожі на наше рішення. Кажучи простіше – це ринок прямих конкурентів та аналогів.

SOM (Serviceable & Obtainable Market) – реально досяжний обсяг ринку, частка від SAM. Обсяг продажу, який компанія може отримати завдяки доступним їй інструментів.

Тепер визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

Потреба, що формує ринок	ЦА	Відмінності у поведінці клієнтів	Вимоги споживачів
Позитивна зміна якості питної води, і водних ресурсів загалом	Виробництва / бізнеси, які прагнуть екологічно модернізуватися	Зацікавлені у нинішніх тенденціях, соціально відповідальні	Зосередженість екологічних послуг в одному місці

Тож, послугами «Еко-Плазмон» могли б користуватися малі підприємці, середній бізнес, а також великі компанії. Адже останнім часом

актуально бути «екологічними», ретельніше ставитися до того, що споживається, і відповідно до того, який продукт пропонується на ринку. Отже, екологічність зростає, а найбільш прогресивною ланкою суспільства є люди 25-44 років, які можуть бути потенційними клієнтами «Еко-Плазмон».

Використовуючи дану технологію існують також і певні загрози, що можуть завадити входу на ринок і процвітанню стартапа «Еко-Плазмон». Деякі із загроз пов'язані між собою (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7 Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Ворожі дії з боку росії	Загроза знищення майна, відсутність електроенергії	Сповільнення надання послуг (найпозитивніший варіант)
2	Інфляція	Подорожчання покупок	Більші витрати на закупки у закордонних компаній
3	Виникнення нових конкурентів	Розділення попиту споживачів між більшою кількістю постачальників послуг	Зменшення прибутку
4	Технологічні прориви в інших країнах	Складність виходу на міжнародний ринок	Зменшення прибутку та факторів впливу

Ведення екологічного бізнесу з урахуванням потреб споживачів має свої плоди в довготривалій перспективі. Як бачимо з таблиці 5.7, всі загрозові фактори мають сильний вплив, особливо за умови воєнних дій на території України, спричинені агресивною політикою країни-сусідки. В таких обставинах потенційні споживачі можуть витратитися на більш буденні потреби короткої

перспективи, а це не може не призвести до зменшення попиту на послуги «Еко-Плазмон».

Але поряд з рядом загроз існують і певні можливості розвитку «Еко-Плазмон», які показано у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Доступність інвестицій та кредитів	Вкладення іноземних інвесторів	Впевнений старт та подальше існування бізнесу
2	Швидке зростання ринку	Збільшення попиту	Збільшення прибутку
3	Вертикальна інтеграція	Контроль багатьох ланок холдингу	Більш чітка та визначена стратегія ведення бізнесу
4	Розвиток країни	Більше потенційних споживачів звертають увагу якість води, і загалом на екологічний стан	Здатність витратитися на рекламу і т.п.

Отже, завдяки вище згаданим факторам, ідея стартапу «Еко-Плазмон» зможе не тільки гарно стартувати, а й розвиватися у подальшому. Через швидке зростання ринку та євроінтеграцію бізнес зможе розширитися. Використовуючи бізнес-модель об'єднання та втілення вертикальної інтеграції, стартапер може вивести ідею на масштаби впізнаваних бренд-гігантів за рахунок чіткої, визначеної стратегії ведення бізнесу.

Тепер визначимо основні риси конкуренції. Результати показано у таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
--------------------------------------	---	--

Тип конкуренції: чиста	Ціна контролюється всім ринком	Відсутність бар'єрів для входу
Рівень конкурентної боротьби: національний	Споживач обирає з- поміж компаній однієї країни	Нейтральний
Міжгалузева конкуренція	Компанії задовольняють різні види послуг, спеціалізуються на виконанні різних послуг екологічної сфери	Можливість надання всіх екологічних послуг однією компанією
Товарно-родова конкуренція	Конкуренція на рівні технології задоволення потреб	Можливість диференціації послуги щодо рівня забезпеченості потенційного споживача
Характер конкурентної переваги: нецінова	Споживач в першу чергу звертає увагу на професіоналізм фахівців та наявність новітніх технологій	Необхідність мати вартісне та надійне обладнання
Не марочна	В даній сфері немає брендів, які у всіх «на слуху»	Можливість зайняти першість

Нині ринок з надання таких послуг дещо диференційований, бо одні компанії займаються очищенням водних ресурсів, інші спеціальним водокористуванням, а хтось спеціалізується на розробці стратегій модернізації систем очищення води і т. д. Проте так само важливо здійснювати і контроль забруднень, а ще краще – контроль з вище згаданими послугами. Тому цей ринок навіть потребує сильних гравців.

Враховуємо характеристики ідеї проєкту (табл. 5.2) та фактори маркетингового середовища (табл. 5.7-5.8), після чого зможемо визначити та обґрунтувати фактори конкурентоспроможності (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Кількість послуг, що надаються	Немає компаній, які б займалися всіма видами послуг, що стосується контролю забруднення води
2	Орієнтованість на молодих підприємців	Сприяє популяризації послуг
3	Інтеграція новітніх технологій	Надання найбільш якісних послуг

З таблиці 5.10 видно, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний вплив. Основною перевагою та головним досягненням є зосередженість послуг, їх якісне виконання за рахунок вкладення ресурсів у дослідження нових методів аналізу та модернізації систем контролю забруднення води. Орієнтованість на прогресивну, соціально відповідальну ланку суспільства сприяє популяризації того самого «бути екологічними» та таких послуг відповідно.

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Венкон»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Венкон»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	16		+					
2	Велика кількість постачальників	15			+				
3	Висока якість	17	+						
4	Технічна підтримка	19				+			
5	Ціна	14						+	

Тепер перейдемо до фінального етапу ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту – і це складання SWOT-аналізу, який представлено в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 SWOT- аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Диференціація послуг Система інформації та реклами Масштаби	Слабкі сторони: Розмір капіталовкладень
Можливості: 1. Вкладення іноземних інвесторів 2. Можливість зайняти першість 3. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників	Загрози: 1. Різка зміна курсу гривні може привести до зменшення попиту, особливо з боку малих фірм 2. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу 3. Зменшення продажів через несвоєчасне виконання замовлень

Це матриця аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей. Ідея «Еко-Плазмон» має життєво необхідні сильні сторони, але важливо пам'ятати про необхідність великих капіталовкладень. Загрози існують через нестабільне положення в країні, проте зацікавленість розвинених країн в Україні дає необхідні можливості для подальшого розвитку проєкту.

5.4 Розроблення ринкової та маркетингової стратегії проєкту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку. Тож спочатку для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (таблиця 5.13).

Таблиця 5.13 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні	Базова стратегія розвитку
--------------------------------------	---------------------------	-----------------------------	---------------------------

		позиції відповідно до обраної альтернативи	
Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Охоплення різних видів послуг, пов'язаних з контролем забруднення води	Повна модернізація, використовуючи послуги однієї компанії	Стратегія лідерства по витратах

Виходячи з даних, поданих у таблиці, можемо зробити висновок, що в ході конкурентної боротьби з використанням цієї стратегії з ринку вимушені будуть піти фірми, менш ефективні з точки зору величини і структури витрат, нездібні до проведення технологічних новацій, спрямованих на зниження витрат.

Тепер перейдемо до наступного етапу – вибору стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Пріоритет на нових	Орієнтованість на новітні технології з використанням існуючих	Стратегія лідера

Отже, стратегія лідера припускає три підстратегії. Одна з яких – розширення первинного попиту. Тож не є доцільним розмінюватися на боротьбу з невеликими конкурентами, коли можна отримати велику економічну

віддачу від розширення первинного рівня попиту. В цьому випадку компанія займається реалізацією заходів по формуванню попиту, також пропаганду нових напрямів застосувань існуючих товарів, виявлень нових груп споживачів.

Результат цього підрозділу – розробка системи рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку. Тож перейдемо до розробки маркетингових програм – трирівневої моделі товару: зазначимо ідею послуги, її фізичні складові та особливості процесу її надання (таблиця 5.15).

Таблиця 5.15 Опис 3-х рівнів моделі послуги

Рівні послуги	Сутність та складові		
I. Послуга за задумом	Попередня оцінка екологічного стану підприємства, розробка плану модернізації, втілення задуму		
II. Послуга у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Група показників
	1. Вартість обслуговування (середньоринкова)	М	Економічна
	2. Оптимізація витрат коштів та часу	М та Нм	Технологічна
	3. Цілісність пропозиції	Нм	Естетична
	4. Знижки для постійних клієнтів	М	Економічна
	Якість: стандартизація відповідно до законодавства України		
	Марка: послуги компанії «Еко-Плазмон»		
III. Послуга із підкріпленням	У разі необхідності наводиться інформація про сервісне обслуговування продукту, додаткові послуги. Розкриваються вимоги до контролю якості, до підготовки користувачів, до гарантійного та післягарантійного обслуговування		

Отже, пропонується екологічна модернізація бізнесів із середньою вартістю по ринку в залежності від масштабу робіт. Оптимізація витрат коштів та часу забезпечується шляхом налагоджених каналів з партнерами, а також

завдяки цьому забезпечується і цілісність пропозиції. Можливі знижки для постійних клієнтів чи, наприклад, при виконанні комплексних та масштабних проєктів.

Тепер визначимо оптимальну систему збуту послуг (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16 Формування систем збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збутооу, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Зацікавленість в зменшенні витрат на модернізацію	Консультація з поясненнями про важливість екологічності ведення бізнесу та можливість використання цього в маркетингових цілях	Канал нульового рівня	Інтернет ресурси

Таким чином робота з малими та середніми бізнесами буде забезпечуватися за допомогою інтернет ресурсів. Також, можлива співпраця з великими підприємствами, яким вкрай необхідна модернізація відповідно до нещодавно прийнятих постанов.

Далі перейдемо до таблиці 5.17, в якій представлений характер позиціонування компанії та концепція для популяризації.

Таблиця 5.17 Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції для позиціонуванн я	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
--	--	--	--	--------------------------------------

Зацікавленість в отриманні компетентних послуг, що забезпечать відповідність законодавчим нормам та спонукатиме популяризації цієї компанії	Інтернет ресурси та відгуки модернізованих компаній, спеціалізовані виставки	Спонукати розвитку та популяризації компанії, модернізуючи виробництво згідно з нормами законодавства	Інформування про важливість ведення бізнесу, екологічно орієнтованого на потреби людей, та соціальну відповідальність	Ведення бізнесу, гарантуючи високу якість продукту та «в тандемі з планетою»
---	--	---	---	--

В результаті отримуємо ринкову програму, яка включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проєкт.

Далі визначимо концепції позиціонування для послуг «Еко-Плазмон». Кожний параметр оцінимо за 3-х бальною шкалою (табл. 5.18). Концепції, які набрали в результаті оцінки найбільшу кількість балів будуть найефективнішими стратегіями позиціонування.

Таблиця 5.18 Оцінювання концепцій позиціонування «Еко-Плазмон»

Концепція позиціонування	Довіра	Однозначність	Унікальність	Запам'ятовуваність	Підкреслює властивості продукту	Відповідає потребам ЦА	Сума балів
Нова субкатегорія	2	3	3	3	2	2	15
Лідерство в вирішенні проблеми	3	3	0	3	1	2	12

Створення протилежного способу	0	0	3	3	3	0	9
Протиставлення конкуренту	2	2	2	3	3	2	15
Відмінні характеристики	1	1	3	2	3	2	12
Використання прихованого попиту	2	1	3	2	3	2	15

Виходячи з отриманих даних таблиці 5.18 вибрано три концепції для маркетингового позиціонування послуг «Еко-Плазмон». Перша – те, що сукупність послуг «Еко-Плазмон» по своїй суті є новою суб-категорією на цьому ринку, так як ніхто до цього не об’єднував всі види екологічних послуг. По-друге, за рахунок цілісності пропозиції можна робити ставку на протиставлення і перевагу над конкурентами. По-третє, використання прихованого попиту.

Тепер перейдемо до представлення бізнес-моделі (таблиця 5.19), яка дозволить надати цінність нашим клієнтам, залучити їх та забезпечити дохідні потоки через продаж систем моніторингу забруднення води, надання послуг аудиту якості води, оформлення екологічної документації.

Таблиця 5.19 Бізнес-модель страп-проекту

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Відносини клієнтами	Сегменти користувачів
Ключовим і партнерам і будуть виробники систем	Екологічний аудит і консалтинг, консультаційні послуги з питань	Клієнти отримують ряд послуг, пов’язаних з моніторингом	Прямі продажі та підтримка клієнтів, післяпродажний сервіс та	Бізнеси, пов’язані зі сферою харчування, господарств а тощо

контролю якості води	очищення води, розробка та погодження екологічної документації, лабораторні дослідження, розробка та установка систем моніторингу якості води	м якості води, в одному місці	технічна підтримка	
	Ключові ресурси Інженери та технічний персонал, виробничі потужності		Канали збуту Прямі продажі та рекомендації від існуючих клієнтів, маркетингов і кампанії, участь у тематичних виставках та конференціях, інтернет- ресурси для реклами та демонстрації продукту	
Структура витрат Аналіз, розробка та виробництво систем контролю якості води, маркетинг та реклама, технічна підтримка та обслуговування клієнтів			Джерела доходів Продаж систем контролю якості води, проектування індивідуальних рішень, аудит якості води, оформлення екологічної документації	

Отже, дана бізнес-модель дозволяє залучити партнерів, забезпечити ефективність виробництва, виправдати витрати та привернути цільову аудиторію до запропонованої інноваційної технології.

Висновки до розділу 5

Модернізація бізнесів, виробництв, підприємств які зацікавлені в послугах екологічної модернізації, що стосується контролю якості води – є важливою справою. Адже аудит забруднення води може покращити загальну якість питної води, загальний екологічний стан водних ресурсів, покращення здоров'я споживачів та, можливо, навіть знаходження нових рішень.

Ідеєю для стартапу стало створення проєкту «Еко-Плазмон», що забезпечить зручність надання послуг по модернізації компаній шляхом зосередження цих послуг, комплексного вирішення технічних завдань.

Було визначено основні напрямки застосування ідеї та зазначено можливі базові потенційні ринки. Цей проєкт допоможе приблизити реалії життя до більш чистих та соціально відповідальних. Проте проєкт потребує великих капіталовкладень на старті через його масштабність, що є слабкою стороною ідеї. Найбільш ефективною і вигідною реалізацією може стати технологія бізнес-об'єднання, адже це позбавляє від конкурентів.

Оскільки екологічна модернізація стає все більш популярною, це може означати, що ринок потребує нових гравців через швидке зростання попиту. Потенційними споживачами послуг «Еко-Плазмон» можуть стати прогресивні та соціально відповідальні підприємці.

Загрозою для ефективного ведення бізнесу є нестабільна політично-економічна ситуація в країні, проте також спостерігається зацікавленість іноземців в Україні як в привабливому майданчику для інвестицій.

Основною перевагою «Еко-Плазмон» є зосередженість послуг та їх якісне виконання. Пропонується екологічна модернізація бізнесів із середньою вартістю по ринку в залежності від масштабу робіт.

Робота буде забезпечуватися за допомогою інтернет ресурсів, а маркетингова програма зможе популяризувати важливість здорового споживання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Недоліком найбільш розповсюджених абсорбційних методів визначення нерозчинних домішок у воді, як нефелометрія та турбідиметрія, є висока вартість вимірювального обладнання (понад 20 тис.грн.) та необхідність підготовки проби води (дегазація) та великий її об'єм (понад 10 мл), вимірювального оснащення (кювети мають бути дуже чисті та оброблені попередньо спеціальними розчинниками) та робочої зони (відсутність пилу, вологи у повітрі, тощо).

2. За результатами чисельного моделювання характеристик відбиття для довжин хвиль збудження поверхневих плазмонів в діапазоні від 650 нм до 1550 нм було визначено оптимальну довжину хвилі (980 нм), оптимальну товщину плівки золота (47нм) та робочий кут падіння світла від лазера на межу метал-суспензія (58 градуси).

3. Розраховано чутливість для суспензії оксиду кремнію та оксиду заліза, відповідно: 7,45 мкВ/NTU (55 (мкВ·л/мг) або 0,11 мВ/ppm) та 27,75 мкВ/NTU (208 (мкВ·л/мг) або 0,42 мВ/ppm).

4. Експериментально підтверджено можливість застосування явища поверхневого плазмонного резонансу для визначення нерозчинних домішок у воді на приладі серії «Плазмон».

5. Було обрано схемні рішення, електронні компоненти, як активні, так і пасивні приладу системи. Проведено розрахунок номінальних значень пасивних компонентів. В ході розрахунків вихначено загальний струм споживання приладом, а саме, 72 мА і сумарну споживану потужність 0,36 Вт.

6. Встановлено основну відносну похибку вимірювання вихідної напруги приладу системи – 1,0%.

7. Розрахована межа визначення нерозчинних домішок у воді, а саме, наночастинок оксиду кремнію та оксиду заліза. Мінімальна концентрація оксиду заліза становила 0,23 мг/л, що в перерахунку на нефелометричні одиниці

каламутності становить приблизно 1,8 NTU. Мінімальна концентрація оксиду кремнію становила 0,68 мг/л, що в перерахунку на нефелометричні одиниці каламутності становить приблизно 5 NTU. Діапазон вимірювання концентрації наночастинок оксиду заліза у воді для лінійного діапазону вимірювання вихідної напруги становив 3,52 г/л, що задовольняє вимоги згаданих у роботі стандартів.

8. Розроблено стартап-проект «Еко-Плазмон».

Список використаних джерел

1. Критерії якості питної води. *Мар'їнська міська військова адміністрація*.
URL: <https://maryinska-gromada.gov.ua/news/1633439196/>
2. Прокопов В.О., Зоріна О.В. Результати гігієнічного моніторингу питної води поліпшеної якості в Україні. Гігієна населених місць: зб. наук. пр. К., 2019. Вип. 69. С. 72-78.
3. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною (із внесеними змінами): ДСанПіН 2.2.4-171-10 / МОЗ України. Київ, 2012. 55 с.
4. О.П. Вавріневич. Міністерство здоров'я України. Національний медичний університет імені О.О. Богомольця. Методичні рекомендації для студентів: Київ, 2017 р. 11 с.
5. Запорізький державний медичний університет. Гігієна та екологія. Навчально-методичний посібник змістовний модуль №2: Запоріжжя, 2020 р. 28-29 с.
6. H. Bai, R. Wang, B. Hargis, H. Lu, Y. Li. A SPR Aptasensor for Detection of Avian Influenza Virus H5N1 // *Sensors*. – 2012. – Vol.12. – PP. 12506-12518.
7. Formazine. *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Formazine>.
8. ISO 7027-1:2016. Water quality — Determination of turbidity — Part 1: Quantitative methods // <https://www.iso.org>.
9. ISO 11923:1997. Water quality -- Determination of suspended solids by filtration through glass-fibre filters // <https://www.iso.org>.
10. Drinking Water Contaminants – Standards and Regulations. Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals // <https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals>.

11. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum // WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, World Health Organization. – 2017. – 542 p. ISBN 978-92-4-154995-0.
12. Государственные санитарные нормы и правила "Гигиенические требования к воде питьевой, предназначенной для потребления человеком" (ГСанПиН 2.2.4-171-10). Зарегистрировано в Министерстве юстиции Украины 1 июля в 2010 г. за N 452/17747.
13. Aubin J. Current methods for characterising mixing and flow in microchannels / J. Aubin, M. Ferrando, V. Jiricny // Chemical Engineering Science. – 2010. – Vol. 65 (No 6). – P. 2065–2093.
14. Merkus H.G. Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality / H.G. Merkus. – Springer, 2009. – 533 p.
15. Кутя В. М. Аналіз методів і засобів контролю дисперсності емульсій / В. М. Кутя // Вісник інженерної академії України. - 2013. - № 3-4. - С. 242-247.
16. Nuno Miguel Matos Pires, Tao Dong, Ulrik Hanke, Nils Hoivik. Recent developments in Optical detection technologies in Lab-on-a-Chip devices for biosensing applications // Sensors 2014, 14, 15458-15479.
17. Дорожинський Г.В., Маслов В.П., Ушенін Ю.В. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу. // Київ: НТУУ «КПІ» видавництво «Політехніка», 2016. – 264с. ISBN 978-966-622-752-5.
18. Hustafsson P. Absorption investigation of UV-light spectroscopy // Phys.Rev. 1995, 6, 2365-2369.
19. National Environmental Methods Index. *Nemi*. URL:
https://www.nemi.gov/methods/method_summary/5217/
20. Нефелометрія. Рефрактометрія. Лекція 2,3. *Moodle*. URL:
https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/67362/mod_resource/content/1/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F_2.3.pdf.

21. «Методи та засоби діагностики. Сучасні оптоелектронні діагностичні прилади» [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 163 - «Біомедична інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. М.Ф. Богомолів, В.В. Шликов, В.Б. Максименко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл 13 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 98, 99 с.
22. Турбідиметрія. *Фармацевтична енциклопедія*. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/2296/turbidimetriya>.
23. Мельник В.П. Використання турбідиметрії в лабораторних аналізаторах. 101 с.
- Седиментація. *Фармацевтична енциклопедія*. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/493/sedimentaciya>.
25. Дорожинський Г.В., Маслов В.П., Ушенін Ю.В. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу. Монографія / Відповідальний редактор Порєв В.А. - Київ: НТУУ «КПІ», 2016.
26. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Modeling the SPR-sensor response to low concentrations of water nanosuspensions // Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS), Vol. 3 Issue 8, (2017), 2007-2011.
27. Granchak V.M., Sysjuk V.G., Dorozinska H.V., Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Kudryavtsev O.O., Kachur N.V. Studying the polymerization efficiency of photosensitive compositions by surface plasmon resonance method // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2020. – Vol.23, № 4. – P.393-399.
28. Kretschmann, E. Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächen plasmaschwingungen // Z. Phys. – 1971. – Vol. 241. – P. 313-324.

29. Shalabney, A. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors [Text] / A. Shalabney, I. Abdulhalim // *Laser Photonics Rev.* – 2011. – Vol. 5, No.4. – P. 571-606.
30. Дорожинський Г.В. Оцінка впливу основних конструкторсько-технологічних чинників на чутливість приладу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу // *Науковий Вісник Харківського політехнічного інституту.* – 2015. - № 52. – С.104-108.
31. *Azzam, R. M. A. Ellipsometry and Polarized Light* [Text] / R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. – Amsterdam: North-Holland, 1987. – 583 p.
32. ipz.com.ua, Ghosh G. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals, *Opt. Commun.* 163, 95-102 (1999).
33. G. Rosenblatt, B. Simkhovich, G. Bartal, M. Orenstein. Nonmodal plasmonics: Controlling the forced optical response of nanostructures, *Phys. Rev. X* 10, 011071 (2020).
34. *Kedenburg, S. Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear liquids in the visible and near-infrared spectral region* [Text] / S. Kedenburg, M. Vieweg, T. Gissibl, H. Giessen // *Opt. Mat. Express.* – 2012. – Vol. 2. – P. 1588-1611., L. Gao, F. Lemarchand, M. Liquime. Refractive index determination of SiO₂ layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs, *J. Europ. Opt. Soc.Rap.Public.* 8, 13010 (2013), M. R. Querry. Optical constants, Contractor Report CRDC-CR-85034 (1985).
35. Дорожинський Г.В. Аналіз основних похибок вимірювання показника заломлення аналіту приладом «Плазмон-6». *East European Scientific Journal*, Vol.4 (2015) 65-73.
36. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Promising method for determining the concentration of nano-sized diamond powders in water

- suspensions // *Functional Materials Journal (FMJ)*, Vol. 25, Issue 1, (2018), 158-164.
37. Wiener O/ *Abhanl. math-phys / Kl. Sachs. Wiss.* – 1912. Vol. 32. – P.509.
38. Garnett J.M. Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions / Garnett J.M. // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character.* – 1906. – P. 237 – 288.
39. Романенко А. Ю., Дорожинська Г. В. Чисельне моделювання концентрації нерозчинних домішок у воді за умови виникнення плазмонного резонансу / XIX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні». – Київ, Україна. – 20-21 грудня, 2023.
40. Романенко А. Ю., Дорожинська Г. В. Підвищення чутливості сенсора для визначення нерозчинних домішок у воді / XIX Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні». – Київ, Україна. – 20-21 грудня, 2023.
41. Bruggeman V.D. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, dielektrizitatskonstanten und leitfahigkeiten der mischkorper aus isotropen substanzen / V.D. Bruggeman // *Annalen der Physik.* – 1935. – Vol.416, No. 7. – P. 636 – 664.
42. «Визначення товщини нанорозмірних металевих плівок оптичних сенсорів». *Ela.kpi*. URL:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/51769/1/Hryhorchuk_magistr.pdf
43. Ваги лабораторні ТВЕ 0.21. *Лабімнекс*. URL:
<https://labimpex.com.ua/ua/p887005774-vesy-laboratornye-tve.html>
44. Магнітна мішалка РИВА 04.3 клас захисту IP 21. *Spectrolab*. URL:
<https://spectrolab.com.ua/ua/p786313264-magnitnaya-meshalka-riva.html>

ДОДАТОК А. ОПУБЛІКОВАНІ ТЕЗИ

СЕКЦІЯ №3. — ЕФЕКТИВНІСТЬ АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ.

УДК 681.5.004.4.92

К.А. Романенко, аспірант гр. ПБ-31ф, проф., д.т.н Безуглий М.О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ПОЛЯРИМЕТРА

Анотація. Розглянуто проблему мультиспектрального поляриметра та запропоновано її вирішення через суміщення пікселів зображення, за допомогою автоматизованої системи, що буде визначати центри міток та точно суміщати кадри зображення. Розглянуто структурну схему системи та запропоновано загальний алгоритм її роботи. Зроблено висновки та розглянуто наступні кроки роботи над системою.

Ключові слова: аерозолі, image поляриметр, мультиспектральний поляриметр, обробка зображень, автоматизована система.

XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20-21 грудня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

УДК 535.016

А.Ю. Романенко, студентка гр. ПІ-21мп, PhD, ст. вик. Дорожжінська Г.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ СЕНСОРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕРОЗЧИННИХ ДОМІШОК У ВОДІ

Анотація. У роботі наведені результати численного моделювання чутливості сенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу (ППР) для низьких концентрацій нерозчинних домішок водних наносупспензій діоксиду кремнію та оксиду заліза, які відрізняються оптичними властивостями. Показано перспективи досліджень визначення методом поверхневого плазмонного резонансу низьких концентрацій нерозчинних домішок у воді з високою чутливістю. Запропоноване вдосконалення сенсора для визначення нерозчинних домішок у воді дозволило підвищити чутливість з 7,3 мкВ/NTU до 73 мкВ/NTU для оксиду заліза та знизити межу детектування у 8,3 рази з 205 NTU до 24,7 NTU.

Ключові слова : поверхневий плазмонний резонанс, нерозчинні домішки, вода, чутливість, межа детектування.