

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіoeлектроніки
Факультет радіoeлектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРОВІ

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи РТз-220м

Спеціальності _____
172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Телемедицинні та біомедицинні системи»

Самойлик Катерина Валеріївна
(прізвище та ініціали)

Керівник Морщавка С.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Фарафонов О.Ю.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики і радіоелектроніки, ФРЕТ
Кафедра Радіотехніка та телекомунікації
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Телемедичні та біомедичні системи»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТТ
Морщавка С.В.
« » 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Самойлик Катерини Валеріївни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження діелектричних властивостей крові

керівник проєкту (роботи) Морщавка Сергій Володимирович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «01» листопада 2021 року № 411

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 14 грудня 2020 року

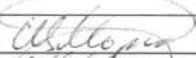
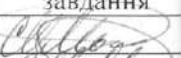
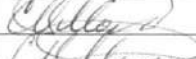
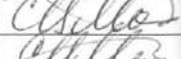
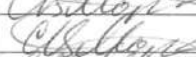
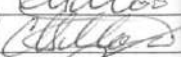
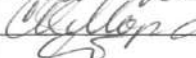
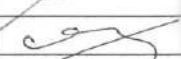
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Належить дослідити способи виміру комплексної діелектричної проникності жидких речовин, та можливість використання виміру значення діелектричної проникності крові для діагностики хвороб.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд літературних джерел та вивчення переваг і недоліків існуючих рішень. Дослідження діелектричної проникності, та способів її виміру. Визначення меж використання діелектрометрії в медицині їх переваг та недоліків. Побудова математичної моделі прохідного резонатора для визначення діелектричної проникності крові.

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

Презентація з висвітленням наступних питань: природа діелектричної проникності матеріалів, методи виміру діелектричної проникності та їх сфера застосування, діелектрометрія в медицині, математична модель системи для вимірювання діелектричної проникності крові, основні математичні формули та скріншоти отриманих результатів розрахунку у вигляді графічних залежностей.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

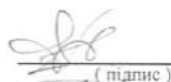
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Морщавка С.В., доцент, к.т.н.		
2	Морщавка С.В., доцент, к.т.н.		
3	Морщавка С.В., доцент, к.т.н.		
4	Морщавка С.В., доцент, к.т.н.		
5	Севастьянов Р.В., доцент, к.е.н.		
6	Якімцов Ю.В., доцент, к.т.н.		
нормо-контроль	Мороз Т.В.		

7. Дата видачі завдання « 01 » вересня 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Срок виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Актуальність роботи та постановка задач на її виконання	2-й тиждень	виконано
2	Дослідження діелектричної проникності	4-й тиждень	виконано
3	Дослідження методів виміру діелектричної проникності	5-й тиждень	виконано
4	Застосування діелектрометрії в медицині	6-й тиждень	виконано
5	Математичні розрахунки прохідного резонатору з міцним зв'язком	7-й тиждень	виконано
6	Математичне моделювання отриманих даних у середовищі Mathcad	8-й тиждень	виконано
7	Робота над економічною частиною	10-й тиждень	виконано
8	Розробка рекомендацій з охорони праці	12-й тиждень	виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентації	13-й тиждень	виконано
10	Проходження нормоконтролю, рецензування, антиплагіату, оформлення дублінського ядра	14-й тиждень	виконано

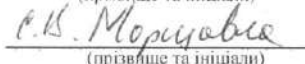
Студент(ка)


(підпис)


(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)


(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 114 сторінок, 29 рисунків, 15 таблиць, 17 джерел

Об'єктом дослідження – діелектрична проникливість крові.

Мета роботи полягає у аналізі існуючих методів виміру діелектричної проникливості матеріалів та створення на їх основі математичної моделі для визначення діелектричної проникності крові.

Наукова новизна – встановлені в дипломній роботі наукові положення є суттєвим доповненням знань, необхідних для розвитку високоякісної елементної бази пристроїв НВЧ та систем вимірювання, а саме запропоновано математичну модель хвилеводно-резонаторної структури з частковим заповненням, що дозволяє визначати діелектричну проникність крові.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що запропонована в роботі математична модель може застосовуватись для виробництва вимірювальних НВЧ пристроїв.

ДІЕЛЕКТРИЧНЕ ЗАПОВНЕННЯ, ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ,
ІНТЕГРАЛЬНЕ РІВНЯННЯ, КРОВ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ,
РЕЗОНАТОР, ФУНКЦІЯ ГРІНА.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1 ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ.....	10
1.1 Сутність діелектричної проникності.....	12
1.2 Механізми поляризації діелектриків.....	15
1.2.1 Орієнтаційна (дипольна) поляризація.....	17
1.2.2 Електронна та атомарна поляризація.....	18
1.2.3 Час релаксації	18
1.2.4 Іонна провідність.....	20
1.2.5 Рівняння Дебая	20
1.2.6 Діаграма Коул-Коула	21
1.2.7 Гранична чи об'ємна поляризація.....	22
2 МЕТОДИ ВИМІРУ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ.....	24
2.1 Коаксіальний пробник	24
2.2 Метод лінії передачі.....	29
2.3 Метод вільного простору	32
2.4 Метод паралельних пластин	35
2.5 Метод об'ємного резонатора	37
2.5.1 Резонатор с розділеним циліндром	37
2.5.2 Резонатор з розділеним стрижнем.....	38
2.5.3 Метод збудження резонатора.....	39
2.6 Порівняння методів.....	40
3 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЇ В МЕДИЦИНІ	42
3.1 Інвазивні методи.....	42
3.2 Неінвазивні методи	48
4 ПРОХІДНИЙ ПРЯМОКУТНИЙ РЕЗОНАТОР З ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ.....	53

4.1 Постановка задачі.....	53
4.2 Розрахунок електромагнітного поля в резонансній області з діелектричними пластинами.....	54
4.4 Виведення системи рівнянь для хвильоводної області.....	67
4.5 Чисельні результати.....	69
5 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	73
5.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу.....	73
5.3 Побудова мережевого графіку.....	82
5.4 Розрахунок витрат на практичну реалізацію.....	84
5.4.1 Визначення витрат на матеріали.....	84
5.4.2 Витрати на електричну енергію.....	85
5.4.3 Розрахунок амортизації універсального обладнання.....	86
5.4.4 Розрахунок заробітної плати робітників та супутні витрати.....	87
5.4.5 Загальні фінансові витрати.....	88
5.5 Розрахунок економічної ефективності НДР.....	89
5.6 Розрахунок фінансового результату.....	91
5.7 Висновки економічного розділу.....	92
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	94
6.1 Аналіз потенційних небезпек.....	94
6.2 Заходи щодо забезпечення техніки безпеки.....	95
6.3 Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці.....	97
6.4 Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки.....	103
6.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	106
ВИСНОВКИ.....	111
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	113

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ENA	–	серія аналізаторів ланцюгів компанії Keysight
FDTD	–	метод кінцевих різниць у часовій області
IPC	–	Inter Process Communications (міжпроцесна взаємодія) – комп’ютерна технологія, обміну даними між потоками одного або різних процесів
GPIB	–	General Purpose Interface Bus, інтерфейсна шина загального призначення
LAN	–	Local Area Network, локальна обчислювальна мережа
NIST	–	National Institute of Standards and Technology, Національний інститут стандартів і технології – національний орган зі стандартизації у США.
NRL arch	–	мікрохвильова вимірювальна система, яка може вимірювати коефіцієнт відбиття радіолокатора вільного простору
PNA	–	серія аналізаторів ланцюгів компанії Keysight
USB	–	Universal Serial Bus, універсальна послідовна шина
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач (англ. Analog-to-digital converter, ADC)
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
КЗ	–	короткозамикаючий ланцюг
КДП	–	комплексна діелектрична проникність
КДР	–	квазіоптичний діелектричний резонатор
ККВ	–	комплексний коефіцієнт відбиття
НВЧ	–	надвисокочастотне випромінювання
ПЗ	–	програмне забезпечення
ПК	–	персональний комп’ютер

ВСТУП

Незважаючи на постійне вдосконалення діагностичних методів, проблема ранньої та, по можливості, неінвазивної діагностики низки захворювань залишається актуальною. Це стосується ранньої діагностики та моніторингу вже існуючої патології, що негативно впливає на здоров'я людей, а значне її поширення має вагомий негативний економічний вплив.

Серед найбільш розповсюджених захворювань лідирує серцево-судинна патологія, онкологічні захворювання, хвороби обміну речовин. Своєчасна діагностика серцево-судинних порушень може сприяти зменшенню несприятливих наслідків як то інфаркт та інсульт. Проте, індивідуальний прогноз у хворих на ішемічну хворобу серця може відрізнятися у значних межах залежно від клінічних, функціональних, анатомічних та соціальних факторів. Ступінь атеросклеротичного ураження коронарних артерій при стабільній стенокардії має важливе прогностичне та терапевтичне значення. У сучасному поданні еволюції бляшки, тромбоцити, лейкоцити, ендотелій відіграють велику роль у її зростанні та стабільності покритишки атерому. Інформацію про рівень активності тромбоцитів, їх морфологію, про біофізичні властивості крові, сироватки та інших компонентів, які також впливають на кров'яні пластинки, дозволить швидко і без труднощів отримати діелектрична спектроскопія. Цукровий діабет виступає як самостійний та незалежний фактор ризику фатальних та нефатальних ускладнень, передусім впливаючи на серцево-судинну систему [1]. В дитячому віці формування серцево-судинних ускладнень при інсулінозалежному цукровому діабеті відбувається одночасно з розвитком захворювання [2]. Тому рання діагностика ускладнень цукрового діабету на етапі до клінічних змін дуже важлива. Визначення латентних змін у системі крові у людей, хворих на цукровий діабет, дозволить значно поліпшити ранню

діагностику та оптимізувати шляхи корекції встановлених порушень.

У ситуації невизначеності щодо завершення та впливу COVID-19, вимоги й запити до систем охорони здоров'я, які постійно виникають, породжують багато проблем, головною з яких є потреба в нормуванні ресурсів для надання допомоги пацієнтам. У цьому світлі актуальними стають діагностичні технології та моніторингові системи, що не потребують або потребують незначного втручання з боку медичного персоналу. Останнім часом привертають увагу активні дослідницькі зусилля в науковому співтоваристві, направлені на розробку неінвазивних електронних пристроїв для вимірювання рівня глюкози, що використовують технології реєстрації оптичних сигналів за допомогою, фотоакустичних датчиків [3]. Однак для здешевлення та більшої доступності застосування ідеальним кандидатом виступає використання датчиків глюкози на основі застосування частот мікрохвильового випромінювання. З цією метою в основному використовуються мікрохвильові високочастотні резонатори у конструкції неінвазивного датчика для виявлення глюкози [4-7]. Проникність крові змінюється по відношенню до концентрації глюкози. Однак цю невелику відмінність у проникності крові щодо концентрації глюкози виявити всередині тканини дуже важко. Оскільки високочастотні резонатори мають гостру резонансну частоту, будь-яка зміна в навколишній діелектричній проникності діелектричного матеріалу (напр. крові) відобразиться на зсуві резонансної частоти резонатору. Є дослідження щодо використання спіральних резонаторів різної форми [4-6], розрізних кільцевих резонаторів [7] і мікросмужкових патч-антен на основі резонаторів [8], [9], що можуть бути використані як неінвазивні датчики глюкози.

Досліджуючи технології, що використовують метод НВЧ діелектрометрії, в рамках означеної проблеми пропонується створення математичної моделі резонатора для визначення діелектричної проникності крові.

1 ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

Фахівці у багатьох галузях промисловості прагнуть краще розуміти властивості матеріалів, з якими їм доводиться працювати, оскільки це дозволяє скоротити цикли проектування, покращити вхідний контроль, моніторинг технологічних процесів та контроль якості. Кожен матеріал має унікальний набір електричних параметрів, які залежать від його діелектричних властивостей. Точний вимір цих параметрів може дати вченим та інженерам цінну інформацію, що дозволяє найбільш оптимальним чином використовувати ці матеріали в пристроях, що розробляються, або контролювати процеси виготовлення, забезпечуючи вищу якість.

Вимірювання характеристик діелектричних матеріалів може дати дуже важливу інформацію для багатьох електронних додатків. Наприклад, втрати в ізоляції кабелю, опір підкладки або частота діелектричного резонатора безпосередньо пов'язані з діелектричними властивостями. Також ця інформація корисна для покращення властивостей феритів, поглиначів випромінювання та конструкцій корпусів.

У новітніх додатках в аерокосмічній, автомобільній, харчовій та медичній промисловості також можна використовувати переваги знання діелектричних властивостей, що наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Приклади додатків для вимірювання параметрів матеріалів [10]

Галузь	Програми / вироби
1	2
Електроніка	Конденсатори, підкладки, друковані плати, друковані антени, ферити, магнітні головки, що записують, поглиначі випромінювання, маскуючі матеріали, датчики

Продовження таблиці 1.1

1	2
Аерокосмічна/оборонна промисловість	Радіопоглинаючі покриття, матеріали, поглинаючі випромінювання, антенні обтічники
Промислові матеріали	1) Кераміка та композитні матеріали: корпуси ІС, аерокосмічні та автомобільні компоненти, цемент, покриття, біоімпланти; 2) Полімери та пластики: оптичне волокно, підкладки, плівки, ізоляційні матеріали; 3) Гідрогель: одноразові пелюшки, що вбирають, м'які контактні лінзи; 4) Рідкі кристали: дисплеї Гума, напівпровідники та надпровідники 5) Інші вироби, що містять такі матеріали: шини, фарби, клеї тощо.
Харчова промисловість та сільське господарство	Дослідження зберігання (псування) продуктів харчування, розробка продуктів харчування для мікрохвильових ланцюгів, упаковка, вимірювання вологості.
Лісівництво та гірничо-сировинна справа	Вимірювання вологості дерева або паперу, аналіз вмісту олії
Фармацевтика та медицина	Дослідження та виробництво лікарських препаратів, біоімпланти, вимірювання параметрів людських тканин, біомаса, концентрація хімічних речовин, ферментація.

1.1 Сутність діелектричної проникності

Матеріал класифікується як "діелектрик", якщо він здатний запасати енергію під час застосування зовнішнього електричного поля. Якщо до конденсатора, що складається з двох паралельних пластин, підключити джерело постійного напруги, то конденсатор запасає більше енергії, якщо між його пластинами помістити діелектричний матеріал (порівняно з вакуумом). Діелектричний матеріал підвищує ємність конденсатора, компенсуючи заряди електродів, які в загальному випадку давали б внесок у зовнішнє поле. Ємність з діелектричним матеріалом залежить від його діелектричної проникності.

Якщо до конденсатора, що складається з двох паралельних пластин, підключити джерело постійної напруги V (рис. 1), то конденсатор запасає більше енергії, якщо між його пластинами помістити діелектричний матеріал (порівняно із вакуумом).

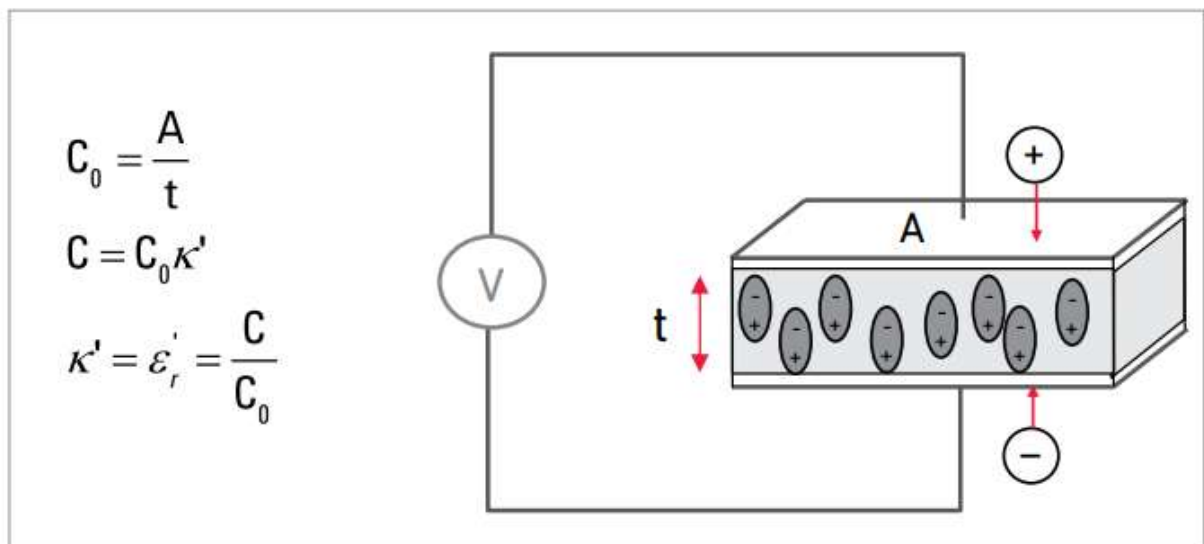


Рисунок 1.1 – Конденсатор із паралельних пластин, постійна напруга, де C та C_0 - це ємність з діелектриком і без нього, $k' = \epsilon'_r$ – дійсна діелектрична

постійна або діелектрична проникність, A та t – це площа пластин конденсатора та відстань між ними.

Діелектричний матеріал підвищує ємність конденсатора, нейтралізуючи заряди електродів, які у випадку давали б внесок у зовнішнє поле. Ємність діелектричного матеріалу пов'язана з діелектричною проникністю через наведені вище рівняння. Якщо до того ж конденсатору підключити джерело змінної напруги V (рис. 2), то результуючий струм складатиметься із струму перезаряду I_c і струму втрат I_l , який пов'язаний із діелектричною проникністю. Втрати в матеріалі можна подати у вигляді провідності – G , включеної паралельно конденсатору – C .

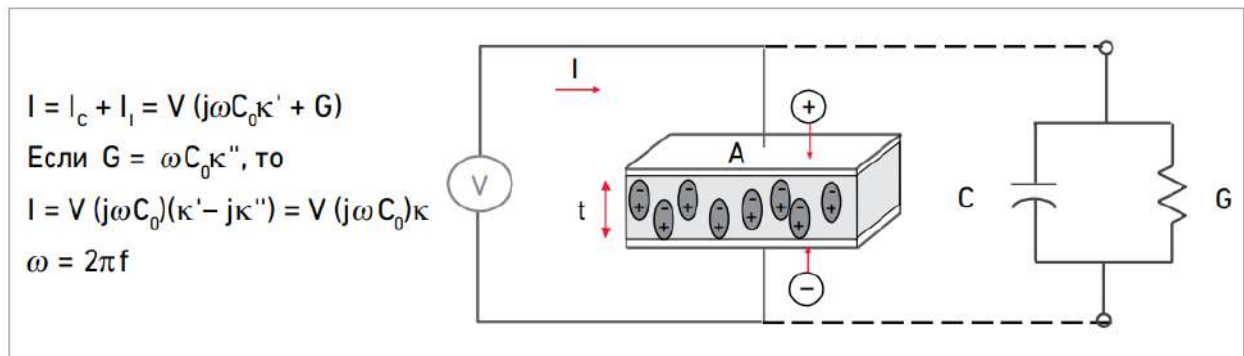


Рисунок 1.2 – Конденсатор із паралельних пластин, змінна напруга

Комплексна діелектрична проникність k складається із дійсної частини k' , яка представляє запас енергії, та уявної частини k'' , яка представляє втрати. Для обчислення комплексної діелектричної проникності використовується такий вираз:

$$k = k^* = \epsilon_r = \epsilon_r^*.$$

З погляду електромагнітної теорії, електрична індукція (щільність просторового заряду) D_f визначається наступним чином:

$$D_f = \varepsilon E,$$

де $\varepsilon = \varepsilon^* = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ – абсолютна діелектрична проникність,

ε_r – відносна діелектрична проникність,

ε_0 – діелектрична проникність вакуума,

E – напруга електричного поля.

Діелектрична проникність визначає взаємодію матеріалу з електричним полем E і є комплексною величиною:

$$k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \dot{\varepsilon}_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''.$$

Діелектрична постійна (k) еквівалентна відношенню діелектричної проникності (ε_r) або відношенню абсолютної діелектричної проникності (ε) до діелектричної проникності вакууму (ε_0). Дійсна частина діелектричної проникності (ε_r') показує, скільки енергії зовнішнього електричного поля збережено у матеріалі. Уявна частина діелектричної проникності (ε_r'') називається коефіцієнтом втрат і показує рівень розсіювання чи втрат зовнішнього електричного поля у матеріалі. Уявна частина діелектричної проникності (ε_r'') завжди більше нуля і зазвичай набагато менше, ніж ε_r' . На коефіцієнт втрат впливають діелектричні втрати та провідність.

Якщо комплексну діелектричну проникність уявити у вигляді простої векторної діаграми (рис.1.3), то дійсна та уявна компоненти будуть зсунуті по фазі не 90° . Сумарний вектор повернутий на кут δ щодо дійсної осі (ε_r'). Відносні втрати матеріалу визначаються ставленням втраченої енергії до запасеної [10].

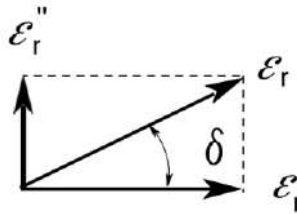


Рисунок 1.3 – Тангенс кута втрат

Тангенс кута втрат або $\tan(\delta)$ визначається як відношення уявної частини діелектричної проникності до дійсної. D означає коефіцієнт втрат, а Q називається добротністю. Тангенс кута втрат або $\tan(\delta)$ називають тангенсом дельта, тангенсом кута втрат чи коефіцієнтом втрат. Іноді до матеріалів, що використовуються у НВЧ електронних приладах, застосовують термін «добротність», який є оберненою величиною від тангенса кута втрат. Для матеріалів з дуже малими втратами (оскільки $\tan(\delta) \approx \delta$), тангенс кута втрат можна замінити самими кутом, вираженим у мілірадіанах або мікрорадіанах.

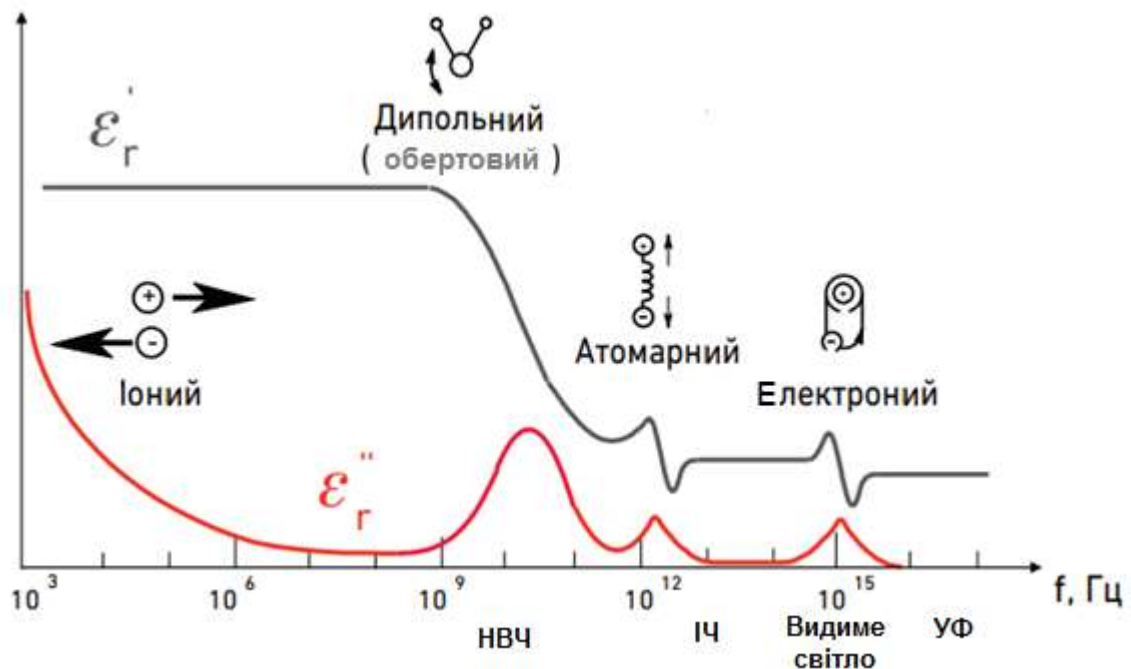
1.2 Механізми поляризації діелектриків

Діелектричний матеріал може мати кілька механізмів або ефектів поляризації, що дають внесок у загальну діелектричну проникність (рис.1.4). Діелектричний матеріал містить розташовані певним чином носії електричних зарядів, які можуть зміщуватись електричним полем. Заряди орієнтуються, прагнучи компенсувати електричне поле таким чином, щоб позитивні та негативні заряди рухалися у протилежних напрямках.

На мікроскопічному рівні кілька діелектричних механізмів можуть робити внесок у поведінку діелектрика. Орієнтація диполів та іонна провідність сильно взаємодіють на надвисоких частотах. Наприклад, молекули води є стабільними диполями, які повертаються за змінним електричне поле. Ці механізми породжують помітні втрати саме тому їжа нагрівається в мікрохвильових печах.

Атомарні та електронні механізми поляризації відносно слабше і зазвичай не залежать від частоти в НВЧ діапазоні. Кожен механізм поляризації характеризується "частотою зрізу". Зі зростанням частоти вплив повільних механізмів спадає, а швидкі механізми починають давати все більший внесок у ϵ' . Коефіцієнт втрат (ϵ'') матиме відповідний пік на кожній характерній частоті. Амплітуда та «частота зрізу» кожного механізму унікальні для різних матеріалів. Вода має сильний дипольний ефект на низьких частотах, але її діелектрична проникність різко спадає приблизно на 22ГГц. З іншого боку, політетрафторетилен (фторопласт-4) не має дипольного механізму, та його діелектрична проникність залишається практично постійною до міліметрового діапазону.

Резонансні ефекти пов'язані зазвичай з електронною чи атомарною поляризацією. Ефект релаксації зазвичай пов'язаний із орієнтаційною поляризацією.



Рисунку 1.4 – Механізми поляризації у діелектриках залежно від частоти [10]

1.2.1 Орієнтаційна (дипольна) поляризація

Молекула складається з кількох атомів із узагальненими електронами. Такий перерозподіл електронів може породжувати розбаланс розподілу заряду, створює постійний дипольний момент. За відсутності електричного поля моменти диполів орієнтовані випадковим чином, і поляризація не спостерігається. Електричне поле E створює крутний момент T на електричному диполі, і диполь починає повертатися, щоб зорієнтуватися вздовж електричного поля, що породжує орієнтаційну поляризацію (рис.1.5). Якщо поле змінює напрямок, то змінюється і крутний момент.

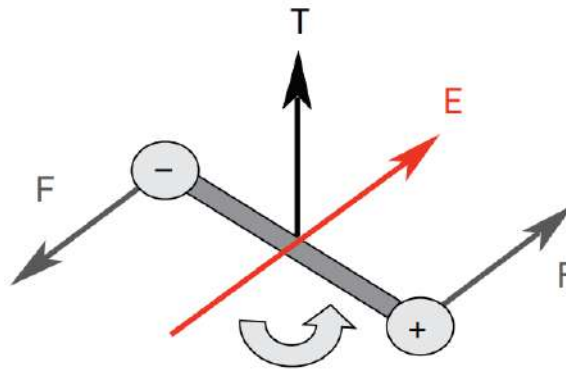


Рисунок 1.5 – Поворот диполя в електричному полі

Тертя, що супроводжує поворот диполя, дає внесок у діелектричні втрати. Поворот диполя породжує коливання ϵ_r' та ϵ_r'' з частотою релаксації, яка зазвичай лежить у НВЧ діапазоні. Як мовилося раніше, прикладом речовини, демонструє сильну орієнтаційну поляризацію, є вода.

1.2.2 Електронна та атомарна поляризація

Електронна поляризація з'являється в нейтральних атомах, коли електричне поле зміщує ядро по відношенню до навколишніх електронів. Атомарна поляризація з'являється, коли сусідні позитивні та негативні іони "розтягуються" під дією прикладеного електричного поля. Для багатьох сухих твердих речовин ці механізми поляризації є домінуючими в НВЧ діапазоні, хоча явний резонанс з'являється на значно вищих частотах. В області інфрачервоного та видимого світла слід враховувати інерцію орбітального руху електронів. Можна змодельовати атоми у вигляді осциляторів із загасанням, подібно до механічної пружини та системи мас. Амплітуда коливань буде малою для всіх частот, відмінних від частоти резонансу. Значно нижче резонансної частоти електронний та атомарний механізми дають лише малий та постійний внесок у ϵ_r' , і практично не створюють втрат [10]. Резонансна частота ідентифікується резонансною характеристикою r' і піком максимального поглинання ϵ_r'' . Вище резонансу внесок цих механізмів зникає.

1.2.3 Час релаксації

Час релаксації – це міра рухливості молекул (диполів) матеріалу. Це час, який необхідний системі, що перебуває під впливом електричного поля для повернення на величину $1/e$ від її випадкового рівноважного значення (або час, необхідне диполям для орієнтації в електричному полі. Молекули рідин і твердих речовин згруповані відносно щільно і мають малу свободу руху при застосуванні електричного поля. Постійні зіткнення викликають внутрішнє тертя, тому молекули повертаються повільно та експоненціально підходять до кінцевого положення при поляризації з постійною часу релаксації t . Коли поле

відключається, все відбувається у зворотному порядку, і випадкове розподілення відновлюється з тієї ж постійної часу. Частота релаксації f_c є зворотною величиною від часу релаксації:

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c}$$

На частотах нижче за частоту релаксації змінне електричне поле стає досить повільним, щоби диполі встигали за змінами поля. Оскільки поляризація може реалізуватися повністю, втрати (ϵ_r'') прямо пропорційні частоті (рис.1.6). Зі зростанням частоти ϵ_r'' продовжує наростати, а запас енергії (ϵ_r') починає знижуватися через зсув фази між орієнтацією диполя та електричним полем. Вище частоти релаксації та, та ϵ_r' зменшуються, оскільки електричне поле змінюється дуже швидко, щоб впливати на поворот диполя, і орієнтаційна поляризація зникає.

Рівняння Дебая : $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}$

для $\omega = 0$, $\epsilon(0) = \epsilon_s$

для $\omega = \infty$, $\epsilon(\infty) = \epsilon_\infty$

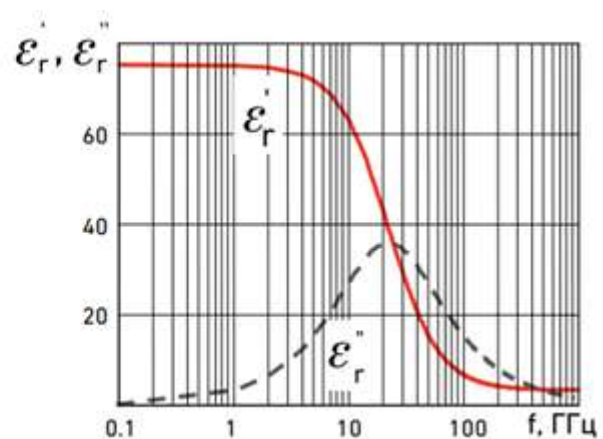


Рисунок 1.6 – Дебайвська релаксація води за температури 30°C [10]

1.2.4 Іонна провідність

Виміряні втрати у матеріалі можна висловити як залежності діелектричних втрат (ε_r'') і провідності (σ):

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_{rd}'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

На низьких частотах повна провідність може складатися з різних механізмів провідності, але в більшості матеріалів переважає іонна провідність. Домінуючий вплив на ε_r'' надає провідність електроліту, обумовлена існуючими у розчині (зазвичай водному) вільними іонами.

Іонна провідність легко вносить втрати у матеріал. На низьких частотах вплив іонної провідності обернено пропорційно частоті і проявляється у вигляді спаду кривою ε_r'' зі швидкістю $1/f$.

1.2.5 Рівняння Дебая

Матеріали, що мають лише одну постійну часу релаксації, можна змодельовати рівнянням Дебая, яке виглядає як залежність діелектричної проникності від частоти (рис.1.6). ε_r' не змінюється вище і нижче частоти релаксації та має перепад поблизу цієї частоти (22 ГГц). Крім того, значення ε_r'' мало вище та нижче частоти релаксації і досягає максимуму в області переходу на частоті релаксації. При розрахунку наведених вище кривих використовувалося статичне значення діелектричної проникності (пост. струм) дорівнює $\varepsilon_s = 76,47$, оптичне значення (нескінченна частота) діелектричної проникності $\varepsilon_\infty = 4,9$ та час релаксації $t = 7,2$ пс [10].

1.2.6 Діаграма Коул-Коула

Комплексну діелектричну проникність також можна показати на діаграмі Коул-Коула, відклавши по вертикальній осі уявну частину (ϵ_r''), а горизонтальною осі дійсну частину (ϵ_r'), і використавши частоту як незалежний параметр (рис.1.7). Діаграма Коул-Коула певною мірою подібна до діаграми Сміта. Матеріал, що має одну частоту релаксації відповідно до рівняння Дебая, буде представлений півколом з центром на горизонтальній осі $\epsilon_r''=0$ і піком коефіцієнта втрат на частоті $1/\tau$. Матеріал із декількома частотами релаксації буде представлятися півколом (симетричний розподіл), або дугою (несиметричний розподіл) із центром нижче горизонтальної осі $\epsilon_r''=0$.

Крива на рис. 1.7 являє собою півколо з центром на осі X і радіусом $(\epsilon_s - \epsilon_\infty)/2$.

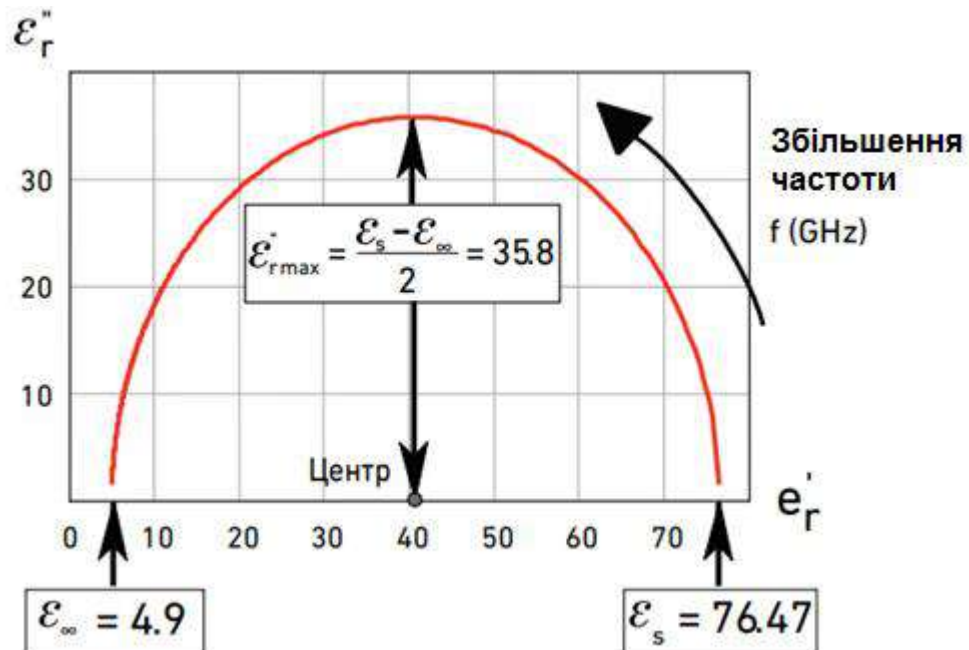


Рисунок 1.7 – Діаграма Коул-Коула для рис. 1.6 [10].

Максимальне значення уявної частини діелектричної проникності ε_r' буде дрівнювати радіусу. Збільшення частоти відповідає руху по кривій проти годинникової стрілки.

1.2.7 Гранична чи об'ємна поляризація

Електронна, атомарна та орієнтаційна поляризація з'являються, коли заряди локально прив'язані до атомів, молекул або структур рідких або твердих речовин. Крім того, існують носії заряду, здатні мігрувати через матеріал у присутності низькочастотного електричного поля. Гранична або об'ємна поляризація заряду утворюється, коли рух цих мігруючих зарядів утруднений. Заряд може бути захопленим на межі розділу фаз матеріалу. Крім того, рух може бути утруднений, коли заряди не можуть вільно розряджатися або замінюватися на електродах. Спотворення поля, викликане накопиченням цих зарядів, підвищує загальну ємність матеріалу, що проявляється як зростання ε_r' .

Суміші матеріалів з електропровідними областями, які не контактують один з одним (розділені непровідними областями), демонструють на низьких частотах ефект Максвелла-Вагнера. Якщо заряджені шари тонкі і значно менші за розмір частинок, то заряди реагують незалежно від зарядів сусідніх частинок. На низьких частотах заряди мають достатньо часу, щоб зібратися біля кордонів провідних областей, що викликає зростання ε_r' . На високих частотах у зарядів немає часу на накопичення, і поляризація не настає, оскільки зміщення заряду мало в порівнянні з розмірами провідної області. Зі зростанням частоти ε_r' зменшується, і втрати демонструють той самий спад зі швидкістю $1/f$, як і у разі нормальної іонної провідності [10].

В області низьких частот можуть виявлятися і інші механізми поляризації, викликаючи великий розкид діелектричної проникності. Наприклад, колоїдні

суспензії виникають, якщо товщина зарядженого шару має той же порядок чи перевищує розміри частинок. Ефект Максвелла-Вагнера стає не застосовується, оскільки на характеристику тепер впливає розподіл заряду сусідніх частинок.

2 МЕТОДИ ВИМІРУ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ

2.1 Коаксіальний пробник

Особливості методу:

- широка смуга;
- простота та зручність (неруйнівний аналіз);
- обмежені точність вимірювання ϵ_r та дозвіл тангенсу кута втрат;
- придатність для вимірювання характеристик рідких та порошкоподібних речовин.

Можливі характеристики матеріалу:

- «напівнескінченна» товщина;
- немагнітний матеріал;
- ізотропність та однорідність;
- плоска поверхня;
- відсутність повітряних зазорів.

Ненавантажений коаксіальний пробник є лінією передачі зі зрізом на одному кінці. Параметри матеріалу вимірюються шляхом занурення пробника в рідину або шляхом дотику до плоскої поверхні твердого або порошкоподібного матеріалу. Поля, створювані на кінці пробника, проникають у матеріал та змінюються внаслідок контакту з досліджуваним матеріалом (рис.2.1).

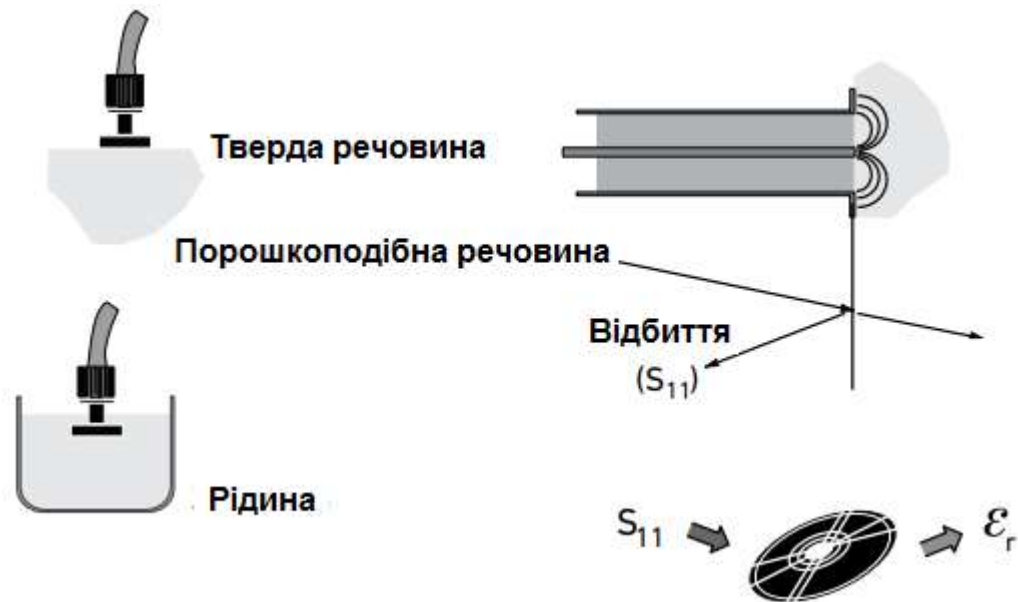


Рисунок 2.1 – Метод коаксіального пробника [10]

Відбитий сигнал (S_{11}) можна виміряти та співвіднести з величиною ϵ_r^* . Типова вимірювальна система, що використовує метод коаксіального пробника, складається з аналізатора ланцюгів або аналізатора імпедансу, програмного забезпечення для розрахунку діелектричної проникності та коаксіального пробника, тримача пробника та кабелю. ПЗ можна встановити на зовнішній ПК, підключений залежно від аналізатора через GPIB, LAN або USB. При використанні аналізаторів ланцюгів серії ENA або PNA ПЗ можна встановити прямо на аналізатор і обійтися без зовнішнього комп'ютера.

На рисунку 2.2 показано три пробники: високотемпературний пробник (а), тонкий пробник (б) та високоякісний пробник (в).

Високотемпературний пробник (а) показаний з розташованим праворуч шунтуючим блоком. Три тонкі пробники показані в нижній частині малюнка (б), зверху розташований шунт та інше приладдя. Високоякісний пробник також представлений з шунтуючим блоком.



Рисунок 2.2 – Типи діелектричних пробників [10]

Маючи міцну конструкцію, високотемпературний пробник (а) оснащений герметичним металоскляним ущільненням, що робить його стійким до корозії та абразивних матеріалів. Пробник витримує широкий діапазон температур: від -40°C до $+200^{\circ}\text{C}$, що дозволяє вимірювати залежність від частоти та температури.

Широкий фланець дозволяє досліджувати не тільки рідкі та порошкоподібні речовини, але й тверді матеріали із пласкою поверхнею. Тонкий пробник (б) легко встановлюється в бродильні ємності, камери для хімічних реакцій та інші установки з малими отворами. Крім того, тонка конструкція дозволяє використовувати його із зразками невеликого розміру. Цей пробник найкраще підходить для вимірювання характеристик рідких та дрібнодисперсних порошкоподібних речовин. Пробник не настільки дорогий, тому при дослідженні литих зразків його можна заливати матеріалом і залишати у виливку. Оскільки ці пробники є витратним матеріалом, вони поставляються наборами. У комплект поставки тонких пробників зазвичай входить тонкий герметичний тримач, який забезпечує перехід із зовнішнього діаметра на внутрішній діаметр, а також стандартні адаптери та втулки середнього розміру. Високоякісний пробник (в) має міцну тонку конструкцію, витримує високі

температури і може працювати на високих частотах, що робить його ідеальним рішенням для найвибагливіших додатків. Пробник герметизований як з боку наконечника, і з боку роз'єму, що робить його стійким до зовнішніх впливів проти іншими пробниками. Він працює в широкому діапазоні температур від -40°C до $+200^{\circ}\text{C}$, що дозволяє вимірювати залежність від частоти та температури. Пробник допускає автоклавування, що дозволяє використовувати його в харчовій, медичній та хімічній промисловостях, де необхідною умовою є стерилізація. Тонка конструкція дозволяє легко встановлювати його в бродильні ємності, камери для хімічних реакцій та інші установки з малими отворами. Він придатний для вимірювання властивостей рідких, порошкоподібних та твердих матеріалів із плоскою поверхнею.

Перед виміром потрібно виконати калібрування на наконечнику пробника. Триетапне калібрування компенсує похибки спрямованості, стеження та узгодження джерела, які можуть бути присутніми у вимірах відбитого сигналу. Щоб усунути ці три складові похибки, виконується вимірювання трьох відомих калібрувальних заходів. Для компенсації систематичної (повторюваної) похибки вимірювання використовується різниця між передбаченими і реальними значеннями. Трьома відомими калібрувальними заходами є повітря, короткозамкнутий ланцюг (КЗ) та дистильована деіонізована вода. Але навіть після калібрування пробника додаткові джерела похибок можуть впливати на точність виміру.

Існують три основні джерела похибки:

- Нестабільність характеристик кабелю
- Повітряні зазори
- Товщина зразка

Перед виміром важливо дати кабелю, що з'єднує пробник з аналізатором ланцюгів, достатньо часу на стабілізацію та простежити за тим, щоб він не

змінював свого положення (не згинався і не переміщався) після калібрування до завершення вимірювання. Автоматична функція оновлення електронного калібрування в лічені секунди виконує перекалібрування системи перед кожним виміром.

Це практично усуває нестабільність характеристик кабелю та похибки дрейфу.

Для твердих матеріалів, якщо не обробити поверхню матеріалу так, щоб вона була настільки ж гладкою, як і поверхня пробника, важливим джерелом похибки може бути повітряний проміжок між пробником і зразком. Для рідких зразків аналогічний вплив можуть надавати бульбашки повітря на наконечнику пробник.

Крім того, зразок має бути досить товстим, щоб пробник сприймав його як «нескінченний». Є просте рівняння для розрахунку приблизної товщини зразка для високотемпературного пробника та передбачуваної товщини зразка для тонкого пробника. Простий спосіб перевірки полягає в тому, щоб поставити за зразком шунт та подивитися, чи впливає він на результати вимірювання.

На рисунку 2.3 порівнюються вимірювання діелектричної проникності та коефіцієнта втрат метанолу при кімнатній температурі (+25 °C), отримані з використанням високотемпературного пробника з теоретичними розрахунками, виконаними за допомогою моделі Коул-Коула. У розрахунках Коул-Коула використовувалися такі параметри:

$$\varepsilon_s=33,7 \quad \varepsilon_\infty=4,45 \quad \tau=4,95 \cdot 10^{-11} \quad \alpha=0,036$$

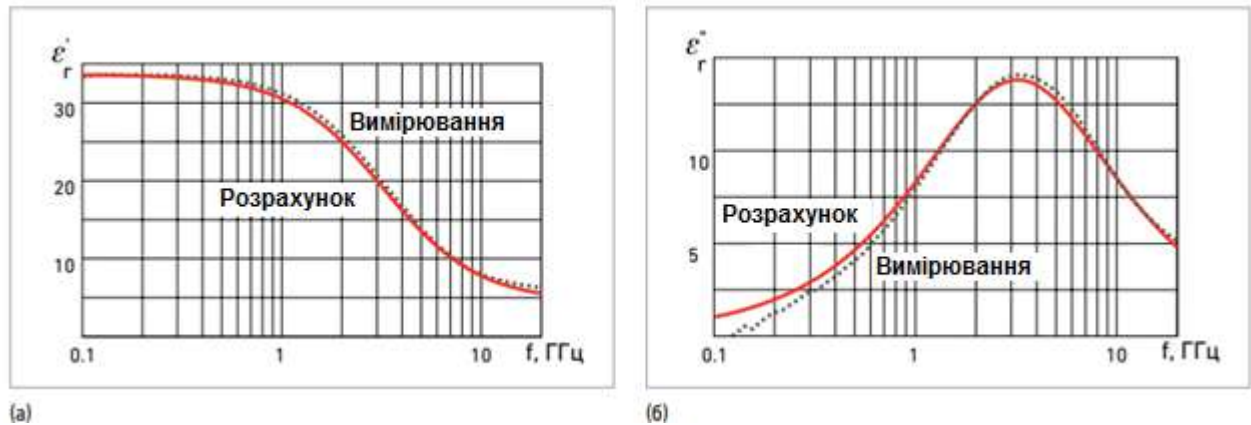


Рисунок 2.3 – Порівняння вимірюваних діелектричної проникності (а) та коефіцієнта втрат (б) метанолу при +25 °С із моделлю Коул-Коула [10]

Недоліком методу коаксіального пробника є обмежена точність в деяких умовах, порівняно з методами лінії передачі, вільного простору або об'ємного резонатора.

2.2 Метод лінії передачі

Методи лінії передачі передбачають розміщення матеріалу усередині відрізка закритої лінії передачі. Як лінію передачі зазвичай використовується секція прямокутного хвильоводу чи коаксіальна повітряна лінія (рис.2.4). ϵ_r^* і μ_r^* обчислюються за результатами вимірювань відбитого сигналу (S_{11}) та переданого сигналу (S_{21}).

Можливі властивості досліджуваного матеріалу:

- зразок заповнює поперечний переріз тестового оснащення;
- відсутність зазорів між матеріалом та стінками тестового оснащення;
- гладкі, плоскі поверхні, перпендикулярні до поздовжньої осі;
- однорідність.

Особливості методу:

- широка смуга – з нижнього боку обмежена довжиною зразка;

- обмежена роздільна здатність для малих втрат (залежить від довжини зразка);
- можливість вимірювання магнітних матеріалів;
- можливість вимірювання анізотропних матеріалів у хвилеводі.

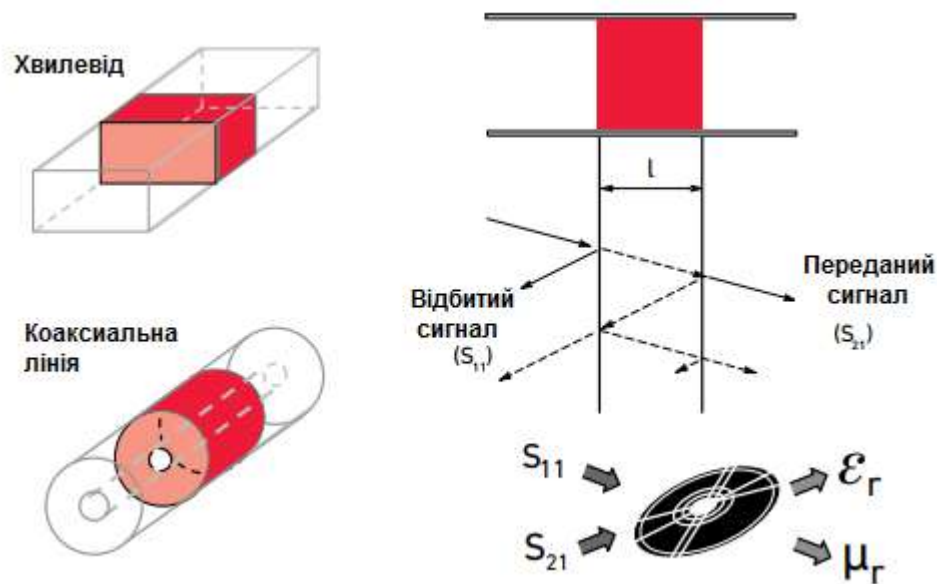
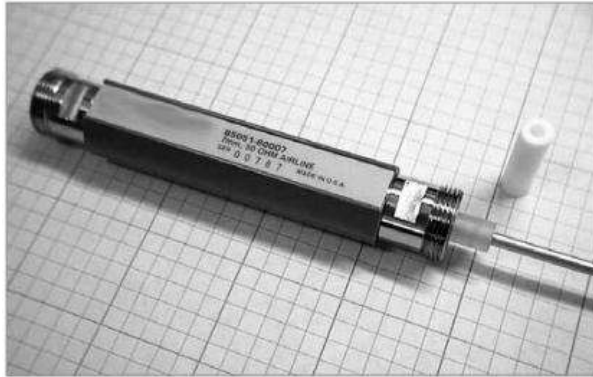


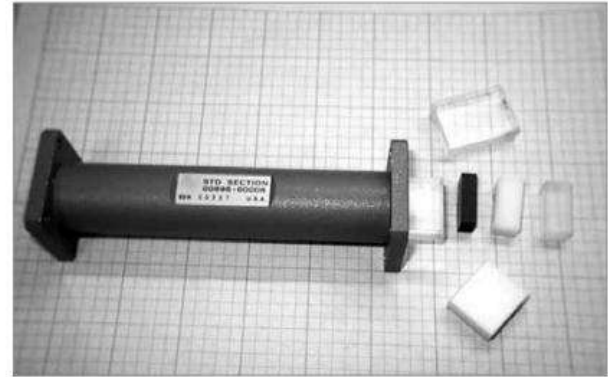
Рисунок 2.4 – Метод лінії передачі; хвилевід і коаксиальна лінія [10]

Коаксіальні лінії передачі охоплюють широкий діапазон частот, але їм потрібні тороїдальні зразки, які складні у виготовленні (рис.2.5а). Діапазон частот хвилеводного тестового оснащення тягнеться до міліметрових хвиль, зразки виготовляти простіше, але їх частотний діапазон носить смуговий характер (рис.2.5б). Типова вимірювальна система, що використовує метод лінії передачі, складається з векторного аналізатора ланцюгів, коаксиальної або хвилеводної лінії передачі та програмного забезпечення для розрахунку діелектричної або магнітної проникності. Це ПЗ можна встановити на зовнішній ПК, підключений через GPIB, LAN або USB залежно від аналізатора. При

використанні аналізаторів ланцюгів серії ENA або PNA можна встановити прямо на аналізатор і обійтися без зовнішнього комп'ютера.



(a)



(б)

Рисунок 2.5 – Повітряна коаксіальна лінія діаметром 7 мм із зразками (а) та пряма секція хвилеводу Х-діапазону із зразками (б) [10].

На рисунку 2.6 показано результати вимірювання діелектричної проникності (а) та тангенсу кута втрат (б) для двох зразків з плексигласу довжиною 25 мм та 31 мм у хвилеводі Х-діапазону.

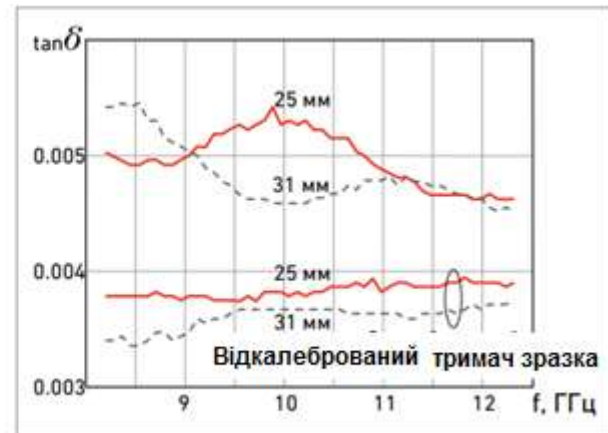
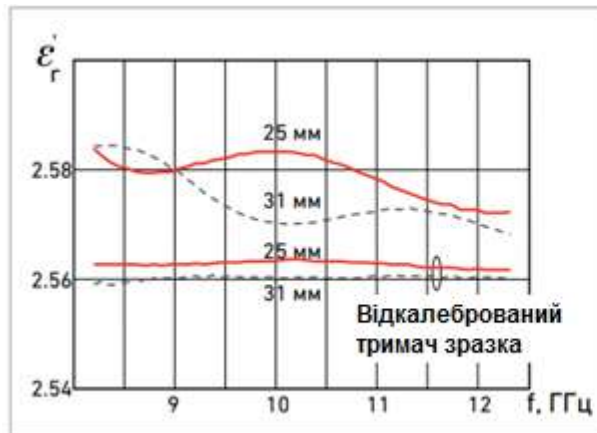


Рисунок 2.6 – Вимірювання двох зразків з плексигласу довжиною 25 мм та 31 мм у хвилеводі Х-діапазону [10].

2.3 Метод вільного простору

Припущення про властивості матеріалу:

- великі плоскі зразки з паралельними гранями;
- однорідність.

Особливості методу:

- безконтактний, неруйнівний;
- високочастотний – нижня частота обмежується максимально можливими розмірами зразка, рупорної антени та приміщення;
- придатний при високих температурах;
- для анізотропних матеріалів можна змінювати поляризацію антени;
- можливість вимірювання властивостей магнітних матеріалів.

Метод вільного простору використовує спрямовані антени для фокусування енергії на бруську або аркуші матеріалу або пропускання енергії через нього (рис. 2.7). Цей метод є безконтактним і може застосовуватись до матеріалів, які необхідно досліджувати при високих температурах та в агресивних середовищах. На рисунку 2.7 показані дві типові схеми вимірювання: конфігурація зміни S-параметрів передачі у вільному просторі (вгорі) і конфігурація для вимірювання відображення методом NRL arch (внизу). Типова система складається з векторного аналізатора ланцюгів, відповідної тестової оснастки для вільного простору та програмного забезпечення для розрахунку діелектричної або магнітної проникності. Його можна встановити на зовнішній ПК, підключений через GPIB, LAN або USB залежно від використовуваного аналізатора. При використанні аналізаторів ланцюгів серії ENA або PNA можна встановити прямо на аналізатор та обійтись без зовнішнього комп'ютера.

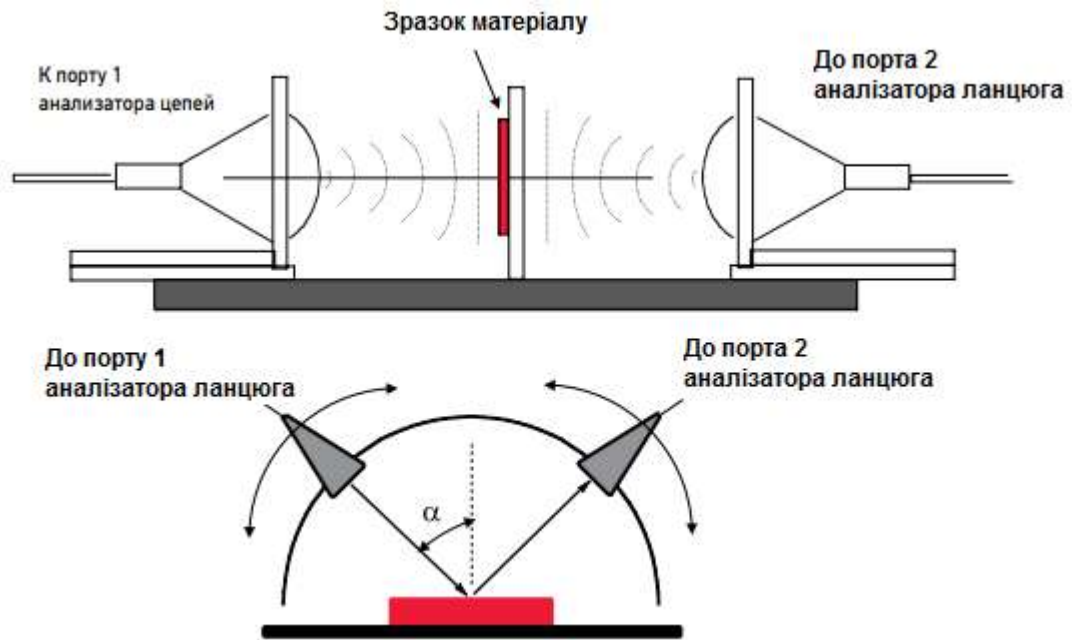


Рисунок 2.7 – Схема вимірювання у вільному просторі [10].

У вільному просторі легко виконуються високотемпературні вимірювання, оскільки зразок ні до чого не торкається (рис.2.8). Зразок можна нагріти, помістивши його в піч із «вікном» з ізолюючого матеріалу, прозорого для НВЧ випромінювання. Базова схема такого виміру показано на рисунку 2.8.

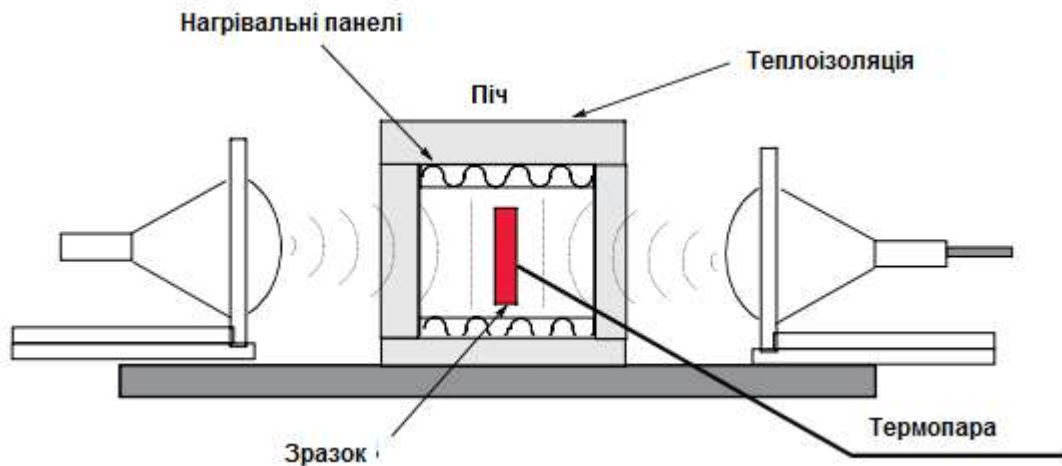


Рисунок 2.8 – Високотемпературне вимірювання у вільному просторі [10]

Калібрування аналізатора ланцюгів для вимірювання у вільному просторі досить складне, оскільки калібрувальні заходи, що використовуються для цього методу, не мають роз'єми. Залежно від необхідної зручності та точності, калібрування може виконуватися не складніше, ніж калібрування АЧХ, або досягати складності повного двопортового калібрування.

На рисунку 2.9 показані результати вимірювання зразка з рексоліту в U-діапазоні (40 – 60 ГГц) з калібруванням GRL, отримані за допомогою аналізатора ланцюгів PNA.

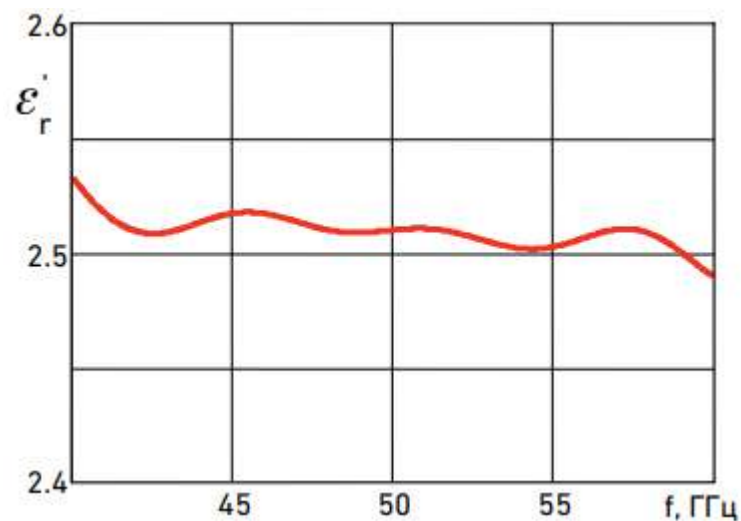


Рисунок 2.9 – Вимірювання зразка з рексоліту в U-діапазоні (40 – 60 ГГц)

Тестове оснащення була виконана з рупорних антен зі стандартним посиленням і виявилася під рукою підходящої полиці, щоб показати, що при використанні калібрування навіть у простій схемі можна виконати достовірні виміри. Для виконання точних вимірювань рекомендується використовувати більш жорсткі тестові оснащення та сфокусовані рупорні антени.

На рисунку 2.10 показано квазіоптичний стіл Thomas Keating Ltd. з діапазоном частот 330-500 ГГц, рупорні антени з гауссівською діаграмою спрямованості, фокусуючі дзеркала та тримач зразка [10].



Рисунок 2.10 – Квазіоптичний стіл Thomas Keating Ltd

2.4 Метод паралельних пластин

Метод паралельних пластин (рис.2.11), відомий також як метод трьох контактів, полягає в розміщенні тонкого листа матеріалу або рідини між двома електродами, щоб вийшов конденсатор. Потім виміряна ємність використовується для розрахунку діелектричної проникності. У реальній схемі використовуються два електроди з тестовим оснащенням для установки діелектричного матеріалу. Прилад для вимірювання імпедансу вимірює векторні компоненти ємності (C) та розсіювання (D), а ПК розраховує діелектричну проникність і тангенс кута втрат. Цей метод добре підходить для точних низькочастотних вимірювань характеристик тонких листових матеріалів та рідин.

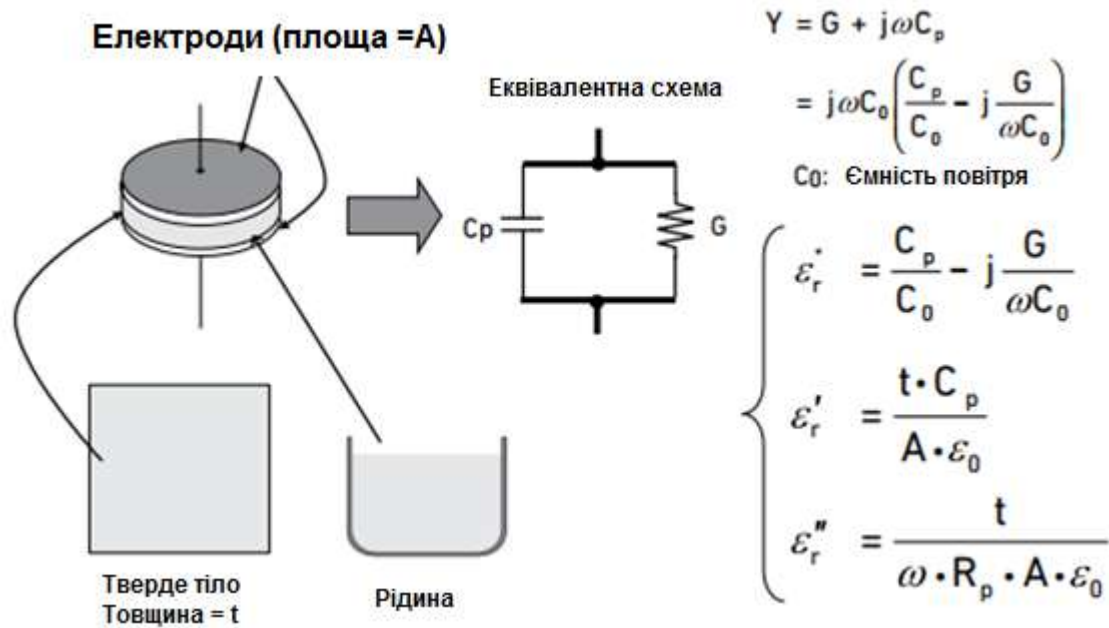


Рисунок 2.11 – Метод паралельних пластин

Типова система для вимірювання за методом паралельних пластин складається з аналізатора імпедансу або вимірювача імпедансу і тестової оснастки (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Приклади оснащення (тестове оснащення) для вимірювання характеристик діелектриків з аналізатором імпедансу

2.5 Метод об'ємного резонатора

Об'ємні резонатори мають високу добротність і резонують на певних частотах. Зміщений у порожнину резонатора зразок впливає на частоту резонансу (f) та добротність (Q) резонатора. За цими параметрами можна розрахувати комплексну діелектричну проникність матеріалу однією частоті. Типова вимірювальна система складається з аналізатора ланцюгів, тестового оснащення з об'ємним резонатором та програмного забезпечення для розрахунків. Існує багато різних методів вимірювання та типів тестового оснащення. Для управління аналізатором ланцюгів можна використовувати зовнішній ПК, підключений через GPIB, LAN або USB залежно від аналізатора. При використанні аналізаторів ланцюгів серії ENA або PNA можна встановити прямо на аналізатор та обійтися без зовнішнього комп'ютера.

2.5.1 Резонатор с розділеним циліндром

Резонатор з розділеним циліндром є циліндричний об'ємний резонатор, розділений на дві половини (рис.2.13). Зразок міститься у зазор між двома половинами циліндра. Одна половина циліндра зафіксована, а інша регулюється, дозволяючи змінювати зазор відповідно до товщини зразка.



Рисунок 2.13 – Резонатор з розділеним циліндром на частоту 10 ГГц [10]

Дійсна частина діелектричної проникності ϵ' та тангенс кута втрат або тангенс дельта ($tg\delta$) розраховуються за товщиною зразка, довжиною циліндра та вимірним S-параметрам резонатора з розділеним циліндром – порожнього та з зразком. За допомогою моделі узгодження мод, розробленої в NIST у Боулдер Сіті, штат Колорадо, можна розрахувати тангенс кута втрат на моді 10 ГГц TE_{011} . Можна також виконати вимірювання на модах TE_{0np} вищого порядку, де відсутні моди, що заважають. Цей метод використовується ІРС як метод випробувань у стандарті TM-650 2.5.5.1315.

2.5.2 Резонатор з розділеним стрижнем

Діелектричний резонатор із розділеним стрижнем використовує діелектричні матеріали з малими втратами, які дозволяють створювати резонатори з більш високою добротністю та кращою температурною стабільністю в порівнянні з традиційними суцільнометалевими резонаторами. Цей метод є одним із найпростіших і точніших методів вимірювання комплексної діелектричної проникності та тангенсу кута втрат для тонких листових матеріалів із малими втратами. Діелектричний резонатор із розділеним стрижнем на 5 ГГц компанії QWED представлений на рисунку 2.14.

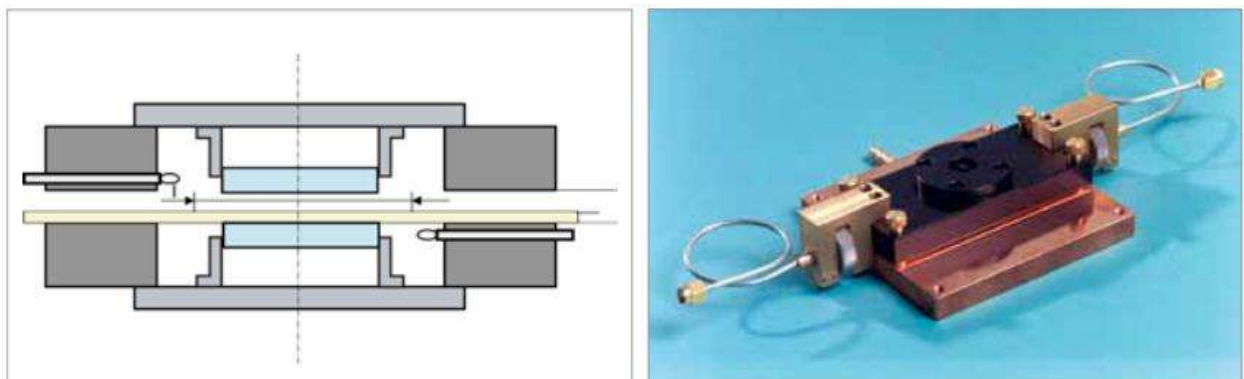


Рисунок 2.14 – Діелектричний резонатор із розділеним стрижнем

2.5.3 Метод збудження резонатора

Метод обурення резонатора використовує прямокутний хвилевід із пов'язаними через діафрагму фланцями, який працює на моді TE_{10n} (рис.2.15). Для вимірювання властивостей діелектрика зразок міститься в максимум електричного поля. Потрібно просвердлити отвір точно в середині по довжині хвилеводу і виготовити два пов'язані через діафрагму фланці. Розміри отвору діафрагми $b/2,2$ де b – вузька сторона поперечного перерізу хвилеводу. Якщо зразок вставляється через отвір, розташований на середині довжини хвилеводу, то непарне число напівхвиль створить максимум електричного поля в місці розташування зразка, що дозволить виміряти його діелектричні властивості. Парна кількість напівхвиль створить у точці розташування зразка максимум магнітного поля, що дозволить виміряти магнітні властивості зразка.

Для методу обурення резонатора потрібний дуже маленький зразок, щоб поле в резонаторі спотворювалося дуже слабо та зміщувало частоту резонансу та добротність. Таке припущення дозволяє спростити теорію і використовувати для розрахунку діелектричних властивостей наведені вище рівняння.

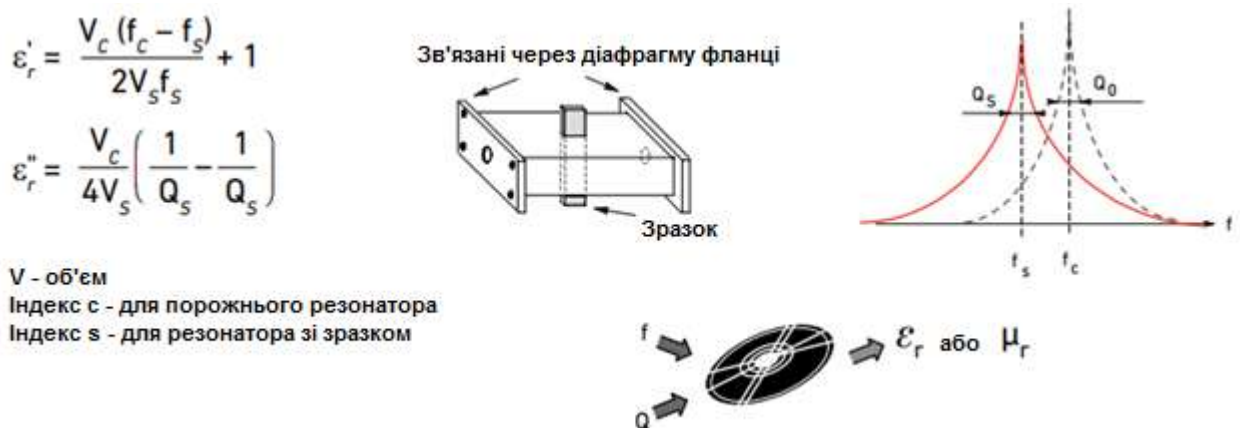


Рисунок 2.15 – Вимірювання в об'ємному резонаторі [10]

2.6 Порівняння методів

Вибір найбільш відповідного методу вимірювання визначається багатьма факторами, такими як точність, зручність, форма та вид матеріалу (Табл. 2.1). Нижче наведено список найважливіших факторів:

- діапазон частот;
- очікувані значення ε_r та μ_r ;
- необхідна точність виміру;
- властивості матеріалу (наприклад, однорідність, ізотропність);
- вид матеріалу (наприклад, рідина, порошок, тверде тіло, лист);
- обмеження на розмір зразка;
- руйнівний або неруйнівний метод;
- контактний чи безконтактний метод;
- температура;
- вартість.

Таблиця 2.1 – Рекомендації щодо використання методів

Метод	Параметр	Використання
Коаксіальний пробник	ε_r	Широкопasmовий, зручний, неруйнуючий. Добре підходить для матеріалів з великими втратами, для рідин та порошкових речовин
Лінія передавання	ε_r та μ_r	Широкопasmовий. Руйнуючий. Добре підходить для матеріалів з великими втратами та речовин які можливо обробляти.
Вільне середовище	ε_r та μ_r	Широкопasmовий. Безконтактний. Добре підходить для листових матеріалів,

		порошків , високих температур.
Об'ємний резонатор	ε_r	Одна частота. Точність. Добре підходить для речовин з малими втратами та невеликих зразків.
Паралельні пластини	ε_r	Точність. Добре підходить для низьких частот. Тонких листових матеріалів.

Таким чином можна дати наступні рекомендації по вибору оптимального методу для визначення діелектричної проникності речовини.

Резонансні методи слід використовувати у випадку:

- високоімпедансне середовище;
- можливість виконання достовірних вимірів на малих зразках;
- вимірювання лише на одній або на кількох частотах;
- придатні для матеріалів із малими втратами.

Широкополосні методи слід використовувати у випадку:

- середа з малим імпедансом;
- для виконання достовірних вимірювань потрібні зразки більшого розміру;
- вимірювання на "будь-якій" частоті.

3 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЇ В МЕДИЦИНІ

У сучасній медицині досі залишається нагальною і багато в чому невирішеною задачею прижиттєва тонка діагностика початкових змін функціонального стану тканин. Керуючись принципом мінімального втручання, діагностику функціонального стану біологічних тканин і рідких середовищ доцільно здійснювати на основі спектроскопічних методів, оскільки особливості взаємодії електромагнітних випромінювань з біооб'єктами містять важливу інформацію про структуру речовини, не руйнуючи її. Рівень же структури, яка вивчається, визначається діапазоном випромінювання.

Методи діелектрометрії знаходять своє застосування при дослідженні морфологічних змін еритроцитів, вивченні діелектричних характеристик клітин крові в нормі та при патологіях, виявленні їх температурних залежностей у нормі та при онкології, а також при вивченні впливу на кров низки лікарських засобів тощо.

3.1 Інвазивні методи

Дослідження діелектричних характеристик у міліметровому діапазоні довжин хвиль – області дисперсії вільної води – дозволяють отримувати унікальну інформацію про стан водного компонента біосистем. У тому числі показано, що найближче гідратне оточення є реплікою структури макромолекули, а водне оточення повторює зміни її конформації (Конев Ф. А. зі співавт., 2017). Важливе значення колоїдного стану цитоплазми, рідких біологічних середовищ для їхньої функціональної активності обумовлює інтерес до мікрохвильового діапазону електромагнітних випромінювань, що дозволяє досліджувати гідратну структуру нативних колоїдів та біомакромолекул.

Один з основних методів мікрохвильової спектроскопії ($\nu=3\text{-}300$ ГГц) - КВЧ-діелектрометрія - активно використовується у фізиці та фізичній хімії при вивченні міжмолекулярних взаємодій та надмолекулярної структури речовини, механізмів поглинання електромагнітного випромінювання речовиною (Аксенов С.І., 1990; Турковський І.І., 1997, Жилякова Т.А., 2015). В останні 30-40 років мікрохвильова діелектрометрія знайшла застосування при вивченні взаємодії білків та білково-ліпідних комплексів з їх гідратним оточенням (Щеголева Т.Ю., 1988, Антоненко Є.О. та ін., 2015, Шубний О.І., 2017).

Метод КВЧ діелектрометрії може бути використаний для визначення функціонального стану еритроцитів, а саме для вивчення діелектричних характеристик еритроцитів у сфері дисперсії вільної води. Даний метод заснований на вимірювання комплексного коефіцієнта відображення (ККВ) від короткозамкнутої багаточислової структури (хвильоводного сенсора), що містить досліджуваний зразок, в одночастотному режимі на певній частоті. Архипова Е.А. зі співавторами (2011) в експерименті вимірювали ККВ від покращеного за своїми точними характеристикам хвильоводного сенсора в одночастотному режимі з частотою 39,5 ГГц. Завдання знаходження комплексної діелектричної проникності (КДП) для даного типу сенсора реалізується шляхом вирішення прямої та зворотної задач електродинаміки з використанням чисельних методів. Для вирішення прямого завдання авторами використовувався метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD), з застосуванням якого в результаті електродинамічного моделювання є вид функцій ККВ залежно від КДП. Зворотне завдання реалізувалося рішенням отриманої системи нелінійних рівнянь. Взагалі, модифікація хвильоводного сенсора дозволяє робити його більш чутливим, а зразки, необхідні для проведення дослідження зменшити в об'ємі до дуже малих кількостей (5-10 мкл

на вимірювання), що позитивно впливає на комплаєнс з пацієнтом а також полегшує роботу дослідникам [11].

Проведення дослідження чутливості діелектричної спектроскопії до морфології еритроцитів шляхом вимірювання та аналізу їх комплексної проникності в діапазоні частот від 0,1 до 110 МГц показало, що характерна частота та параметр розширення діелектричної релаксації міжфазної поляризації є високоспецифічними до форми еритроцитів, водночас нечутливими до об'ємної фракції клітини. Тому ці два діелектричні параметри можна використовувати для диференціації еритроцитів різної форми, якщо для проточно-цитометричного дослідження окремих клітин крові застосовувати діелектричну спектроскопію. Крім того, авторами було виявлене обмеження аналітичної теорії міжфазної поляризації для пояснення експериментальної проникності несферичних еритроцитів [12].

Для вивчення комплексної діелектричної проникності крові, лімфи та інших фізіологічних рідин, які характеризуються високим значенням діелектричної проникності і мають великі втрати в мікрохвильовому, включаючи міліметровий, діапазоні довжин хвиль, знайшли застосування різні методи, засновані на використанні хвилеводних ліній передачі в широкому діапазоні частот. Проте більшу чутливість мають резонаторні методи, які відрізняються видом резонансної системи та типом збуджуваних в них коливань. Більш висока чутливість їх забезпечується "багатопрхідним характером" взаємодії мікрохвильового поля з досліджуваною речовиною в процесі резонансних вимірювань [13]. Важливою стає також і можливість проводити вимірювання зразків достатньо малих об'ємів. При вимірюванні ϵ (діелектричної проникності) і $tg\delta$ (тангенсу кута діелектричних втрат) речовин з великими втратами застосування таких структур викликає певні труднощі, що насамперед пов'язано зі зниженням добротності резонаторів.

На цей час більш широке застосування знайшли відкриті резонаторні системи, що мають достатню чутливість, зручні в експлуатації. Добротність їх може досягати достатньо високих значень, що дозволяє з великою точністю виміряти малі значення втрат. З цієї точки зору все більш зручними стають методи вимірювання, засновані на квазіоптичному розповсюдженні хвиль. Серед даного типу систем резонаторів особливо виділяються квазіоптичні діелектричні резонатори (КДР) з хвилями шепочучої галереї, що дозволяють працювати у достатньо широкому діапазоні довжин хвиль [14]. Відомо, що для дослідження матеріалів з діелектричною проникністю $\epsilon' = 1-100$ та тангенсом діелектричних втрат $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon' \leq 10^{-1}$ у діапазоні частот 20-300 ГГц доцільно використовувати в діелектрометрах вимірювальний діелектричний резонатор з азимутальними коливаннями [14]. Вибір матеріалу для виготовлення вимірювального діелектричного резонатора залежить від величин ϵ' та ϵ'' матеріалу, що досліджується. Якщо досліджуються речовини з малими втратами $\text{tg}\delta \leq 10^{-3}$ та діелектричними проникностями $\epsilon' \geq 10$, то й матеріал для виготовлення вимірювального резонатора доцільно вибирати з подібними характеристиками (наприклад, діелектричний дисковий резонатор з лейкосапфіру забезпечує похибку при вимірюванні $\epsilon' = 0,05\%$, а $\text{tg}\delta = 1\%$). Високі точності у такого резонатора обумовлені його високою власною добротністю Q_0 в міліметровому діапазоні хвиль ($Q_0 \sim 10^5$ при кімнатній температурі та $Q_0 \sim 10^8 - 10^9$ при температурі рідкого гелію).

З цією метою можна використовувати квазіоптичний діелектрометр [15], який містить вимірювальний діелектричний резонатор, поєднаний з надвисокочастотним генератором для збудження хвиль типу "шепочучої галереї" та приймачем. У резонаторі, затиснутому двома металевими пластинками з металевими отворами, створена канавка з концентричними боковими поверхнями так, щоб досліджувана речовина, що заповнює цю

канавку, взаємодіяла з полем хвилі "шепочучої галереї", які збуджуються діелектричними хвилеводами. Канавка заповнена вимірювальною речовиною фіксується знизу дном канавки, а зверху - одною з металевих пластин. Спектр резонансних частот кільцевого діелектричного резонатора вимірюється за схемою "на проходження" при слабкому зв'язку. Експериментальне вимірюються частоти та добротності коливач, що спостерігаються, визначається їх тип, а потім виміряні частоти та добротності порівнюються з теоретичними. Недоліком цього пристрою є неможливість його використання для дослідження рідин малих об'ємів, до яких можуть відноситись біологічні об'єкти та різні бінарні з'єднання та які мають великі значення діелектричних втрат. При роботі з даним типом резонатора досліджуваній речовині надається форма диска (кільця). В цьому випадку, при роботі з рідкими діелектриками важко забезпечити однорідність досліджуваної речовини, що вимірюється, по товщині, яка порушується унаслідок поверхневого натягнення або утворення пухирців на поверхні в області поля. Ці труднощі особливо виразні у разі рідин, які мають високі діелектричні втрати (наприклад, вода, ацетон та інші). Наявність навіть дуже маленького пухирця повітря в канавці з рідиною може привести до великих погрешностей, що унеможливорює її досліджування у динамічному режимі [15].

Як видно з рисунку 3.1, діелектричний резонатор має радіальний отвір радіусом $r_0 \leq \lambda_p/2$ (де λ_p - довжина хвилі у рідині) для розміщення в ньому ємності 3 з досліджуваною речовиною, який затиснуто між двома металевими пластинами. Для збудження хвиль "шепочучої галереї" у діелектричному резонаторі використовуються дзеркальні хвилеводи, які з одного боку з'єднані з генератором, а з другого - з приймачем. Висоту h резонатора вибрано такою, щоб збуджувалися лише коливання з аксіальним числом 1, це виконується за умови λ_n , де λ_n - довжина хвилі, на якій працює діелектрометр, а радіус

вимірювального резонатора $R = \lambda_n / 2\pi$, де n - число довжин хвиль по периметру резонатора. Ємність може бути виконана з можливістю дослідження речовини, як фіксованого об'єму, так і для проточної речовини через отвори у резонаторі та металевій пластині, розташовані на відстані $r_1 = R/2$ (де R - радіус резонатора) від бокової поверхні резонатора і з'єднані з радіальним отвором.

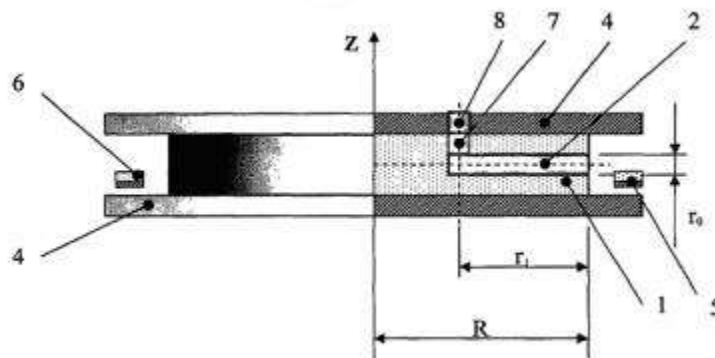


Рисунок 3.1 – Квантооптичний діелектрометр має діелектричний резонатор, де:

1 - квантооптичний діелектрометр має діелектричний резонатор, 2 - радіальний отвір, 3 - ємність з досліджуваною речовиною, 4 - металеві пластини, 5 та 6 - дзеркальні хвилеводи (з одного боку з'єднані з генератором (хвилевод 5), а з другого - з приймачем (хвилевод 6)), 7 - отвори у резонаторі, 8 - металевій пластині 8.

Запропонований пристрій працює таким чином: у діелектричному резонаторі з дзеркальними діелектричними хвилеводами збуджуються хвилі “шепучої галереї”. Спектр резонансних частот резонатора вимірюється за схемою „на проходження” при слабкому зв’язку. Експериментальне вимірюються частоти та добротності коливань, що спостерігаються, визначається їх тип, а потім виміряні частоти та добротності порівнюються з відповідними величинами для резонатора - зразками, виміряними на цьому ж

діелектрометрії, або порівнюються з теоретично розрахованими, що дає можливість, в подальшому, отримувати діелектричні характеристики досліджуваних речовин.

3.2 Неінвазивні методи

Надвисокочастотна (НВЧ) діелектрична спектроскопія успішно застосовується у вивченні механізмів взаємодії мембранних рецепторів нативних еритроцитів з нестероїдними гормонами та низкою лікарських препаратів (Мала Л.Г. зі співавт., 1988; Антоненко Є.О. зі співавт., 2015).

Хворим на цукровий діабет рекомендується контролювати рівень глюкози в крові безперервно. Однак більшість комерційних існуючих датчиків глюкози використовують крихітну голку для вилучення зразка крові для вимірювання глюкози, що викликає дискомфорт у пацієнтів [16].

Метод безконтактного визначення рівня глюкоз в крові включає генерацію сигналу (НВЧ), подачу його через спрямований відгалужувач на мікросмуговий резонатор, вимірювання коефіцієнта відбиття сигналу від мікросмугового резонатора, над яким розташовують досліджуваний об'єкт. Надалі відбувається обчислення комплексної діелектричної проникності дослідного об'єкта за зсувом резонансної частоти відносно частоти власного резонансу резонатора, у якому контактну робочу поверхню мікросмугового резонатора фіксують безпосередньо на досліджуваній ділянці тіла пацієнта. Для генерації НВЧ сигналу використовують генератор змінної частоти дециметрового діапазону зі смугою перестроювання відносно резонансної частоти вибраної моди коливань не більше 10%. Окремо вимірюють електричну провідність крові досліджуваної ділянки на низькій частоті, а потім за одержаними даними провідності крові та дійсною частиною діелектричної

проникності крові вираховують об'ємну концентрацію рівня глюкози в крові за формулою:

$$x = \frac{\dot{\varepsilon} - \varepsilon_t + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}{\varepsilon_s - \varepsilon_t + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}, \quad (3.1)$$

де $\dot{\varepsilon}$ – комплексна діелектрична проникність,

ε_s – діелектрична проникність глюкози,

ε_t – діелектрична проникність усіх складових біологічних тканин досліджуваної ділянки тіла, за виключенням глюкози,

i – уявна одиниця, стала, що є ознакою комплексної частини рівняння,

σ – електрична провідність,

ω – кутова частота електромагнітних коливань,

ε_0 – електрична постійна. Вимірювання діелектричної проникності крові можуть здійснювати під час систоли.

Найкраще, коли вимірювання діелектричної проникності крові здійснюють під час систоли. Спосіб реєстрації пульсової хвилі із застосуванням дії НВЧ випромінювання дозволяє вимірювати об'ємну концентрацію рівня глюкози в крові. Слід зазначити, що електрична проникність глюкози складає приблизно 3,6. Комплексна діелектрична проникність біологічних тканин з високим вмістом води знаходиться у діапазоні від 40 до 60, в залежності від стану здоров'я та віку людини. Діелектрична проникність глюкози та ефективна діелектрична проникність інших тканин, що знаходяться у області дії електромагнітного поля мікросмугового резонатора, відрізняються більше ніж у десять разів.

Реєстрацію пульсової хвилі та вимірювання рівня концентрації глюкози в крові здійснюють наступним чином. З генератора НВЧ (рис.27) зондуєчий сигнал через спрямований відгалужувач подають на мікросмуговий резонатор,

частота резонансу якого залежить від концентрації глюкози в крові та провідності крові. Відбитий від резонатора сигнал через спрямований відгалужувач надходить на амплітудний або логарифмічний детектор і далі продетектований сигнал подають на підсилювач низької частоти, підсилений сигнал з якого подають на вхід АЦП. Дані з виходу останнього обробляють за допомогою мікропроцесора і передають на пристрій відображення та на персональний комп'ютер, де відображають отримані та вирахувані результати, згідно з формулою (3.1). Електричну провідність σ вимірюють реографом, цей параметр слугує для обчислення комплексної частини діелектричної проникності досліджуваної тканини, а також є пристроєм синхронізації для вибору моменту проведення вимірювань на НВЧ (систола).

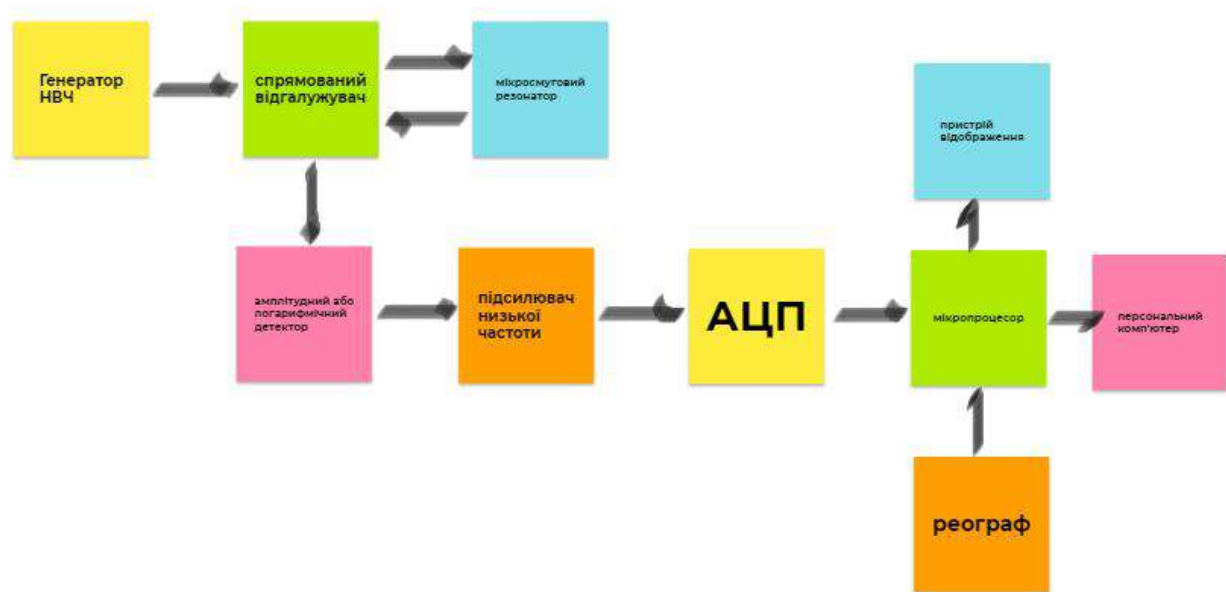


Рисунок 3.2 – Спосіб реєстрації пульсової хвилі та вимірювання рівня концентрації глюкози в крові.

Об'єкт, що досліджується, повинен бути еластичним та приймати пласку форму резонатора. Форму та геометричні розміри мікросмугового резонатора вибирають згідно з робочою довжиною хвилі. Лінійні розміри резонатора набагато менші за розміри досліджуваного об'єкта. Форма резонатора може бути довільною, на її вибір впливають наступні вимоги: номер моди частоти коливань, на якій збуджується резонатор, максимальне узгодження імпедансу резонатора з імпедансом генератора на частоті вибраної моди, структура електромагнітного поля у ближній зоні.

Аналіз пульсової хвилі дозволяє проводити діагностику серцево-судинної системи та здійснювати аналіз варіабельності серцевого ритму, що зображен на рисунку 3.3.

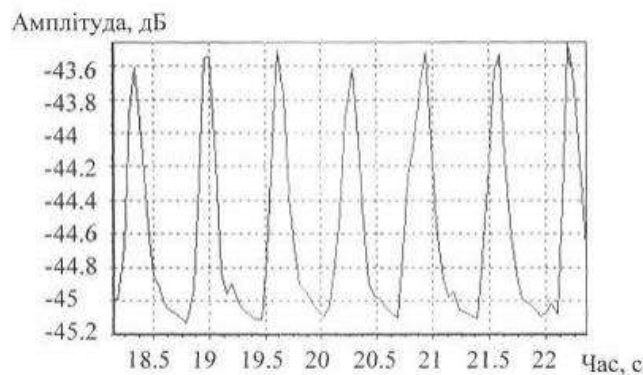


Рисунок 3.3 – Пульсова хвиля [17]

З графіка (рис.3.4) видно, що збільшення концентрації глюкози у крові 40 приводить до зсуву резонансної частоти коливань резонатора.

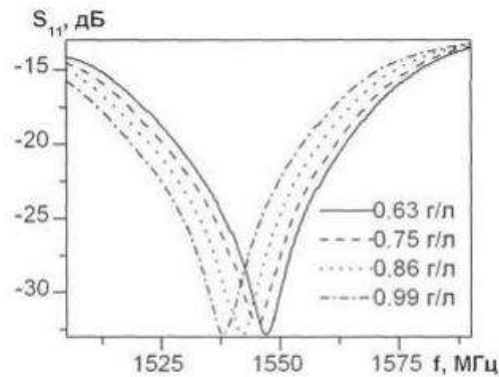


Рисунок 3.4 – Експериментальні залежності коефіцієнтів відбиття для різних концентрацій глюкози в крові [17].

Даний ефект пов'язаний із зміною ефективного значення діелектричній проникності, згідно з формулою (3.1). При цьому вимірювання коефіцієнта відбиття резонатора здійснюють у піках пульсової хвилі (хвиля першого порядку) та корегують дихальною хвилею (хвиля другого порядку). Хвилі першого та другого порядків вимірюють реографом. Метод дозволяє за аналізом пульсової хвилі проводити експрес-діагностику серцево-судинної системи та здійснювати аналіз варіабельності серцевого ритму та обчислювати рівень глюкози в крові за допомогою НВЧ датчика - мікросмугового резонатора та допоміжного пристрою - реографа. Все це дозволяє проводити діагностику стану здоров'я людини неінвазивним, безболісним способом, що дає значний соціальний та техніко-економічний ефекти [17].

4 ПРОХІДНИЙ ПРЯМОКУТНИЙ РЕЗОНАТОР З ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ

4.1 Постановка задачі

В якості математичної моделі було обрано прохідний резонатор з сильним зв'язком, що містив діелектричне заповнення із заданими комплексними діелектричними проникностями (рис.4.1).

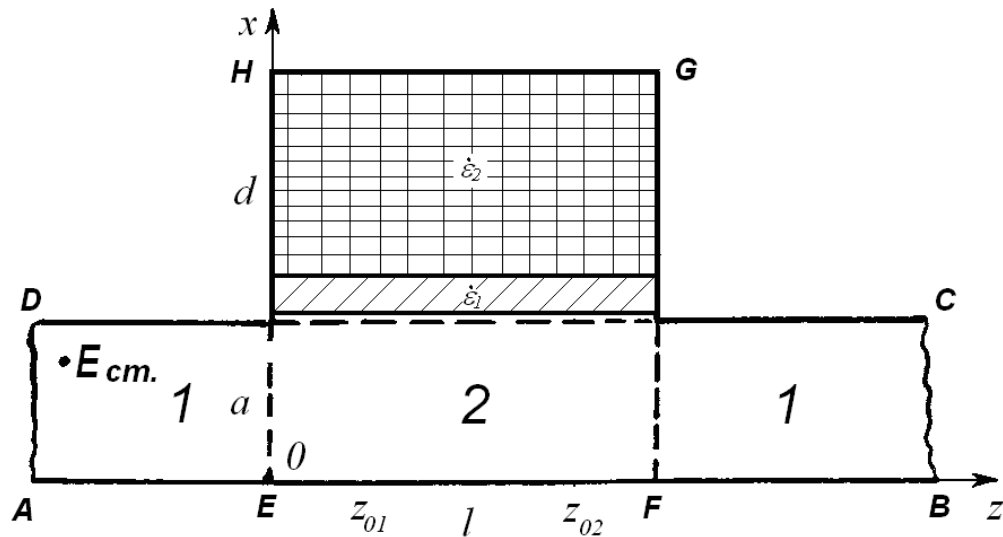


Рис. 4.1 – Резонатор з діелектричним заповненням

Всю область визначення електромагнітного поля розбили на дві пересічні області (області перетину позначені пунктирною лінією):

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ область } ABCD \quad \left\{ \begin{array}{l} -\infty < z < +\infty \\ 0 \leq x \leq a \end{array} \right. , \\
 &2 \text{ область } EFGH \text{ (резонансна область)} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq z \leq l \\ 0 \leq x \leq a + d \end{array} \right. .
 \end{aligned}$$

Будемо вважати, що на вході даної конструкції вздовж позитивного напрямку осі z поширюється хвиля TE_{10} . Область резонатора (друга область) заповнена речовиною з комплексної діелектричною проникністю $\dot{\epsilon}_2$ і відділена від основного хвилеводу діелектричною пластиною з діелектричною проникністю $\dot{\epsilon}_1$. Припустимо, що основний хвилевід заповнений середовищем зі скалярними проникностями ϵ_0 та μ_0 і має ідеально провідну поверхню.

4.2 Розрахунок електромагнітного поля в резонансній області з діелектричними пластинами

Оскільки розміри структури вздовж осі OY не змінюються, варіація полів у всіх розглянутих областях по цій осі відсутні. Електричне поле в цьому випадку має тільки одну складову напруженості E_y .

Скориставшись другою теоремою Гріна та враховуючи вторинні хвилі, перевипромінені діелектричними пластинами, а також граничні умови Діріхле, для першої і другої областей склали наступну систему інтегральних рівнянь:

$$E^I(x, y) = E_{cm.}(x, z) - \int_0^l E^{II}(x', z') \frac{\partial G^I(x, z; x', z')}{\partial x'} dz' \Big|_{x'=a}, \quad (4.1)$$

$$E^{II}(x, y) = \int_0^a E^I(x', z') \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \int_0^a E^I(x', z') \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + \\ + (k^2 + \text{graddiv}) \int_V \vec{G}_e(x, z; x', z') (\dot{\epsilon} - 1) E^{II}(x', z') dV'. \quad (4.2)$$

Електромагнітне поле в резонансній області визначили з інтегрального рівняння для $E^{\text{II}}(x, y)$, яке отримали при підстановці (4.1) в (4.2):

$$\begin{aligned}
 E^{\text{II}}(x, y) = & \int_0^a \left(E_{\text{cm.}}(x', z') - \int_0^l E^{\text{II}}(x'', z'') \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \right) \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \\
 & - \int_0^a \left(E_{\text{cm.}}(x', z') - \int_0^l E^{\text{II}}(x'', z'') \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \right) \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + \\
 & + \sum_{i=1}^k (k^2 + \text{graddiv}) \int_{V_i} G^{\text{II}}(x, z; x', z') (\dot{\varepsilon}_i - 1) E^{\text{II}}(x', z') dV'
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

де $G^{\text{I}}(x, z; x', z')$, $G^{\text{II}}(x, z; x', z')$ – функції Гріна для першої та другої областей, відповідно.

Для першої області у вихідній формі функція Гріна мала вигляд:

$$G^{\text{I}}(x, z; x', z') = \sum_s \frac{1}{i\gamma_s a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s |z-z'|} \tag{4.4}$$

$$\text{де } \gamma_s = \sqrt{k^2 - \left(\frac{s\pi}{a}\right)^2},$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \text{ – хвильове число.}$$

Для другої області:

$$G^{\text{II}}(x, z; x', z') = - \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z'\right) \tag{4.5}$$

Рівняння (4.3) є інтегральним рівнянням Фредгольма другого роду з виродженим ядром. Рішення цього рівняння шукали у вигляді розкладання за власними функціями другої області:

$$E^{II}(x, z) = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z\right), \quad (4.6)$$

$$E_{cm}(x, z) = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cdot e^{-i\gamma z}.$$

В рівняння (4.3) підставили вираз (4.6) і обчислили інтеграли, що входять до нього

$$\begin{aligned} E^{II}(x, y) = & \int_0^a \left(E_{cm}(x', z') - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \right) \Big|_{x''=a} \times \\ & \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=0} - \int_0^a \left(E_{cm}(x', z') - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \times \right. \\ & \times \left. \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} dz'' \right) \Big|_{x''=a} \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} dx' \Big|_{z'=l} + (k^2 + \text{graddiv}) \int_V \vec{G}_e^{II}(x, z; x', z') \times \\ & (\dot{\varepsilon} - 1) E^{II}(x', z') dV'. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Окремо обчислили:

$$\frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} = \frac{\partial \sum_s \frac{1}{i\gamma_s a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a} x''\right) \cdot e^{-i\gamma_s |z' - z''|}}{\partial x''} =$$

$$= \sum_s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cos\left(\frac{s\pi}{a} x''\right) \cdot e^{-i\gamma_s |z'-z''|}.$$

При $x'' = a$ отримали:

$$\left. \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \right|_{x''=a} = \sum_s (-1)^s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s |z'-z''|},$$

де $s = 1, 2, 3, \dots$

При $z' > z''$ та $x'' = a$, отримали:

$$\left. \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \right|_{x''=a}^{z' > z''} = \sum_s (-1)^s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s (z'-z'')} \quad (4.8)$$

де $s = 1, 2, 3, \dots$.

При $z' < z''$ та $x'' = a$, отримали:

$$\left. \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \right|_{x''=a}^{z' < z''} = \sum_s (-1)^s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{i\gamma_s (z'-z'')} \quad (4.9)$$

де $s = 1, 2, 3, \dots$.

Похідна від функції Гріна для другої області:

$$\frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} = - \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right) \cos\left(\frac{n\pi}{l}z'\right),$$

(4.10)

для $z' = 0$:

$$\left. \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \right|_{z'=0} = - \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right),$$

для $z' = l$:

$$\left. \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \right|_{z'=l} = \sum_m \sum_n (-1)^{n+1} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right).$$

Виразували окремо перший інтеграл, що входить в (4.7):

$$\begin{aligned} & \int_0^a \left(E_{cm.}(x', z') - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \Big|_{x''=a} dz'' \right) \times \\ & \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' = \\ & = \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' - \\ & - \int_0^a \left(\int_0^l \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \frac{\partial G^{\text{I}}(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \Big|_{x''=a} dz'' \right) \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' - \\
&- \int_0^a \int_0^l \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \sum_s (-1)^s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s z''} \times \\
&\times (-1) \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) dz'' dx' = \\
&= \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' - \\
&- \sum_{\alpha, \beta, m, n, s} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) (-1)^{s+1} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times \\
&\times \int_0^a \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s z''} dz'' dx' = \\
&= \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' - \\
&- \sum_{\alpha, \beta, m, n, s} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) (-1)^{s+1} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times \\
&\times \int_0^a \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) dx' \times \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) e^{-i\gamma_s z''} dz'' = \\
&= \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{\alpha, \beta, m, n, s} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+1} \frac{4}{(a+d)l} \left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) \times I_{ms} I_{\beta s}^1 \\
& \qquad \qquad \qquad k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \times I_{ms} I_{\beta s}^1, \\
(4.11)
\end{aligned}$$

$$I_{ms} = \int_0^a \sin\left(\frac{s\pi}{a}x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right) dx' = \frac{\frac{s\pi}{a}(-1)^{s+1} \sin\left(\frac{m\pi a}{a+d}\right)}{\left(\frac{s\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2},$$

де

$$I_{\beta s}^1 = \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \cdot e^{-i\gamma_s z''} dz'' = \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \frac{[1 + (-1)^{\beta+1} e^{-i\gamma_s l}] \frac{\beta\pi}{l}}{\left(\frac{\beta\pi}{l}\right)^2 - (\gamma_s)^2}.$$

Виразували окремо другий інтеграл, що входить в (4.7):

$$\begin{aligned}
& \int_0^a \left(E_{cm.}(x', z') - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \Big|_{x''=a} dz'' \right) \times \\
& \times \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' = \\
& = \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' - \\
& - \int_0^a \left(\int_0^l \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}x''\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \frac{\partial G^I(x', z'; x'', z'')}{\partial x''} \Big|_{x''=a} dz'' \right) \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' = \\
& = \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \int_0^a \int_0^l \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \sum_s (-1)^s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a}x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s(l-z'')} \times \\
& \times \sum_m \sum_n (-1)^{n+1} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right) dz'' dx' = \\
& = \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' - \\
& - \sum_{\alpha\beta mns} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+n+1} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times \\
& \times \int_0^a \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a}x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s(l-z'')} dz'' dx' = \\
& = \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' - \\
& - \sum_{\alpha\beta mns} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+n+1} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times \\
& \times \int_0^a \sin\left(\frac{s\pi}{a}x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x'\right) dx' \times \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z''\right) e^{-i\gamma_s(l-z'')} dz'' = \\
& = \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{\text{II}}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' - \\
& - \sum_{\alpha\beta mns} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+n+1} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times I_{ms} \cdot I_{\beta s}^2,
\end{aligned}$$

$$I_{\beta s}^2 = \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z''\right) \cdot e^{-ij_s(l-z'')} dz'' = \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \frac{[1 + (-1)^{\beta+1} e^{-i\gamma_s l}] \frac{\beta\pi}{l}}{\left(\frac{\beta\pi}{l}\right)^2 - (\gamma_s)^2} (-1)^{\beta+1}$$

де

Провели обчислення інтегралів стороннього джерела:

$$\begin{aligned} & \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=0} dx' = \\ & = \int_0^a E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s z'} (-1) \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) dx' = \\ & = (-1) \sum_m \sum_n E_0 \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \int_0^a \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) dx' = \\ & = (-1) \sum_m \sum_n E_0 \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times I_{ms} \end{aligned} \quad , \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^a E_{cm.}(x', z') \times \frac{\partial G^{II}(x, z; x', z')}{\partial z'} \Big|_{z'=l} dx' = \\ & = \int_0^a E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \cdot e^{-i\gamma_s z'} (-1)^{n+1} \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (-1)^{n+1} \sum_{m,n} E_0 e^{-i\gamma_s l} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \int_0^a \sin\left(\frac{s\pi}{a} x'\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) dx' = \\
&= (-1)^{n+1} \sum_{m,n} E_0 e^{-i\gamma_s l} \frac{4}{(a+d)l} \frac{\left(\frac{n\pi}{l}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \times I_{ms} ,
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Ввели наступні позначення:

$$B1_{mn} = \frac{\frac{4}{(a+d)l} \left(\frac{n\pi}{l}\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} , \tag{4.14}$$

$$B2_{mn} = \frac{\frac{4}{(a+d)l}}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} . \tag{4.15}$$

З урахуванням введених позначень і обчислених інтегралів, (4.7) записали у вигляді:

$$\begin{aligned}
E^{\text{II}}(x, y) &= \sum_{m,n} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z\right) = \\
&= - \sum_{m,n} E_0 B1_{mn} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) + \\
&+ \sum_{\alpha,\beta,m,n,s} E_{\alpha\beta} B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) (-1)^s \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) \times I_{ms} I_{\beta s}^1 +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{m,n} (-1)^n E_0 B1_{mn} I_{ms} e^{-i\gamma_s l} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) - \\
& - \sum_{\alpha,\beta,m,n,s} E_{\alpha\beta} \cdot B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) (-1)^{s+n} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) \times I_{ms} I_{\beta s}^2 + \\
& + (k^2 + \text{graddiv}) \int_V \vec{G}_e^{\text{II}}(x, z; x' z') (\dot{\epsilon} - 1) E^{\text{II}}(x', z') dV'
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Розглянемо обчислення інтегралів від діелектричних неоднорідностей:

$$\begin{aligned}
& (k^2 + \text{graddiv}) \int_V \vec{G}_e^{\text{II}}(x, z; x' z') (\dot{\epsilon} - 1) E^{\text{II}}(x', z') dV' = \\
& = k^2 \int_V \vec{G}_e^{\text{II}}(x, z; x' z') (\dot{\epsilon} - 1) E^{\text{II}}(x', z') dV' = \\
& = k^2 (\dot{\epsilon} - 1) \int_V (-1) \sum_m \sum_n \frac{4}{(a+d)l} \frac{\sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right)}{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z'\right) \times \\
& \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x'\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z'\right) dV' = \\
& = (-1) \sum_{m,n,\alpha,\beta} E_{\alpha\beta} B1_{mn} k^2 (\dot{\epsilon} - 1) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z\right) \times \\
& \int_V \sin\left(\frac{m\pi}{a+d} x'\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l} z'\right) \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} x'\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z'\right) dV'
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Обчислення інтеграла по просторовим координатам аналогічне проведеними розрахунками в другому і третьому розділі.

Для неоднорідностей у вигляді пластин, вираз, що враховував геометрію неоднорідності та її місце розташування в резонаторній області, визначався виразом (4.21), для циліндричної неоднорідності:

$$A_{pq}^{(k)} = \frac{4}{al} I_{m\alpha}^{(k)} J_{n\beta}^{(k)}, \quad (4.18)$$

$$AR_{mn,\alpha\beta}^{(k)} = \frac{4}{a \cdot l} \cdot I^{(k)}. \quad (4.19)$$

4.3 Виведення системи рівнянь для резонансної області

Після підстановки в (4.16) виразу (4.17), з урахуванням виразів, які відповідали за геометричні параметри і розташування неоднорідностей в резонаторі, отримали систему неоднорідних лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} E^{II}(x, z) &= \sum_m \sum_n E_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) = \\ &= -\sum_{m,n} E_0 B1_{mn} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) + \\ &+ \sum_{m,n,\alpha,\beta,s} E_{\alpha\beta} B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^s \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} I_{ms} I_{\beta s}^1 \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) + \\ &+ \sum_{m,n} (-1)^n E_0 B1_{mn} e^{-i\gamma_s l} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) - \\ &- \sum_{m,n,\alpha,\beta,s} E_{\alpha\beta} \cdot B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+n} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} I_{ms} I_{\beta s}^2 \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) - \end{aligned}$$

$$- \sum_{i,m,n,\alpha,\beta} E_{\alpha\beta} \cdot B2_{mn} \cdot A_{i,mn,\alpha\beta} \cdot k^2 (\dot{\varepsilon}_i - 1) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right). \quad (4.20)$$

Для випадку, поданого на рис. 4.1 з двома діелектричними неоднорідностями в формі діелектричних пластин, отримали систему:

$$\begin{aligned} E^{\text{II}}(x, z) = & \sum_m \sum_n E_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) = \\ = & - \sum_{m,n} E_0 B1_{mn} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) + \\ + & \sum_{m,n,\alpha,\beta,s} E_{\alpha\beta} B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^s \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} I_{ms} I_{\beta s}^1 \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) + \\ + & \sum_{m,n} (-1)^n E_0 B1_{mn} e^{-i\gamma_s l} I_{ms} \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) - \\ - & \sum_{m,n,\alpha,\beta,s} E_{\alpha\beta} \cdot B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+n} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} I_{ms} I_{\beta s}^2 \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) - \\ - & \sum_{m,n,\alpha,\beta} E_{\alpha\beta} \cdot B2_{mn} \cdot A_{mn,\alpha\beta}^{(1)} \cdot k^2 (\dot{\varepsilon}_1 - 1) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right) - \\ - & \sum_{i,m,n,\alpha,\beta} E_{\alpha\beta} \cdot B2_{mn} \cdot A_{mn,\alpha\beta}^{(2)} \cdot k^2 (\dot{\varepsilon}_2 - 1) \sin\left(\frac{m\pi}{a+d}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}z\right), \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$B2_{mn} = \frac{4}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a+d}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2}. \quad (4.22)$$

де

Суми по m та n не впливали на рішення системи (4.21) тому при вирішенні їх можна опустити

$$\begin{aligned}
 E_{mn} = & -E_0 B1_{mn} I_{ms} + \sum_{\alpha, \beta, s} E_{\alpha\beta} B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^s \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} I_{ms} I_{\beta s}^1 + \\
 & + (-1)^n E_0 B1_{mn} e^{-i\gamma_s l} I_{ms} - \sum_{\alpha, \beta, s} E_{\alpha\beta} \cdot B1_{mn} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) (-1)^{s+n} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} I_{ms} I_{\beta s}^2 - \\
 & - \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \cdot B2_{mn} \cdot A_{mn, \alpha\beta}^{(1)} \cdot k^2 (\dot{\epsilon}_1 - 1) - \sum_{\alpha, \beta} E_{\alpha\beta} \cdot B2_{mn} \cdot A_{mn, \alpha\beta}^{(2)} \cdot k^2 (\dot{\epsilon} - 1)
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.4 Виведення системи рівнянь для хвелеводної області

Поле в хвелеводній області (I) описується виразом (4.1), підставили в нього представлення поля для резонаторної області (II), вираз (4.6), чисельні результати якого отримали після рішення системи рівнянь (4.22)

$$E^I(x, z) = E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{-i\gamma_s z} - \int_0^l \sum_{\alpha\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}x'\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z'\right) \frac{\partial G^I(x, z; x', z')}{\partial x'} dz' \Big|_{x'=a} . \quad (4.23)$$

При $x' = a$ з виразу (4.23) отримали:

$$\frac{\partial G^I(x, z; x', z')}{\partial x'} \Big|_{x'=a} = \sum_s (-1)^s \frac{1}{i\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \cdot e^{-i\gamma_s |z-z'|} , \quad (4.24)$$

де $s = 1, 2, 3, \dots$

Для хвилі, що пройшла через резонаторну область (тобто для $z > z'$) можна записати вираз

$$\begin{aligned}
 E^{+I}(x, z) &= E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \cdot e^{-i\gamma_s z} - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z'\right) \times \\
 &\times \sum_s (-1)^s \frac{1}{\gamma_s a} \frac{s\pi}{a} \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \cdot e^{-i\gamma_s(z-z')} dz' = E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \cdot e^{-i\gamma_s z} - \\
 &- \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \frac{s\pi}{\gamma_s a^2} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z'\right) e^{-i\gamma_s(z-z')} dz' = \\
 &= E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) \cdot e^{-i\gamma_s z} - \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \frac{s\pi}{\gamma_s a^2} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z'\right) e^{i\gamma_s z'} dz' \times \\
 &\times \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{-i\gamma_s z} = E_0 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{-i\gamma_s z} - \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \bar{I}_{\beta s}^1 \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{-i\gamma_s z} .
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

Для $s = 1$ отримали коефіцієнт проходження структури (рис.4.1) для хвилі H_{10} :

$$T = E_0 + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) I_{\beta 1}^1 .
 \tag{4.26}$$

Для відбитої хвилі в хвилеводній області (тобто для $z < z'$) можна записати вираз:

$$E^{-I}(x, z) = - \int_0^l \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d}a\right) \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z'\right) \sum_s (-1)^s \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \sin\left(\frac{s\pi}{a}x\right) e^{i\gamma_s(z-z')} dz' =$$

$$\begin{aligned}
&= -\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z'\right) e^{i\gamma_s(z-z')} dz' = \\
&= -\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \frac{s\pi}{i\gamma_s a^2} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) \int_0^l \sin\left(\frac{\beta\pi}{l} z'\right) e^{-i\gamma_s z'} dz' \times \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) e^{i\gamma_s z} = \\
&= -\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) \frac{s\pi}{\gamma_s a^2} \frac{\left[1 + (-1)^{\beta+1} e^{-i\gamma_s l}\right] \frac{\beta\pi}{l}}{\left(\frac{\beta\pi}{l}\right)^2 - (\gamma_s)^2} \times \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) e^{i\gamma_s z} = \\
&= -\sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_s (-1)^s E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) I_{\beta s}^1 \times \sin\left(\frac{s\pi}{a} x\right) e^{i\gamma_s z} .
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Для $s=1$ отримали коефіцієнт відбиття структури (рис.4.1) для хвилі H_{10} :

$$R = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a+d} a\right) I_{\beta 1}^1 . \tag{4.28}$$

Баланс потужностей:

$$S = |R|^2 + |T|^2 . \tag{4.29}$$

4.5 Чисельні результати

За значеннями амплітуд напруженостей полів розраховали коефіцієнти проходження та відображення, а також потужність випромінювання з резонансної області і потужність втрат в діелектриках. Графіки представлені на рис.4.4.

Потужність втрат в діелектрику визначається виразом:

$$P_d = \frac{\omega_p}{2} \varepsilon'' \varepsilon_0 \int_{V_1} |\vec{E}|^2 dV, \quad (4.30)$$

де ε'' – уявна частина діелектричної проникності,

ω_p – частота випромінювання.

Потужності втрат в N -ій неоднорідності, з урахуванням (4.6) і (4.30), визначалися виразами:

$$\begin{aligned} P_{dN} &= \frac{\omega}{2} \varepsilon'' \int_{V_1} |\vec{E}|^2 dV = \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' \int_{h_1^{(N)}}^{h_2^{(N)}} \int_0^b \int_{l_1^{(N)}}^{l_2^{(N)}} |E_y|^2 dx dy dz = \\ &= \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' \int_{h_1^{(N)}}^{h_2^{(N)}} \int_0^b \int_{l_1^{(N)}}^{l_2^{(N)}} \left| \sum_{\alpha\beta=1}^{\infty} E_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\alpha\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta\pi}{l}z\right) \right|^2 dx dy dz. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Після перетворень і операцій інтегрування, отримали остаточні вирази для потужності втрат в кожній з діелектричних неоднорідностей:

$$P_{dN} = \frac{b}{2} \omega \varepsilon'' \varepsilon_0 \sum_{\alpha,\beta=1}^{\infty} \sum_{m,n=1}^{\infty} E_{\alpha\beta} E_{mn} I_{m\alpha}^{(N)} \cdot J_{n\beta}^{(N)}, \quad (4.32)$$

де N – номер неоднорідності.

Графіки залежності тієї, що пройшла, відбитої і поглинутих в діелектрику потужностей від довжини хвилі представлені на рис. 4.2.

При цьому було обрано такі параметри діелектричного заповнення: рідина всередині резонатора (кров) $\varepsilon_2 = 40$, $\operatorname{tg} \delta = 0,6$, відокремлена від хвилеводу кварцевою діелектричною пластиною ($\varepsilon_1 = 3.8$, $\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-4}$) товщиною $0.1 \cdot a$, геометричні розміри хвилеводу 23×10 мм, товщина резонаторної області $d = 0.5a$.

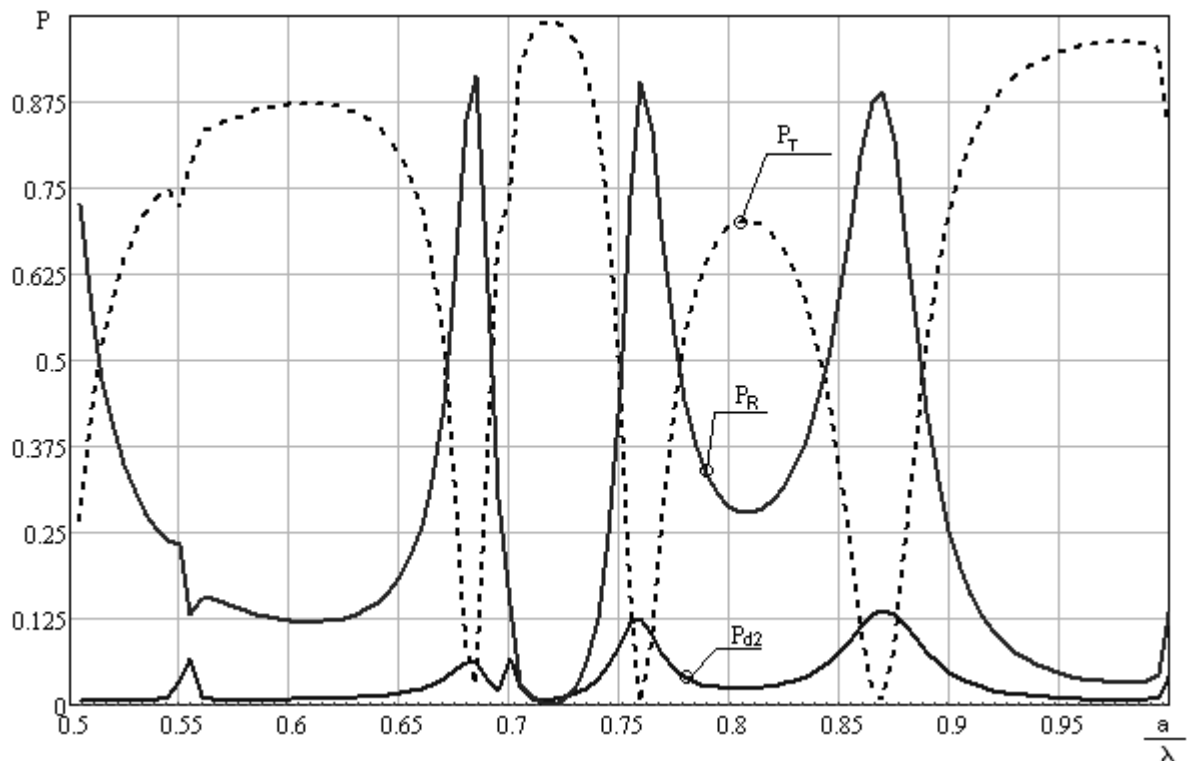


Рис. 4.2 – Залежність тієї, що пройшла, відбитої і поглинених в діелектрику потужностей від довжини хвилі

На графіку рис. 4.2 виділили три області, в яких коефіцієнт проходження мінімальний (в інтервалі довжин хвиль $0.68 \dots 0.7$, $0.74 \dots 0.77$, $0.85 \dots 0.87$). Саме на цих інтервалах доцільно проводити вимірювання, бо в зазначених області відбувається найбільше поглинання діелектриком потужності, що надходить у хвилевід. Також в цих областях приймає найбільше значення коефіцієнт відбиття, який теж може використовуватися для визначення

діелектричної проникності матеріалу, що розміщений в резонаторі. Для цього слід протабулювати значення діелектричної проникності за різних значень потужності, що відбивається, або використовувати формулу 4.32 для знаходження діелектричної проникності за значенням потужності що поглинається в досліджуваному зразку .

5 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

5.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу

У дипломному проекті розробляються методи застосування діелектричних властивостей крові. Ці технології є перспективною альтернативою тим рішенням, що застосовуються наразі.

На сьогоднішній день проблема ефективної оцінки стану пацієнтів є актуальним завданням. У зв'язку з цим поряд із клінічними показниками крові дослідження різних фізико-хімічних характеристик, зокрема її діелектричних властивостей, дозволяє отримати додаткову інформацію про стан пацієнта на клітинному рівні. Методи діелектрометрії знаходять своє застосування при дослідженні морфологічних змін еритроцитів, вивченні діелектричних характеристик клітин крові в нормі та при різноманітних патологіях, виявленні їх температурної залежності, функціональної активності клітин крові при різних патологічних процесах, а також при вивченні впливу на кров низки лікарських засобів та ін.

В табл. 5.1 розглянемо зміст ідеї виробу, що виготовляється, напрямки його застосування та вигоди для користувача.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробляється метод КВЧ діелектрометрії в результаті використання модифікованого вимірювального сенсора для вивчення діелектричних характеристик еритроцитів крові. Концепція базується на технологіях, які використовують метод вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття (ККВ) від короткозамкненої багат шарової структури (хвильового сенсора), що містить досліджуваний зразок. В експерименті був використаний покращений за своїми точностними характеристиками хвильовий сенсор.	1. медичні лабораторії	Визначення функціональної активності клітин крові для діагностики та в лікуванні
	2. фармакологічне виробництво	Вивчення впливу на кров лікарських засобів

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Головні конкуренти	Класична методика визначення біохімічних показників
2	Динаміка ринку	Стагнує
3	Наявність обмежень для входу	Важкодоступність спеціалізованих лабораторій, упереджене ставлення пацієнтів через необізнаність
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Обладнання має бути сертифікованим та відповідати міжнародним стандартам

Для всіх груп клієнтів головною вимогою є якість, точність та швидкість дослідження.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
	Потреба в точному вимірі діелектричних властивостей крові в нормі і патології	Медичні заклади Фармацевтична промисловість	Фінансова та технічна доступність методу	Висока ефективність, простота використання, низька вартість.

В таблиці 5.4 наведено SWOT- аналіз середовища реалізації проекту.

Таблиця 5.4 – SWOT-аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
- менша потреба в персоналі; - висока швидкість отримання даних; - більша пропускну спроможність; - швидке і просте виконання; - високий комплайнс	- високі витрати на реалізацію; - необхідність підготовки персону; - потреба отримання ліцензії.
Можливості:	Загрози:
- розширення ринку надання медичних послуг; - зростання трафіку; - запити користувачів.	- технічні недоліки технологій, що уповільнюють впровадження

В таблиці 5.5 наведено розробку стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Працівники медичних закладів	ознайомлені	громадський	помірна	Доступність сегмента
2	Пацієнти	неознайомлені	повноцінний	помірна	Доступність сегмента
3	Працівники фармкомпаній	ознайомлені	громадський	помірна	Доступність сегмента

Які цільові групи обрано: працівники медичних закладів, пацієнти, працівники фармкомпаній.

Стейкхолдери поділяються на дві групи:

– зовнішні: пацієнти, інвестори, які вкладають у компанію свій капітал з певною часткою ризику з метою отримання доходу у майбутньому; кредитори, які тимчасово надають підприємству позику в обмін на деякий наперед встановлений дохід і зацікавлені в інформації, що дозволяє їм визначити, чи будуть своєчасно здійснені виплати по кредиту; постачальники, зацікавлені в інформації, що дозволяє їм визначити, чи своєчасно виплатять належні їм суми; суспільні і державні організації, так як від успішного функціонування підприємства залежить стан економічної інфраструктури регіону, споживачі, що зацікавлені в отриманні якісного продукту за ринковими цінами, чи навіть нижче; конкуренти, що зацікавлені у тому щоб заволодіти внутрішньою інформацією підприємства, для впровадження нових розробок разом з конкурентом.

– внутрішні: ради директорів фармацевтичних компаній, такі як АТ «Фармак», ПрАТ «Фармацевтична фірма "Дарниця"», корпорація "Артеріум", ТОВ «Біофарма плазма», ПАТ НВЦ «Борщагівський ХФЗ», фармацевтична фабрика «Віола», ДП «ДНЦЛЗ», АТ «Київський вітамінний завод», АТ «Лекхім», які зацікавлені у розвитку та нормальній роботі підприємства; менеджери, які зацікавлені в отриманні фінансової інформації, що дозволяє зробити найбільш достовірну оцінку ефективності управління підприємством; профспілка, яка представляє інтереси робітників, захищає їх права та інтереси, власники лікарень, вище керівництво (адміністрація лікарень, місцева адміністрація тощо), працівники підприємств, які зацікавлені в отриманні інформації про здатність підприємства своєчасно виплачувати зарплату, проводити пенсійні та інші виплати.

Надавачі послуг та клієнти будуть зацікавлені в такого роду дослідженнях, позаяк вони будуть надавати можливість оптимізувати діагностичний та лікувальний процеси, пришвидшити дослідження лікарських засобів, залучити більшу кількість клієнтів, за рахунок чого збільшиться прибуток.

Споживачі будуть зацікавлені в цій методиці, позаяк вони отримають можливість у проведенні швидкого, інформативного та малоінвазивного дослідження.

Інвесторами для даного проекту можуть бути:

1. Держава – через зацікавленість у профілактиці захворюваності населення та підвищення його працездатності.
2. Фірми-постачальники обладнання.
3. Фармацевтичні компанії, які виробляють лікарські засоби.
4. Міжнародні організації та благодійні фонди.

За допомогою аналізу стейкхолдерів можна визначити та оцінити важливість ключових груп людей або організацій.

Таблиця 5.6 - Матриця стейкхолдерів

Група стейкхолдерів	Інтереси стейкхолдерів
Клієнти та пацієнти	Наявність послуги в межах досяжності.
Постачальники	Збут товару, вчасна оплата їхніх послуг
Співробітники	Можливість отримувати заробітну плату – фінансова стабільність.
Суспільство	Розширення асортименту послуг, забезпечення населення своїми товарами на певній території.
Державні органи	Сплата податків

Страховальники	Фінансова вигода у кожному клієнті
----------------	------------------------------------

Карта стейкхолдерів – це спосіб наочного відображення різних відносин зі стейкхолдерами.

Таблиця 5.7 - Карта стейкхолдерів

		Рівень інтересу	
		низький	високий
Рівень впливу	низький	Страховальники	Власники, співробітники і суспільство
	високий	Державні органи	Постачальники, пацієнти, клієнти та споживачі

5.2 Планування робіт

З метою оцінки ефективності роботи над проектом потрібно провести аналіз економічної ефективності. Для цього треба оцінити всі можливі затрати на проектування та виробництво, знайти можливі шляхи зменшення затрат провівши ретельний аналіз проблеми, ситуації на ринку, спланувати подальший план дій та реалізувати його.

Проектування є важливим етапом, що займає значну частину загального часу розробки та є дуже важливим, адже треба проаналізувати проблему, знайти варіанти їх вирішення, визначити оптимальні шляхи, підготуватися до реалізації проекту.

Перевірка роботи пристрою також є важливим етапом, дозволяє виявити можливі помилки які були допущені на попередньому етапі.

Наступний етап – доробка та усунення недоліків дозволяє усунути можливі помили та додати деякі можливі покращення чи оптимізації перед тим як запускати серійне виробництво. У процесі перевірки могли виникнути деякі непередбачені нюанси пов'язані, безпосередньо, з виробництвом, тому перед запуском у серійне виробництво треба всі можливі проблеми вирішити.

Останнім етапом є оформлення документації, наприклад такої як складальне креслення, документація на вибір та ін. Після чого можна безпосередньо починати вироблення виробу та його реалізацію.

Тривалість НДР залежить від безлічі факторів, передбачити які неможливо. Тому, у зв'язку з новизною технічної проблеми, використовуємо вірогідну оцінку часу, яка визначається по кожному етапу робіт:

$$t_{\text{оч}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5} \quad (5.1)$$

де $t_{\text{ож}}$ - очікувана оптимальна оцінка часу виконання НДР, днів,

t_{min} - Мінімально необхідний час виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} - Максимальні витрати часу на виконання роботи по даному етапу при несприятливих умовах, днів.

$$t_{\text{оч } 1} = (3 \cdot 15 + 2 \cdot 19) / 5 = 16.6$$

Правильність визначення $t_{\text{оч}}$ перевіряється розрахунком дисперсії - розкиду між мінімальною і максимальною оцінкою часу. Дисперсія являє собою середнє значення квадрата відхилення тривалості роботи від її очікуваного значення і визначається за формулою:

$$\sigma^2(t) = \left(\frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{5} \right)^2, \quad (5.2)$$

Якщо $\sigma^2(t) \leq 1$, то ступінь невизначеності оцінки часу робіт по даному етапу мала.

$$\sigma^2_1 = [(20 - 15) / 5]^2 = 1$$

Проведемо аналогічні розрахунки для інших етапів

$$t_{оч\ 2} = (3*2 + 2*4) / 5 = 2.8$$

$$\sigma^2_2 = [(4-2) / 5]^2 = 0.16$$

$$t_{оч\ 3} = (3*4 + 2*6) / 5 = 4.8$$

$$\sigma^2_3 = [(6-4) / 5]^2 = 0.08$$

$$t_{оч\ 4} = (3*4 + 2*7) / 5 = 5.2$$

$$\sigma^2_4 = [(7 - 4) / 5]^2 = 0.36$$

Отримані результати занесемо у табл. 5.8

Таблиця 5.8 - Тривалість виконання етапів НДР

Етапи НДР	Тимчасові оцінки			Дисперсія	Виконавці	
	t_{min} дні в	t_{max} днів	$t_{оч}$ днів		Спеціальність	Кількість, чол
Проектування	15	20	16.6	1	Інженер – конструктор, інженер-програміст	2
Перевірка	2	4	2.8	0.16	Інженер -	1

роботи пристрою					конструктор	
Доробка та усунення недоліків	4	6	4.8	0.08	Інженер – конструктор, інженер-програміст	1
Оформлення документації на виріб	4	7	5.2	0.36	Інженер - конструктор	1
Разом	25	37	29,4	1,6	-	2

5.3 Побудова мережевого графіку

Мережевий графік являє собою інформаційно-динамічну модель, в якій відображено взаємозв'язки і результати всіх робіт, необхідних для досягнення кінцевої мети проектування. При побудові мережного графіка використовуються два графічних елемента: роботи і події.

Мережевий графік дозволяє отримати модель процесу, необхідний для керівників підприємства, який дозволяє ефективно корегувати на вносити зміни до виконуваних робіт та стежити за ходом виконання, що в свою чергу дозволяє швидко адаптуватися до нових обставин у виробництві.

Мережевий графік для даної дипломної роботи наведено у табл. 5.9

Таблиця 5.9 Перелік робіт мережевого графіка

№	Код робіт	Найменування роботи	Тривалість, днів
1	0–1	Аналіз технічного завдання	2
2	1–2	Узгодження проекту	1
3	2–3	Вирішення оптимального напрямку рішення завдання	1
4	3–4	Розробка виробу у ПЗ	7
5	4–5	Аналіз оригінального виробу	1
6	5–6	Зміна параметрів на оптимальні	4
7	6–7	Аналіз з оптимальними параметрами	2
8	7–8	Доопрацьовування схеми, додаткове поліпшення параметрів	4
9	8–9	Повторний аналіз з доопрацьованими параметрами	1
10	9–10	Оформлення документації	1
11	10–11	Здача в експлуатацію	1
	Всього		25

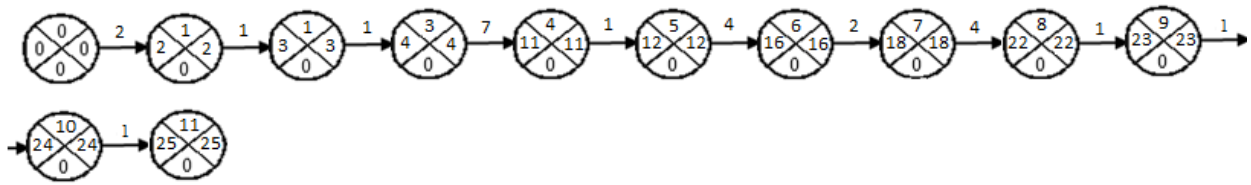


Рисунок 5.1 – Мережевий графік проекту

5.4 Розрахунок витрат на практичну реалізацію

Розрахунок загальних витрат на виготовлення виробу включає в себе: витрати на електроенергію, витрати на матеріали та на людський час. Кількість витрат визначається з огляду на норми витрати матеріалу на ін. Ціни на матеріали та електроенергію беруться за цінами станом на 01.09.2021.

Загальну калькуляцію усіх витрат буде подано після обрахунку витрат по усім категоріям.

5.4.1 Визначення витрат на матеріали

У вартість матеріалів включаються витрати на матеріали для проведення дослідження. Їх кількість визначається на підставі програми дослідження, норм витрати, кількості годин випробувань та інших даних. Ціна матеріалу визначається за цінами станом на 01.09.2021 р.

Витрати на основні матеріали знаходяться з розрахунку їх вартості та кількості.

Транспортно-заготівельні витрати складають 5% від вартості матеріалів.

Вихідні дані й розрахунки вартості матеріалів заносяться в таблицю 5.10.

Таблиця 5.10 – Розрахунок витрат на матеріали

Матеріал	Витрата матеріалу на тему, шт.	Ціна за одиницю, грн.	Сума витрат, грн.
Папір А4	500	0,27	135
Картридж для принтера	1	590	590
Програмне забезпечення	1	10000	10000
Разом:	-	-	10725
Транспортно-заготівельні витрати	-	-	36.25
Всього з урахуванням транспортно-заготівельних витрат:	-	-	10761.25

5.4.2 Витрати на електричну енергію

Витрати на електричну енергію E_c визначаються за формулою:

$$E_c = \frac{M_y \Phi_{\text{еф}} K_n C_e}{\text{КПД}}, \quad (5.3)$$

де M_y - потужність, споживана електроприладом, кВт, $\Phi_{\text{еф}}$ - ефективний фонд часу роботи даного виду обладнання, г., K_n - коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу, що дорівнює 0.8, C_e - ціна 1 кВт*год електроенергії, ККД-коефіцієнт корисної дії, приймається рівним 0.9.

Калькуляцію витрат на електроенергію обладнання заносимо до табл.5.11.

Таблиця 5.11 – Розрахунок вартості енергоресурсів

Обладнання	Вид енергоресурсів	Потужність обладнання, кВт	$\Phi_{\text{эф}}$, год.	Тариф, грн.	Вартість, грн.
------------	--------------------	----------------------------	---------------------------	-------------	----------------

Принтер HP DeskJet 2720	Електроенергія	0.15	10	3.2	4.8
ПК Lenovo ThinkCentre M70s	Електроенергія	0.18	160	3.2	92.16
Освітлення	Електроенергія	0.10	200	3.2	64
Всього	-	-	-	-	160.96

5.4.3 Розрахунок амортизації універсального обладнання

Сума амортизаційних відрахувань від балансової вартості універсального устаткування, апаратів і приладів, які відносяться до основних фондів, розраховуються з урахуванням використання їх для даної НДР. Результати розрахунку зведені в таблицю 5.12.

Сума амортизації обраховується шляхом ділення річної суми амортизації (вартість обладнання помножено на норму амортизації) розділеної на час роботи обладнання.

Таблиця 5.12 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

Обладнання	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	$\Phi_{эф}$, год.	Сума амортизації, грн.
ПК Lenovo ThinkCentre M70s	14500	50	160	397.2
Принтер HP DeskJet 2720	1600	50	10	2.73
Освітлення	750	50	200	25.68
Всього	16100		170	425.61

5.4.4 Розрахунок заробітної плати робітників та супутні витрати

Далі треба порахувати витрати на заробітну плату робітників. В дану статтю включається заробітна плата всіх категорій працівників, які безпосередньо зайняті у процесі проведення розробки. Сума заробітної плати розраховується на основі зайнятості виконавців по окремих етапах робіт. Розрахунок основної заробітної плати зведений в табл. 5.13

Таблиця 5.13 – Розрахунок основної заробітної плати

Посада	Кіл-ть, чол.	Оклад, грн.	Середньо-денна зарплата, грн.	Зайнятість НДР, днів	Підсумкова сума зарплати, грн.
Інженер – конструктор	1	12500	595	25	14875
Інженер-програміст	1	14500	690	19	13110
Разом	2	-	-	-	27985

Додаткова заробітна плата дорівнює 12% від основної заробітної плати, що становить :

$$C_{\text{дод}} = 0.12 * C_{\text{осн}} \quad (5.4)$$

$$C_{\text{дод}} = 0.12 * 27985 = 3358.2 \text{ грн.}$$

Сумарна заробітна плата, таким чином, складе :

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{дод}} + C_{\text{осн}} \quad (5.5)$$

$$C_{\text{заг}} = 27985 + 3358.2 = 31343.2 \text{ грн.}$$

До підсумковій суми основної зарплати робітників треба додати премію та всі доплати до річного фонду в розмірах, що встановлені у лабораторії де проводиться розробка.

Відрахування до Фонду соціального страхування визначаються у відсотковому співвідношенні від повної суми виплат працівникам (з урахуванням додаткової заробітної плати, усіх премій та надбавок).

Відрахування дорівнюють 22%, що при 50%-премії складатиме :

$$C_{\text{пр}} = 0.5 * C_{\text{осн}} \quad (5.6)$$

$$C_{\text{пр}} = 0.5 * 27985 = 13992.5 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{фсс}} = (C_{\text{заг}} + C_{\text{пр}}) * 0.22 \quad (5.7)$$

$$C_{\text{фсс}} = (31343.2 + 13992.5) * 0.22 = 9973.8 \text{ грн.}$$

Також до списку витрат додаються накладні витрати, що пов'язані з організацією, керуванням та обслуговуванням підприємства. Зазвичай накладні витрати приймають у діапазоні від 60 до 100 % основної заробітної плати виконавців.

$$C_{\text{накл}} = 0.7 * C_{\text{осн}} \quad (5.8)$$

$$C_{\text{накл}} = 0.7 * 27985 = 19589.5 \text{ грн.}$$

5.4.5 Загальні фінансові витрати

Загальні фінансові витрати на реалізацію пристрою становитимуть суму усіх порохованих вище витрат :

$$B_{\text{заг}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{ел.ен}} + C_{\text{осн}} + C_{\text{дод}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{фсс}} + C_{\text{накл}} \quad (5.9)$$

$$B_{\text{заг}} = 27985 + 425,61 + 10761,25 + 3358,2 + 13992,5 + 9973,8 + 160,96 + 19589,5 = \\ = 86246,82 \text{ грн.}$$

Кошторис витрат на вивчення і аналіз завдання, а також на проектування та виготовлення спеціалізованого технологічного обладнання наведена в таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Кошторис витрат на реалізацію поставленої задачі

Статті витрат	Сума, грн.	Питома вага до підсумку, %
Заробітна плата основна	27985	32,46
Амортизаційні витрати	425,61	0,49
Витрати на матеріали	10761,25	12,48
Заробітна плата додаткова	3358,2	3,89
Нараховані премії	13992,5	16,23
Відрахування на соц. страхування	9973,8	11,56
Витрати на електроенергію	160,96	0,18
Накладні витрати	19589,5	22,71
Разом	86246,82	100

5.5 Розрахунок економічної ефективності НДР

Для теоретичних досліджень в більшості випадків важко або навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їх техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників: важливості дослідження для народного господарства; складності розробки; результативності та важливості використання. Важливість теоретичного дослідження оцінюють за його призначенням: вирішення проблемних питань; задоволення вимог спеціальної техніки; пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень.

Результативність НДР визначається по повноті рішень поставленої задачі: отриманий результат відповідає планованому; задовільний (часткове рішення); негативний. Аналіз залежності між цими показниками і витратами на їх досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічних показників теоретичних НДР по формулі:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{Z_{\text{НДР}} \cdot t_{\text{НДР}}}, \quad (5.9)$$

де $K_{\text{НДР}}$ - рівень ефективності дослідження;

J^n - важливість роботи;

R - результативність роботи;

T - технічна складність;

$Z_{\text{НДР}}$ - витрати на проведення НДР, тис. грн.;

$t_{\text{НДР}}$ - фактичний час виконання НДР, років;

n - показник використання результатів.

Для НДР час яких виконання не більше 2 років, допустимі значення коефіцієнтів наведені в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 - Значення оціночних факторів

Оціночні фактори	J	R	T	$З_{ндр}$	$T_{ндр}$	N
Допустимі значення	2..5	1..4	1..3	-	-	1..8
Прийняті значення	4	3	2	86246.82	0.1	7

$$K_{ндр} = \frac{4^6 \cdot 3 \cdot 2}{86246.82 \cdot 0.1} = 2.84$$

Так як коефіцієнт вийшов рівним 2,84, що відповідає нерівності $K_{ндр} > 1$, то це значить, що проведена робота має економічний сенс.

5.6 Розрахунок фінансового результату

Цей етап дозволяє визначити очікуваний дохід, фінансовий результат та фінансовий результат за інноваційним проектом.

Витрати на виробництво становлять 86246,82, відповідно собівартість одного виробу при проведенні 500 досліджень буде $=86246,82/500=172,49$ грн..

Ціна одного дослідження буде дорівнювати витратам на одне дослідження + планований прибуток, відповідно дорівнює $172,49+100=272,49$ грн..

Тоді дохід за 500 досліджень буде дорівнювати $272,49 \cdot 500 = 136246,82$ грн..

Фінансовий результат розраховується шляхом помноження прибутку на кількість досліджень та буде дорівнювати $100 \cdot 500 = 50000$ грн.

Цифри для наступного року розраховуємо аналогічно.

Таблиця 5.13 – Розрахунок фінансового результату

№ пе-	Обсяг и	Обсяги реаліза	Залишок нереа-	Ціна 1 од.,	Витра ти на	Прибу ток з	Дохід з партії,	Фінанс овий
----------	------------	-------------------	-------------------	----------------	----------------	----------------	--------------------	----------------

ріод у	вироб ництва (послу г)	ції	лізовано ї продукц ії	грн.	1од., грн.	1од., грн	грн	резуль тат, грн
1 рік	500шт	500шт	0	272,49	172,49	100	136246, 82	50000
2 рік	550шт	550шт	0	272,49	172,49	100	149869, 5	55000
Разо м	-	-	-	-	-		286116, 32	105000

Після розрахунку фінансового результату стали відомі такі показники: дохід, витрати та фінансовий результат, який за 2 роки становить 105000 грн..

Серед можливих ризиків можна виділити появу конкурентів з цінами нижчими ніж розраховані у дипломному проекті, але шанс дуже малий через те, що розроблений метод має унікальний дизайн, важкий у методиці, але натомість має гарні характеристики. Іноваційність розробки дозволяє робити націнку майже у 58%.

5.7 Висновки економічного розділу

В даній дипломній роботі, яка присвячена дослідженню діелектричних властивостей крові, був представлений розрахунок та планування НДР. Основною умовою раціонального планування розробки є скорочення матеріальних витрат та терміну виконання роботи. Перед виконанням розрахунків було проведено SWOT-аналіз та визначені стейкхолдери. В результаті розрахунків було встановлено: тривалість розробки – 25 днів,

витрачена сума на НДР дорівнює 86246.82 грн.. Розрахований коефіцієнт НДР дорівнює 2.84, який означає те що дана розробка має економічний сенс. Було розраховано фінансовий результат який за 2 роки дорівнює 105000 грн., який перекидає ціну НДР та дозволяє отримати прибуток.

Тому можна зробити висновок про економічну доцільність на ефективність проведеної науково дослідницької роботи, що була присвячена дослідженню діелектричних властивостей крові. Також після оцінки фінансового результату можна зробити висновок про наявність економічної доцільності проекту.

Існують ризики упередженого ставлення клієнтів до нової системи досліджень показників крові, адже застосовані у ній технології використовують зовсім інші технології. Клієнти, що звикли використовувати технології радіозв'язку, можуть не розуміти всіх перспектив вивчення діелектричних характеристик еритроцитів крові та не довіряти їй. Адже ці технології, що використовують метод КВЧ діелектрометрії, є мало застосованими та не цілком зрозумілими пересічним громадянам.

В ході проведених економічних розрахунків можна побачити, що витрати на реалізацію проекту окупляться вже за два роки. А подальше розширення мережі буде приносити мільйонні прибутки.

Отже, впровадження проекту є доцільним і економічно вигідним.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Аналіз потенційних небезпек

Чинне трудове законодавство вимагає виконання норм та правил щодо стану виробничих ділянок та робочих місць. Так у приміщеннях повинні підтримуватися відповідні температура, вологість, тиск тощо. Для того, щоб уникнути дії шкідливих та небезпечних факторів, спершу потрібно провести аналіз робочого місця та визначити усі потенційно можливі та наявні небезпечні та шкідливі фактори, які надалі слід мінімізувати, застосовуючи певні заходи.

За вихідні дані вважатимемо робочим приміщенням кімнату, обладнану спеціальними інструментами, вимірювальними приладами та кількома персональними комп'ютерами. Саме таке робоче місце використовувалося під час проектування та створення виробу, описаному у дипломному проекті.

Небезпечні виробничі чинники, пов'язані з даною роботою:

– ураження електричним струмом внаслідок:

- а) невиконання правил користування електроприладами;
- б) безпосереднього зіткнення з відкритими струмоведучими частинами і дротами;
- в) випадкового, не викликаного виробничою необхідністю, дотику або дотику унаслідок помилкової подачі напруги під час ремонту і огляду;
- г) дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких пошкоджена;
- д) торкання до струмоведучих частин за допомогою предметів з низьким опором ізоляції;
- е) дотик до металевих частин устаткування, зіткнення з будівельними деталями конструкцій, що випадково опинилося під напругою (в результаті відсутності або пошкодження пристроїв захисного заземлення);

- негативний вплив роботи на опорно-руховий апарат внаслідок малорухливої специфіки роботи, що приводить до загальної втоми;
- незадовільні параметри мікроклімату приміщення внаслідок недостатнього кондиціонування повітря;
- недостатня освітленість через недостатню кількість світильників, вихід з ладу апаратури;
- можливий спалах внаслідок короткого замикання, перевантаження дротів, нагрітих опорних поверхонь, несправності апаратури. Причиною виникнення загоряння в радіотехнічній схемі може бути недбале виконання і порушення правил монтажу.

6.2 Заходи щодо забезпечення техніки безпеки

Для співробітників, що ведуть розробку існує небезпека ураження електричним струмом, оскільки в приміщенні знаходиться безліч електроприладів. Тому необхідно забезпечити безпеку роботи персоналу ДСТУ 7237:2011. «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».

Для забезпечення недоступності струмоведучих частин від випадкового дотику застосовані наступні заходи:

- огорожа струмоведучих частин;
- застосування робочої ізоляції;
- застосування струмопровідних дротів з подвійною ізоляцією, що складається з робочої і додаткової ізоляції;
- над розетками в стінах вивішені таблички з вказівкою напруги (~220В);

Основним технічним засобом, яке забезпечує безпеку роботи з комп'ютером, є захисне заземлення: йому підлягає корпус комп'ютера, металеві

оболонки кабелів і дротів. Призначення заземлювального контура відповідно до ПУЕ, що забезпечує опір не більше 4Ом.

Зовнішні гнучкі шнури відповідають ДСТУ 7237:2011. «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».

Кінескоп ЕОМ вибухозахищений без додаткового захисту. Вся апаратура, перед експлуатацією повинна перевірятися на відповідність ДСТУ 7237:2011. «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».

Для забезпечення безпеки роботи також використовується занулення. Захисний ефект обнулення полягає в зменшенні тривалості замикання на корпус, а значить в скороченні часу дії електричного струму на людину. Це досягається завдяки підключенню металевого корпусу до нульового дроту.

Для забезпечення безпеки роботи з комп'ютером від впливу електромагнітного випромінювання, наслідків вибуху кінескопа, від наслідків механічної нестійкості апарату проводяться заходи відповідно НПАОП 0.00-7.14-17 «Вимоги безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками».

При нормальній експлуатації комп'ютера і периферійних пристроїв, жодна з частин не повинна нагріватися вище за допустиме значення температури.

Робоче місце користувачів відеотерміналів комп'ютера обладнане з урахуванням вимог ДСТУ EN 60950-1:2015 «Обладнання інформаційних технологій. Безпека. Частина 1. Загальні вимоги» (EN 60950-1:2006; A11:2009; A1:2010; A12:2011; AC:2011; A2:2013, IDT), ДСТУ EN 62368-1:2017 «Обладнання аудіо-, відео-, інформаційних та комунікаційних технологій. Частина 1. Вимоги щодо безпеки» (EN 62368-1:2014; AC:2015-05; AC:2015-02; AC:2015-11; AC:2017; A11:2017; IDT; IEC 62368-1:2014, MOD; Cor 1:2014; Cor

2:2015, IDT). Відстань від очей користувача до екрану дисплея складає 500 - 700 мм, точка зору 10 - 20 градусів, але не більше 40; кут між верхнім краєм відеотерміналу і рівнем очей оператора складає менше 10 градусів. Нахил екрану має бути перпендикулярно до лінії зору користувача. Конструкція робочого місця має забезпечувати оптимальне положення працюючого, коли столи повинні бути міцними, стійкими і з висотою зручною для роботи, поверхні повинні бути гладкими, без тріщин та вибоїн. Руки користувача розташовуються на робочому столі в горизонтальному положенні або злегка нахилені, кут нахилу складає 70-90 градусів. Необхідна хороша опора для спини. Стегна мають розташовуватися паралельно підлозі, а ноги стояти на підлозі або на підставці. Рекомендується чергувати працю з відпочинком та виконанням фізичних вправ (1 годину роботи - 10 хвилин перерви).

6.3 Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

В підрозділі визначаються умови мікроклімату, які дозволяють працюючим уникнути професійних захворювань.

Параметри мікроклімату в приміщенні відповідають вимогам ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони», ці норми та правила становлять санітарні вимоги до робочих приміщень.

ГОСТ 12.1.005-88 визначає оптимальні і допустимі метеорологічні умови для робочої зали (простір висотою 2 м над рівнем підлоги, де розташовані робочі місця) і враховує: пору року, складність робіт, що виконуються, і надлишок тепла.

Виходячи з прорахованих факторів, метеорологічні параметри норми температури повітря становлять в холодну пору року (коли температура повітря зовні менше +10°C) для легких +18 - 21°C, для важких +14- +16°C при вологості

40-60% і швидкості руху не більше 0,2-0,3 м/с, допускається відхилення від норми $+1^{\circ}\text{C}$, вологість повітря до 80%, швидкість до 0,5 м/с. В теплі пори року оптимальна температура для легких робіт складає $+22- +28^{\circ}\text{C}$, роботи середньої важкості $+16-+20^{\circ}\text{C}$.

Порушення метеорологічних умов веде до зниження працездатності та підвищення травматизму.

Виробничі та допоміжні приміщення повинні бути обладнані кондиціонером і опаленням, що забезпечують рівномірну температуру і стан повітряного середовища.

У всіх приміщеннях повинні бути встановлені термометри.

Вентиляція виробничих і допоміжних приміщень може здійснюватись природним провітрюванням, або з використанням кондиціонерів. Використання певної вентиляції повинно бути обґрунтовано розрахунком, що підтверджує забезпечення обміну повітрям, температури і стану повітряного середовища відповідно ГОСТ 12.1.005-88 "Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони".

Сприятливі умови для працюючих створює кондиціонування повітря, що створює постійний мікроклімат. Якщо у виробничих приміщеннях відсутні джерела тепла, то кондиціонер повинен забезпечувати обмін повітря не менше $30 \text{ м}^3/\text{год}$ на кожного працюючого для приміщень до 20 м^3 на одного працюючого. В приміщеннях з об'ємом на одного працюючого $20-40 \text{ м}^3$ не менше $20 \text{ м}^3/\text{год}$, а більше 40 м^3 - провітрювання.

Рациональне освітлення промислових ділянок є одним із важливих факторів попередження травматизму і професійних захворювань.

Система загального освітлення виконана керуючись вимогами ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення. Норми проектування". В робочій зоні передбачено два види освітлення - природне і штучне. Природне бічне

одностороннє і штучне робоче і комбіноване, таке, що складається із загального освітлення приміщення і місцевого освітлення робочих місць. Робочі місця, обладнані дисплеями, розташовують так, щоб у поле зору оператора не потрапляли вікна і освітлювальні прилади. Відеотермінали розміщуються під кутом 90 - 105 градусів до вікон і на відстані 2,5 - 3 м від стіни з віконними отворами. Розмір приміщення приймається $S = 6 \times 8$ м, а робочого місця $S_{PM} = 1,5 \times 1$ м². Висота приміщення $A = 3,3$ м. Проведемо розрахунок освітленості обчислювального центру. Відповідно гігієнічним вимогам ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення. Норми проектування" для заданого приміщення $6 \times 8 \times 3,3$ м потрібно створити освітленість 300 лк. При цьому сумарна освітленість робочої поверхні складає 500 лк. Для освітлення використовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ.

Знаходимо індекс освітлення (показник приміщення). Для цього треба знайти висоту світильників над робочою зоною:

$$H_p = H - H_{pm}, \quad (6.1)$$

де H_p - висота світильників над робочою областю, м;

H - загальна висота приміщення, міліграм;

$H_{pm} = 0,8$ м - висота робочого місця.

$$H_p = 3,3 - 0,8 = 2,5 \text{ (м)}$$

Індекс освітлення знаходиться, як:

$$i = \frac{A \cdot B}{Np \cdot (A + B)} \quad (6.2)$$

де А, В - ширина і довжина приміщення відповідно, м.

$$i = \frac{6 \cdot 8}{2,5 \cdot (6 + 8)} = 1,37$$

Визначимо ($\eta = 0,45$) - відношення світлового потоку, який падає на розрахункову поверхню до світлового потоку джерела світла.

Приймаємо коефіцієнт запасу $do = 1,4$ і коефіцієнт нерівномірності освітлення $z = 1,2$, світильники розмістимо в 2 ряди ($Np = 2$) залежно від розташування робочих столів.

Визначаємо необхідний світловий потік ламп в кожному ряду:

$$Fp = \frac{En \cdot S \cdot z \cdot k}{Np \cdot \eta} \quad (6.3)$$

де En - освітленість, лк;

S - площа освітлюваного приміщення, м²;

z - коефіцієнт нерівномірності освітлення;

k - коефіцієнт використання світлового потоку освітлювальної установки;

Np - число рядів світильників;

η - коефіцієнт запасу.

$$Fp = \frac{300 \cdot 48 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{2 \cdot 0,45} = 26880 \quad (\text{лм})$$

Якщо в світильнику встановити по дві люмінесцентні лампи типу ЛБ (n=2) потужністю 40 Вт і світловим потоком $F_{\text{л}} = 3000$ лм одержимо кількість світильників в ряду:

$$N = \frac{F_p}{n \cdot F_{\text{л}}} \quad (6.4)$$

де F_p - світловий потік ламп в кожному ряду, лм;

n - кількість ламп в світильнику;

$F_{\text{л}}$ - світловий потік лампи, лм.

$$N = \frac{26880}{2 \cdot 3000} = 4,48$$

Вибираємо по 5 світильників в кожному ряду.

Освітленість від світильника місцевого освітлення визначається по формулі:

$$E_M = E_{\Sigma} - E_{\text{заг}} \quad (6.5)$$

$$E_M = 500 - 300 = 200 \text{ (лк)}$$

Світловий потік визначається по формулі

$$F = E \cdot S \quad (6.6)$$

де S – розмір освітлюваної поверхні, м²,

E – освітленість робочої поверхні, лк.

Розмір приміщення приймається $S = 6 \times 8 = 48$ м², а робочого місця $S_{\text{рм}} = 1,5 \times 1 = 1,5$ м². Висота приміщення $A = 3,3$ м, висота підвісу світильника $H_p = 2,5$ м.

Світловий потік від світильника загального освітлення:

$$F_{3AG} = E_{3AG} \cdot S \quad (6.7)$$

$$F_{OB} = 300 \cdot 6 \cdot 8 = 14400 \text{ (лм)}$$

Світловий потік від світильника місцевого освітлення:

$$F_M = E_M \cdot S_{PM} \quad (6.8)$$

$$F_M = 200 \cdot 1 \cdot 1,5 = 300 \text{ (лм)}$$

Таким чином, з урахуванням площі обчислювального центру, розміщення робочих столів і поставлених вимог до штучного освітлення визначили, що світильники необхідно розмістити в 2 ряди по 5 світильників.

Роботи, що проводяться, відносяться до розряду середньої точності, 4 розряду, з найменшими розмірами об'єкту розрізнення (0.5..1) мм. Підрозряд зорових робіт при середньому контрасті об'єкту розрізнення з фоном і при середньому фоні. Значення КЕО нормується для третього поясу світлового клімату. Для міста Запоріжжя, розташованого в четвертому поясі світлового клімату, нормоване значення КЕО складає 1,2825.

Вимірювання освітленості проводиться на основній ділянці робочого місця і в декількох точках горизонтальної робочої поверхні. Вимірювання проводять за допомогою люкметрів типу Ю-16, Ю-17. У апаратній освітленість при штучному освітленні рівна 300 лк, при загальному освітленні і 450 лк при комбінованому, що відповідає встановленим СНіП II-4-79 нормам. Необхідні заходи щодо підтримки освітленості в нормі передбачають регулярне очищення засклених отворів і світильників від забруднень, своєчасну заміну ламп, що перегоріли, і контроль напруги в освітлювальній мережі, очищення повітря в приміщенні від пилу, диму і кіптяви.

Норми КЕО встановлені з урахуванням термінів очищення засклених отворів не менше чотирьох разів на рік при значному забрудненні, не менше трьох разів на рік при помірному і не менше двох разів на рік при незначному забрудненні засклених отворів.

Норми освітлення є обов'язковими і встановлюються в залежності від категорії робіт по точності і по розмірам об'єктів, які необхідно розрізняти.

Штучне освітлення буває загальним, місцевим та комбінованим.

Використання тільки місцевого освітлення забороняється.

Норми штучного освітлення становлять 100-1000 люкс для люмінісцентних ламп і в два рази менше для ламп розжарювання.

У вікон сонячної сторони повинні бути пристрої для захисту від прямих сонячних променів.

Скло світлових проміжків і ліхтарів повинні очищуватись від пилу не менш ніж 2 рази на рік, а в приміщеннях зі значним виділенням диму і пилу не менше 4 разів на рік.

Місьцеве освітлення робочої поверхні обладнується так, щоб можна було змінити напрямок освітлення.

Джерела світла, місцевого освітлення і загальні, що нижче 2.5м повинні живитися від напруги не більше 36 В.

6.4 Заходи щодо забезпечення пожежної безпеки

Пожежа в залі представляє особливу небезпеку, оскільки може привести до великих матеріальними втрат. Основною причиною спалаху може бути коротке замикання.

Для відведення тепла від комп'ютера в приміщенні переговорної кімнати постійно діє система кондиціонування. Тому кисень, як окислювач процесів горіння, є в будь-якій точці кімнати.

Протипожежний захист - це комплекс організаційних і технічних заходів, направлених на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами спалаху в кімнаті можуть бути електронні схеми від комп'ютера, стенду, прилади, вживані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, здатні викликати спалах горючих матеріалів. У сучасних комп'ютерах дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, кабелі. При протіканні по ним електричного струму виділяється значна кількість тепла. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відведення надмірного тепла від комп'ютера служать системи вентиляції і кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи є додатковою пожежною небезпекою.

Для виготовлення будівельних конструкцій використовуються, як правило, цеглина, залізобетон, скло, метал і інші матеріали, що не згорають. Застосування дерева обмежено, а у разі використання воно просочується вогнезахисними складами.

На випадок пожежі згідно з ДБН В.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» передбачені шляхи евакуації тих, що працюють - проходи, проїзди, евакуаційні виходи. Евакуаційні виходи розташовуються розосереджено, а їх кількість в будівлі - не менше двох. При кількості тих, що працюють в зміні до 50 чоловік передбачений другий (запасний) вихід на зовнішні сходи. Коридори і проходи, призначені для евакуації, мають можливо

меншу довжину і мінімальну кількість поворотів. На всьому протязі проходу немає порогів або проміжних ступенів. Важливу роль в забезпеченні безпечного виходу людей грає протидимний захист евакуаційних шляхів. У будівлях заввишки до 9 поверхів незадимлюваність сходових кліток на час евакуації досягається їх ізоляцією від підвалів, горищ і поверхів. Для цього влаштовані відособлені входи в підвали, вхід на сходову клітку з поверхів здійснюють через тамбур - шлюз з підпором повітря, відокремлюють горища від сходових кліток перекриттями з негорючих матеріалів. Для гасіння вогню необхідно застосовувати вогнегасники типів вуглекислотний ВВК-1.4 (3.5) або порошковий (ВП-5).

Для виявлення початкової стадії загоряння і сповіщення служби пожежної охорони використовуються системи автоматичної пожежної сигналізації (АПС). Крім того, вони можуть самостійно приводити в дію установки пожежогасінні, коли пожежа ще не досягла великих розмірів. Системи АПС складаються з пожежних сповіщувач, ліній зв'язку і приймальних пультів (станцій). Ефективність застосування систем АПС визначається правильним вибором типу сповіщувача і місць їх установки. При виборі пожежних сповіщувачів враховуються конкретні умови їх експлуатації: особливості приміщення і повітряного середовища, наявність пожежних матеріалів, характер можливого горіння, специфіка технологічного процесу тощо.

У приміщеннях на початку пожежі при горінні різних пластмасових, ізоляційних матеріалів і паперових виробів виділяється значна кількість диму і мало теплоти. Об'єкти будівлі, в якій знаходиться кімната, окрім АПС обладнані установками стаціонарної автоматичної пожежогасінні. Найдоцільніше застосовувати установки газового гасіння пожежі, дія яких заснована на швидкому заповненні приміщення вогнегасною газовою речовиною з різким зниженням вмісту в повітрі кисню.

6.5 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

В процесі функціонування підприємств ймовірні аварійні ситуації (надзвичайні ситуації), які можуть погіршити екологічний стан регіону загалом, змінити рельєф та зруйнувати прилеглу місцевість, призвести до зменшення місцевої популяції тощо. З метою забезпечення безпеки працюючих і збереження навколишнього середовища прогноуються можливі аварії та розробляються відповідні плани щодо мінімізації впливу аварії та її ліквідації.

Усі надзвичайні ситуації (НС) розділяють на дві групи: природні, та техногенні. Так до природних відносять ті НС, які трапляються внаслідок стихійних лих, та природних сил (землетрус, цунамі, повінь, урагани тощо), а до техногенних відносять НС ситуації, що можливі внаслідок взаємодії об'єктів у техносфері (викид радіації, небезпечних хімічних речовин, поширення вірусів за межі лабораторій, вибухи і пожежі на підприємствах, транспортні аварії тощо).

Для захисту населення від небезпечної та шкідливої дії при виникненні НС, використовують завчасно підготовлені захисні споруди цивільного захисту.

Захисні споруди цивільного захисту – інженерні споруди, призначені для захисту населення від впливу небезпечних факторів, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів (сховища, протирадіаційні укриття, швидкоспоруджені захисні споруди тощо).

Засоби індивідуального захисту відіграють важливу роль в системі профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці і зменшення професійних захворювань. Однією зі складових безпечних умов праці є використання працівниками засобів індивідуального захисту (далі – ЗІЗ).

Відповідно до статті 28 Закону України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992р. № 2694-ХІІ, пункту 8 Положення про Міністерство соціальної

політики України, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 червня 2015 року № 423, затверджені наказом Міністерства соціальної політики України 29 листопада 2018 року № 1804 «Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці» (далі – Мінімальні вимоги) (НПАОП 0.00-7.17-18).

Засоби індивідуального – це засоби, які призначені для носіння і використання працівником з метою індивідуального захисту від одного або більше ризиків, які могли б становити загрозу безпеці та здоров'ю на роботі, а також будь-які пристосування, аксесуари чи змінні компоненти, призначені для цієї мети.

ЗІЗ слід використовувати у разі неможливості уникнути або в достатній мірі обмежити ризики для життя та здоров'я працівників технічними засобами колективного захисту або заходами, методами чи правилами організації роботи. Використовують ЗІЗ виключно за призначенням згідно з інструкціями з експлуатації, які мають бути зрозумілими для працівників.

Відповідно до вимог пункту 4 розділу II Мінімальних вимог працівникам, професії та посади яких передбачені в Нормам безоплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 16 квітня 2009 року № 62, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 12 травня 2009 року за № 424/16440 (далі - Норми безоплатної видачі ЗІЗ), працівникам загальних професій різних галузей промисловості ЗІЗ видаються незалежно від виду економічної діяльності підприємства, за винятком випадків, коли ці професії та посади передбачені у відповідних Нормам безоплатної видачі ЗІЗ з урахуванням специфічних умов праці.

Згідно із статтею 8 Закону України «Про охорону праці» на роботах із шкідливими і небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими метеорологічними умовами, працівникам видаються безоплатно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші ЗІЗ, а також мийні та знешкоджувальні засоби.

Під час обрання ЗІЗ мають:

- відповідати ступеню існуючих ризиків для життя та здоров'я працівників та не призводити до будь-якого збільшення рівня цього ризику;
- відповідати існуючим на робочому місці умовам;
- підходити користувачеві після необхідного регулювання;
- бути сумісними та ефективними проти існуючого ризику (ризиків).

Перед вибором ЗІЗ, понад встановлені норми, роботодавець повинен провести оцінку відповідності ЗІЗ, які він планує використовувати (видавати).

Оцінка має включати:

- аналіз та оцінку ризиків для життя та здоров'я працівників, яких не можна уникнути за допомогою інших засобів;
- визначення характеристик, які повинен мати ЗІЗ для ефективного захисту життя та здоров'я працівників від вже визначених ризиків, беручи до уваги будь-які ризики, які може створити сам ЗІЗ;
- порівняння характеристик ЗІЗ, наявних у суб'єкта господарювання, з характеристиками, визначеними під час цієї оцінки.

Роботодавець зобов'язаний:

- поінформувати працівника про ризики для його життя та здоров'я, від яких його захищатиме користування цим ЗІЗ;
- завчасно інформувати працівників, про всі заходи, що мають бути вжиті для забезпечення безпеки і здоров'я працівників під час використання ЗІЗ на робочих місцях;

- забезпечити регулярне навчання працівників правилам користування ЗІЗ та демонстрацію їх правильного застосування;

- забезпечити приймання і перевірку ЗІЗ, що надходять на підприємство, на їх відповідність вимогам нормативних документів, для чого створює комісію з представників адміністрації, профспілкової організації підприємства (уповноваженої найманими працівниками особи з питань охорони праці, якщо профспілка на підприємстві не створювалась);

- у разі невідповідності ЗІЗ вимогам нормативних документів, вжити заходів з повернення або заміни неякісних ЗІЗ відповідно до вимог чинного законодавства та укладеного з постачальником договору;

- проводити консультації з працівниками, а також надавати їм можливість брати участь в обговореннях усіх питань, що пов'язані із забезпеченням їх безпеки і здоров'я під час використання ЗІЗ на робочих місцях;

- забезпечити відповідно до інструкції з експлуатації періодичне випробовування та перевірку придатності ЗІЗ, а також своєчасну заміну їх компонентів, вузлів або інших частин, якщо їх захисні властивості погіршились або якщо вони певний час не використовувались. Після перевірки на ЗІЗ слід поставити відмітку (клеймо, штамп) про термін наступного випробування;

- організувати на підприємстві належний облік і контроль за видачею у встановлені строки ЗІЗ працівникам і повернення ними ЗІЗ.

Придбані ЗІЗ є власністю роботодавця, обліковуються як інвентар і підлягають обов'язковому поверненню працівниками у разі:

- звільнення з підприємства;
- переведення на тому самому підприємстві на іншу роботу або інше робоче місце;
- зміни виду робіт;
- введення нових технологій;

- введення нових або заміни наявних знарядь праці та в інших випадках, коли використання виданих ЗІЗ не є необхідним;

- закінчення строків їх використання замість одержуваних нових ЗІЗ.

Роботодавець не повинен допускати до роботи працівників без необхідних ЗІЗ, а також якщо ЗІЗ знаходяться в забрудненому, несправному стані або з простроченими строками періодичних випробувань, що проводяться відповідно до інструкцій з їх експлуатації.

Співробітники зобов'язані повідомляти роботодавця про будь-які недоліки стосовно використання ЗІЗ за призначенням.

Нехтування ЗІЗ під час виконання робіт може призвести до важких травмувань та навіть смертельних наслідків. З метою усунення нещасних випадків та професійних захворювань роботодавцям та керівникам підприємств необхідно посилити контроль за застосуванням ЗІЗ підлеглими працівниками.

ВИСНОВКИ

В роботі проведено систематизацію та аналіз існуючих методів виміру діелектричної проникності матеріалів. Встановлено, що вибір найбільш відповідного методу вимірювання діелектричної проникності визначається багатьма факторами, такими як точність, зручність, форма та вид матеріалу.

Для вибору оптимального методу слід виходити з наступних рекомендацій.

Резонансні методи слід використовувати у випадку:

- високоімпедансне середовище;
- можливість виконання достовірних вимірів на малих зразках;
- вимірювання лише на одній або на кількох частотах;
- придатні для матеріалів із малими втратами.

Широкополосні методи слід використовувати у випадку:

- середовище з малим імпедансом;
- для виконання достовірних вимірювань потрібні зразки більшого розміру;
- вимірювання на "будь-якій" частоті.

На базі резонансного метода побудовано математичну модель прохідного резонатора з міцним зв'язком, що дозволяє визначати діелектричну проникність крові, а саме виведені математичні залежності, що пов'язують величину потужності, що поглинається діелектриком з величиною діелектричної проникності.

Показано, що за значенням діелектричної проникності крові можна проводити діагностику хвороб різного типу.

Запропонована в роботі математична модель може застосовуватись для виробництва вимірювальних НВЧ пристроїв.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Khunti. K., Davies. M., Majeed, A., Thorsted, B.L., Wolden, M.L., Paul, S.K. (2015). Hypoglycemia and risk of cardiovascular disease and all-cause mortality in insulin-treated people with type 1 and type 2 diabetes: a cohort study. *Diabetes Care*. 38(2), 316–322. <https://doi.org/10.2337/dc14-0920>
2. Nathan, D. M., Bebu, I., Braffett, B. H. et al. (2016). The Diabetes Control and Complications Trial/Epidemiology of Diabetes Interventions and Complications Research Group. Risk factors for cardiovascular disease in type 1 diabetes. *Diabetes*. 65(5):1370–1379. doi: 10.2337/db15-1517.
3. T. Tajima, Y. Okabe, Y. Tanaka, and M. Seyama, "Linearization technique for dual-wavelength CW photoacoustic detection of glucose" *IEEE Sensors J.*, vol. 17, no. 16, pp. 5079-5086, Aug. 2017.
4. A.A Oloyo, and Z. Hu, "A highly sensitive microwave resonator for non-invasive blood glucose level detection", in proceedings of 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2018, London, UK.
5. K.K. Adhikari, and N.Y. Kim, "Ultrahigh-sensitivity mediator-free biosensor based on a microfabricated microwave resonator for the detection of micromolar glucose concentrations", *IEEE Trans. Microw. Theory Techniques*, vol. 64, no. 1, pp. 319–327, Jan. 2016.
6. K.K. Adhikari, Z. Chuluunbaatar, H. Park, Y. Jung, G. Cho, Y.H. Jo, S.S. Kim, and N.Y. Kim, "Flexible screen printed biosensor with highQ microwave resonator for rapid and sensitive detection of glucose", in proceedings of IEEE MTT-

S Int. Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio), Dec. 2014, London, UK.

7. C. Jang, J.K. Park, H.J. Lee, G.H. Yun, and J.G. Yook, "Temperaturecorrected fluidic glucose sensor based on microwave resonator", *Sensors*, vol. 18, no. 11, Nov. 2018.

8. H.C. Garcia, I. Gouzouasis, I. Sotiriou, S. Saha, G. Palikaras, P. Kosmas, E. Kallos, "Reflection and transmission measurements using 60 GHz patch antennas in the presence of animal tissue for noninvasive glucose sensing", in proceedings of 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Apr. 2016, Davos, Switzerland.

9. B. Camli, E. Kusakci, B. Lafci, S. Salman, H. Torun, and A.D. Yalcinkaya, "Cost-effective, microstrip antenna driven ring resonator microwave biosensor for biospecific detection of glucose", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 2, Mar. 2017.

10. Keysight. Основы измерения диэлектрических свойств материалов / Рекомендации по применению / 2015. – 34с.

11. Е. А. Архипова, П. С. Красов и А. И. Фисун, —Применение модифицированного волноводного сенсора для изучения диэлектрических характеристик эритроцитов пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией до и после лечения», *Біофізичний вісник*, 2011. – вип. 27 (2). – с. 93-102.

12. Dielectric inspection of erythrocyte morphology / Ikuya Oshige, Yoichi Katsumoto, Shinji Omori [et al] // *Phys. Med. Biol.* – 2008. – Vol. 53. – P. 2553-2564.

13. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Физматгиз, 1963. - 404с.
14. Диэлектрические резонаторы. / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятышев, Л.Г. Гасанов и др. / Под ред. М.Е. Ильченко. - М.: Радио и связь, 1989. - 328с.
15. Патент України №59568А, МКИ7 G01R27/26, 2003
16. D. Bruen, C. Delaney, L. Florea, and D. Diamond, "Glucose sensing for diabetes monitoring: recent developments", Sensors, vol. 17, no. 8, Aug. 2017.
17. Спосіб вимірювання глюкози у крові. пат. 107833 Україна. С2 В.В. Дем'яненко зі співавт. – а 2012 13666. заявл. 29.11.2012, опубл. 25.02.2015, 25.02.2015, Бюл. № 4. – 8с.