

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

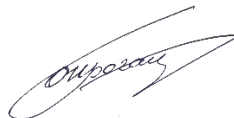
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

## ДИПЛОМНА РОБОТА

бакалавра

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОХВИЛЬОВИХ МЕТОДІВ ВІДБИТТЯ

Завідувач кафедри, д-р. т.н., проф.



О. І. Богатов

Нормоконтролер, к.т.н., доцент



М. В. Москаленко

Керівник, к.т.н., доцент



Д. Є. Петрукович

Студент гр. ММ-41-19



В. В. Костін

Харків – 2023

## Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Факультет механічний  
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності  
Освітній рівень бакалавр  
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»  
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**  
**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ О. І. Богатов  
«02» 04 \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Костіну Володимирі Володимировичу

1. Тема роботи: «Визначення похибки вимірювання рівня рідини з використанням радіохвильових методів відбиття».  
Керівник роботи Петрукович Дмитро Євгенович, канд. техн. наук, доцент  
Затверджені наказом по вищому навчальному закладу від "31" березня 2023 року протокол № 31.
2. Строк подання студентом роботи 01.06.2023 р.
3. Вхідні дані до роботи: робочий діапазон засобу контролю рівня рідин - НВЧ; робоча рідина - рідина, яка проводить струм; модуляція випромінювання, яка зондує рідину - амплітудно-імпульсна.
4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1. Аналіз сучасного стану методів і засобів контролю рівня рідин; 2. Особливості розповсюдження радіоімпульсних сигналів в середовищах, які проводять струм; 3. Розрахунок похибки радіохвильових рівнемірів при вимірюванні рівня рідини, яка проводить струм; 4. Охорона праці при вимірюваннях параметрів вологості для контролю якості щебня та піску.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Не передбачено
6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Канд. техн. наук, доц. Богатов О. І.	15.03.2023	15.03.2023

7. Дата видачі завдання 2 квітня 2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення літератури.	15 березня 2023 р.	виконано
2.	Аналіз сучасного стану методів і засобів рівня контролю рівня рідин	15 квітня 2023 р.	виконано
3.	Особливості розповсюдження радіоімпульсних сигналів в середовищах, які проводять струм	20 травня 2023 р.	виконано
4.	Розрахунок похибки радіохвильових рівнемірів при вимірюванні рівня струмопровідної рідини	29 травня 2023 р.	виконано
5.	Формулювання висновків.	03 червня 2023 р.	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки.	05 червня 2023 р.	виконано
8.	Подання роботи керівнику.	08 червня 2023 р.	виконано
	Подання роботи на рецензію.	10 червня 2023 р.	виконано

Студент гр. ММ-41-19

Костін В. В.

Керівник роботи

Петрукович Д. Є.

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 71 с., 32 рис., 6 табл., 4 додатка, 19 джерел

ВІДЕОІМПУЛЬС, ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ, ПОХИБКА, РАДАРНИЙ  
ВИМІРЮВАЧ РІВНЯ, РАДАРНИЙ МЕТОД, РАДІОСИГНАЛ, СПЕКТР

Об'єкт досліджень – процес утворення похибки радіохвильового рівнеміра при вимірюванні рівня провідних рідин.

Мета роботи – розробка математичної моделі похибки рівня рідин, які проводять струм радіоімпульсним методом.

Методи дослідження – методи еквівалентних дзеркальних відображень.

Проаналізовано визначення існуючих методів вимірювання та засобів контролю рівня рідини в ємностях. Доведено, що до основних безконтактних методів відноситься радіохвильовий. Встановлено, що рівнеміри рівня рідини працюють у частотному діапазоні від 5 ГГц до 25 ГГц з широким діапазоном вимірювання (до 50 м) та малою похибкою вимірювання (до  $\pm 0,15\%$ ).

Показано, що сучасні радарні датчики вимірювання рідини мають низку недоліків і вимагають подальшого вдосконалення. До основних з них відноситься наявність реперного пристрою, що приводить до створення зони нечутливості, котра досягає до 0,6 м, діапазон вимірювання складає від 6 м до 25 м. Показано також, що фізичні процеси, які протікають при вимірюванні радарним методом проводять і не проводять рідин, відрізняються один від одного. Це призводить до появи неврахованої раніше похибки вимірювань рівня провідних рідин.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Аналіз сучасного стану методів і засобів контролю рівня рідин.....	8
1.1 Методи та засоби контролю рівня рідин.....	8
1.2 Аналіз радіохвильового методу і засобів контролю рівня рідини.....	13
2 Особливості розповсюдження радіоімпульсних сигналів в середовищах, які проводять струм.....	19
2.1 Електропровідність рідких речовин та їх електрофізичні властивості.	19
2.2 Аналіз методів розрахунку характеристик радіоімпульсних сигналів в струмопровідних середовищах.....	24
3 Розрахунок похибки радіохвильових рівнемірів при вимірюванні рівня рідини, яка проводить струм.....	30
3.1 Обґрунтування місця розташування ефективної відбиваючої поверхні рідин.....	30
3.2 Визначення часу затримки радіоімпульсу в рідинах.....	39
4 Охорона праці при проведенні вимірювань рівня рідини з використанням радіохвильових методів .....	54
Висновки.....	59
Перелік посилань.....	60
Додаток А Програма розрахунку шляху проходження хвилі в струмопровідній рідині .....	62
Додаток Б Програма для визначення неврахованої товщини шару відбиваючої поверхні та часу проходження сигналу .....	65
Додаток В Програма розрахунку спектру вимірювального сигналу при різних несучих частот.....	68
Додаток Г Ілюстративний матеріал до дипломної роботи.....	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І  
ТЕРМІНІВ

БЧМВ – безперервне частотно-модульоване випромінювання;

ВЧ – високочастотний;

ДРР – датчик реле-рівня;

ЕМП – електромагнітне поле;

ЕМХ – електромагнітні хвилі;

ЕСІ – електричний струмовий імпульс;

ЗВ – засіб вимірювання;

НЧ – низькочастотний;

НШС – надширокосмуговий;

ОПФ – одномірне перетворення Фур'є;

См – сіменс;

СЧ – середньо - частотний сигнал;

ТО – технічний об'єкт;

УЗВ – ультразвуковий випромінювач;

ФСР – функція спектральної щільності;

ЧІМ – частотно - імпульсна модуляція;

## ВСТУП

В даний час системи автоматичного управління виробничими процесами, системи вимірювання та контролю різних параметрів і системи автоматичного збору даних набувають все більшого значення. Щорічний приріст ринку засобів автоматизації технологічних процесів становить 4,3 % на рік.

Рівень відноситься до одних з основних параметрів, який підлягає контролю у різноманітних технологічних процесах хімічних, нафтопереробних та інших виробництв, а також складських і госпрозрахункових ємностях. Засоби контролю рівня представляються частиною систем автоматизації виробництва, якість яких в значній мірі визначає ефективність цих систем.

Примітно, що частіше доводиться вимірювати рівень рідких матеріалів: 82% випадків застосування, а інші 18 % приходяться на сипучі матеріали; при цьому в останні роки швидкими темпами збільшується доля використання методів вимірювання проходження сигналів направленої мікрохвильового випромінювання).

Засоби вимірювання рівня рідини застосовуються у всіх галузях промисловості і сільського господарства для вимірювання, контролю та регулювання параметрів технологічних процесів, випробуваннях машин, обладнання та різної апаратури, при кількісному обліку.

Незважаючи на велику кількість методів вимірювання цих параметрів, потреба у високоточних датчиках надзвичайно велика і, очевидно, буде зростати в міру розвитку виробництва. Підвищення точності і забезпечення єдності вимірювань відноситься до числа актуальних завдань метрології. Одночасно, високоточне вимірювання цих параметрів необхідно для економічної звітності та економії ресурсів.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИН

## 1.1 Методи та засоби контролю рівня рідин

Основною вимогою, яка висувається до того чи іншого методу контролю та вимірювання рівня рідини, є його точність і вірогідність [1]. Засоби контролю повинні бути нечутливими до впливу зовнішніх факторів.

Існує велика кількість методів вимірювання рівня рідин. Вимірювання рівня відбувається як у відкритих резервуарах, так і в ємностях, які знаходяться під тиском [2].

Рівнем називають висоту заповнення технологічного апарата робочим середовищем – рідиною або сипучим тілом і вимірюють в одиницях довжини, а рівнемір – це прилад для вимірювання або контролю рівня рідини і сипучих речовин.

Шляхом вимірювання рівня можна одержувати інформацію про масу рідини в резервуарах. Подібна інформація широко використовується для керування виробничим процесом.

Широке розповсюдження отримали засоби рівня рідини, які відносяться до контактних методів контролю рівня. До основної групи засобів контролю рівня рідини відносяться наступні методи [3]:

- візуальний,
- поплавковий,
- буйковий,
- гідростатичний,
- електричний,
- метод електромагнітного випромінювання,
- ультразвуковий і магнітострикційний.

Класифікація методів контролю рівня рідин зображена на рисунку 1.1.



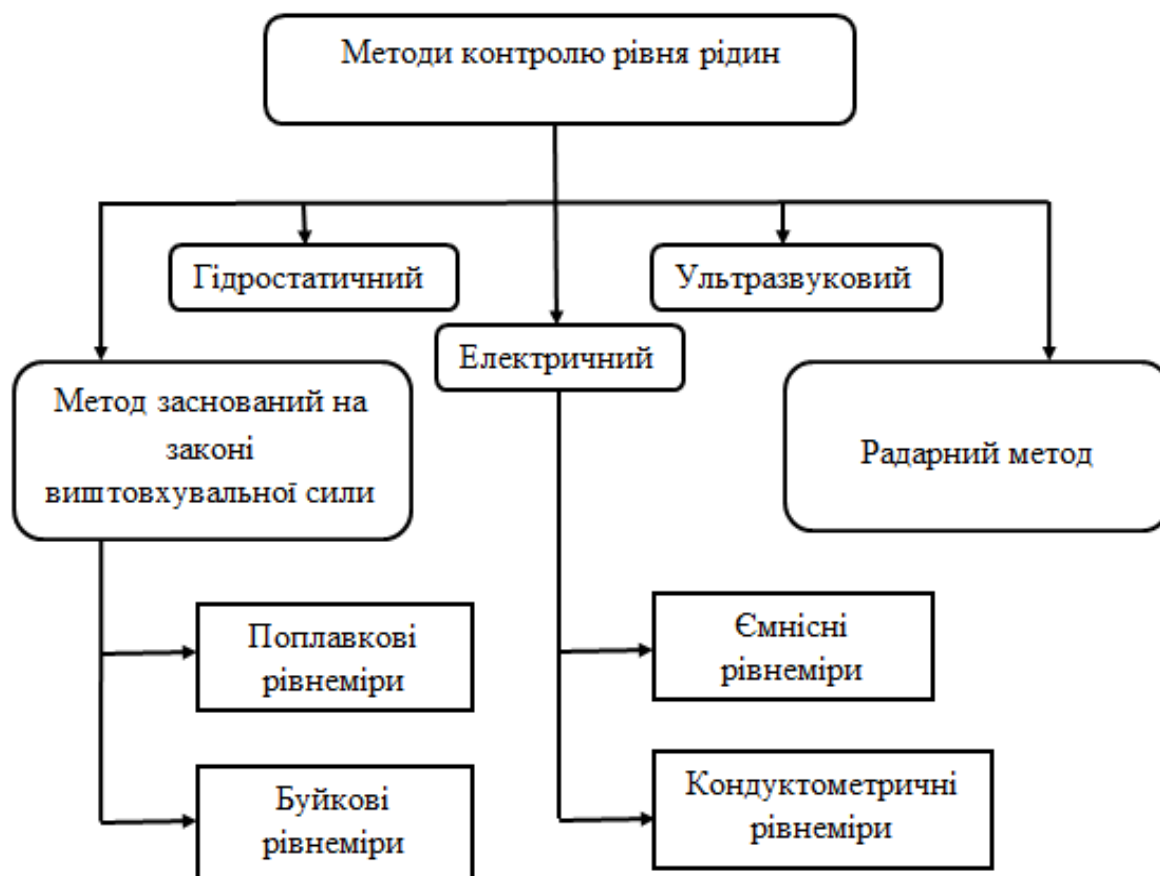


Рисунок 1.1 – Класифікація методів контролю рівня рідин

Візуальний метод заснований на візуальному контролі границі розділу двох рідин з різними фізико - хімічними властивостями, наприклад, вода-бензин, вода-мастило тощо [3, 4].

На практиці широке використання отримали скляні засоби контролю рівня рідини, які засновані на законі сполучених посудин.

Через низьку механічну міцність скляні засоби контролю рівня рідини мають довжину не більшу 0,5 м. Абсолютна похибка скляних засобів контролю з оптичними пристроями дорівнює 0,5 мм.

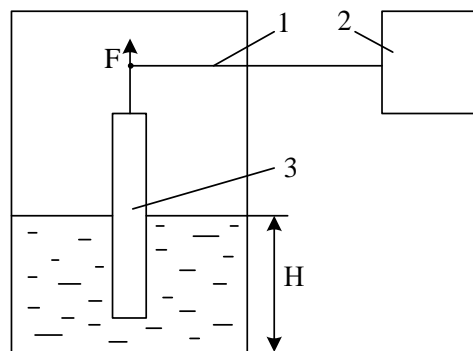
Поплавковий і буйковий методи. В основу їх роботи покладено закон Архімеда. Рівнеміри рідини, у яких використовується поплавок, розділяються на засоби з поплавком постійного та змінного занурення [3,5].

При розрахунках поплавоків рівнемірів підбирають такі конструктивні параметри поплавка, котрі б забезпечували стан рівноваги системи тільки при

певній глибині занурення поплавка. При зміні рівня рідини змінюється глибина занурення поплавка, яка викликає зменшення або збільшення дії сили Архімеда.

До суттєвих недоліків поплавкових рівнемірів рідини відноситься неможливість їх використання в апаратах, які працюють при високих тисках.

У буйкових рівнемірах (рисунок 1.3) застосовується нерухомий занурений у рідину буй 3. Принцип дії буйкових рівнемірів базується на тому, що на занурений буй діє з боку рідини виштовхувальна сила  $F$ . За законом Архімеда ця сила дорівнює вазі рідини, витиснутої буйком. Але, як очевидно з рисунку 1.2, кількість витиснутої рідини залежить від глибини занурення буя, тобто від рівня в ємності  $H$ . Тому залежність виштовхувальної сили від рівня, який вимірюється, лінійна [3,5].



1 – важіль; 2 – проміжний перетворювач сили в уніфікований сигнал; 3 – буй

Рисунок 1.2 – Буйковий рівнемір

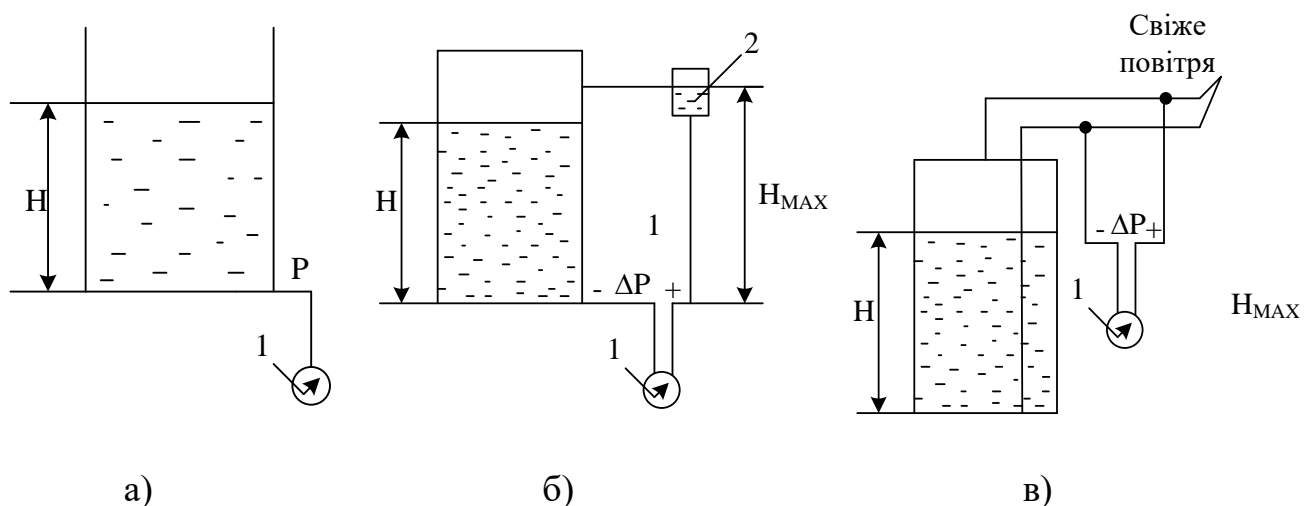
Буйкові рівнеміри рідини знайшли широке використання в герметичних апаратах та апаратах під тиском.

Рівнеміри можуть використовуватися для вимірювання рівня рідини з температурою від мінус 198 °С до 427 °С. Абсолютна похибка вимірювання при нормальних умовах експлуатації не перевищує 5 мм.

Гідростатичний метод заснований на зміні гідростатичного тиску рідини. Тиск рідини в апаратах контролюється або манометром (якщо тиск в апараті рівний атмосферному) або дифманометром якщо апарат знаходиться під тиском [6].

Гідростатичний метод вимірювання рівня базується на тому, що в рідині існує гідростатичний тиск, пропорційний глибині, тобто відстані від поверхні рідини. Тому для вимірювання рівня гідростатичним методом можуть бути використані прилади для вимірювання тиску або перепаду тисків.

Якщо рідина в ємності знаходиться під надлишковим тиском, то дифманометр 1 включають за схемою, приведеною на рисунку 1.3, б, причому його плюсову камеру з'єднують із простором над рідиною через порівнювальну посудину 2. Цю посудину заповнюють рідиною, стовп якої створює постійний гідростатичний тиск у плюсовій камері дифманометра [7, 8].



а – у відкритій ємності; б – у ємності під тиском; в – для суспензій;

1 – дифманометр; 2 – зрівняльна судина

Рисунок 1.3 – Вимірювання рівня дифманометрами

До недоліків таких рівнемірів слід віднести залежність похибки вимірювання від густини рідини, здатності речовин осідати на чутливий елемент та залежність їх від тиску в апараті.

Електричні методи засновані на залежності електричної ємності давача від рівня рідини [7, 8].

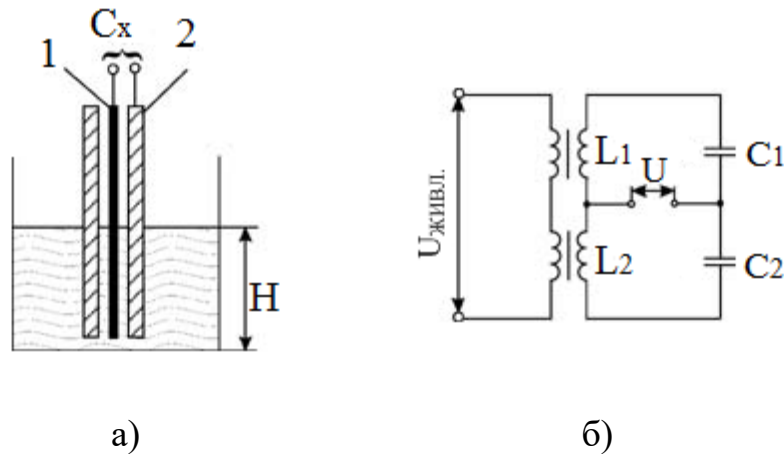
Для неелектропровідних рідин з електропровідністю до  $10^{-6}$  См/см застосовують рівнеміри, чутливий елемент котрих складається з двох коаксіально розміщених електродів, які частково занурені в рідину.

Електроди створюють циліндричний конденсатор, між електродний простір якого до висоти заповнений рідиною, а простір – парогазовою сумішшю.

Кондуктометричні рівнеміри використовуються в ролі сигналізаторів рівня електропровідних рідин з питомою провідністю більшою  $10^{-3}$  См/м.

Електрична схема ємнісного рівнеміра приведена на рисунку 1.4 б.

Вимірювання електричної ємності первинного перетворювача  $C_x$  зображений не зрівноваженим мостом змінного струму, плечами якого є індуктивності  $L_1$  і  $L_2$  і ємність первинного перетворювача  $C_x$ . При зміні рівня змінюється ємність, що призводить до зміни вихідної напруги моста. Похибка вимірювання не перевищує 3 мм.



а – будова датчика; б – електрична схема рівнеміра

Рисунок 1.4 – Ємнісний рівнемір

Метод направленої електромагнітної випромінювання (радіохвильовий метод) заснований на рефлектометрії з часовим розділенням [9, 10]. В основі методу лежить вимірювання коефіцієнта відображення через сполучення прямого і відбитого випробувального сигналу. Метод використовує випромінювання надпровідних імпульсів, що проникають до дна резервуара і заповнюється його речовиною.

Згідно з цим методом вимірюється коефіцієнт відбиття електромагнітної випромінювання методом суміщення прямого та відбитого випробувальних

сигналів і визначається час проходження випроміненого імпульсу до поверхні рідини. Похибка вимірювання складає 5 мм для діапазону вимірювання до 5 м і 0,1 % для зондів більше 5 м.

До недоліків слід віднести вплив налипання або забруднення зонду на точність вимірювання в'язких або липких середовищ.

Суттєвим недоліком радарних рівнемірів є висока ціна, використання складної мікроелектронної апаратури та складного програмного забезпечення, необхідного для фільтрації сигналу. Рівнеміри рівня рідини працюють у частотному діапазоні від 5 ГГц до 25 ГГц.

Магнітострикційний метод вимірювання рівня рідин заснований на взаємодії зовнішнього магнітного поля з електромагнітним полем (ЕМП), яке створюється в результаті переміщення електричного струмового імпульсу (ЕСІ) вздовж хвилеводу [9].

До основних недоліків слід віднести велику залежність від зміни температури, магнітного поля постійного магніту та ЕСІ, фізичних параметрів хвилеводу, а також зміни натягу хвилеводу.

Ультразвуковий метод вимірювання рівня рідини заснований на визначенні часу проходження ультразвуковим імпульсом (УЗІ) відстані від ультразвукового випромінювача (УЗВ) до поверхні рідини. Цей метод простіший в реалізації за інші безконтактні.

Ультразвукові засоби вимірювання рівня рідини (далі рівнеміри) мають достатньо високу точність і діапазон вимірювання (від 10 м до 20 м) [6].

До недоліків слід віднести залежність вимірювання рівня від параметрів газу, наявність зони нечутливості, вплив внутрішніх конструктивних елементів апаратів на точність вимірювання.

## 1.2 Аналіз радіохвильового методу і засобів контролю рівня рідини

Перспективним методом вимірювання рівня рідини є радіохвильовий метод. Радіохвильовими (радарними) називаються рівнеміри, засновані на

залежності параметрів коливань електромагнітних хвиль від висоти рівня рідини [1, 11].

До радіохвильових методів належать радіолокаційний, радіоінтерфераційний і резонансний. Робота радіолокаційних (радарних) рівнемірів заснована на явищі відображення електромагнітних хвиль від кордону розділу середовищ, що розрізняються електричними і магнітними властивостями.

Швидкість поширення електромагнітної хвилі в середовищі визначається значеннями її діелектричної та магнітної проникності. Рівень товщини проходження шару між рідиною визначається виміром тимчасового інтервалу між моментом посилки сигналу випромінювачем і приходом відбитого сигналу на приймач. Зазвичай локація ведеться через газове середовище над рідиною.

Недоліком таких рівнемірів є важкість точного вимірювання малих інтервалів часу. Вони чутливі до знаходження в зоні випромінювання сторонніх предметів, наприклад металевих стінок ємностей.

В принципі локація може здійснюватися і через рідину, якщо вона неелектропровідна. Існують схеми радіолокаційних (радарних) рівнемірів, в яких локація здійснюється через стінку робочої ємності.

Радарні рівнеміри також підрозділяються на безконтактні та контактні для визначення рівнів рідких і розчинних речовин, які використовують радарну технологію, засновану на розповсюдженні безперервного частотно-модульованого випромінювання (БЧМВ) мікрорівневого діапазону.

Розглянемо безконтактні радарні вимірювачі рівня. Вимірювачі використовують радарну технологію, основану на розповсюдженні БЧМВ мікрорівневого діапазону [9, 10].

Сигнал радара (рисунок 1.5) посилається від датчика до поверхні середовища і відображається назад на приймач вимірювального приладу. Приймач оцінює різницю фаз між посланим і прийнятим сигналами. Радарні вимірювачі видають аналоговий вихідний сигнал від 4 мА до 20 мА. Частота

24 ГГц і сучасна електроніка дозволяють радарним датчикам використовувати невелику антенну і отримати вузьку пучку випромінювання.

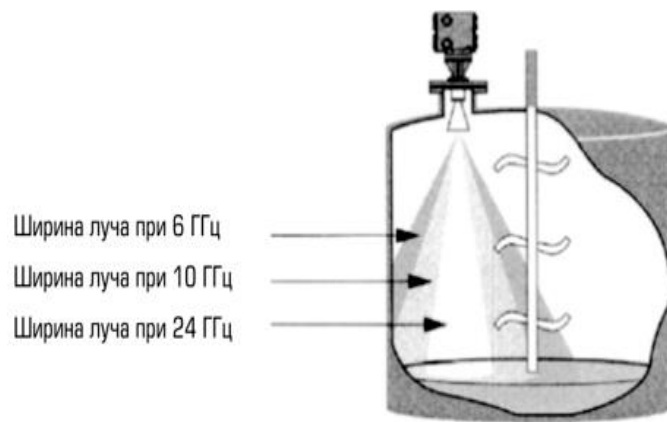


Рисунок 1.5 – Радарний безконтактний рівнемір

Радарна технологія випромінювання через повітря (мікрохвильові безконтактні датчики) базується на аналогічних принципах вимірювань, але помилкові сигнали були і залишаються для неї істотною проблемою.

Головною причиною виникнення помилкових відображень є випромінювання радарних сигналів у розширеному конусі, тобто з відносно широкою діаграмою спрямованості.

Розглянемо контактні радарні вимірювачі рівня. В основі методу лежить вимірювання коефіцієнта відображення через сполучення прямого і відбитого випробувального сигналу.

Радіохвильовий датчик призначений для вимірювання рівня і рівня поверхні розділів рідин, твердих розчинних середовищ [7].

Згідно з цим методом вимірюється коефіцієнт відбиття електромагнітного випромінювання методом суміщення прямого та відбитого випробувальних сигналів і визначається час проходження випроміненого імпульсу до поверхні рідини. Мікрохвильові радіоімпульси малої потужності направляються вниз уздовж зонду, який занурений у рідину. Коли цей імпульс досягає поверхні рідини, то мікрохвильовий імпульс відбивається у зворотному напрямку.

Відстань до контрольованої поверхні пропорційна інтервалу часу між моментом випромінювання імпульсу та моментом приймання відгуку-сигналу.

Фірмою Rosemount розроблені хвильові радарні рівнеміри рідини та засоби контролю поверхні розділу двох рідин серії 3300 [12]. Ці рівнеміри є найточнішими та будуть використовуватися в дипломній роботі.

Хвильова технологія має ряд переваг порівняно з іншими методами вимірювання рівня, оскільки радіоімпульси практично неприйнятні до складу середовища, атмосферу резервуара, температури та напору. Оскільки радіоприймачі направляються по промені, а не вільно розповсюджуються в просторі резервуара, то хвильова технологія може успішно застосовуватися для малих і вузьких резервуарів, а також для резервуарів з вузькими горловинами [7, 13].

Принцип вимірювання за цим методом показано на рисунку 1.6.

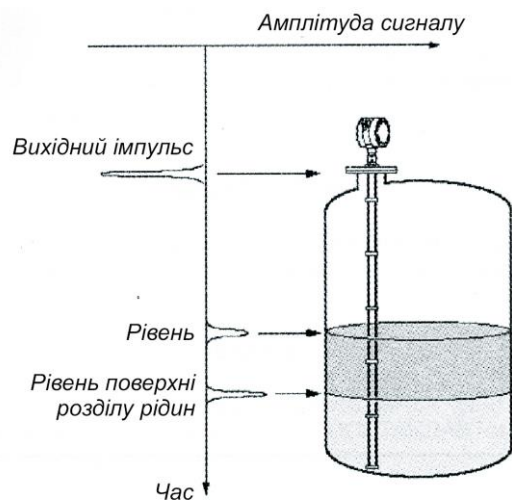


Рисунок 1.6 – Принцип вимірювання методом спрямованого електромагнітного випромінювання

Цей метод вимірювання є нечутливим до зміни температури, тиску газу, густини, в'язкості, присутності пари та інших впливових параметрів. Для рефлектометричних рівнемірів характерною є зона нечутливості, котра досягає



до 0,6 м, діапазон вимірювання складає від 6 м до 25 м. Можуть використовуватися для вимірювання рівня рідин від мінус 40 °С до 150 °С.

Радіохвильові вимірювачі Rosemount серії 3300 – це інтелектуальні прилади, побудовані на основі хвильової технології та забезпечують безперервне надійне вимірювання рівня рідини та зважування в складних умовах експлуатації.

Конструкція рівнеміра Rosemount серії 3300, зображена на рисунку 1.7.

Рівнеміри 3300 складаються з блоку електроніки, приєднання до резервуару і зонда. Приєднання до резервуару і зонд є єдиними деталями, які контактують з атмосферою резервуара. Корпус виконаний з алюмінієвого сплаву з покриттям з поліуретану або нержавіючої сталі і має два окремих відсіку для роздільного розташування блоку електроніки і клемного блоку [12].

При такій компоновці підвищується надійність рівнеміра при експлуатації і забезпечується простий доступ до клем при підключенні. Корпус обертається на 360° навколо своєї осі і може від'єднуватися від зонда при проведенні сервісних робіт, при цьому герметичність резервуара порушиться. Між корпусом і зондом відсутні будь-які механічні з'єднання.

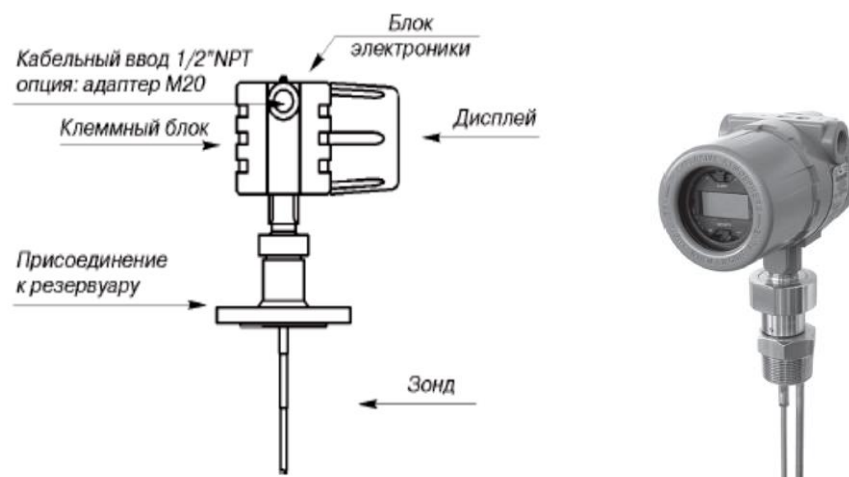


Рисунок 1.7 - Конструкція рівнеміра Rosemount серії 3300

У корпусі є два отвори для підведення кабелю, стандартно серія 3300 поставляється з 1/2 «NPT кабельним вводом, а також адаптером M 20.

Переваги радіохвильового регулятора Rosemount серії 3300:

- точність вимірювань не залежить від діелектричної проникності, щільності, температури, тиску і рН;
- підходять для вимірювання рівнів розпушуючих речовин (гранули, порошки);
- простота установки;
- можливе використання існуючих конструктивних пристосувань від датчика;
- можливість одночасного виміру рівня зовнішньої поверхні та поверхні розділу двох рідин;
- можливість вимірювання в високотемпературних процесах, процесах з високим тиском і високо агресивними середовищами;
- надійність вимірів в умовах високої турбулентності або вібрацій, забруднення.

Радіохвильові вимірювачі Rosemount серії 3300 – вимірювання рівня і рівня границь розділу середовищ в режимі реального часу [19]. Підвищення безпеки і зниження витрат за рахунок автоматизації вимірювань рівня.

Таким чином, в даному розділі виконано аналіз існуючих методів вимірювання та засобів контролю рівня рідини в ємностях. Показано їх позитивні властивості та основні недоліки.

Доведено, що до найбільш використовуваних контактних методів відносяться буйкові та гідростатичні методи вимірювання рівня рідини. До основних безконтактних методів відноситься радіохвильовий, який заснований на технології *time domain reflectometry* – рефлектометрії з часовим розділенням.

Показано, що сучасні радарні датчики вимірювання рідини мають низку недоліків і вимагають подальшого вдосконалення.

## 2 ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ В СЕРЕДОВИЩАХ, ЯКІ ПРОВОДЯТЬ СТРУМ

### 2.1 Електропровідність рідких речовин та їх електрофізичні властивості

Велика кількість рідин дуже погано проводять електричний струм. Але кислоти, лужні та водні розчини солей навпроти добре проводять струм [15].

Електропровідність - здатність речовин проводити електричний струм під дією зовнішнього електричного поля. Виділення на електродах складових частин рідини, називається електролізом, а провідники, в яких це спостерігається, називаються електролітами.

Умовно всі речовини, розчинені в рідині і частково дисоційовані на іони, поділяються на два типи: сильні електроліти і слабкі.

Сильні електроліти – речовини, повністю дисоційовані на іони. Це солі типу NaCl, сильні кислоти типу HCl.

Слабкі електроліти – малодисоціюючі речовини, тобто вони розчиняються у вигляді молекул, лише мала частина молекул дисоціює на іони.

За рахунок великої розчинної здатності води, звичайно, електрична провідність вологих середовищ виявляється досить великою.

Причиною електропровідності зволжених діелектриків є розчинення у воді різних домішок та їх подальша дисоціація на іони. Тому звичайно найбільшим «ворогом» електричної ізоляції є вода, потрапляння якої в діелектрик погіршує електрофізичні характеристики матеріалу.

Електропровідність рідких діелектриків дуже тісно пов'язана зі структурою молекул рідини. В неполярних рідинах електрична провідність залежить від наявності дисоційованих домішок, у тому числі вологи; в полярних рідинах електрична провідність визначається не тільки примішками, але іноді і дисоціацією молекул самої рідини.

Полярні рідини завжди мають підвищену провідність в порівнянні з неполярними, причому збільшення діелектричної проникності призводить до зростання провідності.

При тривалому пропусканні електричного струму через неполярний рідкий діелектрик також можна спостерігати збільшення опору за рахунок переносу вільних іонів до електрода. Питома провідність будь-якої рідини дуже залежить від температури.

Зі збільшенням температури підвищується рухливість іонів в зв'язку з зменшенням в'язкості і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Ці два фактори підвищують провідність. Математично провідність рідкого діелектрика найбільш точно описується виразом [15]:

$$\gamma = A \exp\left(\frac{-\alpha}{T}\right), \quad (2.1)$$

де  $A$  і  $\alpha$  – постійні, які характеризують дану рідину;

$T$  – температура, °С.

В більшості випадків температурна залежність провідності рідких діелектриків від температури може бути виражена наступною формулою [8]:

$$\gamma = \gamma_0 \exp \alpha t, \quad (2.2)$$

де  $\gamma_0$  і  $\alpha$  – постійні величини для даної рідини;

$t$  – температура, °С.

У колоїдних системах спостерігається мало іонна, або електрофоретична електропровідність. Із колоїдних систем в електротехніці використовуються емульсії (обидві компоненти – рідини), суспензії (тверді частки у рідині), аерозолі (тверді і рідкі частинки в газі).

При накладанні поля моль іони приходять в рух, що проявляється як явище електролізу.

Електроліз – розклад речовин (наприклад, води, розчинів кислот, лугів, розчинених або розплавлених солей) постійним електричним струмом.

Електроліз полягає в електрохімічних процесах окиснення та відновлення на електродах.

В результаті електролізу на електродах виділяються речовини в кількостях, пропорційних кількості пропущеного струму.

Значення електропровідності деяких рідин представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Електропровідність рідин

Назва	Формула	$\sigma$ , См/м	Назва	Формула	$\sigma$ , См/м
Прості речовини і неорганічні сполуки					
Аміак	NH <sub>3</sub>	$1,3 \cdot 10^{-5}$	Сірчана кислота	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1
Натрій хлорид	NaCl	3,4	Азотна кислота	HNO <sub>3</sub>	1,5
Бром	Br <sub>2</sub>	$1,33 \cdot 10^{-11}$	Сірки діоксид	SO <sub>2</sub>	$9 \cdot 10^{-5}$
Водню бромід	HBr	$8 \cdot 10^{-7}$	Сірки дихлорид	SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-6}$
Водню хлорид	HCl	$1 \cdot 10^{-6}$	Сульфан	H <sub>2</sub> S	$1 \cdot 10^{-9}$
Ртуть	Hg	$1 \cdot 10^{-10}$	Фосфора оксид-трихлорид	POCl <sub>3</sub>	$2,2 \cdot 10^{-5}$

А значення діелектричної проникності поширених рідин представлені в таблиці 2.2.

Відносна діелектрична проникність середовища визначається за формулою [4, 5]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r + j60\sigma\lambda), \quad (2.3)$$

де  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність середовища, Ф/м;

$\epsilon_r$  – діелектрична проникність рідини;

$\sigma$  – електропровідність рідини, См/м;

$\lambda$  – довжина хвилі, м.

Таблиця 2.2 – Діелектрична проникність поширених рідин

Рідина	Температура, °С	Діелектрична проникність, $\epsilon_r$
Аміак	20	16,5
Азотна кислота	25	1,77
Ацетон	25	20,7
Бензин	20	2,3
Вода	20	80,4
Водень йодид	-34,5	2,9
Метиловий спирт	20	33,1
Натрій хлорид	750	6,3
Пропан	0	1,6
Сірчистий вуглець	-	2,64
Скипидар	20	2,2
Оцтова кислота	20	6,2

Для вирішення задачі із таблиць 2.1 та 2.2 виберемо три рідини, які добре проводять струм – водень йодид (HI), азотна кислота ( $\text{HNO}_3$ ) та натрій хлорид (NaCl).

Середовища, які по властивостям, наближаються до ідеального провідника, задовольняють умові:

$$60\sigma\gamma \gg \epsilon_r. \quad (2.4)$$

Знайдемо область використання умови. Підставивши значення, для кожної рідини за формулою (2.4), отримаємо значення таблиця 2.3.

Як видно з розрахунків, довжину хвилі  $\lambda$  потрібно вибирати починаючи з 10 см. З цієї відмітки рідина проводить струм і формулу (2.4) можна використовувати.

Таблиця 2.3 – Значення параметрів рідин, які добре проводять струм

Для натрію хлориду (NaCl):					
$\lambda$	60	$\sigma$	$\gamma$	$\epsilon_r$	$60\sigma\gamma \gg \epsilon_r$
1 см	60	3,4	0,01	2,04	$2,04 < 6,3$
2 см	60	3,4	0,02	4,08	$4,08 < 6,3$
3 см	60	3,4	0,03	6,13	$6,13 \approx 6,3$
4 см	60	3,4	0,04	8,16	$8,16 > 6,3$
5 см	60	3,4	0,05	10,2	$10,2 > 6,3$
6 см	60	3,4	0,06	12,24	$12,24 > 6,3$
7 см	60	3,4	0,07	14,28	$14,28 > 6,3$
8 см	60	3,4	0,08	16,32	$16,32 > 6,3$
9 см	60	3,4	0,09	18,32	$18,32 > 6,3$
10 см	60	3,4	0,1	20,4	$20,4 < 6,3$
20 см	60	3,4	0,2	40,8	$40,8 < 6,3$
30 см	60	3,4	0,3	61,3	$61,3 \approx 6,3$
40 см	60	3,4	0,4	81,6	$81,6 > 6,3$
50 см	60	3,4	0,5	102	$102 > 6,3$
60 см	60	3,4	0,6	122,4	$122,4 > 6,3$
70 см	60	3,4	0,7	142,8	$142,8 > 6,3$
80 см	60	3,4	0,8	163,2	$163,2 > 6,3$
90 см	60	3,4	0,9	183,2	$183,2 > 6,3$
100 см	60	3,4	1	204	$204 \gg 6,3$
Для азотної кислоти (HNO <sub>3</sub> ):					
1 см	60	1,5	0,01	0,9	$0,9 < 1,77$
2 см	60	1,5	0,02	1,8	$1,8 \approx 1,77$
3 см	60	1,5	0,03	2,7	$2,7 > 1,77$
4 см	60	1,5	0,04	3,6	$3,6 > 1,77$
5 см	60	1,5	0,05	4,5	$4,5 > 1,77$
6 см	60	1,5	0,06	5,4	$5,4 > 1,77$
7 см	60	1,5	0,07	6,3	$6,3 > 1,77$
8 см	60	1,5	0,08	7,2	$7,2 > 1,77$
9 см	60	1,5	0,09	8,1	$8,1 > 1,77$
10 см	60	1,5	0,1	9	$9 > 1,77$
20 см	60	1,5	0,2	18	$18 > 1,77$
30 см	60	1,5	0,3	27	$27 > 1,77$
40 см	60	1,5	0,4	36	$36 > 1,77$
50 см	60	1,5	0,5	45	$45 > 1,77$
60 см	60	1,5	0,6	54	$54 > 1,77$
70 см	60	1,5	0,7	63	$63 > 1,77$
80 см	60	1,5	0,8	72	$72 > 1,77$
90 см	60	1,5	0,9	81	$81 > 1,77$
100 см	60	1,5	1	90	$90 \gg 1,77$
Для водню йодиду (HI)					
від 1 см до 100 см	60	10630	1	637800	$637800 \gg 2,7$

## 2.2 Аналіз методів розрахунку характеристик радіоімпульсних сигналів в струмопровідних середовищах

Методи, які ґрунтуються на розподілі імпульсних сигналів в середовищах з поглинанням та дисперсією [2, 16].

Розташування імпульсного сигналу в однорідному середовищі з поглинанням та дисперсією може бути досліджено за допомогою аналізу інтеграла Фур'є:

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A_0(\omega) \exp\left\{\frac{\omega}{c} x(\omega) z\right\} \exp\left\{i\left(\omega t - \frac{\omega}{c} n(\omega)\right)\right\} d\omega, \quad (2.5)$$

де  $A_0(\omega)$  – спектр початкового імпульсу;

$n(\omega)$  та  $x(\omega)$  – показники заломлення і поглинання середовища.

Аналітичне представлення інтегралу (2.5) складне навіть для найбільш простих випадків залежностей хвильового числа  $k = (\omega/c)$  та  $A_0$  від частоти. Тому аналіз інтеграла приходиться або близькими методами чи численними.

В даному випадку результати таких розрахунків для конкретних параметрів сигналу та середовища, дозволяють виявити характерні особливості розподілу імпульсних сигналів в середовищах з поглинанням та дисперсією.

Далі розраховуються наступні характеристики сигналу: огинаюча, фазове заповнення, швидкість розподілу максимуму огинаючої по формулі (2.5), де частота максимуму амплітудного спектра  $\omega_{\text{макс}}$ .

Отримані значення зіставляються з відповідними значеннями, отриманими раніше шляхом квадратичної апроксимації  $k(\omega)$ :

$$k(\omega) = k(\omega_0) + \frac{dk}{d\omega}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{dk^2}{d\omega^2}(\omega - \omega_0)^2. \quad (2.6)$$



Були зроблені загальні висновки про вплив дисипативних і дисперсійних властивостей середовища на розподіл імпульсних сигналів:

– при розподілі імпульсних сигналів на достатньо великі відстані значення нормованої спектральної амплітуди імпульсу та частоти її максимуму істотно відрізняються від відповідних значень, отриманих при квадратичному апроксимації і значень  $A_0(\omega)$  та  $\omega_0$  початкового імпульсу;

– максимальне значення амплітуди імпульсу  $A_{\max}$  зменшується з відстанню не по експоненціальному закону, а значно повільніше;

– вираз для групової швидкості, отриманий раніше шляхом квадратичної апроксимації справедливо до певних значень  $z$ , які залежать від параметрів дисперсії  $\partial^2(\omega n) / \partial \omega^2$ , поглинання  $\partial(\omega x) / \partial \omega$  та тривалості імпульсу;

– при великих значеннях  $z$ , коли сигнал значно спотворюється і  $\omega_{\max}$  становиться суттєво відмінним від  $\omega_0$ , тоді слід говорити тільки про швидкості сигналу, визначаючи її за формулою (2.6) як швидкість розподілу максимуму імпульсу.

Значення швидкості сигналу за формулою (2.6), отримуються за допомогою численних розрахунків інтегралу Фур'є практично співпадають з класичним виразом для групової швидкості.

Цю швидкість знайдемо за формулою (2.7):

$$v = c \left. \frac{d\omega}{\omega n} \right|_{\omega=\omega_0}, \quad (2.7)$$

Значення практично співпадають, якщо в ньому частоту початкового імпульсу  $\omega_0$  покласти рівною  $\omega_{\max}$ .

Фізично це можна інтерпретувати в такий спосіб: кожна досить вузька частота у спектрі імпульсу відповідає своїй груповій швидкості.

В середовищі з частотною залежністю поглинання різні частоти спектра поглинаються по-різному.

При розподілі імпульсного сигналу на проміжку  $z$  максимум спектральної щільності імпульсу буде приходиться не на  $\omega_0$  (як у середовищі без обліку абсорбції), а на  $\omega_{\text{макс}}$ .

Тому і швидкість розподілу максимуму огибаючої буде характеризуватися виразом (2.7) не при  $\omega_0$ , а при  $\omega_{\text{макс}}$ .

Цей простий та фізично наочний результат дозволяє оцінити швидкість розподілу сигналів, що не враховують інтеграли Фур'є.

Методи, які ґрунтуються на поширенні високочастотних збурень в поглинаючих і активних середовищах [1, 2].

Розглянуто поширення високочастотних збурень в поглинаючому середовищі, коли поняття групової швидкості втрачає чіткий сенс, оскільки поширення збурення в загальному випадку супроводжується швидкою його деформацією.

Досліджується зв'язок між швидкістю перенесення енергії і швидкістю поширення збурення (його енергетичного центру), формулюються обмеження на швидкість електромагнітних хвиль: передній фронт рухається зі швидкістю  $c$ , а швидкість перенесення енергії не перевищує швидкість світла.

Поширення електромагнітних хвиль в однорідних поглинаючих середовищах (лінійних) можна розрахувати за допомогою інтегралу Фур'є згідно виразу (2.5).

Розглянемо комплексну групову швидкість, коли безпосереднє фізичне відношення мають величини  $\text{Re}f(z, t)$  або  $\text{Im}f(z, t)$ , що визначають поле плоскої нестационарної хвилі.

В інтегралі (2.5) є спектральна амплітуда початкового нуля (при  $z = 0$ ), а  $h(\omega)$  – комплексно хвильове число при частоті  $\omega$ :

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(0, t) e^{i\omega t} dt. \quad (2.8)$$

Формули (2.5) і (2.8) застосовані і у випадку просторової дисперсії (в плазмі, за наявності електронних потоків), якщо їх віднести до кожної хвилі окремо, сумуючи вклади від окремих хвиль.

Формули (2.5) і (2.8), а також всі наступні, застосовані к кожної хвилі в однорідній ( по осі  $z$  ) лінії передачі, яка підпорядковується лінійним рівнянням, однак для стислості будемо відносити всі відношення к нестационарним плоским хвилям в однорідному безграничному середовищі.

Нехай початкове поле (при  $z = 0$ ) має вигляд:

$$f(0,t) = \bar{f}(0,t) e^{-i\omega_0 t} dt, \quad (2.9)$$

де  $\bar{f}(0,t)$  - повільна змінна (у порівнянні з  $e^{-i\omega_0 t}$ ) функції.

Тоді, коли мова йде про високочастотні (квазімонохроматичні) збурення з несучою частотою  $\omega_0$  для них функція  $A(\omega)\omega = \omega_0$  і край точки  $\omega_0$  (якщо  $z$  не досить велике), має вигляд:

$$f(z,t) = \bar{f}(z,t) e^{i[h(\omega_0)z - \omega_0 t]}, \quad (2.10)$$

де  $\bar{f}(z,t)$  - повільно змінна, яку можна розрахувати, апроксимуючи  $h(\omega)$ .

Розкладання рядів Тейлора виражається формулою:

$$h(\omega) = h(\omega_0) + h'(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} h''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.11)$$

Якщо обмежитися першими двома членами, то отримаємо:

$$f(z,t) = \bar{f}(0,t - h'(\omega_0)z), \quad (2.12)$$

По формулі (2.12) при вагомим  $h'(\omega_0)$  приводить до загально відомому результату: високочастотне збурення (точніше, його комплексна огинача) поширюється з груповою швидкістю:

$$v = \frac{1}{h'(\omega_0)}. \quad (2.13)$$

Облік третього члену в правій частині (2.11) дає деформацію цього збурення.

При комплексному  $h'(\omega_0)$  формула (2.12) також справедлива, однак вона дає комплексну групову швидкість (2.13), сенс якої підлягає поясненню.

Якщо функція  $\bar{f}(0,t)$  не є аналітичною, наприклад відповідає прямокутному імпульсу:

$$\bar{f}(0,t) = \frac{1}{2T_0} \text{ при } |t| < T_0,$$

$$\bar{f}(0,t) = 0 \text{ при } |t| > T_0,$$

Тоді формула (2.11) взагалі не має сенсу. Якщо ж неаналітичну функцію  $\bar{f}(0,t)$  апроксимувати аналітичною, наприклад в даному прикладі покласти:

$$\bar{f}(0,t) = \frac{1}{2T_0} e^{-\left(\frac{1}{T_0}\right)^{2n}} \text{ при } (n=1,2,\dots), \quad (2.14)$$

А при інших  $n$  сенс формули (2.12) буде вже іншим, зокрема швидкість руху огинає вже не буде дорівнює (2.14).

Звідси видно, що сенс формули (2.12), тобто зміст комплексної групової швидкості (2.13), полягає в тому, що поширення обурення нерозривно пов'язане з деформацією обурення, що залежить від його форми.

Деформація тут постає не при обліку третього члена розкладання (2.11), як при матеріальному  $h'(\omega_0)$  (тобто не при великих значеннях  $z$ ), а одночасно з поширенням.

Швидкість деформації тим більше, чим більше  $h'(\omega_0)$ , причому ця швидкість, що залежить від форми обурення, впливає на спостережувану швидкість його руху. Тому не можна говорити про швидкість поширення високочастотних збурень в поглинаючому середовищі, задаючи тільки несучу частоту  $\omega_0$  і не фіксуючи форму збурення (його комплексну огинаючу  $f(0,t)$ ).

Зв'язок швидкості переміщення імпульсів зі швидкістю поширення енергії буде розглянута в подальшому.

## 3 РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ РАДІОХВИЛЬОВИХ РІВНЕМІРІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ РІВНЯ РІДИНИ, ЯКА ПРОВОДИТЬ СТРУМ

### 3.1 Обґрунтування місця розташування ефективної відбиваючої поверхні рідин

У більшості систем необхідна інформація зберігається в поточному значенні деякого сигнального параметра (амплітуди, частоти, початкова фаза, відставання). Для її вилучення спостерігач повинен вимірювати або оцінити відповідний параметр.

Згідно середовище з кінцевої провідністю еквівалентно замінюється плоскою поверхнею, яка проводить струм і опущеною на деяку глибину  $d/2$  щодо початкової межі розділу середовищ [2, 17].

Для вирішення завдання визначення місця розташування ефективної відбиваючої поверхні струмопровідної рідин скористаємося методом дзеркальних відображень.

Сутність методу полягає в заміні звичайно-провідної поверхні на ідеально-провідну поверхню, віднесену на деяку комплексну відстань  $d/2$ . Стосовно до методу дзеркальних відображень зобразимо спрощену модель, яка зображена на рисунку 3.1.

Метод дзеркальних відображень використовується для знаходження розподілу полів в електровакуумних приладах.

Метод дзеркальних відображень успішно застосовується для визначення частотних властивостей багатошарових середовищ. При цьому метод дзеркальних відображень дозволяє врахувати як набіг фази, так і затухання амплітуди електромагнітної хвилі.

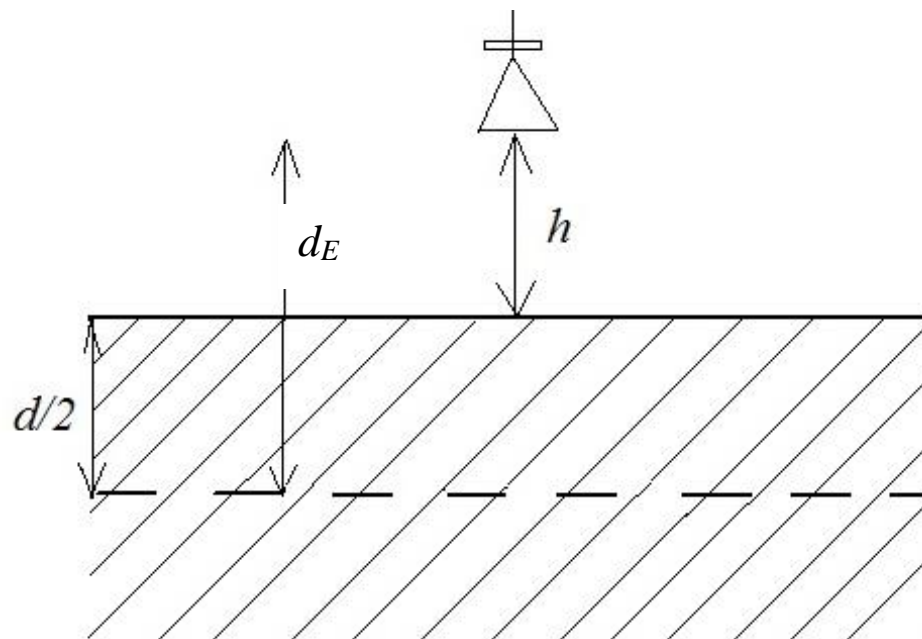
Розглянемо випадок поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ) уздовж землі. Існує кілька способів знаходження глибини залягання ідеально провідної поверхні  $d/2$ .

Найбільш простий і наочний – порівняння поверхневих імпедансів на рівні  $x = 0$ .

Використовуючи поняття поверхневого імпедансу, можна отримати наближене рішення.

Методи отримання значень поверхневого імпедансу для багатословних середовищ розроблені так само, як і для однорідного середовища. Вони виходять при розрахунку падіння плоскої вертикально поляризованої хвилі на поверхню розділу.

Для визначення місця розташування ефективною відбиваючої поверхні струмопровідної рідини необхідно зобразити схему вимірювання рівня рідини. Дана схема представлена на рисунку 3.1.



— – реальний рівень рідини; - - - - - положення ефективною відбиваючої поверхні;  
 $h$  – відстань від передатчика до поверхні рідини;  $d/2 = d_E/2$  – глибина зсуву відбиваючої поверхні

Рисунок 3.1 - Спрощена схема вимірювання рівня рідини

Для того, щоб визначити місце розташування ефективної відбиваючої поверхні струмопровідної рідини необхідно знайти шлях проходження хвилі в рідині:

$$d_E = \frac{-j\lambda}{\pi\sqrt{(\varepsilon_r - 1) - j60\sigma\lambda}}, \quad (3.1)$$

де  $\varepsilon_r$  – діелектрична проникність;

$\sigma$  – проникність рідин, См/м;

$\lambda$  – довжина хвилі, м.

Шлях проходження хвилі в рідині буде виражатися в комплексному вигляді.

Тому потрібно задати фазу та амплітуду сигналу. Формула (3.1) матиме вигляд:

$$d_E = |d_E| e^{j\varphi}, \quad (3.2)$$

А за формулами (3.3) та (3.4) безпосередньо знаходять амплітуду та фазу сигналу:

$$d_{EA} = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3.3)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{a}{b}\right). \quad (3.4)$$

Проведемо розрахунки цих формул в програмі Matlab для кожної струмопровідної рідини.



Програми реалізації розрахунку шляху проходження хвилі в рідині для водню йодиду, натрію хлориду та для азотної кислоти представлено в додатку А.

На рисунках 3.2 – 3.3 показана залежність фази та амплітуди від довжини хвилі для водню йодиду (HI).

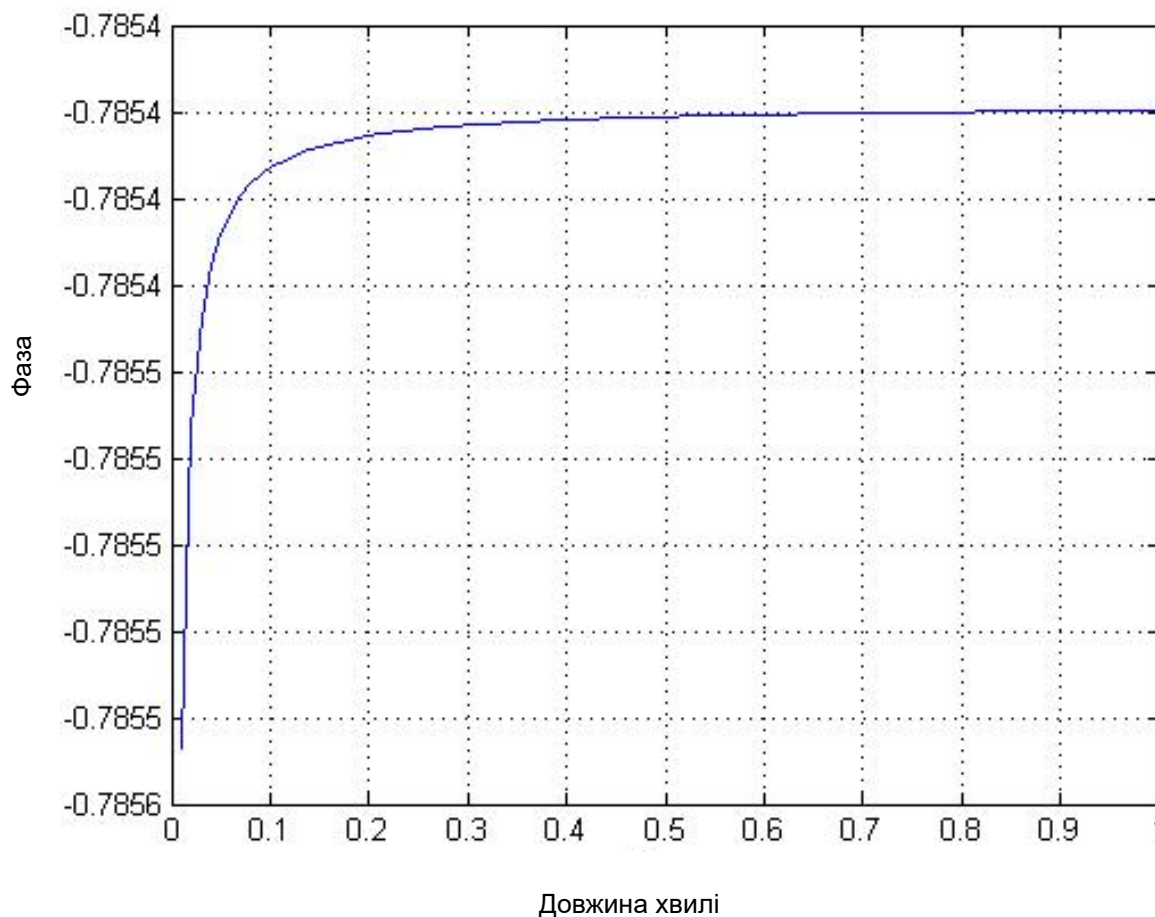


Рисунок 3.2 – Залежність фази від довжини хвилі для водню йодиду (HI)

На рисунках 3.4 – 3.5 показана залежність фази та амплітуди від довжини хвилі для натрію хлориду (NaCl).

На рисунках 3.6 – 3.7 показана залежність фази та амплітуди від довжини хвилі для азотної кислоти (HNO<sub>3</sub>).

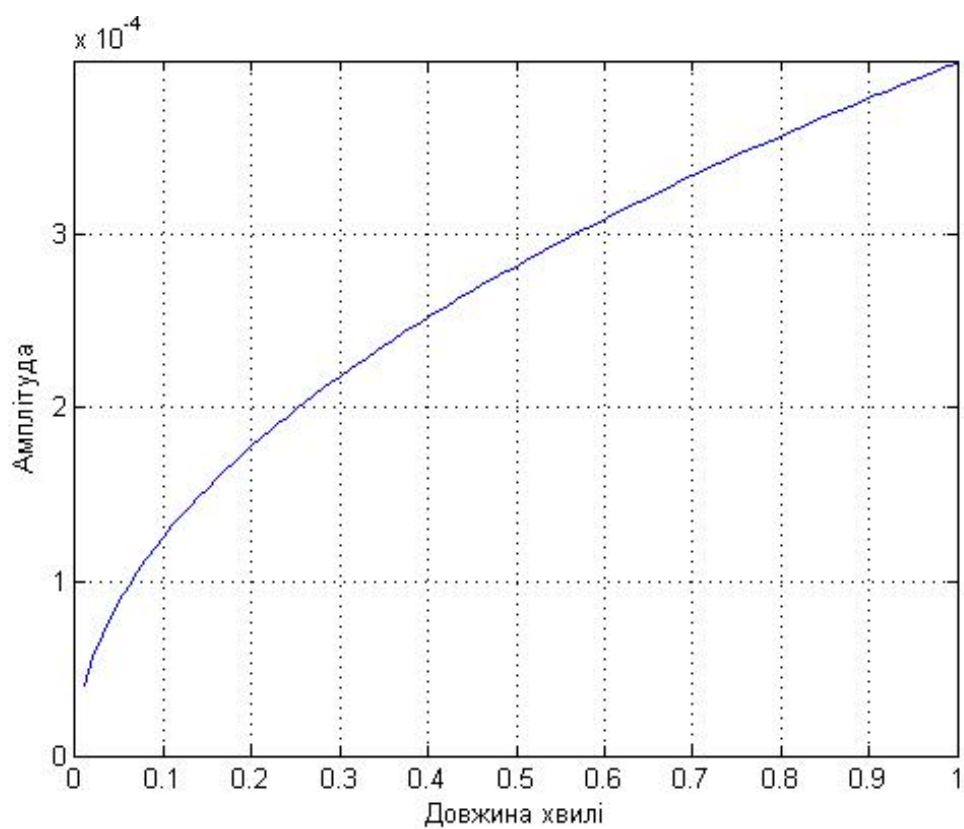


Рисунок 3.3 – Залежність амплітуди від довжини хвилі для HI

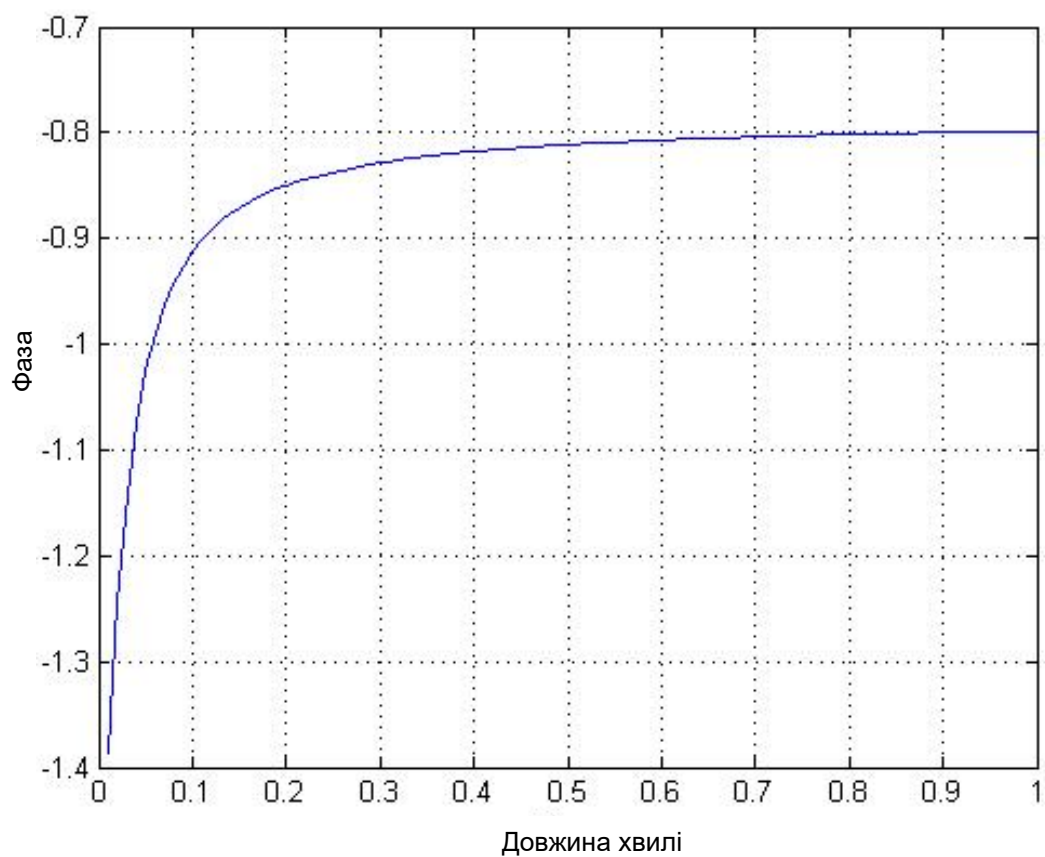


Рисунок 3.4 – Залежність фази від довжини хвилі для NaCl

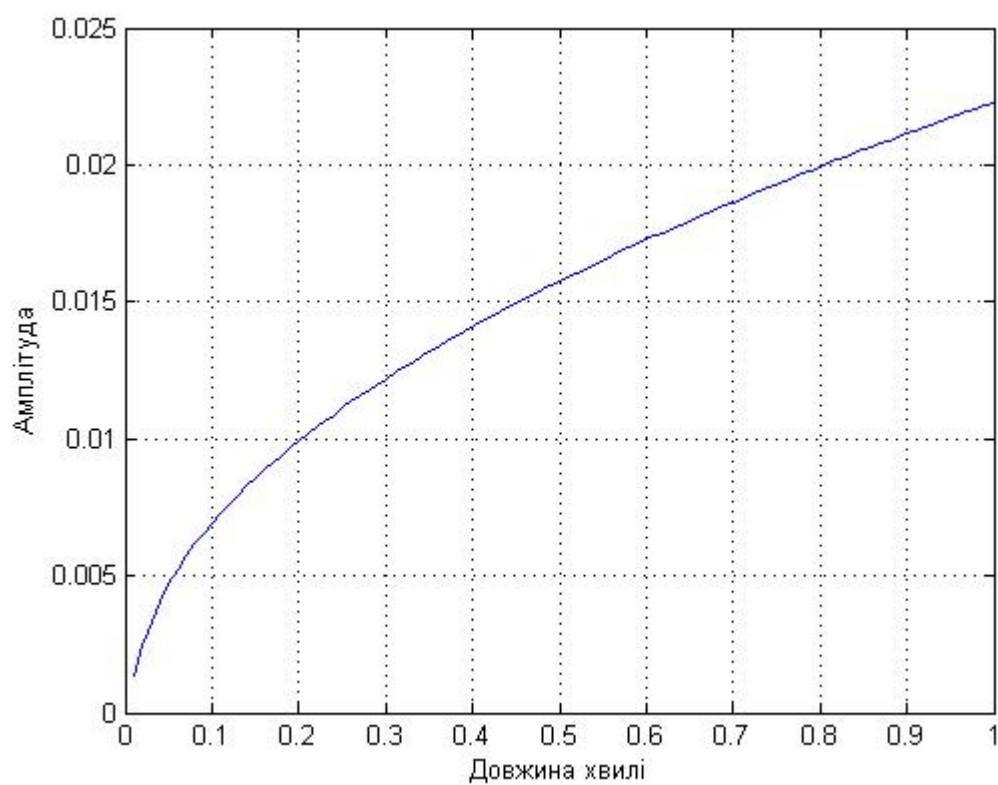


Рисунок 3.5 – Залежність амплітуди від довжини хвилі для NaCl

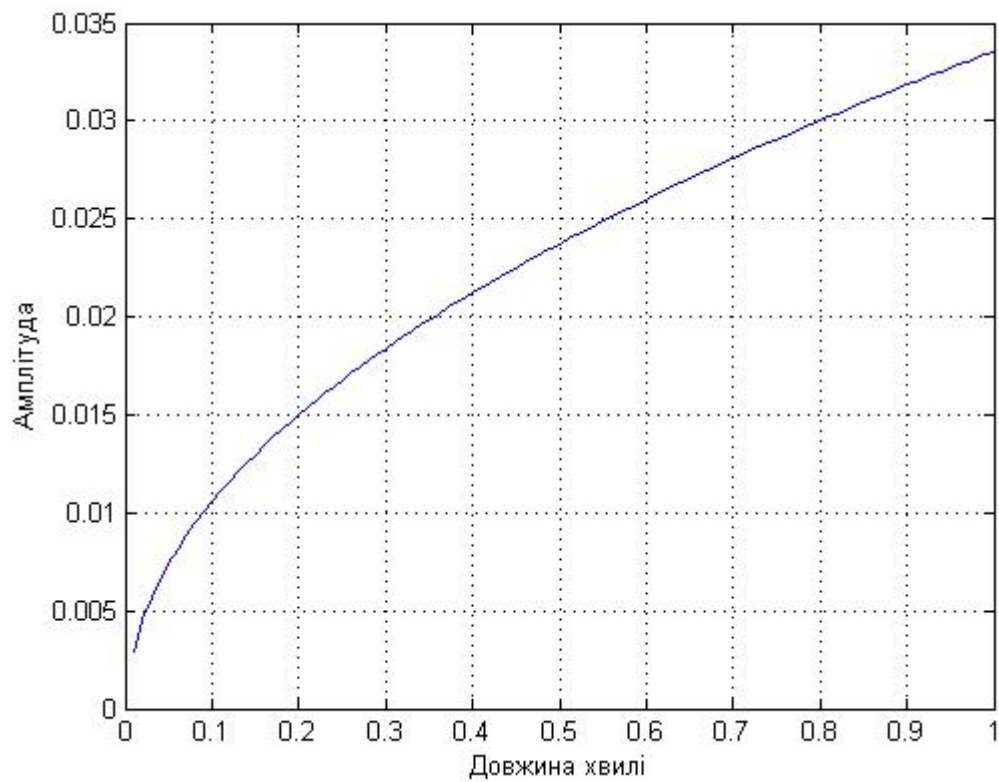


Рисунок 3.6 – Залежність амплітуди від довжини хвилі для HNO<sub>3</sub>

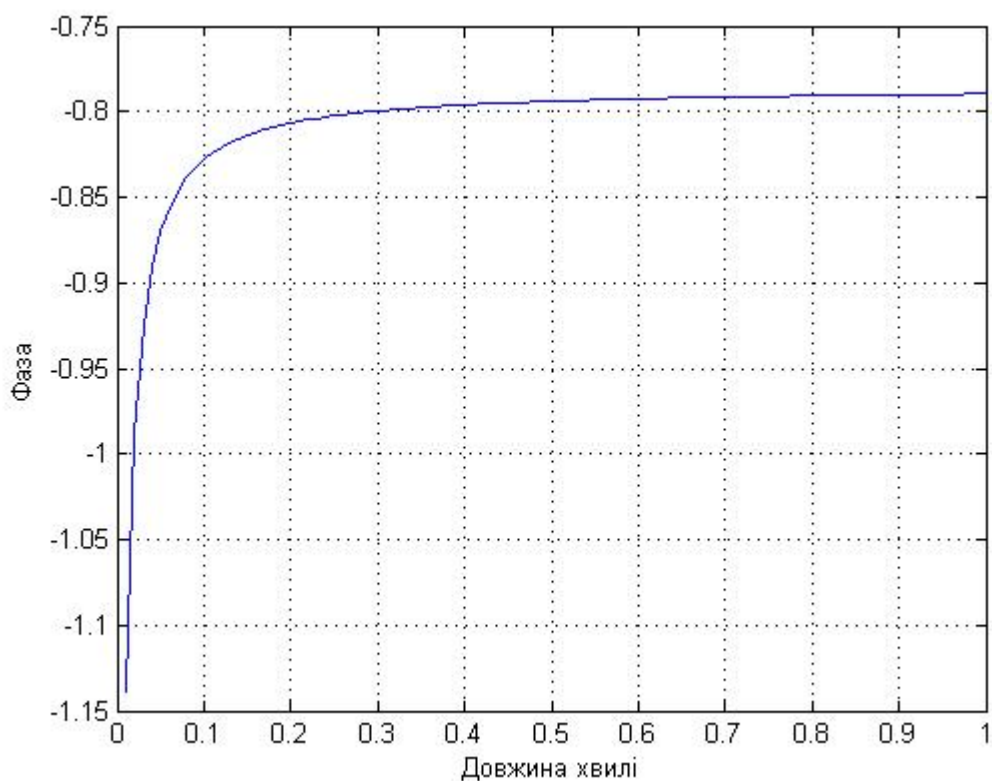


Рисунок 3.7 – Залежність фази від довжини хвилі для  $\text{HNO}_3$

Як видно з графіків, амплітуда збільшується з ростом довжини хвилі, а фаза розподілена по експоненціальному закону розподілу.

Таблиця 3. 1 – Шлях проходження хвилі в рідині

Рідина	Шлях проходження хвилі в рідині	
	початкове значення	кінцеве значення
Водень йодид	$2,81791679050057e-05$ $- 2,81875637020955e-05i$	$0,000281833247623814 -$ $0,000281834087203570i$
Натрій хлорид	$0,000244009816610860$ $- 0,00131323322833632i$	$0,0155500786147624 -$ $0,0159593228720375i$
Азотна кислота	$0,00122335646558578$ $- 0,00265664198309926i$	$0,0236232794843650 -$ $0,0238262543314417i$

З таблиці 3.1 видно, що шлях проходження хвилі в рідині – це число, яке має реальну і уявну частину. А для обчислень потрібно взяти реальну частину від  $d_E$ .

Для вимірювання рівня рідини треба також знайти відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ), тобто потрібно шлях проходження хвилі в рідині  $d_E$  за формулою (3.1) розділити на 2.

Графіки відстані до поверхні, яка являється відбиваючою ( $d_E/2$ ) для кожної рідини HI, NaCl та HNO<sub>3</sub> приведені на рисунках 3.8 – 3.10.

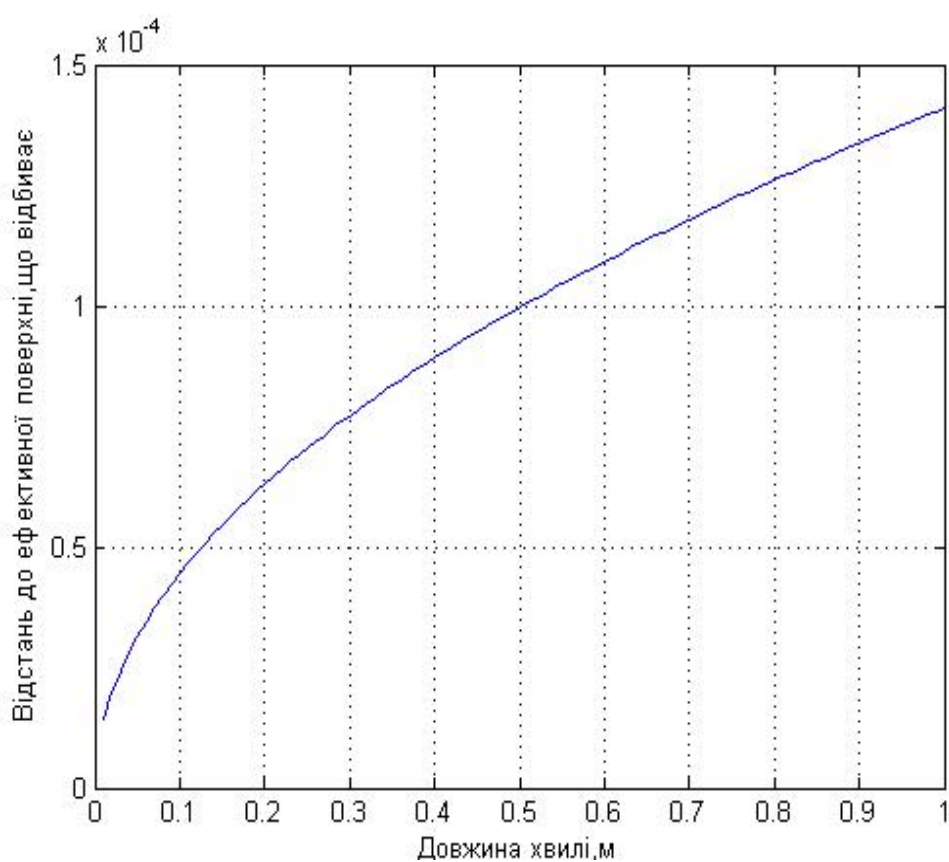


Рисунок 3.8 – Відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ) для HI

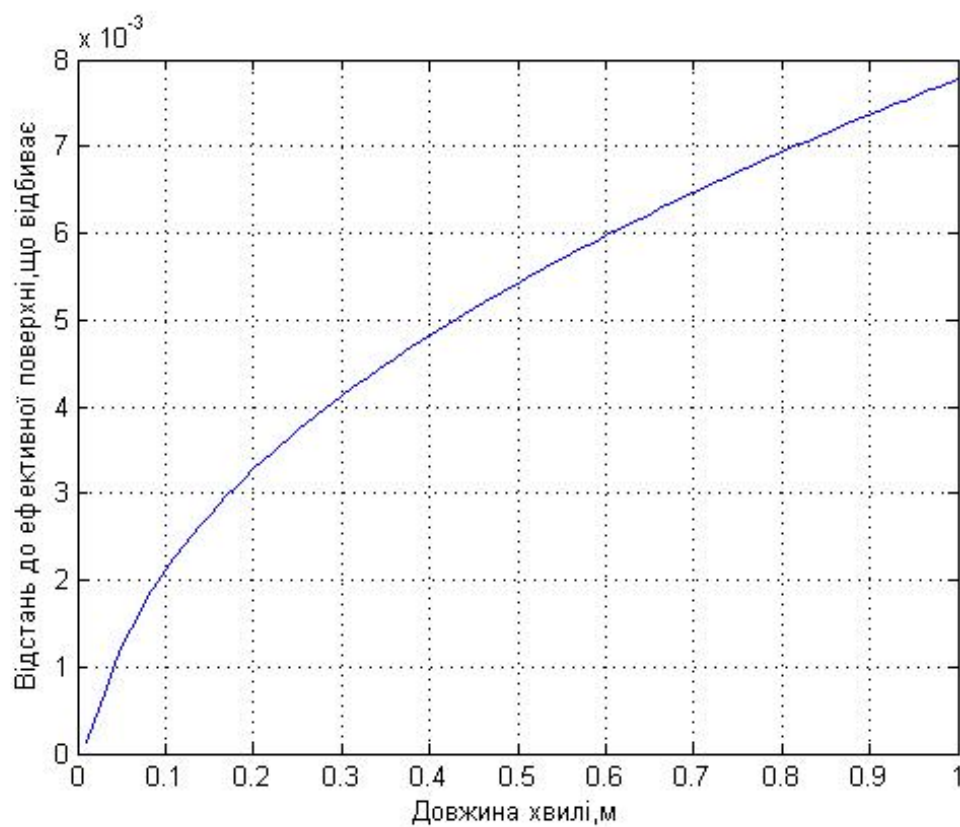


Рисунок 3.9 – Відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ) для NaCl

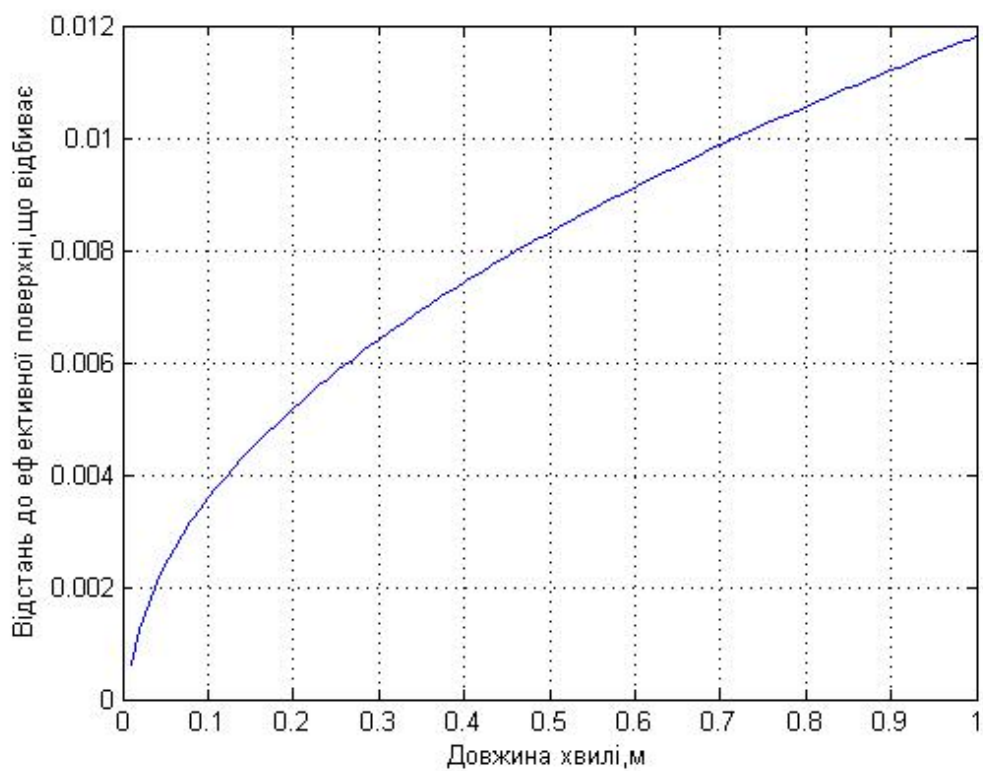


Рисунок 3.10 – Відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ) для HNO<sub>3</sub>

Проаналізувавши графіки можна зробити висновок, що відстань до поверхні, яка відбиває ( $d_E/2$ ) збільшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$ .

Найбільша відстань у азотної кислоти ( $\text{HNO}_3$ ) – 0,012 м; середня відстань у натрій хлору ( $\text{NaCl}$ ) –  $7,88 \cdot 10^{-3}$  м і найменша відстань у гідрогену йодиду ( $\text{HI}$ ) –  $1,4 \cdot 10^{-4}$  м.

### 3.2 Визначення часу затримки радіоімпульсу в рідинах

За характером зміни параметрів електричних сигналів з плином часу, виділяють детерміновані сигнали, що мають скінчену енергією і є суттєво відмінними від нуля лише протягом обмеженого інтервалу часу. Серед імпульсних сигналів виділяють відеоімпульси та радіоімпульси [18].

Відеоімпульси можуть бути різної форми (прямокутні, трикутні, трапецевидні), полярності, амплітуди і т. д. Часто на практиці приходиться мати справу з прямокутними імпульсами, у яких тривалість плоскої частини вершини складає не менше 0,7 с від тривалості імпульсу, відрахованої на половинному рівні його амплітуди. Будь-який радіосигнал може бути представлений як результат модуляції амплітуди і фази безперервного косинусоїдального коливання (несучої) рисунок 3.11.

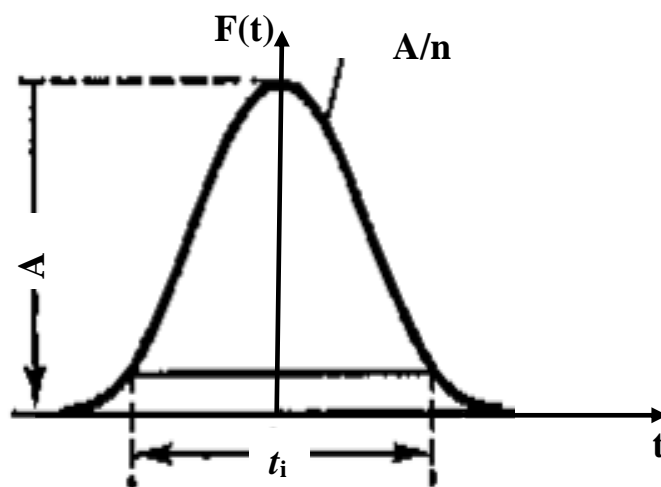


Рисунок 3.11 – Зображення відеоімпульсу

Формули, які описують огинаючу відеоімпульсу:

$$F(t) = Ae^{-(\alpha t)^2}, \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{2\sqrt{\ln n}}{t_i}. \quad (3.6)$$

при  $n = \sqrt{2}$ ;  $\alpha = \frac{1,2}{t_i}$ , при  $n = 2$ ;  $\alpha = \frac{1,7}{t_i}$ .

Оскільки відстань до поверхні оцінюють за часом проходження сигналу від передавача до приймача, то необхідно визначити час проходження сигналу в товщі рідини, розташованої над ефективно-відбиваючою поверхнею:

$$\Delta t = \frac{d_E}{V_{ep}}, \quad (3.7)$$

де  $d_E$  – шлях проходження хвилі в рідині, м;

$V_{ep}$  – швидкість переміщення максимальної амплітуди радіоімпульсу, м/с.

На рисунках 3.12 – 3.14 представлені графіки часу проходження сигналу в товщі рідини, розташованої над ефективно-відбиваючою поверхнею для різних рідин.



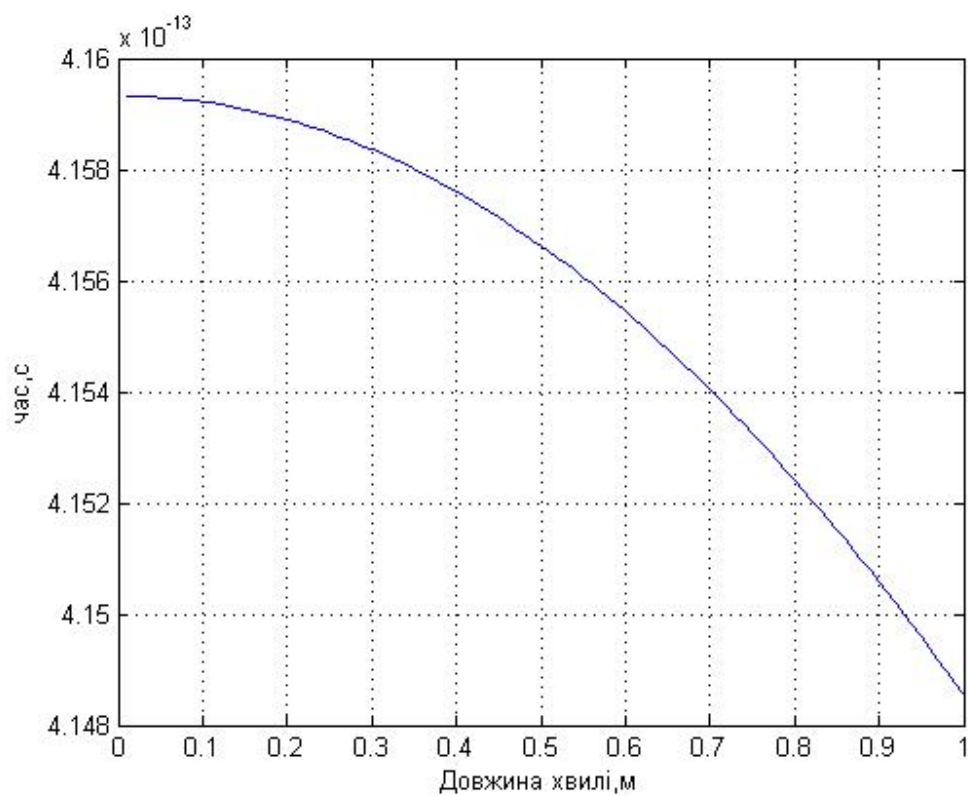


Рисунок 3.12 – Час проходження сигналу в товщі рідини для HI

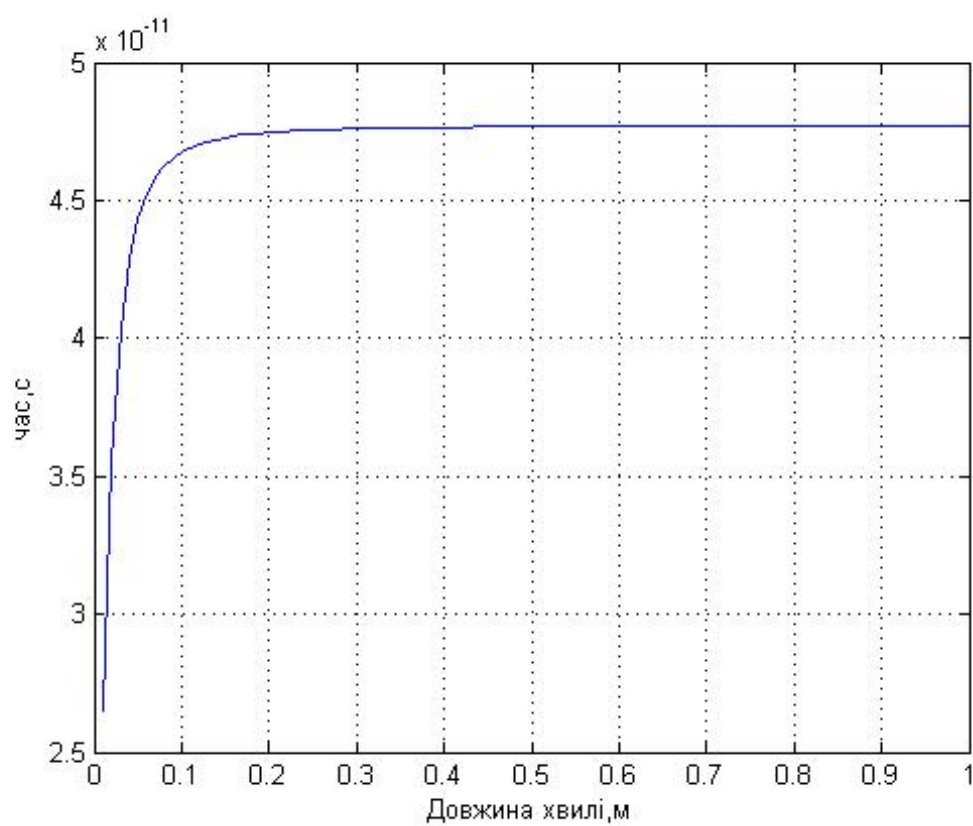


Рисунок 3.13 – Час проходження сигналу в товщі рідини для NaCl

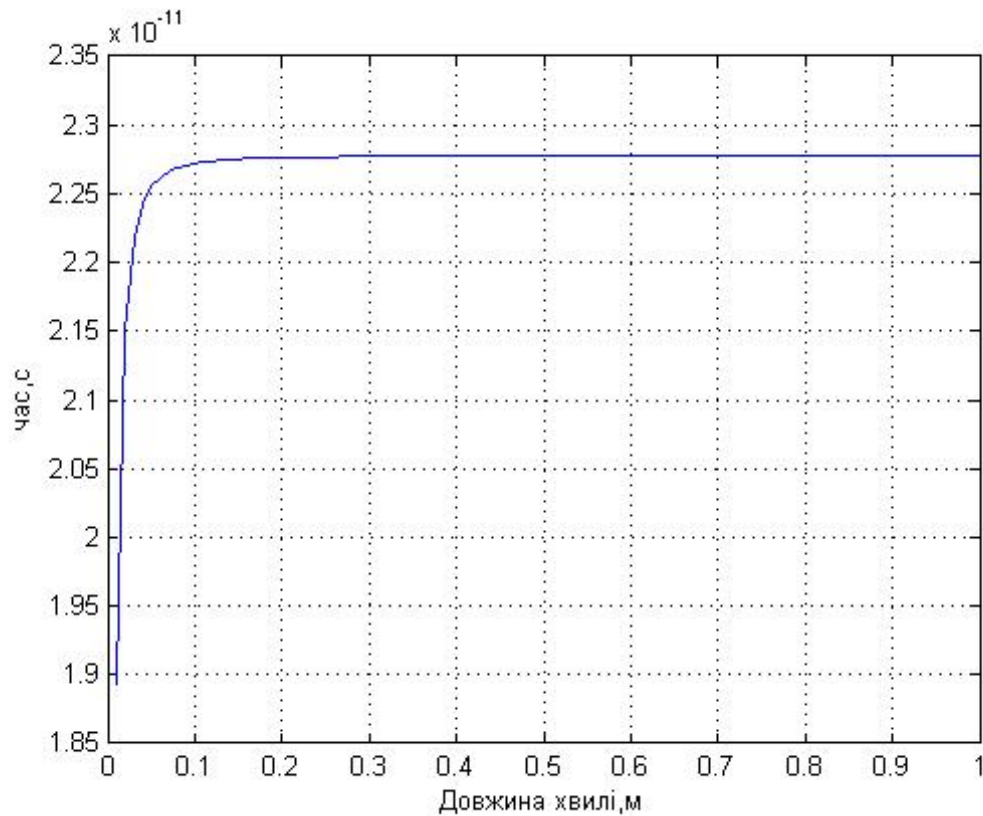


Рисунок 3.14 – Час проходження сигналу в товщі рідини для  $\text{HNO}_3$

Для того, щоб знайти швидкість переміщення максимуму амплітуди радіоімпульсу необхідно знайти похідну частоти  $\omega$  від постійної розповсюдження  $\gamma$ :

$$V_{gp} = \frac{d\omega}{d\gamma}. \quad (3.8)$$

Частоту знайдемо за формулою:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{300}{\lambda}. \quad (3.9)$$

Так як постійна розповсюдження залежить від діелектричної проникності  $\epsilon_r$  та електропровідності  $\sigma$ , то її запишемо у вигляді:

$$\gamma = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_r - j60\sigma\lambda}}{\lambda}. \quad (3.10)$$

Потім знайдемо похідну від постійної розповсюдження  $\gamma$  :

$$\gamma' = \frac{1}{300} \left[ \frac{1(2\omega\varepsilon_r - j36000\pi\sigma)}{2\sqrt{\varepsilon_r\omega^2 - j36000\pi\sigma}} \right]. \quad (3.11)$$

Знайдемо невраховану товщину шару відбиваючої поверхні:

$$h = \Delta t \cdot c, \quad (3.12)$$

де  $c$  – швидкість світла, м/с.

Комплексна огинаюча рухається з груповою швидкістю і передається енергія сигналу, яка пропорційна часу та пов'язана з ним інформація [11]. Термін групова швидкість пояснюється тим, що даний сигнал з вузьким спектром частот називається групою хвиль або квазімонохроматичною групою.

Групову швидкість можна назвати просто швидкістю, яка окреслює вузькість спектрального сигналу, оскільки вся інформація передається комплексною згинаючою, а не високочастотним заповненням.

На рисунках 3.15 – 3.17 показана неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для різних струмопровідних рідин.

Програма для розрахунку згідно виразів 3.8 – 3.12 неврахованої товщини шару відбиваючої поверхні та часу проходження сигналу для різних струмопровідних рідин представлена в додатку Б.

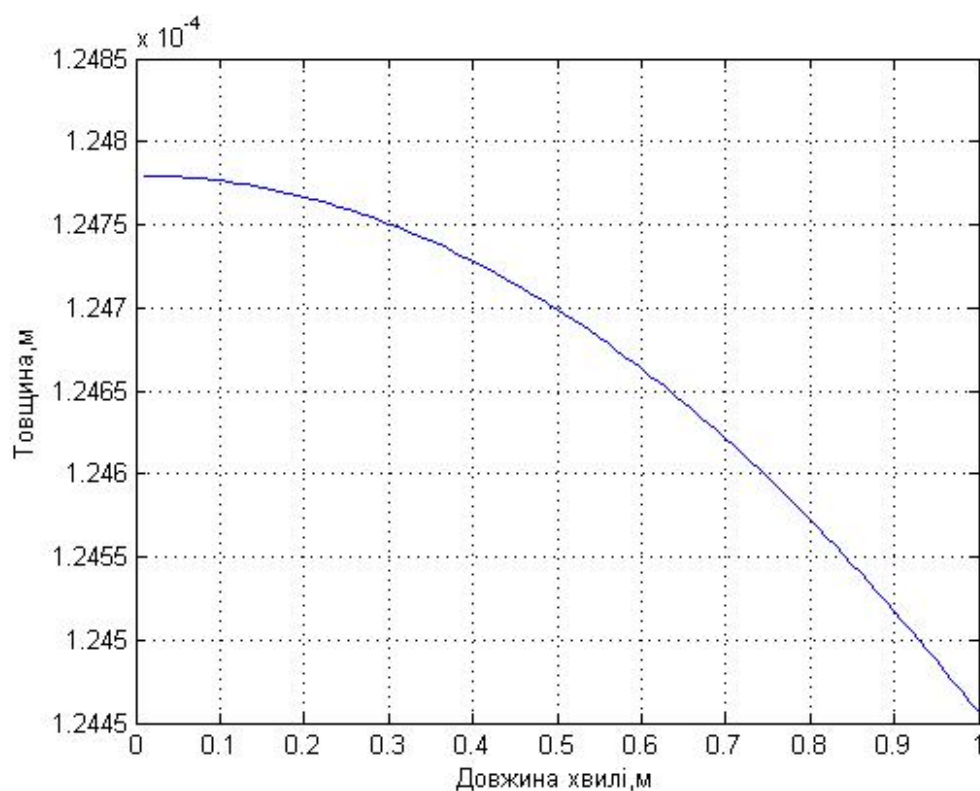


Рисунок 3.15 – Неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для NI

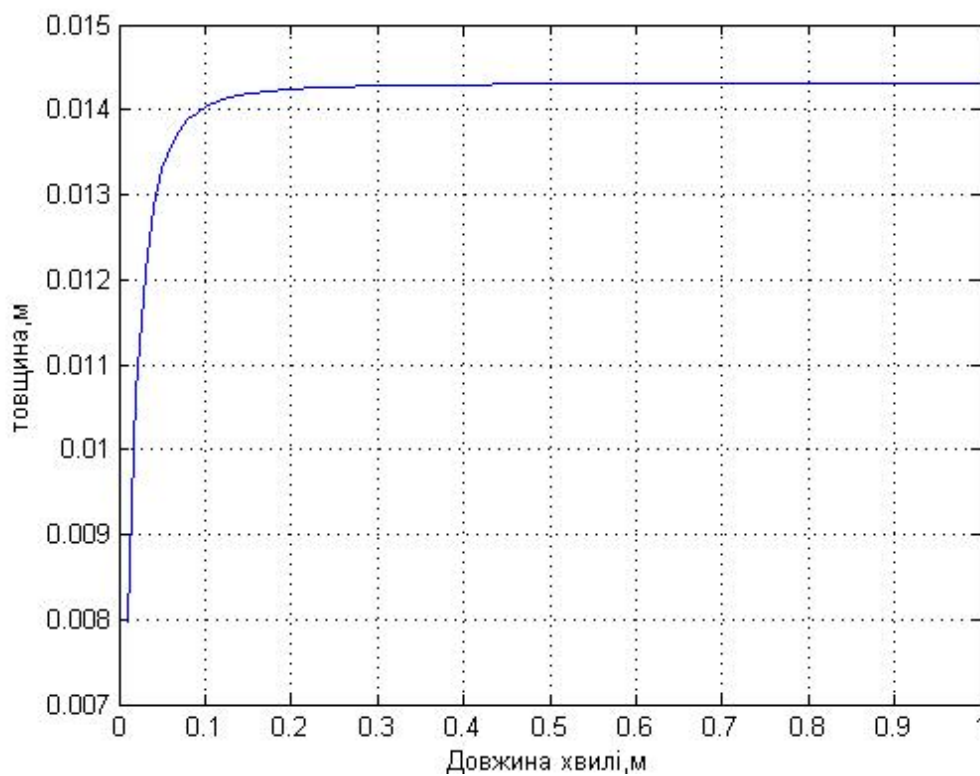


Рисунок 3.16 – Неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для NaCl

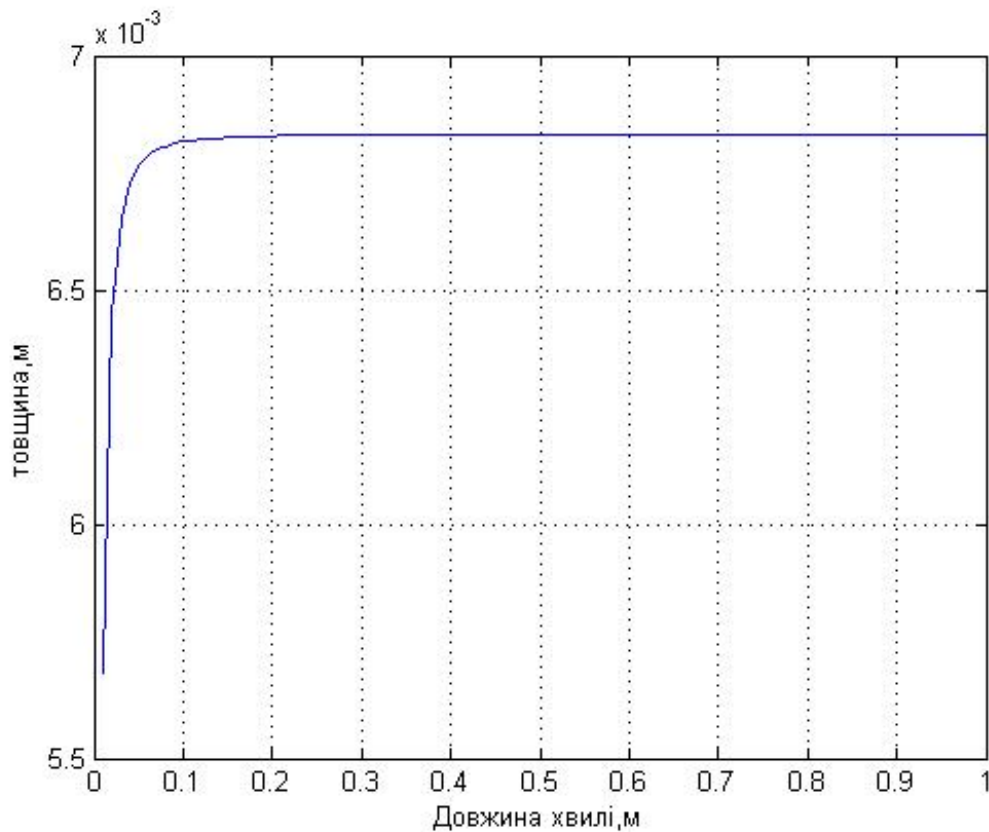


Рисунок 3.17 – Неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для  $\text{HNO}_3$

Залежність фазової швидкості від частоти називається дисперсією. За наявності дисперсії групова швидкість лише приблизно характеризує поширення сигналу. Чим вужче спектральний діапазон сигналу, тим деформація відбувається повільніше.

Поширення модульованих хвиль в хвилеводі запишемо формулою:

$$h = \sqrt{k^2 - g^2} \text{ при } (k > g). \quad (3.13)$$

Фазову швидкість знайдемо за формулою:

$$u = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{g}{k}\right)^2}}. \quad (3.14)$$

Фазова швидкість характеризує поширення фази в монохроматичній хвилі, що в просторі (уздовж осі  $z$ ) і в часі нескінченною синусоїдою.

Передача інформації можлива лише за допомогою модульованих хвиль, переміщення якої відбувається з груповою швидкістю  $V_{gp}$ , яка виражається формулою (3.8).

Умовою застосовності цієї формули є вимога, щоб спектр сигналу, був зосереджений в досить малому діапазоні довільної центральної частоти  $\omega$ .

Визначимо за формулою (3.8) групову швидкість електромагнітної хвилі в хвилеводі:

$$V_{gp} = \frac{1}{\left(\frac{d\gamma}{d\omega}\right)} = \frac{c}{\left(\frac{d\gamma}{dk}\right)}, \quad (3.15)$$

Отримаємо:

$$V_{gp} = c \sqrt{1 - \frac{g}{k^2}}. \quad (3.16)$$

Групова швидкість хвиль в хвилеводі опиняється менше швидкості  $c$ .

Таким чином фазова та групова швидкості в хвилеводі будуть задовольняти співвідношенню:

$$uV_{gp} = c^2. \quad (3.17)$$

А якщо сигнал обмежений в часі, то в його спектральному розкладанні (3.13) або (3.14) теоретично представлені всі частоти аж до найвищих; функція  $F(t)$  при  $\omega \rightarrow \infty$  прагне до нуля, але перетворюється в нуль лише при  $\omega = 0$ .

Згідно формули (3.12):

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\omega}{\gamma} = c, \quad (3.18)$$

Оскільки при  $\omega \gg \omega_0$ , то функція  $F(t)$  приймає малі значення.

Для створення сигналу з різко вираженим фронтом передавач повинен працювати в нескінченно широкому діапазоні частот. Тому фактично реєструється прихід сигналу по фронту огинаючої, яка переміщається з груповою швидкістю  $V_{gp}$ .

Наведений на рисунку 3.18 реальний радіосигнал, за формою відрізняється від прямокутника і не схожий на первинний сигнал.

Це відбувається тому, що при поширенні з згасанням сигнал не лише ослаблюється, а ще змінюється форма спектру відеоімпульсу, який визначається виразом:

$$F(j\omega) = A \sqrt{\pi e^{-\left(\frac{\omega - \omega_0}{2\alpha}\right)^2}}, \quad (3.19)$$

де  $\omega$  – частота, МГц;

$\omega_0$  – циклічна частота, МГц.

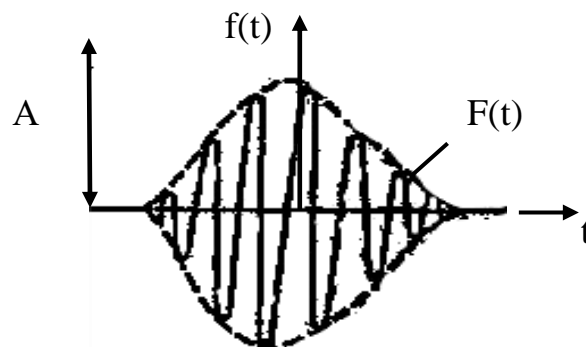


Рисунок 3.18 – Зображення реального радіосигналу

Причина деформації комплексної огибаючої при поширенні без загасання – це непостійність групової швидкості в межах смуги частот.

Якщо хвилі при своєму поширенні затухають, то відбувається додаткова деформація через непостійність коефіцієнта загасання.

Початкову стадію додатковою деформація легко досліджувати, якщо із самого початку вважати хвилеве число  $\gamma$  комплексною функцією частоти в околиці несучої частоти  $\omega_0$ .

Чим слабше залежність згасання від частоти, чим вужчий смуга сигналу, і чим менше відстань, тим менше спотворюється комплексна огибаюча  $F(t)$ . При протилежній умові комплексна огибаюча  $F(t)$  спотворюється до невпізнання.

Так як рівнеміри рівня рідини працюють у частотному діапазоні від 5 ГГц до 25 ГГц, побудуємо спектри для кожної несучої частоти окремо.

В додатку В представлена програм для розрахунку спектру вимірювального сигналу з використанням формули (3.19) для різних несучих частот. На рисунках 3.19 – 3.21 представлені графіки спектру сигналу для різних несучих.

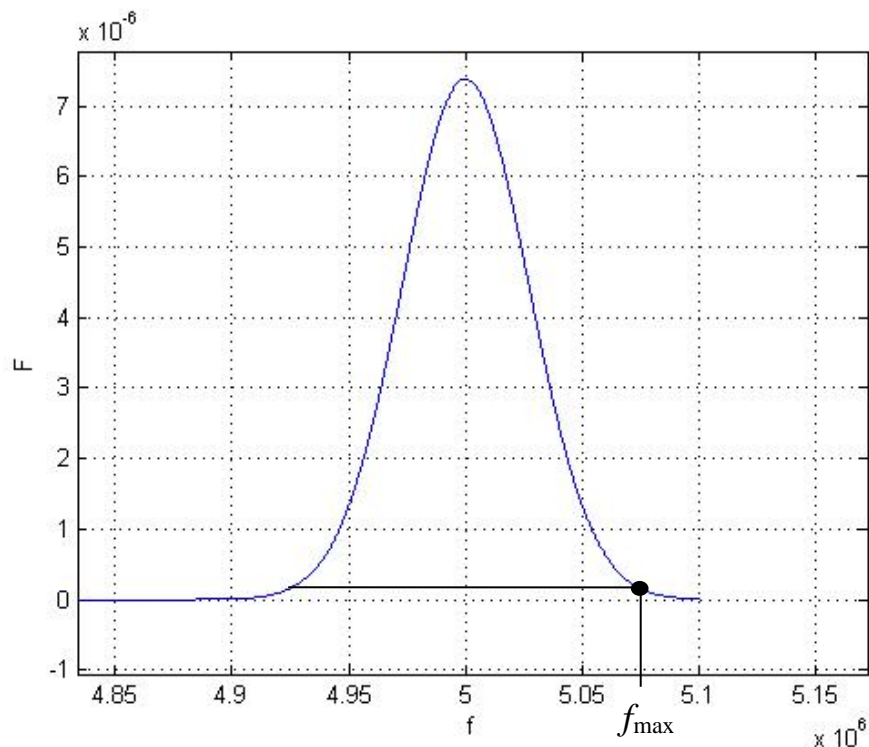


Рисунок 3.19 – Спектр сигналу для несучої частоти 5 ГГц



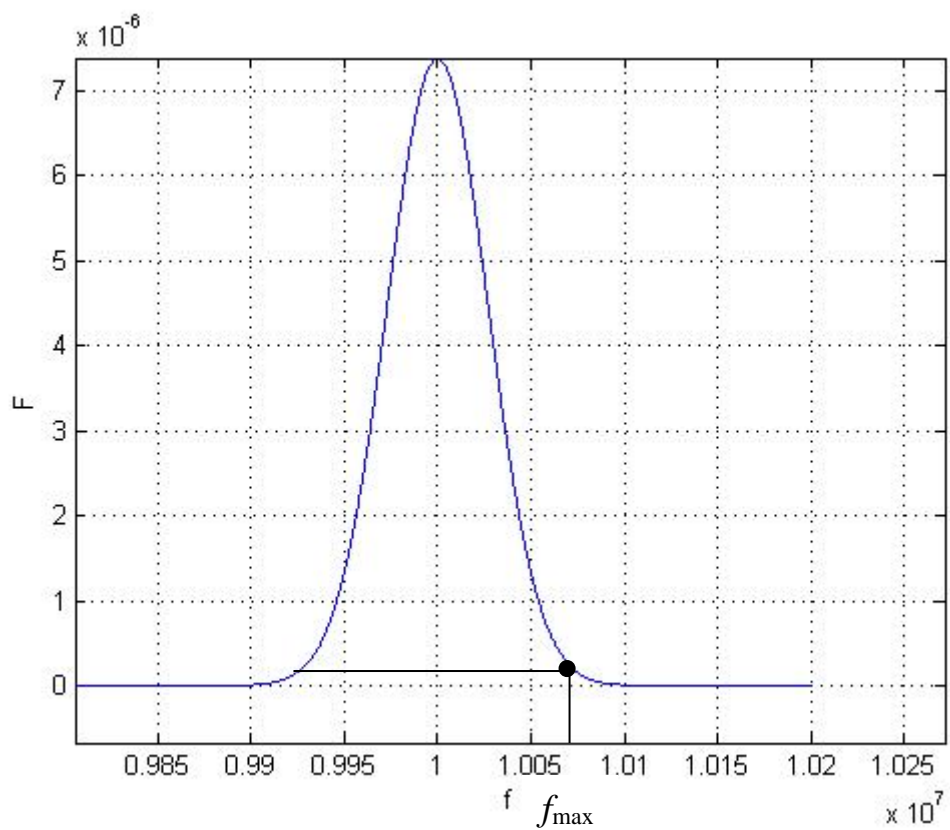


Рисунок 3.20 – Спектр сигналу для несучої частоти 10 ГГц

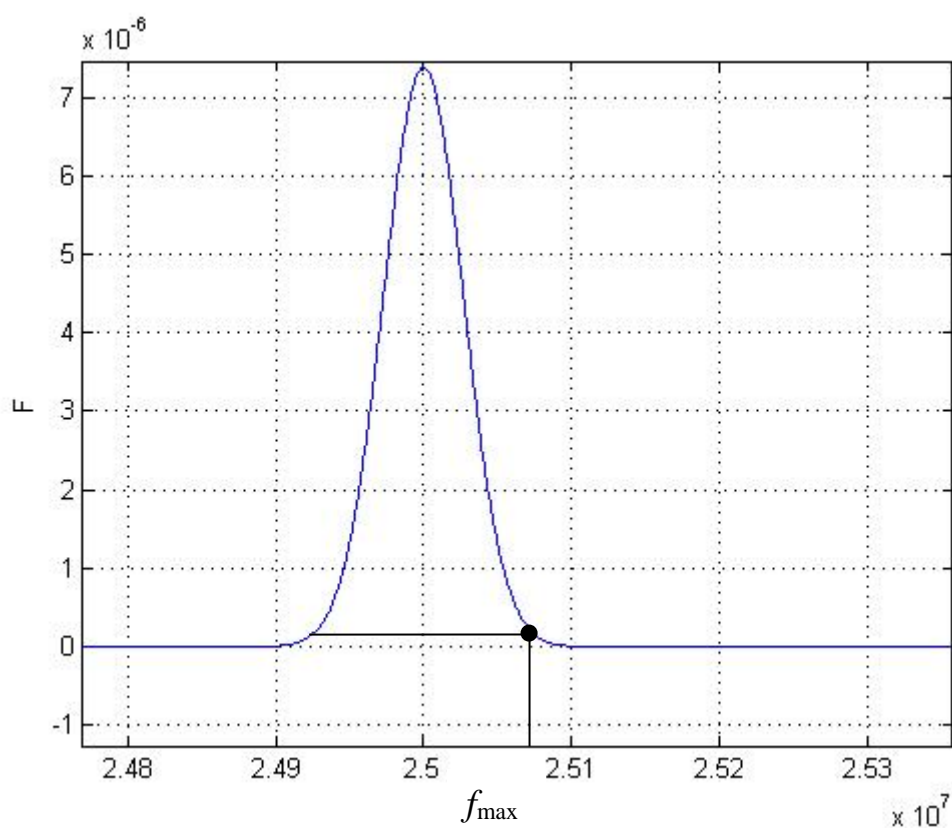


Рисунок 3.21 – Спектр сигналу для несучої частоти 25 ГГц

Якщо амплітуда знаходиться на рівні 0,1 А, тоді для кожної струмопровідної рідини знайдемо максимальну частоту:

- для 5 ГГц  $f_{\max} = 5,07$  ГГц;
- для 10 ГГц  $f_{\max} = 10,07$  ГГц;
- для 25 ГГц  $f_{\max} = 24,08$  ГГц.

Порівняння значення максимальної частоти, з часом затримки сигналу і товщиною неврахованого шару, за наведеними рисунками 3.12 – 3.17, занесені до таблиці 3.3.

Порівнюючи данні можна зробити висновок, що для водню йодиду (HI) час затримки радіоімпульсу  $\Delta t$ , зменшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  та несучої частоти, а для натрій хлориду (NaCl) та азотної кислоти (HNO<sub>3</sub>) час затримки радіоімпульсу  $\Delta t$ , збільшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  та несучої частоти.

Таблиця 3.3 – Порівняння значення максимальної частоти, з часом затримки сигналу і товщиною неврахованого шару

Рідина	водень йодид (HI)		
Максимальна частота $f_{\max}$ , ГГц	5	10	25
Час затримки $\Delta t$ , с	$4,16 \cdot 10^{-13}$	$4,1587 \cdot 10^{-13}$	$4,1585 \cdot 10^{-13}$
Неврахована товщина шару $h$ , м	$1,24755 \cdot 10^{-4}$	$1,24754 \cdot 10^{-4}$	$1,24752 \cdot 10^{-4}$
Рідина	натрій хлорид (NaCl)		
Максимальна частота $f_{\max}$ , ГГц	5	10	25
Час затримки $\Delta t$ , с	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$4,55 \cdot 10^{-11}$	$4,57 \cdot 10^{-11}$
Неврахована товщина шару $h$ , м	0,0135	0,014	0,0142
Рідина	азотна кислота (HNO <sub>3</sub> )		
Максимальна частота $f_{\max}$ , ГГц	5	10	25
Час затримки $\Delta t$ , с	$2,252 \cdot 10^{-11}$	$2,254 \cdot 10^{-11}$	$2,255 \cdot 10^{-11}$
Неврахована товщина шару $h$ , м	$6,55 \cdot 10^{-3}$	$6,56 \cdot 10^{-3}$	$6,57 \cdot 10^{-3}$

Найменший час затримки сигналу і товщина неврахованого шару у водню йодиду (HI) дорівнює  $\Delta t = 4,1585 \cdot 10^{-13}$  с,  $h = 1,24752 \cdot 10^{-4}$  м.

Реально приймач вказує відстань, яка менша часу проходження сигналу в товщі рідини на тривалість фронту  $\Delta t / 2$ .

Похибка радіохвильового рівнеміра буде визначатись виразом:

$$p = c \frac{\Delta t}{2}. \quad (3.20)$$

На рисунках 3.22 – 3.24 представлені графіки зміни похибку радіохвильового рівнеміра в залежності від провідності рідини.

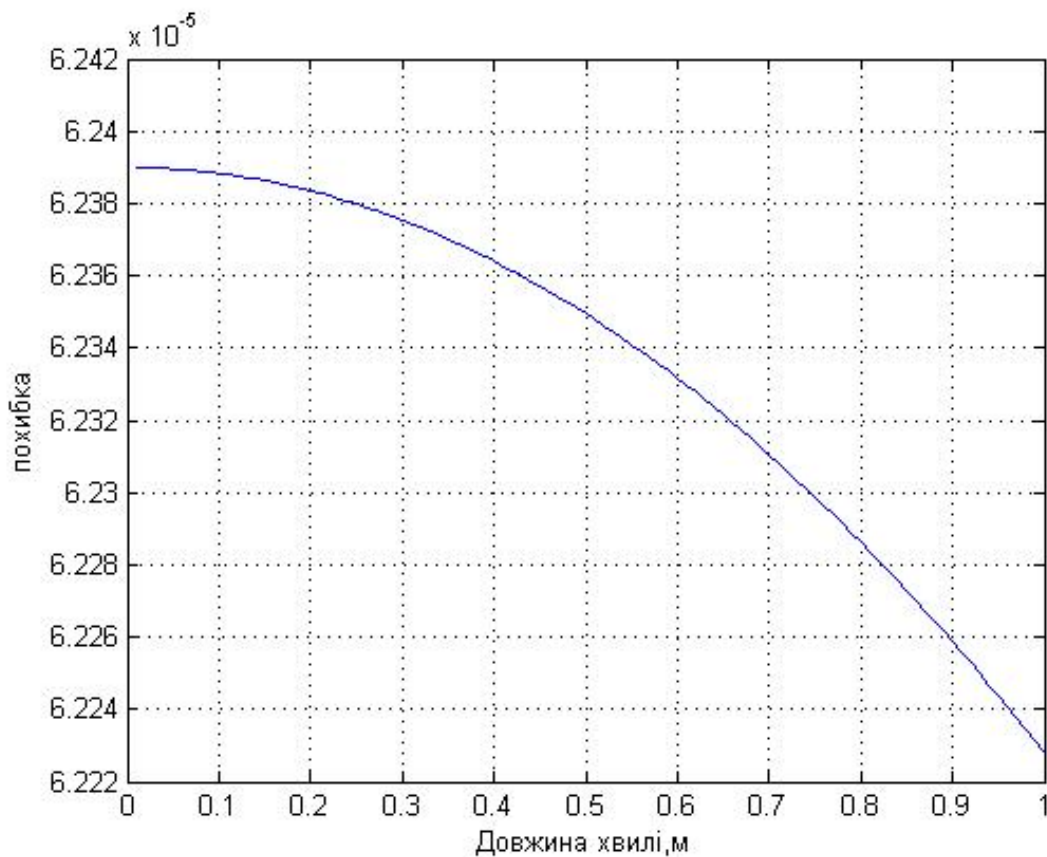


Рисунок 3.22 – Похибка рівня провідності для водню йодиду (HI)

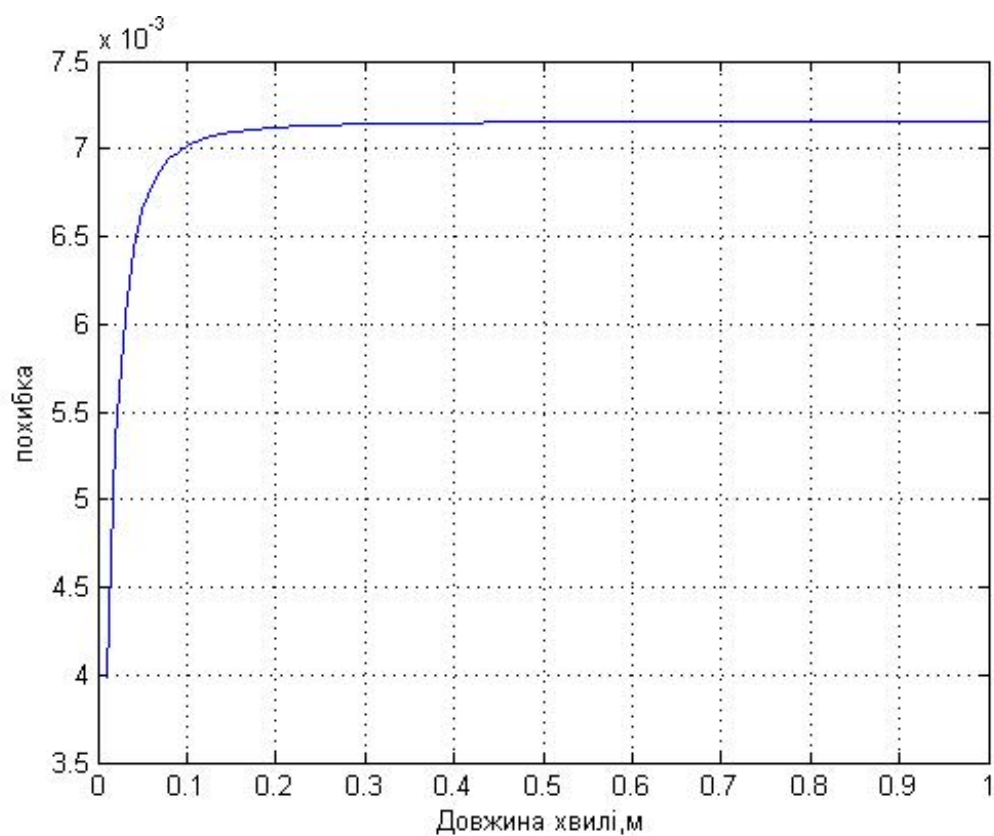


Рисунок 3.23 – Похибка рівня провідності для натрій хлориду (NaCl)

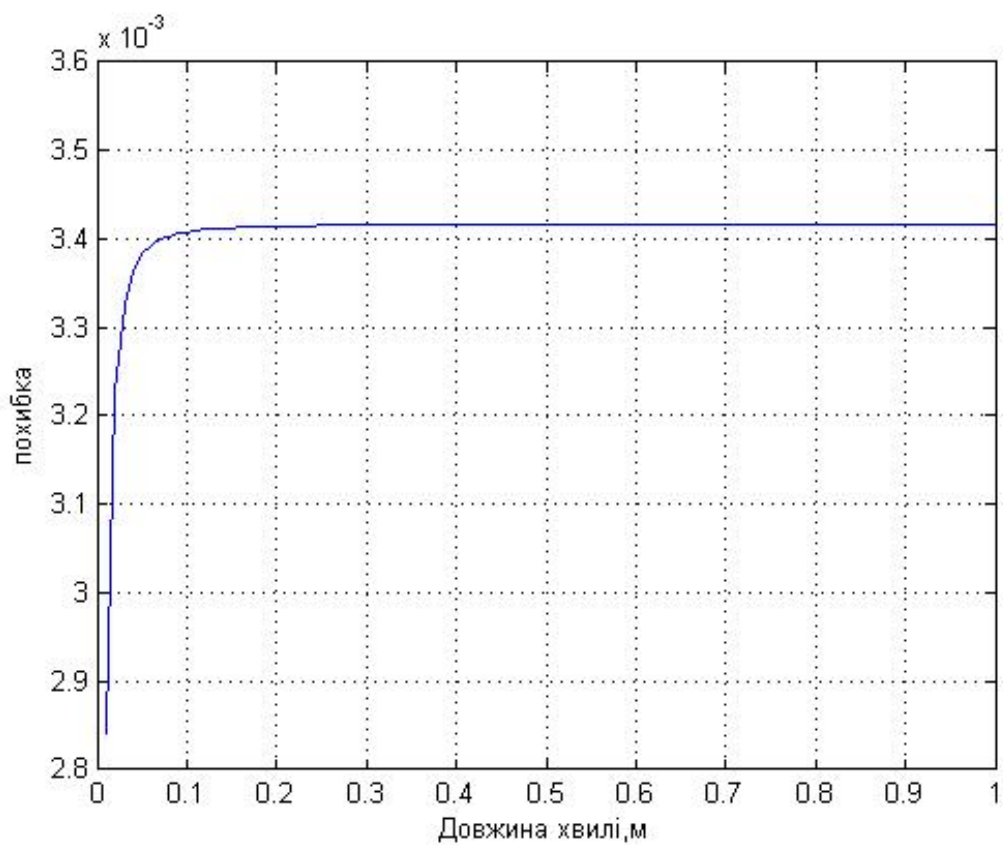


Рисунок 3.24 – Похибка рівня провідності для азотної кислоти (HNO<sub>3</sub>)

Використовуючи наведені графіки та формулу 3.20, визначаємо похибку:

– похибка рівня провідності для водню йодиду (HI) спадає зі збільшенням довжини хвилі  $\lambda$  від  $6,2385 \cdot 10^{-5}$  м до  $6,22 \cdot 10^{-5}$  м;

– похибка рівня провідності для натрій хлориду (NaCl) зростає зі збільшенням довжини хвилі  $\lambda$  від  $4 \cdot 10^{-3}$  м до піку  $7,2 \cdot 10^{-3}$  м і далі не змінюється;

– похибка рівня провідності для азотної кислоти (HNO<sub>3</sub>) зростає зі збільшенням довжини хвилі  $\lambda$  від  $2,85 \cdot 10^{-3}$  м до піку  $3,41 \cdot 10^{-3}$  м і далі не змінюється.

#### 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВИМІРЮВАНЬ РІВНЯ РІДИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОХВИЛЬОВИХ МЕТОДІВ

У даному розділі розглядаються питання охорони праці при проведенні вимірювань рівня рідини.

Робота спеціаліста у сучасному автоматизованому і механізованому виробництві являє собою процес взаємодії людини і машини, при якій здійснюється мобілізація психологічних і фізичних функцій людини. Тому важливим є дотримання оператором режиму праці й відпочинку.

На теперішній час великого значення набули питання використання й застосування цифрових вимірювальних приладів. У зв'язку з цим виникла потреба розробки забезпечення безпечних умов експлуатації даних приладів оператором [19].

Розглянемо характеристику небезпечних та шкідливих факторів. Небезпечні та шкідливі фактори, характерні для такого типу робіт, наведено у таблиці 4.1.

Мікрокліматичні умови - параметри температури, відносної вологості, в робочій зоні або в зоні обслуговування та на постійних робочих місцях, установлені відповідними нормами.

Об'єм у повітрі робочої зони не повинен перевищувати: озону -  $0,1 \text{ мг/м}^3$ , оксидів азоту -  $5 \text{ мг/м}^2$ , пилу -  $4 \text{ мг/м}^2$ .

Приміщення повинні мати природне і штучне освітлення. Природне світло повинне проникати через вікна, зорієнтовані, як правило, на північний схід. Вікна повинні мати регулюючі пристосування для відкривання, а також жалюзі, штори, зовнішні козирки тощо. Повинен бути забезпечений коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %.

Штучне освітлення приміщення обладнане системою загального рівномірного освітлення. Рівень освітленості на робочому столі в зоні розміщення документів повинний бути в межах від 300 лк до 500 лк.

Таблиця 4.1 - Перелік шкідливих та небезпечних факторів

Найменування	Джерело	Нормовані параметри
Підвищений рівень шуму	Друкувальна техніка, вентиляційна система	Гранично припустима норма звуку $L=50$ дБА
Рентгенівське випромінювання	Монітор ЕОМ	100 мкР/год
Підвищений потенціал статичної електрики	Діелектрична поверхня електричних приладів	Напруга електростатичного поля $E=15$ кВ/ м
Електромагнітне поле радіочастотного діапазону $f = 60$ кГц– $300$ МГц $f = 300$ МГц– $300$ ГГц	ЕПТ ПК	Щільність потоку енергії, ППЕ, Вт/см <sup>2</sup>
Змінне електричне поле і змінне магнітне поле $F = 50$ Гц	Електрична мережа та електрична апаратура	Напруженість електричного поля $E$ , В/м Магнітна індукція $B$ , Тл. Напруженість магнітного поля $H$ , А/м
Підвищена напруга, В	Електрична мережа, електроапаратура	Струм через тіло людини $I_h=(0,6-1,5)$ мА
Напруженість праці	Відповідальність, труднощі виробничого завдання	Категорія роботи: напружена – класу 3.2.

Проведемо розрахунок для освітлення на робочому місці (рисунок 4.1). Для цього будемо застосовувати крапковий метод розрахунку.

Крапковий метод застосовується для розрахунку висвітлення: горизонтальних рівномірно і нерівномірно освітлених поверхонь, вертикальних і похилих поверхонь, місцевого висвітлення.

Перевірити освітленість у точці А, робоче місце висвітлюється світильниками ОД із двома лампами ЛД-80 (люмінесцентне висвітлення). Висота підвісу світильника 3,0 м, відстань від точки А к світильникам 2, 3, 6, 7 дорівнює 2,0 м; відстань від точки А к світильникам 1, 5, 4, 8 дорівнює 2,5 м [19].

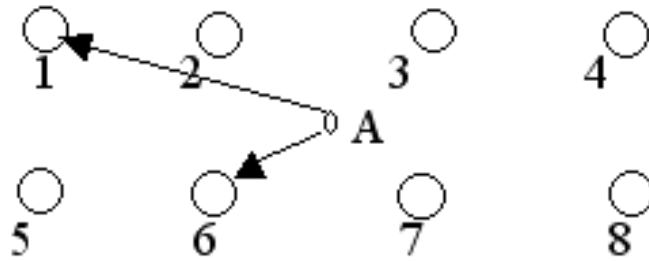


Рисунок 4.1 – Схема розташування світильників у лабораторії

Поведемо розрахунок освітленості від точки А к світильникам 2, 3, 6:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{H_n}, \quad (4.1)$$

де  $d$  – відстань від розрахункової точки;

$H_n$  – висота підвісу світильника.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{3,0} = 0,66.$$

Кут падіння світлового променя А від світильників 2, 3, 6, 7 дорівнює:

$$\alpha = 33^0; \cos^3 \alpha = 0,59; J_a = 198,$$

де  $J_a$  – сила світла лампи, кД.

Умовна освітленість дії світильника відповідно до формули:

$$e_r = \frac{J_a \cos^3 \alpha}{H_n^2}, \quad (4.2)$$



$$e_r = \frac{198 \cdot 0,59}{3^2} = 12,9.$$

Проведемо розрахунок освітленості в крапці А від світильників 1, 4, 5, 8:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2,5}{3,0} = 0,83.$$

Кут падіння світлового променя А від світильників 1, 4, 5, 8 дорівнює:

$$\alpha = 39^0; \cos^3 \alpha = 0,46; J_a = 157 \text{ кД};$$

$$e_r = \frac{157 \cdot 0,46}{3^2} = 8,02.$$

Сумарна умовна освітленість від врахованих світильників складе:

$$\sum e_r = 4 \cdot 12,9 + 4 \cdot 8,02 = 83,6.$$

Одержуємо фактичну горизонтальну освітленість у точці А:

$$E_r = \frac{2\Phi\mu\sum e}{1000K}, \quad (4.3)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт додаткової освітленості,  $\mu = 1,15$ ;

$K$  – коефіцієнт запасу;

$\Phi$  – світловий потік лампи,  $\Phi = 5220$  лм.

$$E_r = \frac{2 \cdot 3000 \cdot 1,15 \cdot 83,6}{1000 \cdot 1,5} = 384.$$

Для забезпечення нормованих рівнів шуму у виробничих приміщеннях і на робочих місцях застосовуються шумопоглинальні засоби, у якості яких повинні застосовуватися не згораючи або спеціальні перфоровані плити, панелі, мінеральна вата з максимальним коефіцієнтом звукопоглинання в межах частот від 31,5 Гц до 8000 Гц або інші матеріали аналогічного призначення. Крім того, необхідно застосовувати підвісні стелі з аналогічними властивостями.

У залежності від особливостей виробничого процесу, крім загальних вимог пожежної безпеки, здійснюються спеціальні протипожежні заходи щодо окремих видів виробництв, технологічних процесів і промислових об'єктів. Для споруджень і приміщень, у яких експлуатуються ВДТ, такі заходи визначені [19].

Організація пожежної охорони. Відповідальність за пожежну безпеку покладена на ректора університету. Він, у свою чергу, призначає відповідальних за пожежну безпеку окремих служб, відділів, складів і інших службових приміщень з покладанням на них обов'язків за спостереженням за справним станом первинних засобів пожежогасіння, дотримання протипожежного режиму, виконанню протипожежних заходів.

Пожежно-технічна комісія не рідше 1 разу на місяць зобов'язана проводити ретельне обстеження по дотриманню протипожежного режиму у всіх виробничих і службових приміщеннях. Вона повинна контролювати виконання розпоряджень Держпожежнагляд і витрата відпущених на ці заходи засобів.

Наявність струмоведучих частин, які можуть піддаватися гасінню, висуває певні вимоги до засобів пожежогасіння (мати діелектричні властивості). Як первинні засоби пожежогасіння, в такому разі, можна використовувати пінні вогнегасники марки ОХП-10, які придатні для гасіння струмоведучих елементів і хімічно малоактивні. Вогнегасники ОХП-10 дають струмінь довжиною до 8 метрів протягом 60 секунд і розраховані на покриття 50 м<sup>2</sup> площі приміщення.

## ВИСНОВКИ

На даному етапі найбільше розповсюдження отримали безконтактні засоби вимірювання. Найбільш перспективні та високонадійні радарні датчики, які відносяться до радіохвильового методу вимірювання рівня рідин.

Основною перевагою радарного методу є широкий діапазон вимірювання (до 50 м), незначна похибка вимірювання (до  $\pm 0,15\%$ ). Для діапазону вимірювання до 5 м – похибка  $0,05\%$ , а для діапазону вимірювання більше 5 метрів –  $0,1\%$ .

Для визначення похибки рівня провідності рідин радіоімпульсним методом в якості засобу вимірювання вибраний рівнемір фірми Rosemount серії 3300.

З'ясовано, що відстань до поверхні, яка відбиває збільшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$ .

Час затримки радіоімпульсу  $\Delta t$  для рідини НІ, зменшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  та несучої частоти, а для рідин NaCl та  $\text{HNO}_3$  час затримки радіоімпульсу  $\Delta t$ , збільшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  та несучої частоти. Найменший час затримки сигналу і товщина неврахованого шару у рідини НІ ( $\Delta t = 4,1585 \cdot 10^{-13}$  с,  $h = 1,24752 \cdot 10^{-4}$  м).

Визначена похибка рівня провідності рідин радіоімпульсним методом:  
похибка рівня провідності:

- для НІ від  $6,2385 \cdot 10^{-5}$  м до  $6,22 \cdot 10^{-5}$  м;
- для NaCl від  $4 \cdot 10^{-3}$  м до  $7,2 \cdot 10^{-3}$  м;
- для  $\text{HNO}_3$  від  $2,85 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,41 \cdot 10^{-3}$  м.

Рівнемір характеризується високими метрологічними параметрами, експлуатаційною надійністю, а також можливістю зв'язку з цифровими комунікаційними промисловими мережами.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин : навч. посіб. Львів : ЗНУ, 2000. 360 с.
2. Безвесільна О.М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: підручник. Житомир : ЖДТУ, 2006. 560 с.
3. Назаров В. Є. Аналіз сучасного стану методів і засобів вимірювального контролю рівня рідинних середовищ: навч. посіб. Северодонецьк: НУ ім. В. Даля, 2016. 114 с.
4. Леонт'єв В. О. Електротехнічні матеріали : навч. посіб. / за ред. В. О. Леонт'єва, С. В. Бевза, В. А. Видмиша. Вінниця : ВНТУ, 2013. 122 с.
5. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади: навч. посіб. К.: НТУУ «КПІ», 2007. 436 с.
6. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої / Терещенко М. Ф., Тимчик Г. С., Чухраєв М. В., Кравченко А. Ю. Київ : Вид-во «Політехніка» 2018. 180 с.
7. Дудніков А. А., Писаренко П. В. Проектування технологічних процесів сервісних підприємств. Вінниця: 2011. 400с.
8. Оборський Г. О., Слободяник П. Т. Вимірювання неелектричних величин. Одеса: Наука і техніка, 2005. 200 с.
9. Вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів методом тонкого діелектричного резонатора / В.І. Молчанов // *Electronics and Communications*. 2015. Vol. 20. №1(84). PP. 23 - 26
10. Трубаров І.В. Багатоелементні антени на циліндричних діелектричних резонаторах і смужкових лініях у випадку їх ортогональної взаємної орієнтації // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2011. № 47. с. 98 - 105
11. Рішан О.Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади / Рішан О.Й. К.: НУХТ, 2007. 162 с.

12. William Bolton/ Instrumentation and Control Systems / Elsevier Science 2004. 352с.
13. Subhas Chandra Mukhopadhyay. Smart Sensors and Sensing Technology/ Springer Berlin Heidelberg 2008. 411с.
14. Безвесільна О.М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: підручник. Житомир: ЖДТУ, 2006. 560 с.
15. Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посіб. Львів, 2007. 242 с.
16. Ілюшенко В. І., Туяхов А. І., С. М. Саф'янц. Вимірювання в енергетиці. Донецьк, 2008. 352 с.
17. Banister P. R. The Image Theory Electromagnetic Fields of a Horizontal Electric Dipole in the Presense of a conducting half Spase. *Radio Science*, 1982. Vol.17. № 5. P. 1095 - 1102.
18. Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Яцук В. О. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник. Львів : Бескид Біт, 2003. 544 с.
19. Ярова І. А. Охорона праці. Спеціальні розділи. Одеса: Наука і техніка, 2007. 76 с.

ДОДАТОК А  
ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ШЛЯХУ ПРОХОДЖЕННЯ ХВИЛІ В  
СТРУМОПРОВІДНІЙ РІДИНІ

Шлях проходження хвилі в рідині для водню йодиду:

```

l=10^(-2):10^(-2):1;
Er=2.9;
s=10630;
a=-1i*l;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*l);
de=a./b;
Dr=real(de);
D=imag(de);
fi=atan(D./Dr);
M=sqrt(D.^2+Dr.^2);
plot(l,fi);
xlabel('Фаза');
ylabel('Довжинахвилі');
grid on
figure
plot(l,M);%Dr
xlabel('Довжинахвилі');
ylabel('Амплітуда');
grid on

```

Шлях проходження хвилі в рідині натрій хлориду :

```

l=10^(-2):10^(-2):1;
Er=6.3;
s=3.4;
a=-1i*l;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*l);
de=a./b;
Dr=real(de);
D=imag(de);
fi=atan(D./Dr);
M=sqrt(D.^2+Dr.^2);
plot(l,fi);
xlabel(' Довжина хвилі');
ylabel(' Фаза ');
grid on
figure
plot(l,M);%Dr
xlabel('Довжина хвилі');
ylabel('Амплітуда');
grid on

```

Шлях проходження хвилі в рідині для азотної кислоти:

```
l=10^(-2):10^(-2):1;  
Er=1.77;  
s=1.5;  
a=-1i*l;  
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*l);  
de=a./b;  
Dr=real(de);  
D=imag(de);  
fi=atan(D./Dr);  
M=sqrt(D.^2+Dr.^2);  
plot(l,fi);  
xlabel('Довжина хвилі');  
ylabel(' Фаза ');  
grid on  
figure  
plot(l,M);%Dr  
xlabel('Довжина хвилі');  
ylabel('Амплітуда');  
grid on
```



ДОДАТОК Б  
ПРОГРАМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕВРАХОВАНОЇ ТОВЩИНИ ШАРУ  
ВІДБИВАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЧАСУ ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛУ

Для водню йодиду:

```

l=10^-2:10^-2:1;
Er=2.9;
s=10630;
om=2*pi*300./l;
e=2.*om.*Er-i.*36000.*pi.*s;
d=2.*(sqrt(Er^2-i.*36000.*pi.*om));
D=e./(300*d);
V=(1./D).*10^(6);
a=-1i*l;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*1);
de=a./b;
h1=real(de)
plot(l,D);
grid on
dT=de./V;
t=real(dT);
c=3*10^8;
p=c.*t./2;
h=t*c;
plot(l,h);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м'); ylabel('Товщина,м');
plot(l,t);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');ylabel('Час,с');

```

Для натрій хлориду:

```

l=10^-2:10^-2:1;
Er=6.3;
s=3.4;
om=2*pi*300./l;
e=2.*om.*Er-i.*36000.*pi.*s;
d=2.*(sqrt(Er^2-i.*36000.*pi.*om));
D=e./(300*d);
V=(1./D).*10^(6);
a=-1i*l;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*1);
de=a./b;
h1=real(de)
plot(l,D);
grid on
dT=de./V;
t=real(dT);

```

```

c=3*10^8;
p=c.*t./2;
h=t*c;
plot(l,h);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м'); ylabel('Товщина,м');
plot(l,t);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м'); ylabel('Час,с');

```

Для азотної кислоти:

```

l=10^-2:10^-2:1;
Er=1.77;
s=1.5;
om=2*pi*300./l;
e=2.*om.*Er-i.*36000.*pi.*s;
d=2.*(sqrt(Er^2-i.*36000.*pi.*om));
D=e./(300*d);
V=(1./D).*10^(6);
a=-1i*l;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*1);
de=a./b;
h1=real(de)
plot(l,D);
grid on
dT=de./V;
t=real(dT);
c=3*10^8;
p=c.*t./2;
h=t*c;
plot(l,h);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м'); ylabel('Товщина,м');
plot(l,t);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м'); ylabel('Час,с');

```

ДОДАТОК В  
ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ СПЕКТРУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО  
СИГНАЛУ ПРИ РІЗНИХ НЕСУЧИХ ЧАСТОТ

Для несучої частоти 5 ГГц:

```
A=1;
ti=10.*10^(-6);
a=1.2./ti;
f0=5.*10^6;
om0=2*pi*f0;
d=0.00002.*f0;
f1=0.8*f0;
f2=f0+0.02.*f0;
% f3=1.2*f0;
f=f1:d:f2;
om=2*pi*f;
F=(A.*(sqrt(pi))./(2.*a)).*exp(-((om-om0)/(2.*a)).^2);
plot(f,F);
grid on
xlabel('f');
ylabel('F');
```

Для несучої частоти 10 ГГц:

```
A=1;
ti=10.*10^(-6);
a=1.2./ti;
f0=10.*10^6;
om0=2*pi*f0;
d=0.00002.*f0;
f1=0.8*f0;
f2=f0+0.02.*f0;
% f3=1.2*f0;
f=f1:d:f2;
om=2*pi*f;
F=(A.*(sqrt(pi))./(2.*a)).*exp(-((om-om0)/(2.*a)).^2);
plot(f,F);
grid on
xlabel('f');
ylabel('F');
```

Для несучої частоти 25 ГГц:

```
A=1;
ti=10.*10^(-6);
a=1.2./ti;
f0=25.*10^6;
om0=2*pi*f0;
d=0.00002.*f0;
```

```
f1=0.8*f0;  
f2=f0+0.02.*f0;  
%f3=1.2*f0;  
f=f1:d:f2;  
om=2*pi*f;  
F=(A.*(sqrt(pi))./(2.*a)).*exp(-((om-om0)/(2.*a)).^2);  
plot(f,F);  
grid on  
xlabel('f');  
ylabel('F');
```

ДОДАТОК Г  
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
(ХНАДУ)

Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ  
бакалавра

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ З  
ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОХВИЛЬОВИХ МЕТОДІВ ВІДБИТТЯ

Завідувач кафедри, к.т.н., проф.  
Нормоконтролер, к. т. н., доц.  
Керівник к. т. н., доц.  
Студент гр. ММ 41- 19



Богатов О. І.  
Москаленко М. В.  
Петрукович Д. Є.  
Костін В. В.

м. Харків - 2023

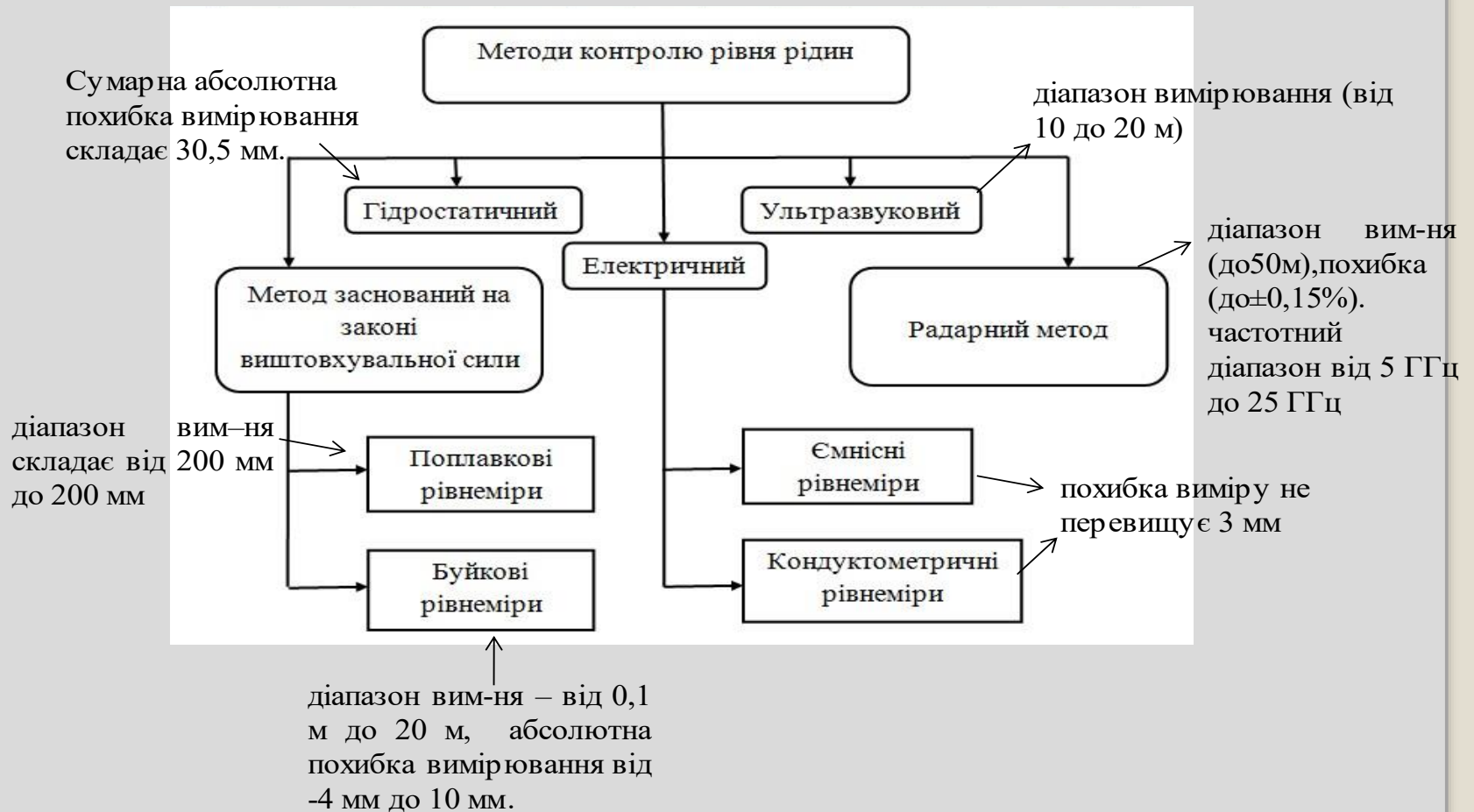


*Об'єкт досліджень* – процес утворення похибки радіохвильового рівнеміра при вимірюванні рівня провідних рідин.

*Мета роботи* – розробка і аналіз математичної моделі похибки рівня рідин, які проводять струм радіоімпульсним методом

*Методи дослідження* – методи еквівалентних дзеркальних відображень.

## Класифікація методів контролю рівня рідин



## Особливості розповсюдження радіоімпульсних сигналів в середовищах, які проводять струм

Для вирішення задачі, яка поставлена у дипломній роботі із таблиці виберемо три рідини, які добре проводять струм – водень йодид (HI), азотна кислота ( $\text{HNO}_3$ ) та натрій хлорид (NaCl).

Середовища, які по властивостям, наближаються до ідеального провідника, задовольняють умову:

$$60\sigma\lambda \gg \varepsilon_r \quad (1)$$

де  $\varepsilon_r$  – діелектрична проникність рідини;  
 $\sigma$  – електропровідність рідини, См/м;  
 $\lambda$  – довжина хвилі, м.

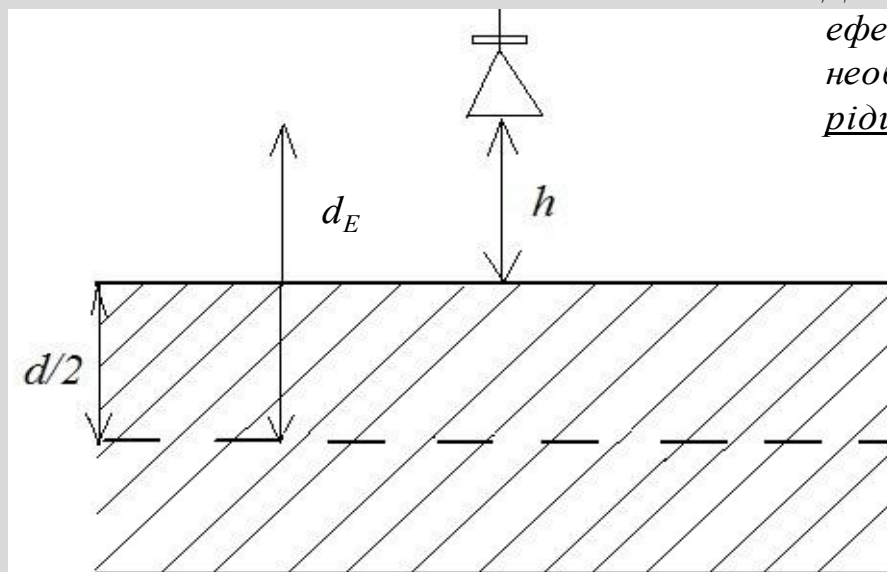
Рідина	Електропровідність $\sigma$ , См/м	Діелектрична проникність, $\varepsilon_r$
Азотна кислота ( $\text{HNO}_3$ )	1,5	1,77
Водень йодид (HI)	10630	2,9
Натрій хлорид (NaCl)	3,4	6,3

Вибрано рідини, які добре проводять струм – HI,  $\text{HNO}_3$  та NaCl і їх значення задовольняють умову.

Всі розрахунки будуть проводитися в програмі Matlab з використанням цих рідин.

## Місце розташування ефективної відбиваючої поверхні рідин

Для визначення місця розташування ефективної відбиваючої поверхні рідин, які проводять струм, необхідно зобразити схему вимірювання рівня рідини. Ця схема показана на рисунку.



— — реальний рівень рідини; - - - - положення ефективної відбиваючої поверхні;  
 $h$  – відстань від передатчика до поверхні рідини;  $d/2 = d_E/2$  – глибина зсуву відбиваючої поверхні

Рисунок 1 – Спрощена схема вимірювання рівня рідини

Для того, щоб визначити місце розташування ефективної відбиваючої поверхні рідини необхідно знайти шлях проходження хвилі в рідині:

$$d_E = \frac{-j\lambda}{\pi\sqrt{(\epsilon_r - 1) - j60\sigma\lambda}} \quad (1)$$

де  $\epsilon_r$  – діелектрична проникність

$\sigma$  – проникність рідин

$\lambda$  – довжина хвилі, м.

Для визначення місця розташування ефективної відбиваючої поверхні струмопровідної рідин скористаємося методом дзеркальних відображень. Сутність методу полягає в заміні звичайно-провідної поверхні на ідеально-провідну поверхню, віднесену на деяку комплексну відстань  $d/2$ .

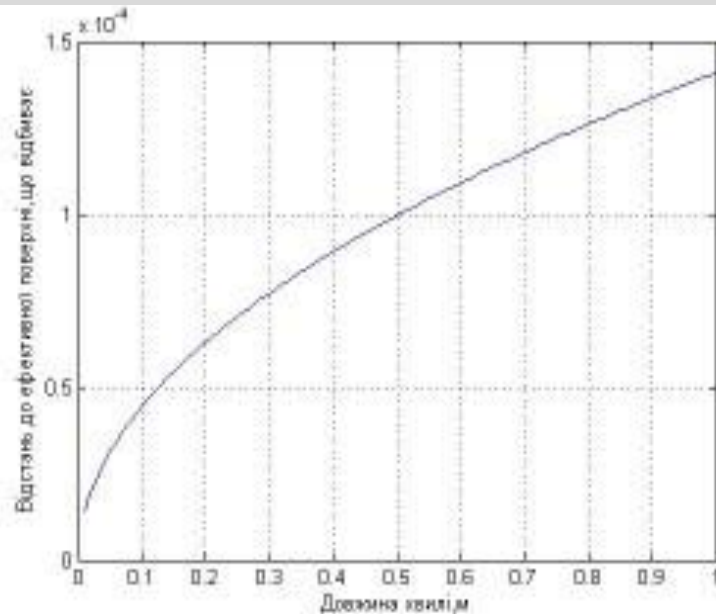


Рисунок 1 – Відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ) для HI

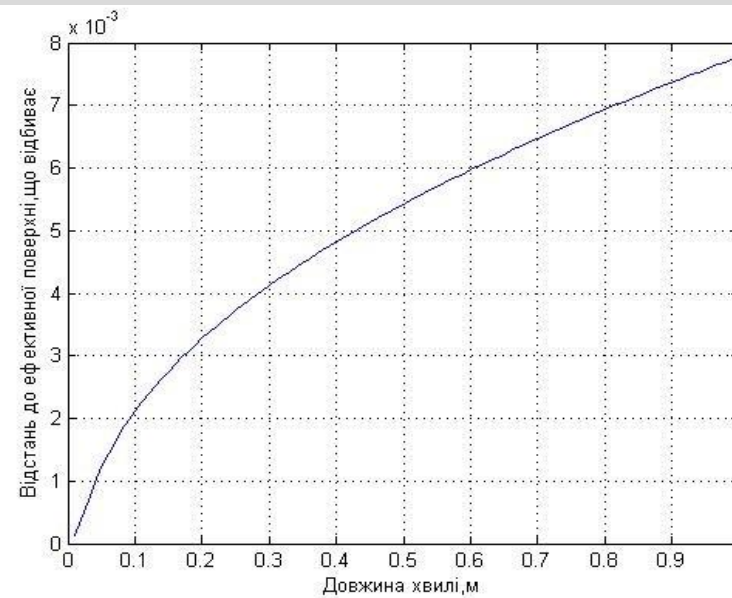


Рисунок 2 – Відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ) для NaCl

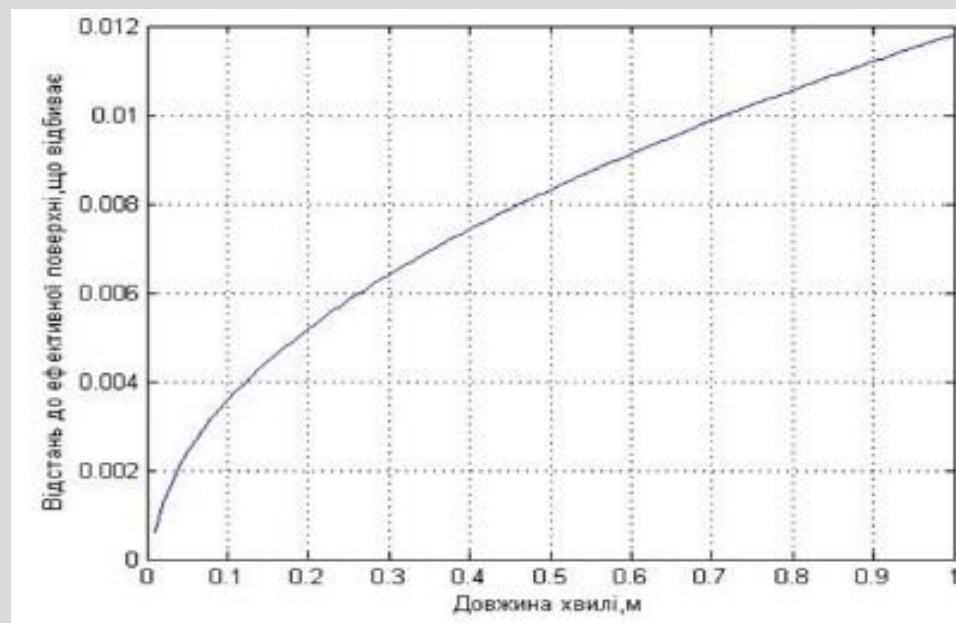


Рисунок 3 – Відстань до поверхні, що відбиває ( $d_E/2$ ) для  $\text{HNO}_3$

## Визначення часу затримки радіоімпульсу в рідині з врахованою товщиною шару відбиваючої поверхні та похибки рівня рідин

Час проходження сигналу в товщі рідини, розташованої над ефективно-відбиваючою поверхнею має вигляд:

$$\Delta t = \frac{d_E}{V_{\text{зр}}}, \quad (1)$$

де  $d_E$  – шлях проходження хвилі в рідині, м;

$V_{\text{зр}}$  – швидкість переміщення максимуму амплітуди радіоімпульсу, м/с.

Щоб знайти швидкість переміщення максимуму амплітуди радіоімпульсу необхідно знайти похідну частоти  $\omega$  від постійної переміщення  $\gamma$ :

$$V_{\text{зр}} = \frac{d\omega}{d\gamma} \quad (2)$$

Частоту знайдемо за формулою:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{300}{\lambda}, \quad (3)$$

Постійна розповсюдження обчислюється за формулою:

$$\gamma = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda}}{\lambda} \quad (4)$$

Знайдемо похідну від постійної розповсюдження:

$$\gamma' = \frac{1}{300} \left[ \frac{1(2\omega\epsilon_r - j36000\pi\sigma)}{2\sqrt{\epsilon_r\omega^2 - j36000\pi\omega}} \right] \quad (5)$$

Знайдемо невраховану товщину шару відбиваючої поверхні за формулою:

$$h = \Delta t \cdot c, \quad (6)$$

де:  $c$  – швидкість світла, м/с;

Похибка радіохвильового рівнеміра буде мати вигляд:

$$p = c \frac{\Delta t}{2} \quad (7)$$



## Програми для визначення неврахованої товщини шару відбиваючої поверхні, часу проходження сигналу та похибки

Для водню йодиду:

```
l=10^2:10^2:1;
Er=2.9;
s=10630;
om=2*pi*300./l;
e=2.*om.*Er-i.*36000.*pi.*s;
d=2.*(sqrt(Er^2-i.*36000.*pi.*om));
D=e./(300*d);
V=(1./D).*10^(6);
a=-1i*1;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*1);
de=a./b;
h1=real(de)
plo(1,D);
grid on
dT=de./V;
t=real(dT);
c=3*10^8;
p=c.*t./2;
h=t*c;
plo(1,h);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');
ylabel('Товщина ,м');
plo(1,t);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');
ylabel('Час,с');
```

Для натрій хлориду:

```
l=10^2:10^2:1;
Er=6.3;
s=3.4;
om=2*pi*300./l;
e=2.*om.*Er-i.*36000.*pi.*s;
d=2.*(sqrt(Er^2-i.*36000.*pi.*om));
D=e./(300*d);
V=(1./D).*10^(6);
a=-1i*1;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*1);
de=a./b;
h1=real(de)
plo(1,D);
grid on
dT=de./V;
t=real(dT);
c=3*10^8;
p=c.*t./2;
h=t*c;
plo(1,h);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');
ylabel('Товщина ,м');
plo(1,t);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');
ylabel('Час,с');
```

Для азотної кислоти:

```
l=10^2:10^2:1;
Er=1.77;
s=1.5;
om=2*pi*300./l;
e=2.*om.*Er-i.*36000.*pi.*s;
d=2.*(sqrt(Er^2-i.*36000.*pi.*om));
D=e./(300*d);
V=(1./D).*10^(6);
a=-1i*1;
b=pi*sqrt((Er-1)-1i*60*s*1);
de=a./b;
h1=real(de)
plo(1,D);
grid on
dT=de./V;
t=real(dT);
c=3*10^8;
p=c.*t./2;
h=t*c;
plo(1,h);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');
ylabel('Товщина ,м');
plo(1,t);
grid on
xlabel('Довжина хвилі,м');
ylabel('Час,с');
```

## Графіки для визначення часу затримки радіоімпульсу в рідинах

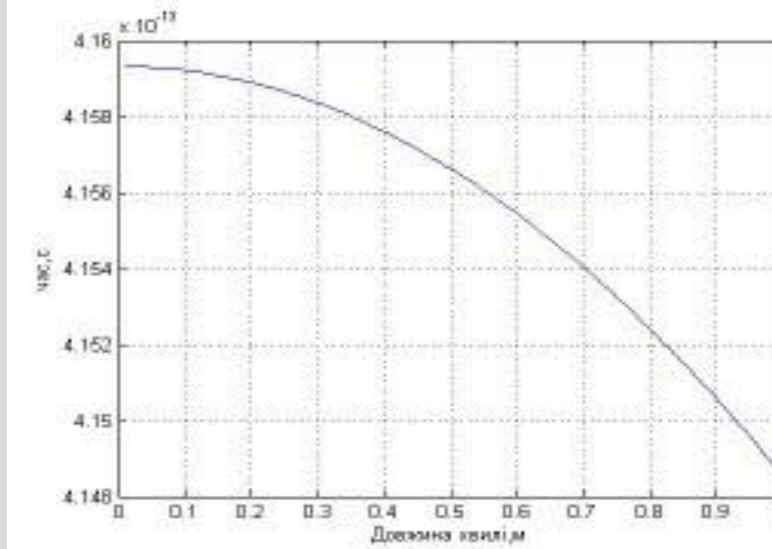


Рисунок 1 - Час проходження сигналу в товщі рідини для HI

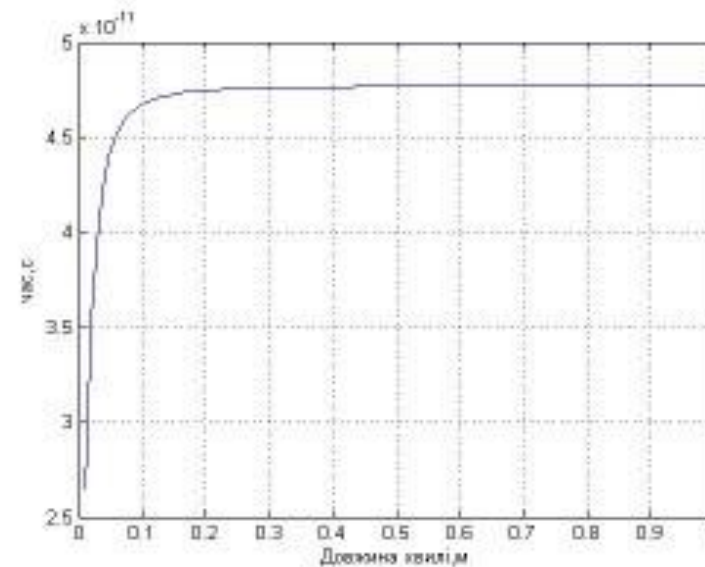


Рисунок 2 - Час проходження сигналу в товщі рідини для NaCl

## Графіки для визначення часу затримки радіоімпульсу в рідинах

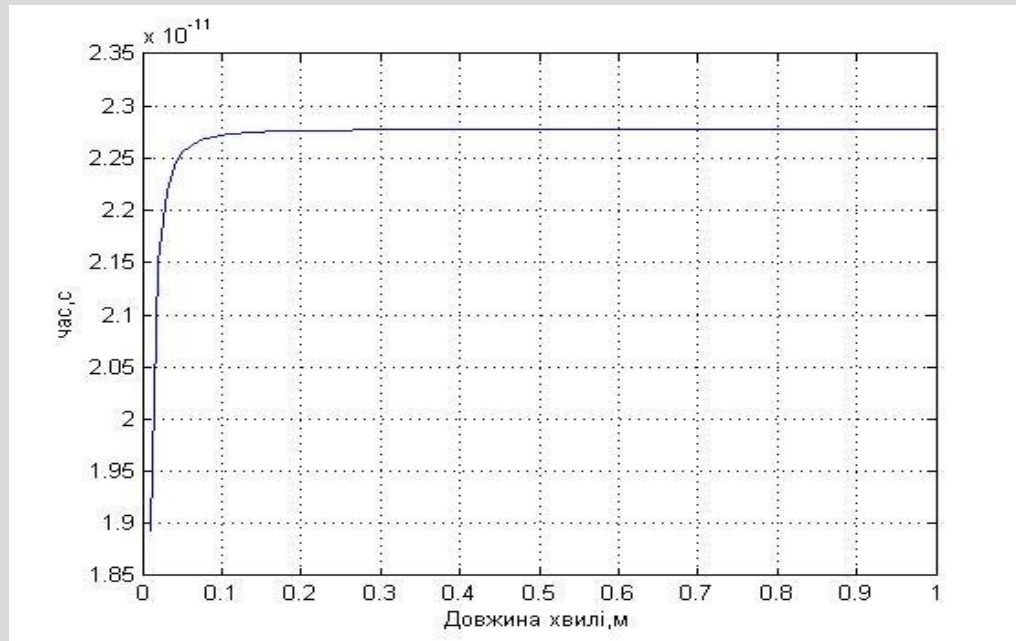


Рисунок 3 - Час проходження сигналу в товщі рідини для  $\text{HNO}_3$

## Графіки для неврахованої товщини шару відбиваючої поверхні

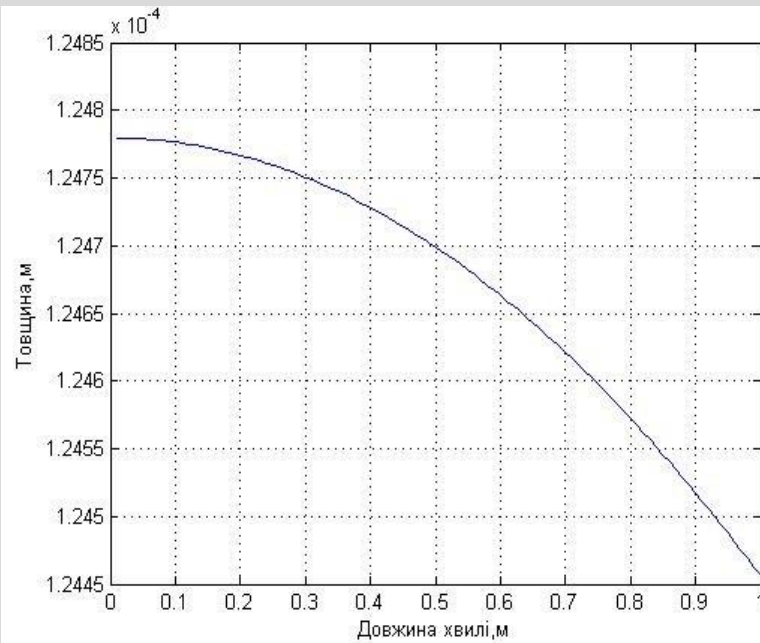


Рисунок 1 – Неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для HI

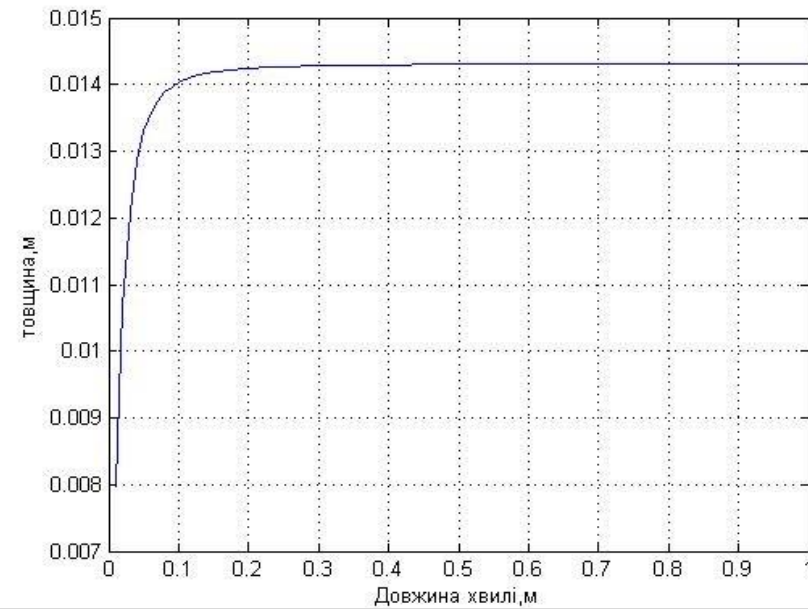


Рисунок 2 – Неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для NaCl

## Графіки для неврахованої товщини шару відбиваючої поверхні

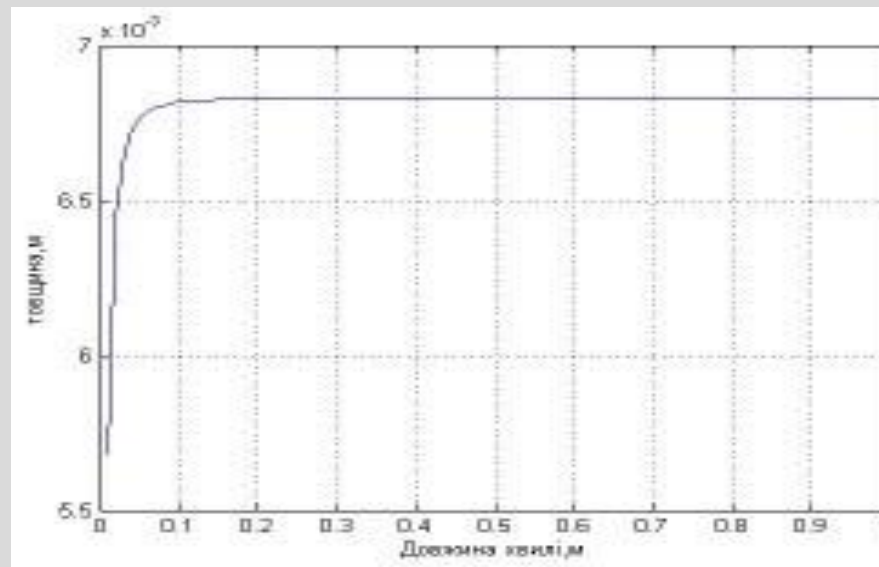


Рисунок 3 – Неврахована товщина шару відбиваючої поверхні для  $\text{HNO}_3$

## Графіки для визначення похибки рівня рідин, які проводять струм

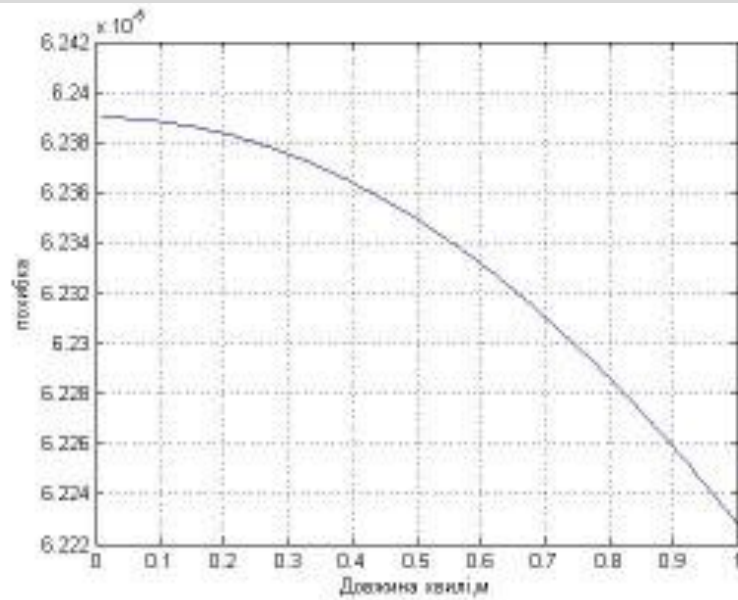


Рисунок 1 – Похибка рівня рідин, які проводять струм для НІ

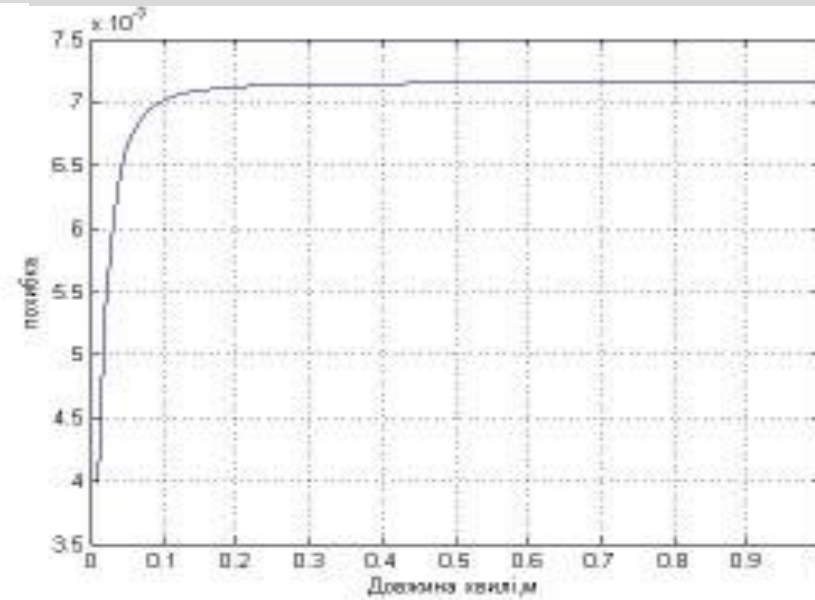


Рисунок 2 – Похибка рівня рідин, які проводять струм для NaCl

## Графіки для визначення похибки рівня рідин, які проводять струм

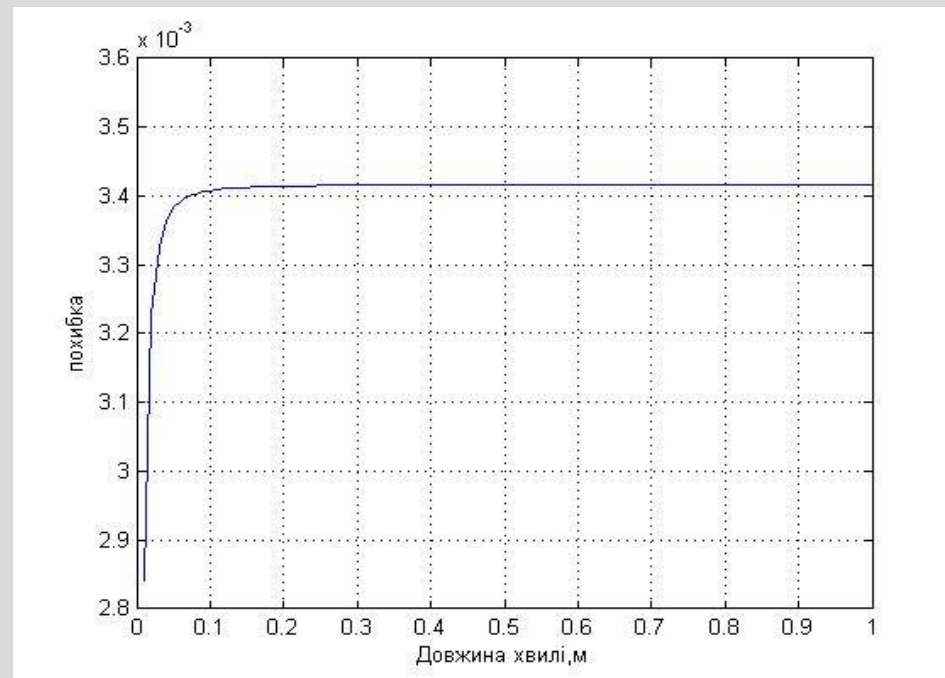


Рисунок 3 – Похибка рівня рідин, які проводять струм для  $\text{HNO}_3$

## ВИСНОВКИ

Найбільше розповсюдження отримали безконтактні засоби вимірювання. Найбільш перспективні та високонадійні радарні датчики, які відносяться до радіохвильового методу вимірювання рівня рідин.

Основною перевагою радарного методу є широкий діапазон вимірювання (до 50 м), незначна похибка вимірювання (до  $\pm 0,15\%$ ). Для діапазону вимірювання до 5 м – похибка 0,05 %, а для діапазону вимірювання більше 5 метрів – 0,1% .

Для визначення похибки рівня рідин радіоімпульсним методом в якості ЗВ вибраний рівнемір фірми Rosemount серії 3300 .

З'ясовано, що відстань до поверхні, яка відбиває збільшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$ .

Час затримки радіоімпульсу  $\Delta t$  для рідини НІ, зменшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  та несучої частоти, а для рідин NaCl та  $\text{HNO}_3$  час затримки радіоімпульсу  $\Delta t$ , збільшується при збільшенні довжини хвилі  $\lambda$  та несучої частоти. Найменший час затримки сигналу і товщина неврахованого шару у рідині НІ ( $\Delta t = 4,1585 \cdot 10^{-13}$  с,  $h = 1,24752 \cdot 10^{-4}$  м).

Визначена похибка рівня провідності рідин радіоімпульсним методом: похибка рівня провідності :

- для НІ від  $6,2385 \cdot 10^{-5}$  м до  $6,22 \cdot 10^{-5}$  м;
- для NaCl від  $4 \cdot 10^{-3}$  м до  $7,2 \cdot 10^{-3}$  м;
- для  $\text{HNO}_3$  від  $2,85 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,41 \cdot 10^{-3}$  м.

Рівнемір характеризується високими метрологічними параметрами а також можливістю зв'язку з цифровими комунікаційними промисловими мережами.