

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Удосконалення технологій телекомунікаційного моніторингу для  
геофізичного виявлення вуглеводневих покладів із застосуванням сучасних  
електромагнітних методів»

Виконав: студент 2 курсу, групи  
2МТТ

спеціальності 172 «Телекомунікації  
та радіотехніка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Ященко П. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Ігнат'єв С.Є.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава – 2025 рік

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена удосконаленню технологій телекомунікаційного моніторингу для геофізичного виявлення вуглеводневих покладів на основі сучасних електромагнітних методів. У дослідженні виконано комплексне моделювання процесів взаємодії електромагнітного випромінювання з анізотропним середовищем, характерним для геологічних структур над вуглеводневими покладами. Здійснено аналіз електрофізичних та фізико-хімічних властивостей середовища, що визначають реакцію порід на вплив електромагнітних сигналів, а також модульованих коливань різних типів.

У роботі побудовано електродинамічні моделі для оцінювання впливу бігармонійних і модульованих сигналів у низькочастотному та високочастотному режимах на тензор діелектричної проникності анізотропного середовища. Отримані результати дозволили дослідити дисперсійні та частотні характеристики геофізичних структур, визначити особливості відгуку середовища та виокремити інформативні електромагнітні ознаки, пов'язані з наявністю вуглеводневих покладів.

Практична частина роботи присвячена розробленню та обґрунтуванню методів реєстрації природного та збуреного електромагнітного випромінювання для ідентифікації меж анізотропних утворень. Запропоновано підходи до локалізації вуглеводневих покладів за допомогою модульованих сигналів, аналізу змін імпедансу антен та використання акустичного впливу. Сформовано структурну модель радіотехнічної системи телекомунікаційного моніторингу, орієнтованої на підвищення точності геофізичної розвідки.

**Ключові слова:** електромагнітні методи, телекомунікаційний моніторинг, анізотропне середовище, вуглеводневі поклади, діелектрична проникність, бігармонійний сигнал, модульовані сигнали, геофізичне моделювання, електромагнітне випромінювання, радіотехнічна система.

## ABSTRACT

The master's thesis focuses on improving telecommunication monitoring technologies for the geophysical detection of hydrocarbon deposits through the application of modern electromagnetic methods. The research provides comprehensive modelling of the interaction between electromagnetic radiation and the anisotropic geological media characteristic of formations above hydrocarbon reservoirs. The study includes an analysis of the electrophysical and physicochemical properties of the environment, which determine its response to multi-frequency and dual-frequency electromagnetic excitation, as well as various types of modulated signals.

Electrodynamic models were developed to evaluate the influence of biharmonic and modulated signals in both low-frequency and high-frequency regimes on the dielectric permittivity tensor of anisotropic media. The obtained results enabled the investigation of dispersion and frequency characteristics of geophysical structures, the identification of medium-specific responses, and the extraction of informative electromagnetic indicators associated with the presence of hydrocarbon deposits.

The practical part of the thesis addresses the development and justification of methods for registering natural and induced electromagnetic radiation for identifying the boundaries of anisotropic formations. New approaches are proposed for localizing hydrocarbon deposits using modulated signals, analysing antenna impedance variations, and employing acoustic stimulation. A structural model of a radio engineering system for telecommunication monitoring is developed to enhance the accuracy of geophysical exploration.

**Keywords:** electromagnetic methods, telecommunication monitoring, anisotropic medium, hydrocarbon deposits, dielectric permittivity, biharmonic signal, modulated signals, geophysical modelling, electromagnetic radiation, radio engineering system.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки  
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
 Рівень вищої освіти Магістр  
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,  
 електроніки та телекомунікацій  
 О.В. Шефер  
 « 03 » \_\_\_\_\_ 09 \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ Яценку Павлу Олеговичу

1. Тема проекту (роботи) «Удосконалення технологій телекомунікаційного моніторингу для геофізичного виявлення вуглеводневих покладів із застосуванням сучасних електромагнітних методів»

Керівник проекту (роботи) Ігнат'єв Станіслав Євгенович, к.г.н., професор  
 затверджена наказом вищого навчального закладу від « 03 » 09 2025 року № 4025 ф. а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідними даними є матеріали зібрані під час проходження переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно зробити) Моделювання процесу взаємодії електромагнітного випромінювання і середовища над покладами. Моделювання взаємодії електромагнітної хвилі з анізотропним середовищем. Аналіз впливу ЧМ сигналу на середовище. Дослідження дисперсійних характеристик середовища над покладами під впливом височастотного коливання. Аналіз взаємодії АЧМ сигналів з анізотропним середовищем. Практична реалізація способу реєстрації природного випромінювання покладів. Реєстрація меж анізотропного середовища із використанням акустичного сигналу. Дослідження локалізації вуглеводневих покладів із використанням моделюваних сигналів. Використання вимірювань імпедансу антен для виділення анізотропних неоднорідностей. Структурна побудова радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів. Висновки.

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

Мета об'єкт та предмет дослідження. Модель розрізу геологічного профілю над покладами. Розподіл коефіцієнта поглинання залежно від довжини хвилі. Графік швидкості зміни області високих частот від резонансної взаємодії. Розрахунок частотної взаємодії з вуглеводородними покладами. Вплив показника заломлення на

резонансну частоту та принцип збудження коливань для виявлення покладів. Структурна схема пристрою, що реалізує спосіб реєстрації природного випромінювання покладів. Характеристики двочастотної взаємодії електромагнітної хвилі з покладами. Структурна схема установки для реалізації метода альтернативних частот. Структурна схема для дослідження меж нафтових покладів у режимі АМ сигналів. Архітектура телекомунікаційної системи виявлення вуглеводнів. Структурна схема пристрою для вимірювання відношення коефіцієнтів відображення. Розподіл концентрації вуглеводнів, залежно від поверхневої електромагнітної хвилі. Схеми електрична принципова радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів. Залежності діелектричної проникності порід від коефіцієнта пористості. Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1	Дослідження фізико-хімічних властивостей середовища в околі ВВП.	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Вплив бігармонійного сигналу в режимі низькочастотного потужного сигналу на анізотропні утворення.	21.10.25	I	25%	Пл. 2
3	Дослідження частотних характеристик тензора діелектричної проникності в режимі двочастотної дії електромагнітної хвилі.	04.11.25		40%	Пл. 3
4	Дослідження частотних характеристик тензора діелектричної проникності середовища при дії модульованих сигналів.	11.11.25		50 %	Пл. 4
5	Практичне застосування методу реєстрації кордонів вуглеводневих покладів щодо аномальних змін напруженості електричного поля.	18.11.25	II	60%	Пл. 5
6	Використання вимірювань імпедансу антен для виділення анізотропних неоднорідностей.	25.11.25		70%	Пл. 6
7	Аналіз структурної побудови радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів.	09.12.25		90%	Пл. 8
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 10

Магістрант

(підпис)

Яценко П. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Ігнат'єв С.Є.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Моделювання процесу взаємодії електромагнітного випромінювання і середовища над вуглеводородними покладами	11
1.1.1 Аналіз електрофізичних властивостей середовища на околиці УВЗ	11
1.1.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей середовища в околі	11
ВВП	
1.2. Електродинамічне моделювання взаємодії ЕМВ із середовищем над ВВП	14
1.2.1. Моделювання фізичних процесів у геофізиці	14
1.2.2. Моделювання взаємодії електромагнітної хвилі з анізотропним середовищем	16
1.2.3. Взаємодія бігармонійного сигналу з анізотропним середовищем	18
1.2.4 Вплив бігармонійного сигналу в режимі низькочастотного потужного сигналу на анізотропні утворення	20
1.2.5 Вплив бігармонічного сигналу в режимі потужного високочастотного сигналу на анізотропне середовище	23
1.2.6 Вплив амплітудно-модульованого сигналу на анізотропне середовище	24
1.2.7 Вплив ЧМ сигналу на анізотропне середовище	25
1.3 Висновкт за розділом та постановка завдання дослідження	27
2 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА	29
2.1 Дослідження дисперсійних характеристик середовища над вуглеводневими покладами під впливом багаточастотного коливання	29
2.2 Дослідження частотних характеристик тензора діелектричної	30

проникності в режимі двочастотної дії електромагнітної хвилі	
2.2.1 Частотні характеристики тензора діелектричної проникності в режимі потужного ВЧ сигналу	36
2.3. Дослідження частотних характеристик тензора діелектричної проникності середовища при дії модульованих сигналів	38
2.3.1. Аналіз взаємодії АМ-сигналів з анізотропним середовищем	38
2.3.2. Аналіз взаємодії ЧС-сигналів з анізотропним середовищем	40
2.3.3. Аналіз взаємодії амплітудно-частотної модуляції сигналів з анізотропним середовищем	43
2.4 Висновки за розділом	44
3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	46
3.1. Практична реалізація способу реєстрації природного випромінювання вуглеводневих покладів	46
3.2 Практичне застосування методу реєстрації кордонів вуглеводневих покладів щодо аномальних змін напруженості електричного поля на двох частотах	50
3.3 Реєстрація меж анізотропного середовища із використанням акустичного сигналу	54
3.4 Дослідження локалізації вуглеводневих покладів із використанням модульованих сигналів	57
3.5 Використання вимірювань імпедансу антен для виділення анізотропних неоднорідностей	64
3.6 Аналіз структурної побудови радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів	67
3.7 Висновки за розділом	74
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77
ДОДАТКИ	80

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку енергетичного сектору України особливої ваги набуває ефективне використання наявних природних ресурсів, зокрема вуглеводневих. В умовах поступового виснаження традиційних родовищ та зростання потреби у внутрішньому енергетичному забезпеченні держави, важливим завданням є вдосконалення методів геофізичної розвідки, які дозволяють з високою точністю виявляти нові поклади нафти і газу, а також уточнювати геологічну будову вже відомих родовищ.

Полтавський регіон є одним із провідних центрів нафтогазової промисловості України. На його території розташована значна кількість родовищ, що активно експлуатуються протягом десятиліть. Проте внаслідок тривалої розробки багато з них перейшли у стадію зниження дебіту, що потребує нових підходів до геофізичного аналізу — як для дооцінки залишкових запасів, так і для виявлення нових перспективних структур, які могли бути пропущені через обмеження класичних методів дослідження. У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження сучасних електромагнітних методів геофізики, які дозволяють досліджувати геологічне середовище на новому рівні точності.

Електромагнітна розвідка, зокрема такі методи, як контрольоване джерело електромагнітного поля (CSEM) та магнітотелуричний метод (MT), забезпечують можливість отримання даних про електричні властивості гірських порід, що часто прямо корелюють із наявністю флюїдів, зокрема вуглеводнів. Для таких складних за геологічною будовою регіонів, як Полтавщина, де поширені як тектонічно порушені, так і слабо вивчені глибокозалягаючі структури, електромагнітні методи стають цінним доповненням до традиційних сейсмічних досліджень.

Разом з тим, успішна реалізація електромагнітних досліджень вимагає високої якості збору, обробки та передачі даних. Саме тут ключову роль відіграє технологія телекомунікаційного моніторингу – сукупність апаратно-програмних рішень, що

забезпечують безперервний контроль за параметрами польових вимірювань, оперативну передачу даних у реальному або наближеному до реального часу, віддалене керування обладнанням, а також інтеграцію результатів у цифрові геофізичні моделі.

Упровадження сучасних телекомунікаційних систем у геофізичні дослідження на території Полтавської області дозволяє не лише підвищити ефективність виявлення вуглеводневих покладів, але й знизити загальні витрати на проведення польових робіт, скоротити час обробки інформації та забезпечити більш гнучке планування дослідницьких кампаній.

Таким чином, актуальність даної магістерської роботи полягає у необхідності удосконалення підходів до геофізичного виявлення вуглеводнів у Полтавському регіоні шляхом синергії електромагнітних методів та сучасних телекомунікаційних технологій.

Особливої актуальності ці технології набувають у Полтавському регіоні, який є одним із найважливіших нафтогазоносних басейнів України. Тут актуальні завдання полягають у дооцінці залишкових ресурсів, дослідженні глибоких горизонтів і підвищенні точності прогнозування перспективних ділянок.

Поєднання електромагнітних методів із удосконаленими телекомунікаційними системами моніторингу відкриває нові можливості для підвищення ефективності геофізичних досліджень, зниження витрат та мінімізації людського фактора.

**Мета роботи** полягає в розробці та обґрунтуванні удосконаленої технології телекомунікаційного моніторингу геофізичних досліджень із застосуванням електромагнітних методів для підвищення ефективності виявлення вуглеводневих покладів на території Полтавської області.

У межах дослідження передбачено:

- дослідження можливостей застосування електромагнітних методів у складних геологічних умовах;

- проектування телекомунікаційної системи моніторингу та передачі даних для геофізичних польових досліджень;

- моделювання та оцінювання ефективності запропонованої системи на прикладі конкретної ділянки Полтавського нафтогазоносного басейну.

Отже, комплексне впровадження сучасних електромагнітних методів разом із телекомунікаційними рішеннями сприятиме не лише технічному прогресу геофізичних досліджень, але й створенню передумов для більш стійкого та рентабельного розвитку нафтогазового сектору України.

**Об'єктом дослідження** є процеси та технології геофізичного моніторингу, що використовуються для виявлення вуглеводневих покладів у нафтогазоносних регіонах, зокрема в Полтавській області.

**Предметом дослідження** є технології телекомунікаційного моніторингу в системах електромагнітної геофізичної розвідки, їх вплив на ефективність збору, передачі та інтерпретації геофізичних даних під час пошуку вуглеводнів у Полтавському регіоні.

## **1. АНАЛИТИЧНА ЧАСТИНА**

### **1.1 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ І СЕРЕДОВИЩА НАД ВУГЛЕВОДОРОДНИМИ ПОКЛАДАМИ**

#### **1.1.1 Аналіз електрофізичних властивостей середовища на околиці УВЗ**

Результати теоретичних досліджень та існуючі моделі вуглеводородних покладів (ВВП) [1] показують, що властивості середовища над покладом нафти та газу відрізняються від даних, отриманих для дослідження зразків порід, відібраних безпосередньо над ВВП. При цьому аномалії електромагнітного поля (ЕМП) на реальному родовищі можуть сягати кількох десятків відсотків. Дані розбіжності пояснюються безпосереднім впливом вуглеводнів на електричні властивості порід, що розміщуються над ВВП. Тому дослідження відібраних зразків порід, що розміщуються над ВВП у відриві від природних умов залягання не відповідає реальній фізичній картині, що виникає над реальним родовищем або скупченням нафти і газу.

#### **1.1.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей середовища в околі ВВП**

Представимо реальний поклад вуглеводнів (рис.1.1) як середовище 4, занурене у середовище з втратами (середовище 2), має межу розділу ОХ з повітряним простором (середовище 1) [1]. Поклад знаходиться на глибині  $Z$  від межі розділу середовищ 1-2 і має потужність  $Z1$  і протяжність  $X1$ .

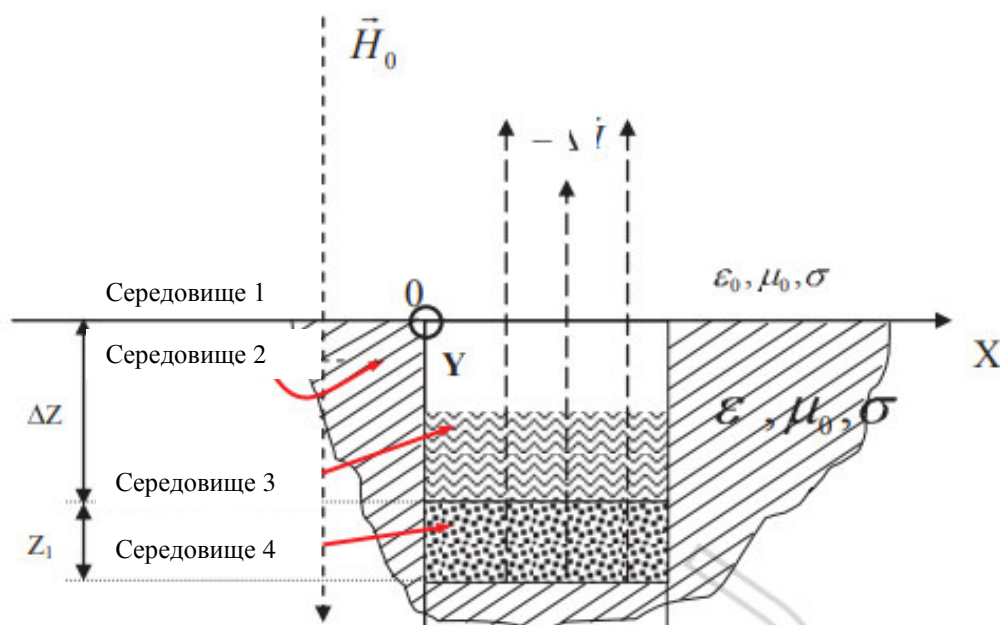


Рисунок 1.1 – Модель розрізу геологічного профілю над ВВП

Навколишній вуглеводний простір (середина 2) знаходиться в фізичній та хімічній рівновазі з середовищем 1 і містить твердий кристалічний скелет, пронизаний електролітом і провідними включеннями за рахунок мінералів з електронною провідністю. Під дією високих температур та пластового тиску над покладом вуглеводнів відбуваються електрохімічні процеси, що призводять до утворення на кордоні з повітряним простором проміжної області (середина 3), що характеризується надлишком вільних електронів.

Дослідження зразків порід над ВВП свідчать про хлоридно-натрієве середовище в розсолах підвищеної концентрації лужних та лужноземельних металів, а також ізотопних елементів [2]. Такі умови сприяють утворенню в зоні над ВВП складних іонних сполук напівпровідникового характеру, які мають підвищену термоелектронну емісію (до  $10.0 \text{ мкА м}^2$  при температурі  $20^\circ\text{C}$  [3]).

Відмінність фізичних властивостей порід в області покладу від властивостей порід-колекторів, в яких вона знаходиться, виявляється у зменшенні щільності покладу порівняно із законтурною областю, підвищенні сумарного електричного

опору, зниженні швидкості сейсмічних поздовжніх хвиль, збільшенні їх поглинання (послаблення) тощо.

Кількісні прояви цих ефектів визначаються фізико-геологічними властивостями порід-колекторів: гранулометричним та мінералогічним складом порід, структурно текстурними особливостями скелета, характером пористості та проникності, видом цементуючої речовини та механічними властивостями скелета, кількістю пластової води в порах та її мінералізацією тощо. Великий вплив на фізичні властивості порід мають термодинамічні умови залягання (всєбічний тиск і температура).

Перебудова фізичних та хімічних процесів у проміжній області через обмінні реакції та перетворення супроводжується переміщенням вільних носіїв заряду у напрямку до межі розділу середовищ 1 та 3 над родовищем нафти та газу, появою компенсуючих іонних струмів. Поляризація ВВП, викликана окислювально-відновними процесами, сприяє вертикальній міграції заряджених частинок, пов'язаної з дрейфом флюїдів та збільшенням кількості вільних електронів за рахунок теплових коливань кристалічних решіток [4].

Аналіз фізико-хімічної обстановки над ВВП [1] показує, що над покладом існує потік електронів, що призводить до появи геомагнітної аномалії Н через прояв діамагнітних властивостей частинок, що переміщуються в середовищі. Дане явище можна пояснити дією слабкої лоренцевої сили, при якій з'являється корекція траєкторії руху електрона в постійному магнітному полі [4].

Існування електронного потоку в породах, що вміщують, сприяє зміні провідності середовища над покладом, що підтверджується даними, отриманими за допомогою методу радіокіп [5]. Поздовжня чи поперечна зміна питомої провідності напівпровідникового зразка відбувається за рахунок впливу аномалії постійного магнітного поля Землі. Експериментальні дослідження, проведені у СВ-КВ-діапазонах на реальних родовищах вуглеводнів показують, що над

нафтогазоносними неоднорідностями відзначається збільшення питомого електричного опору [5].

Таким чином, короткий аналіз хіміко-фізичної обстановки в межах ВВП показує, що:

- над покладом існує потік заряджених частинок, що переміщається в поліфазному середовищі від ВВП до денної поверхні;

- потік частинок викликає появу геомагнітної аномалії за рахунок складання магнітного поля Землі  $H_0$  та негативного магнітного поля заряджених частинок, що переміщаються;

- зміна геомагнітного поля призводить до зміни питомого опору порід, що розміщуються над ВВП і свідчить про анізотропний характер середовища над ВВП, властивому плазмовим і плазмоподібним утворенням.

## **1.2. Електродинамічне моделювання взаємодії ЕМВ із середовищем над ВВП**

### **1.2.1. Моделювання фізичних процесів у геофізиці**

Для вивчення фізичних процесів, що відбуваються на реальних родовищах, використовується моделювання. У геофізиці моделювання здійснюють на зразках гірських порід, відібраних у свердловинах, шахтах, штольнях тощо. За допомогою зразків моделюють процеси фільтрації флюїдів, електромагнітні, теплові, дифузійні, ядерні, акустичні та інші природні процеси. У деяких випадках створюють

моделі самих гірських порід (штучні зразки), у яких виконують у подальшому моделювання зазначених процесів. Крім самих фізичних процесів, іноді моделюють термобаричні умови, у яких протікають ці процеси. Для цієї мети потрібно

використовувати спеціальні установки, що дозволяють моделювати температуру залягання гірських порід, геостатичний та пластовий тиск.

Проведення фізичного моделювання у геофізиці пов'язане з певними складнощами. Насамперед, порушується геометрична подoba контурного об'єкта та моделі. Об'єм породи, що досліджується в лабораторних умовах, не відповідає її природним умовам залягання, що вивчається геофізичними методами у свердловинних варіантах і особливо методами польової (наземної) геофізики. Складність фізичного моделювання гірських порід полягає також у тому, що в природних умовах досліджуваній об'єкт не є ізольованою системою, а займає певне просторове становище серед інших порід, що мають інші метрологічні та петрофізичні характеристики, і перебуває з ними у фізико-хімічній та термодинамічній взаємодії.

При вилученні породи з тієї чи іншої глибини з конкретними термобаричними умовами на поверхню (в атмосферні умови) порушується внутрішня структура гірської породи, яка значно впливає на петрофізичні характеристики. Порушення початкової структури породи пов'язані з утворенням у ній додаткової тріщинуватості, усиханням і розтріскуванням глинистого цементу, зміною набухання глинистого цементу, зміною порового обсягу породи з допомогою зворотних деформацій її скелета тощо.

Останнім часом найбільш поширене предметно-математичне і дещо рідше фізичне моделювання. У геофізиці найбільшого поширення набуло електричне моделювання, що дозволяє вивчати на електричних моделях електромагнітні, теплові, акустичні, дифузійні, гідродинамічні та інші явища. Для цієї мети використовують пласкі сіткові моделі, що складаються з набору різних опорів (електроінтеграторів), дискретне моделювання, електролітичні ванни та електропровідний папір моделювання на суцільних середовищах [6].

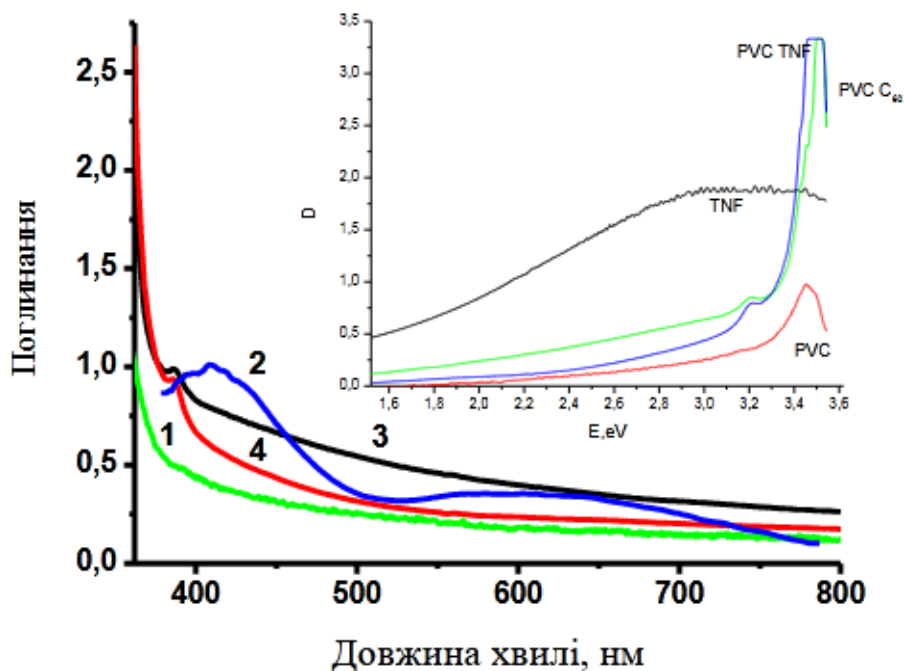


Рисунок 1.2 – Розподіл коефіцієнта поглинання залежно від довжини хвилі

### 1.2.2. Моделювання взаємодії електромагнітної хвилі з анізотропним середовищем

Поряд із натурними дослідженнями ВВП широко використовується фізичне моделювання із застосуванням електродинамічного підходу, заснованого на використанні зв'язку характеристик об'єкта, що досліджується, з параметрами сигналів, що впливають.

Аналогія досліджуваного середовища над покладом вуглеводнів з плазмоподібним утворенням, що має анізотропні властивості, дозволяє використовувати для вивчення взаємодії електромагнітної хвилі з ВВП існуючі рішення щодо плазми та плазмоподібних середовищ:

- використання кінетичного підходу та його наближене рішення у сфері низьких частот [7];

- гідродинамічний розгляд процесів взаємодії у сильних магнітних полях, у тому числі з урахуванням зіткнень, у нелінійних режимах щодо стійкості рішень [8];
- використання як кінематичного, так і гідродинамічного підходів у окремих випадках взаємодії слабких і сильних електромагнітних полів;
- моделювання однорідної плазми у різних енергетичних станах та обмеження умов існування анізотропії магнітоактивної плазми на високих частотах [9].

Предметом аналізу плазмоподібних середовищ служать радіомаскування і радіоукриттів різні аерозолі, горючі суміші й плазмові джерела, що створюють хмари іонізованого газу, а також плазмові розряди (газові, блискавки), твердотільна електроіонідируєча плазма напівпровідників і т.д. [10].

Аналіз основних напрямів дослідження параметрів плазмоподібних утворень за допомогою ЕМ показує, що найбільш загальним методом вивчення процесу взаємодії електромагнітної хвилі з анізотропним середовищем є метод кінетичного рівняння [11], що використовує функцію просторово-часового розподілу частинок. Для сильно розрідженого газу, коли взаємодія між частинками мала (у межах беззіткнувального режиму), компоненти тензора діелектричної проникності однозначно визначаються гідродинамічним наближенням.

Для розглянутої електрохімічної обстановки в околиці вуглеводнів, що залягають, слід віддати перевагу квазігідродинамічному наближенню з використанням багаточасткових електронно-іонних струмів і феноменологічно заданих частот зіткнень, зважаючи на відсутність необхідності врахування точних просторово-часових переміщень частинок.

У рамках такого наближення рівняння руху електрона має вигляд:

$$m \frac{d\mathcal{G}}{dt} + \gamma m \mathcal{G} = \gamma \left( \dot{\mathbf{E}} + \gamma \mu \mathcal{G} \cdot \dot{\mathbf{H}}_0 \right), \quad (1.1)$$

де  $m, q, \dot{g}$  - маса, заряд та швидкість руху частинок,  $\nu$  - частота зіткнень електрона з важкими частинками,  $\mu_0$  - магнітна проникність вакууму,  $r/E$  - напруженість електричного поля електромагнітної хвилі.

Дослідження процесу взаємодії двочастотної електромагнітної хвилі на анізотропне середовище представляє теоретичний та практичний інтерес, пов'язаний з модернізацією діючого електромагнітного промислового обладнання.

### **1.2.3. Взаємодія бігармонійного сигналу з анізотропним середовищем**

У роботі [12] поклад вуглеводнів представлений у вигляді резонансної системи, що випромінює тональне коливання. У першому наближенні цей сигнал може бути представлений у вигляді гармонійного, який може впливати на поверхневу електромагнітну хвилю, що розповсюджується вздовж межі розподілу середовища «Повітря-вміщуючі породи». Суперпозиція даних хвиль є двочастотною електромагнітною хвилею, що взаємодіє з анізотропним середовищем.

Іншим прикладом такої взаємодії може стати ненавмисний або навмисний вплив тонального сигналу на характеристики електромагнітного поля, що вивчається, створюваного електромагнітною хвилею.

Тому розглянемо процес взаємодії електромагнітної хвилі з вуглеводневим покладом в режимі бігармонічного сигналу виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_E = \frac{E_2}{E_1} \\ k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} \end{array} \right. \quad (1.2)$$

і розглянемо взаємодію складного сигналу (1.2) з різними співвідношеннями параметрів електромагнітної хвилі, що формується з анізотропним утворенням.

Для знаходження огибаючої та миттєвої частоти двох сигналів, що взаємодіють, необхідно використовувати перетворення Гільберта [13].

Знайдемо щільність повного струму в немагнітному анізотропному середовищі ( $\mu$  - магнітна проникність досліджуваного середовища не відрізняється від магнітної проникності вакууму  $\mu_0$ ).

$$\dot{\vec{D}} = \dot{\vec{D}}_M + \dot{\vec{D}}_P = j \cdot \omega \cdot \epsilon \cdot \vec{E} + \sum_{l=1}^N q_l \cdot N_l \cdot \dot{\vec{D}}, \quad (1.3)$$

яка визначається струмами в діелектричному наповнювачі середовища з проникністю, як у вакуумі і включає струм провідності з відомою концентрацією електронів  $N_e$ .

Спільне рішення рівнянь дозволяє подати тензор діелектричної проникності у вигляді:

$$\begin{aligned}
 e(t) &= E_1(1+k_E \cos \alpha t) \cdot \cos \left[ \omega t + \alpha k_E \int_0^t \frac{k_E + \cos \omega (1-k_\omega) \cdot t}{1+k_E^2 + 2k_E \cos \omega (1-k_\omega) \cdot t} dt \right] = \\
 &= E_1(1+k_E \cos \alpha t) \cdot \cos \left( \omega t + \alpha k_E \int_0^t (a_1 + a_2) dt \right)
 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Інформація про властивості анізотропного середовища закладена у компонентах тензора, що підлягають дослідженню у різних режимах взаємодії середовища з електромагнітною хвилею. Аналіз дисперсії тензора діелектричної проникності середовища над вуглеводородним покладом можна використовувати для пошуку вуглеводнів.

#### 1.2.4 Вплив бігармонійного сигналу в режимі низькочастотного потужного сигналу на анізотропні утворення

При дії потужного низькочастотного (НЧ) сигналу на анізотропні утворення складовим електромагнітних хвиль відповідають коефіцієнти:

$$\begin{cases} k_E \ll 1 \\ k_\omega \ll 1 \end{cases} \quad (1.5)$$

Використовуючи перетворення Гільберта, сигнал (1.3) для даного випадку взаємодії набуває вигляду:

$$a_1 = \int_0^t \frac{k_E}{1 + \frac{v^2}{c^2} + 2k_E \cos \omega (1 - \frac{v^2}{c^2})t} dt \quad (1.6)$$

Рішення рівняння (1.1) щодо складових швидкості руху електрона у вибраній системі координат дає:

$$\begin{cases} g_X = \frac{e}{m} E_X (1 + k_E \cos \alpha t) \frac{j\omega + v}{(j\omega + v)^2 + \omega_\Gamma^2} - \frac{e \omega_\Gamma E_Y (1 + k_E \cos \alpha t)}{m (j\omega + v)^2 + \omega_\Gamma^2}, \\ g_Y = \omega_\Gamma \frac{e E_X (1 + k_E \cos \alpha t)}{m (j\omega + v)^2 + \omega_\Gamma^2} + \frac{e E_Y (1 + k_E \cos \alpha t) (j\omega + v)}{m (j\omega + v)^2 + \omega_\Gamma^2}, \\ g_Z = \frac{e E_Z (1 + k_E \cos \alpha t)}{m (j\omega + v)}. \end{cases}$$

З урахуванням виразу для щільності повного струму та його прив'язки до обраної системи координат, з урахуванням (1.6) можна записати:

$$\begin{cases} \delta_z = j\omega E_z \left\{ \varepsilon_r (k_\omega^2 + k_E^2) + k_E (1 - k_\omega^2) \cos \alpha t - j \left[ \frac{-\varepsilon_r k_E (1 - k_\omega^2) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\sigma_r}{\omega} + \frac{\omega_\Pi}{\omega} \frac{1}{j\omega - v} \right] \right\}, \end{cases}$$

де:

$$\omega_\Pi = q_e \left( \frac{N_e}{m \varepsilon} \right)^{1/2} - \text{плазменна частота.}$$

Координатне розкладання напруженості електричного поля з урахуванням даного співвідношення дозволяє записати компоненти тензора діелектричної проникності для двочасткового потоку у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon} &= \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_m}{(\nu_i + \omega_{\Gamma} - \omega)^2 + 4\omega \nu_i} \begin{bmatrix} \omega_{\Gamma} - \omega & -\nu_i \\ \nu_i & \omega \end{bmatrix} \right\} \\ &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_m}{(\nu_i + \omega_{\Gamma} - \omega)^2 + 4\omega \nu_i} \frac{\omega_{\Gamma}}{\omega} \begin{bmatrix} \omega_{\Gamma} - \omega & -\nu_i \\ \nu_i & \omega \end{bmatrix} - \nu_i - \omega_{\Gamma} - j2\omega \nu_i \right\} \\ &= \epsilon_r - j \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_m}{\nu_i + \omega_{\Gamma}} \left[ 1 + j \frac{\nu_i}{\omega} \right] \right\} \end{aligned}$$

Останній вираз містять інформацію про відгук досліджуваного середовища впливу двочастотного сигналу.

Для гармонійного сигналу компоненти тензора діелектричної проникності визначаються виразами [1].

Якісне порівняння двочастотних режимів взаємодії електромагнітних хвиль з анізотропним середовищем дозволяє зробити наступний висновок. Істотною відмінністю є те, що у виразах присутні величини, що визначають параметри впливу на анізотропне середовище сигналів, які можуть змінюватись у широких межах, викликаючи різний електродинамічний відгук середовища.

Отже, використання двочастотних сигналів дозволяє підвищити інформативність методів пошуку вуглеводневих покладів.

### 1.2.5 Вплив бігармонічного сигналу в режимі потужного високочастотного сигналу на анізотропне середовище

Зберігаючи алгоритм аналітичного визначення компонентів тензора для випадку, що розглядається, з урахуванням початкових даних, можна записати:

$$e(t) = E_1 k_E \cdot \cos \left[ \omega t + \alpha k_E \int_0^t \frac{k_E + \cos \alpha t}{1 + k_E^2 + 2k_E \cos \alpha t} dt \right] \quad (1.7)$$

Для знаходження шуканого рішення необхідно визначити підінтегральний вираз:

Перший інтеграл визначається шляхом використання підстановки

$$(u = \cos \frac{\alpha t}{2}) \text{ в } \int u dv$$

В результаті маємо:

$$a_3 = \frac{t}{k_E},$$

а другий інтеграл визначається інтегруванням частинами з використанням змінних:

$$u = \cos \alpha \text{ и } \vartheta = \frac{t}{k_E}$$

$$a_4 = \int_0^t \frac{\cos \alpha}{1 + k_E^2 + 2k_E \cos \alpha} dt = \frac{1}{\alpha k_E^2} \sin \alpha$$

Компоненти тензора діелектричної проникності з урахуванням (1.7) для двочасткового потоку набувають вигляду:

$$\begin{cases} \delta_x = \varepsilon \omega_{\Pi} E_x \frac{j\omega + \nu}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_r} - \frac{\varepsilon \omega_{\Pi} \nu E_y}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_r}, \\ \delta_y = \frac{\varepsilon \omega_{\Pi} \nu E_x}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_r} + \frac{\omega_{\Pi} \varepsilon E_y (j\omega + \nu)}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_r}, \\ \delta_z = \frac{\varepsilon \omega_{\Pi} E_z}{j\omega + \nu} \end{cases} \quad (1.8)$$

Порівнюючи вирази, можна дійти невтішного висновку, що компоненти тензорів діелектричної проникності середовища над вуглеводневим середовищем як потужного НЧ- і потужного ВЧ-сигналів мають суттєві відмінності. В результаті частотна залежність складових для двох випадків зондування буде мати різний вигляд.

Для режиму потужного ВЧ-сигналу характерно суттєвий вплив коефіцієнтів  $k_E$  і  $k$  на уявні складові, на відміну від режиму потужного ВЧ-сигналу.

### 1.2.6 Вплив амплітудно-модульованого сигналу на анізотропне середовище

У разі тональної амплітудної модуляції (АМ) радіосигнал записується як

$$e(t) = E (1 + \theta_m \cos \Omega * \cos \varphi), \quad (1.9)$$

де  $E$  - амплітуда несучого коливання,  
 $\theta_m$  - коефіцієнт амплітудної модуляції,  
 $\Omega, \varphi$  - модулююча і несуча частоти.

Для цього випадку немає необхідності використовувати перетворення Гільберта. Складові швидкості електрона визначаються:

Для цього виду взаємодії характерна залежність компонентів тензора діелектричної проникності від коефіцієнта амплітудної модуляції  $k_m$ , від модулюючої та несучої частот АМ-сигналу.

Порівняння з одночастотним режимом взаємодії показує, що уявні частини діагональних компонентів тензора мають поправний член.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= \varepsilon + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\left[ \omega \frac{\omega - \omega - v^i}{(v^i + \omega - \omega)^2 + 4\omega^i} + j \left[ \frac{\varepsilon k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega + k_m \cos \Omega t} - \frac{\sigma}{\omega} \right] \right] \\ &\left[ - \frac{\omega v^i}{\omega (v^i + \omega - \omega)^2 + 4\omega^i} \right] \end{aligned} \right\} \\ \dot{\varepsilon} &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\left[ \frac{\omega v^i}{\omega (v^i + \omega - \omega)^2 + 4\omega^i} - \frac{2j v^i v^i}{(v^i + \omega - \omega)^2 + 4\omega^i} \right] \end{aligned} \right\} \\ \dot{\varepsilon} &= \varepsilon + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} &\left[ \omega \frac{1}{v^i + \omega} + j \left[ \frac{\varepsilon k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega + k_m \cos \Omega t} - \frac{\sigma}{\omega} - \frac{\omega v^i}{\omega \omega + v^i} \right] \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

Це говорить про те, що частоти резонансної взаємодії не відрізнятимуться від частот для гармонійного сигналу.

### 1.2.7 Вплив частотно-модульованого сигналу на анізотропне середовище

Для радіосигналу з тональною частотною модуляцією (ЧМ) виду

$$e(t) = E_2 \cos(\omega t + \beta \sin \omega t), \quad (1.10)$$

де  $E_2$  і  $\omega_2$  - відповідно амплітуда і частота коливання;  $\omega_1$  - частота, що модулює;

$\beta$ - індекс модуляції;

$\omega_1$ - девіація частоти, при обчисленні складових швидкості руху частинок,

Як і в попередньому випадку, немає необхідності використовувати перетворення Гільберта.

Тоді складові швидкості:

$$\begin{cases} g_x = \frac{e}{m} E_x \frac{j\omega + \nu}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_G^2} - \frac{e}{m} \frac{\omega_G E_y}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_G^2}, \\ g_y = \omega_G \frac{e}{m} \frac{E_x}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_G^2} + \frac{e}{m} \frac{E_y (j\omega + \nu)}{(j\omega + \nu)^2 + \omega_G^2}, \\ g_z = \frac{e}{m} \frac{E_z}{j\omega + \nu} \end{cases} \quad (1.11)$$

Порівняно з АМ-сигналом в дійсній частині з'являється множник, що залежить від індексу частотної модуляції і коефіцієнта  $k$ . Для АМ-сигналу уявні частини компонентів залежать від параметрів  $k$  та  $\beta$ , а для ЧС-сигналу – від параметра  $\omega$ .

Компоненти тензора діелектричної проникності середовища для двохчастотного потоку:

$$\begin{cases} \delta_x = \varepsilon \omega_{\Pi} E_x \frac{(1 + \beta \cos \Omega t)(j\omega + \nu - \varepsilon \omega_{\Pi} \nu_{\Gamma} E_Y (1 + \beta \cos \Omega t))}{(j\omega + \nu^2 + \omega_{\Gamma})} - \frac{\varepsilon \omega_{\Pi} \nu_{\Gamma} E_Y (1 + \beta \cos \Omega t)}{(j\omega + \nu^2 + \omega_{\Gamma})}, \\ \delta_y = \frac{\varepsilon \omega_{\Pi} \nu_{\Gamma} E_x (1 + \beta \cos \Omega t)}{(j\omega + \nu^2 + \omega_{\Gamma})} + \frac{\omega_{\Pi} \varepsilon E_Y (1 + \beta \cos \Omega t)(j\omega + \nu)}{(j\omega + \nu^2 + \omega_{\Gamma})}, \\ \delta_z = \frac{\varepsilon \omega_{\Pi} E_z (1 + \beta \cos \Omega t)}{j\omega + \nu}, \end{cases}$$

Видно, що компоненти тензора включають параметри змішаного модульованого сигналу:  $K_m$ ,  $\beta$ ,  $\Omega$ ,  $K\omega$  і мають більш складну залежність, порівняно з АМ-і ЧМ-сигналами.

### 1.3. Висновки за розділом та постановка завдання дослідження

Проведений аналіз дав змогу отримати вирази для компонентів тензорів діелектричної проникності середовища над вуглеводними покладами, представлені у вигляді анізотропної неоднорідності в режимі двочастотних та модульованих сигналів. Встановлено частотну залежність комбінованих елементів тензорів діелектричної проникності анізотропного середовища.

2. Встановлено, що компоненти тензорів діелектричної проникності середовища над вуглеводними покладами при різному співвідношенні амплітуд та частот двочастотних електромагнітних хвиль мають суттєві відмінності, на відміну від режиму потужного ВЧ-сигналу.

3. При дії АМ-сигналу на анізотропне середовище компоненти тензора відрізняються від одночастотного режиму взаємодії наявністю в уявних частинах діагональних компонентів додаткової складової, що залежить від параметрів сигналів.

4. ЧС-сигнал істотно впливає на фізичні процеси в середовищі над вуглеводними покладами. Виявляється це в «модуляції» проникності діелектричного наповнювача (дійсна частина діагональних компонентів), і в порівнянні з однотональним режимом взаємодії компоненти тензора є складною функцією із підвищеною роздільною здатністю.

5. Використання сигналу зі змішаною модуляцією призводить до розширення функціональних залежностей компонентів тензора від параметрів сигналу, що дозволяє підвищити інформативність методів пошуку вуглеводних покладів, що розробляються.

## 2. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Дослідження дисперсійних характеристик середовища над вуглеводневими покладами під впливом багаточастотного коливання

Для анізотропних середовищ характерна залежність властивостей середовища від поляризації та напрямку. Анізотропний діелектрик описується тензором діелектричної проникності виду:

$$\varepsilon = [E + \alpha(t)]\sin(2\pi f_0 + \varphi(t)) \quad (2.1)$$

Аналітичні дослідження взаємодії двочастотних та модульованих ЕМВ із середовищем над вуглеводневими покладами, проведені в попередньому розділі, свідчать про гіротропний характер середовища.

При цьому складові, а загалом тензор діелектричної проникності описується трьома компонентами.

Таким чином, тензор діелектричної проникності з дев'яти елементів зводиться до матриці, що характеризується лише трьома складовими. Кожна з компонентів тензора містить відомості про власне діелектричну проникність та провідність:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon' - j\varepsilon'' \\ \varepsilon_2 = \varepsilon' - j\varepsilon'' \\ \varepsilon_3 = \varepsilon' - j\varepsilon'' \end{cases} \quad (2.2)$$

Кожна компонента має досить складний вигляд і визначається в загальному випадку параметрами електронно-іонного потоку.

## 2.2 Дослідження частотних характеристик тензора діелектричної проникності в режимі двочастотної дії електромагнітної хвилі

Розрахунок компонентів тензорів діелектричної проникності проводиться на підставі експериментально отриманих параметрів середовища над покладами вуглеводнів:

- глибини залягання вуглеводнів:  $h=2.0-3.5$  км;
- різниці потенціалів між покладом та землею поверхнею  $\Delta\varphi=(0.2-0.4)$  В.
- при середній температурі в області покладу  $T=350$  К;
- відносній зміні питомого електричного опору вміщуючих порід у межах контуру покладу при усереднених значеннях діелектричної проникності;
- негативній геомагнітній аномалії  $H=(8.0-15.0)10^3$  А/м
- при значеннях напруженості магнітного поля землі  $H=89$  А/м
- коефіцієнті іонізації  $k_i=1$ ;
- концентрації частинок  $N_e=N_i=(0.3-12.0)10^{16}$  м<sup>-3</sup>.

Даний вид взаємодії характеризується співвідношенням частот та амплітуд, а компоненти тензора діелектричної проникності описуються виразами (1.8). Проведемо аналіз частотних залежностей комбінованих елементів (КЕ) тензора при різних співвідношеннях  $k_E$  та  $k_\omega$ . Аналіз тензорів проведемо за методикою, що полягає у дослідженні частотних характеристик комбінаційних складових.

Як видно із рис. 2.1., дійсна складова має дві точки переходу через нуль на частотах  $f_2$ , що відповідають електронному циклотронному та електронному плазмовому резонансам. При зменшенні коефіцієнта  $k$  відбувається збільшення значень  $f_2$  у тому ж значенні КЕ. При зміні співвідношення амплітуд на 2 порядку відбувається подальше збільшення частоти, а другого резонансу характерно істотне зміщення при зменшенні співвідношення частот.

Для  $kE=10^{-6}$  відбувається подальше зміщення точки, де Re область більш високих частот, а при  $k=10^{-3}$ ,  $kE=10^{-6}$ . У цьому випадку  $f_2$  змінюється не більше (2,6) ГГц.

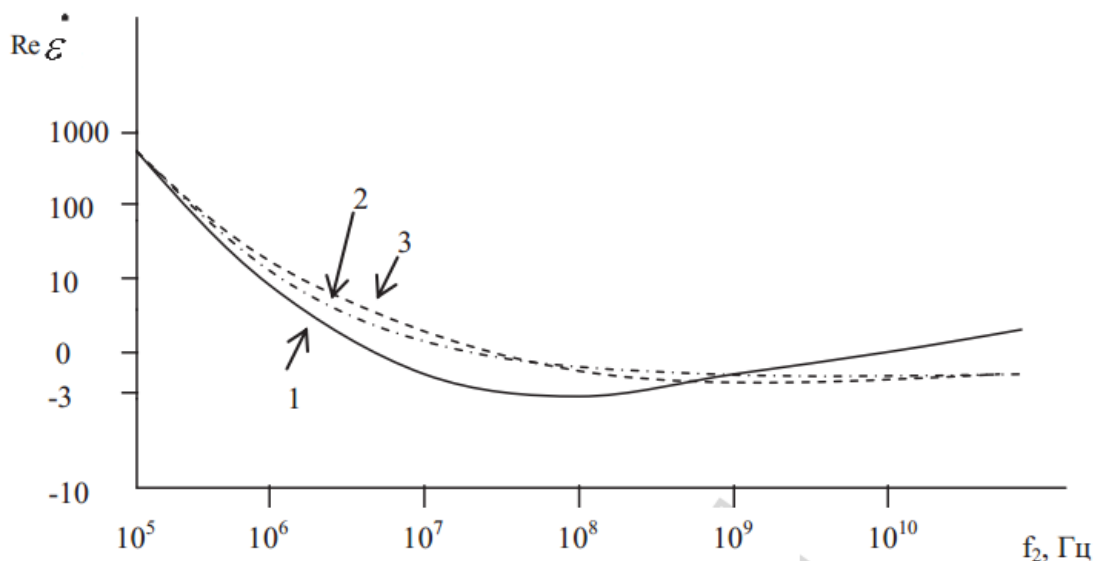


Рисунок 2.1 – Графік залежності  $Re \epsilon^*(f_2)$ : 1 – для  $k = 10^{-1}$ ; 2 – для  $k = 10^{-3}$ ; 3 – для  $k = 10^{-6}$

Таким чином, несуттєві відмінності амплітуд та частот двох сигналів практично не впливають на положення резонансних частот взаємодії та відповідають одночастотному режиму.

Аналіз фазових компонентів від частоти високочастотного сигналу (рис. 2.2) показує, що у частоті  $f_2$  спостерігається різка зміна фази. Причому закономірність зміщення стрибка фази корелюється із закономірністю зміни положення на частотних характеристиках для Re. При  $kE=10^{-3}$ , коли частоти двох сигналів суттєво відрізняються ( $k\omega=10^{-3}\dots 10^{-6}$ ), фазова компонента  $KE$  мало змінюється. Ця обставина може бути використана під час удосконалення електромагнітних методів для ідентифікації середовища над вуглеводневими покладами.

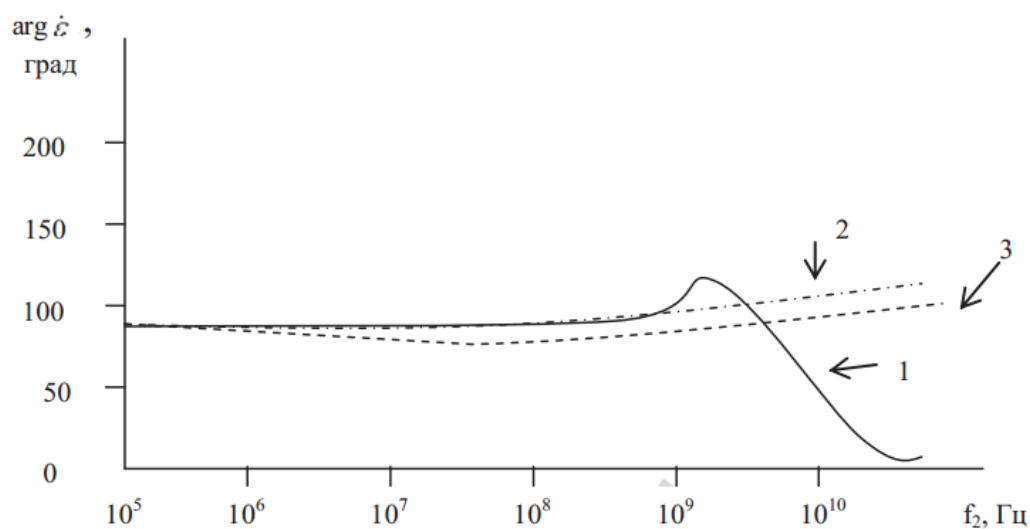


Рисунок 2.2 – Графік залежності  $\text{Re} \dot{\epsilon}(f_2)$ : 1 – для  $k = 10^{-1}$ ; 2 – для  $k = 10^{-3}$ ; 3 – для  $k = 10^{-6}$ .

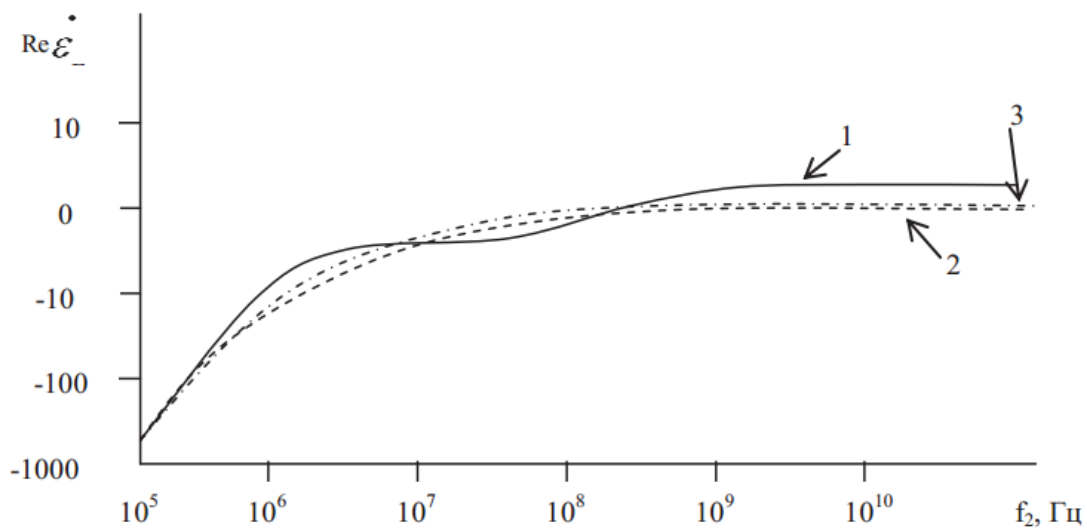


Рисунок 2.3 – Графік залежності  $\text{Re} \dot{\epsilon}(f_2)$ : 1 – для  $k = 10^{-1}$ ; 2 – для  $k = 10^{-3}$ ; 3 – для  $k = 10^{-6}$ .

Наведені графіки показують, що аномальну поведінку напруженості поля ЕМВ над вуглеводневими покладами слід очікувати на частотах, відповідних  $f_2$ . Відображення сигналу від анізотропного середовища спостерігатиметься на всіх

частотах, крім частот резонансної взаємодії. При амплітуді ВЧ-сигналу, що дорівнює  $0,1E_1$ , ефект взаємодії більш суттєвий при меншій розності частот  $f_2$  та  $f_1$ ). Відмінність амплітуди ВЧ-сигналу від амплітуди низькочастотного сигналу в 100 і більше разів призводить до погіршення відбивних властивостей середовища над вуглеводневим покладом та частоти, на яких відбуватиметься зменшення амплітуди напруженості електричного поля ЕМВ, що зміщуються в область більш високих частот.

Коли амплітуда ВЧ-сигналу дорівнює  $10^{-3} E_1$  (рис. 2.3), резонансні прояви на  $f_2$  відсутні. При незначній відмінності частот двох ЕМВ частотні залежності  $Re$  та  $Im$  практично не змінюються, проте із зменшенням частоти  $f_1$  характер взаємодії змінюється. При амплітуді ВЧ-сигналу, що дорівнює  $10^{-6} E_1$ , характер кривих  $Re$  і  $Im$  не змінюється (рис. 2.3), а  $f_2$  переміщається в область вищих частот.

При співвідношенні амплітуд  $kE=10^{-1}$  є дві точки, де дійсна частина приблизно однакова при різних коефіцієнтах  $k$ , тобто. зміни однієї із частот складної ЕМВ не призводить до зміни властивостей середовища. Це спостерігається на частотах 100МГц та 7ГГц.

Коли коефіцієнт  $kE=10^{-3}$ , то незмінність  $Re$  має місце на частоті 900МГц. При  $kE=10^{-6}$  таких характерних точок немає.

Для  $kE=10^{-1}$  на частоті 200МГц залишається практично незмінною при всіх значеннях коефіцієнта  $k$ , а коли  $kE=10^{-3}$ , з'являється дві такі точки: 10МГц і 200МГц. При  $kE=10^{-6}$  частотна залежність речовинної частини приблизно однакова всім значенням коефіцієнта  $k$ .

Для встановлення динаміки зміни комбінованого елемента тензора діелектричної проникності на фіксованій частоті при варіації співвідношень частот та амплітуд доцільно розглянути залежності:

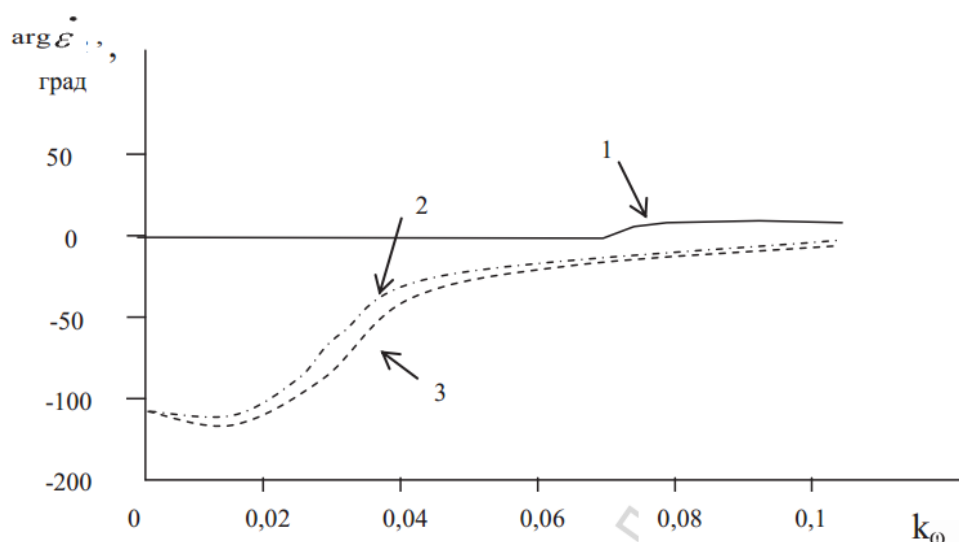


Рисунок 2.4 – Графік залежності  $\arg \varepsilon^* \varphi(k\omega)$  на частоті  $f_2 = 10$  ГГц: 1 – для  $kE = 10^{-1}$ ; 2 – для  $kE = 10^{-3}$ ; 3 – для  $kE = 10^{-6}$  для встановлення динаміки зміни тензора діелектричної проникності середовища

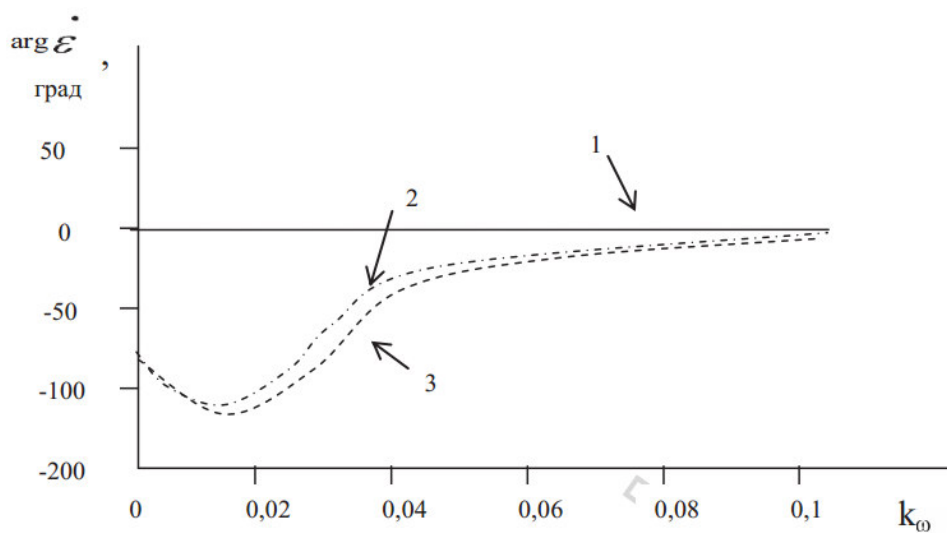


Рисунок 2.5 – Графік залежності  $\arg \varepsilon^* \varphi(k\omega)$  на частоті  $f_2 = 1$  ГГц: 1 – для  $kE = 10^{-1}$ ; 2 – для  $kE = 10^{-3}$ ; 3 – для  $kE = 10^{-6}$  для встановлення динаміки зміни тензора діелектричної проникності середовища

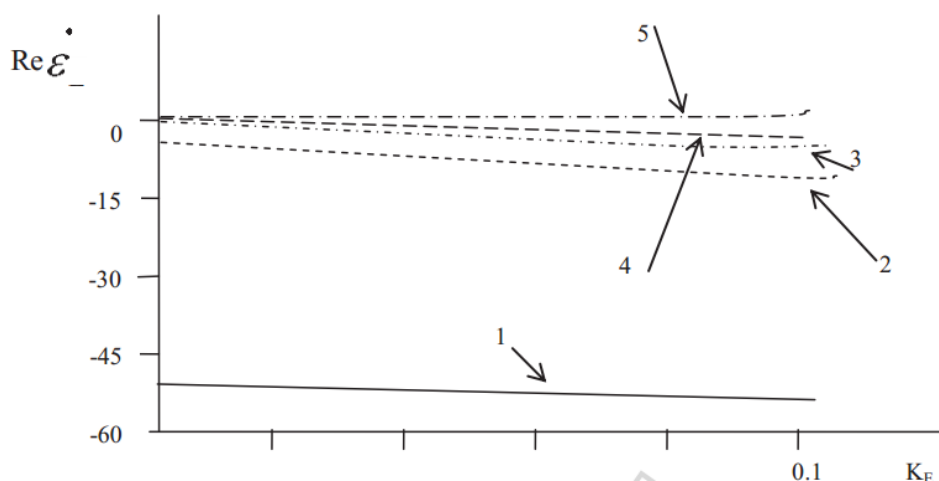


Рисунок 2.6 – Графік залежності  $\arg \varepsilon^* = \varphi(k\omega)$  на частоті  $f_2 = 100$  ГГц: 1 – для  $kE = 10^{-1}$ ; 2 – для  $kE = 10^{-3}$ ; 3 – для  $kE = 10^{-6}$  для встановлення динаміки зміни тензора діелектричної проникності середовища

Залежності  $\text{Re}$  (рис. 2.4 - 2.6) при зміні співвідношень амплітуд змінюються незначно, і мають кінцеві значення для конкретної частоти  $f_2$ . Для аргументів при зміні  $kE$  характерна нерівномірна залежність на частотах  $f_2 = 10$  ГГц і  $f_2 = 100$  ГГц (рис. 2.5, 2.6).

До  $kE = 0,04$  спостерігається суттєвий фазовий набіг, а при  $kE > 0,04$   $\arg \varepsilon$  (криві 5, рис. 2.6). На інших частотах  $\arg \varepsilon$ , має кінцеві значення і практично не відрізняються (криві 1-3, рис. 2.4-2.5).

Аналогічні розрахунки залежностей і значення  $k\omega = 10^{-6}$  практично збігаються з характерними рисами, отриманими при  $k\omega = 10^{-3}$ .

Це говорить про те, що для дослідження середовища над вуглеводневими покладами можна вибрати частоту  $f_2$ , що лежить у більш довгохвильовому діапазоні.

У таблиці 2.1 наведено значення резонансних частот взаємодії, у яких діелектрична проникність покладів, як двочастотної взаємодії, перетворюється на нуль.

Розрахункові значення частот

$k_{\omega}$	$k_E$	$f_2$ , Гц	$f'_2$ , Гц
$10^{-1}$	$10^{-1}$	$1,00045 \cdot 10^7$	$1,17646 \cdot 10^9$
$10^{-1}$	$10^{-3}$	$1,98282 \cdot 10^7$	$2,33153 \cdot 10^9$
$10^{-1}$	$10^{-6}$	$2,00064 \cdot 10^7$	$2,3525 \cdot 10^9$
$10^{-3}$	$10^{-1}$	$1,80419 \cdot 10^7$	$2,12145 \cdot 10^9$
$10^{-3}$	$10^{-3}$	$9,98283 \cdot 10^8$	$1,00598 \cdot 10^9$
$10^{-3}$	$10^{-6}$	-	$1,99891 \cdot 10^9$
$10^{-6}$	$10^{-1}$	$2,13855 \cdot 10^9$	$2,13859 \cdot 10^9$
$10^{-6}$	$10^{-3}$	$1,93517 \cdot 10^9$	$1,99691 \cdot 10^9$

З табл. 2.1 видно, що при зменшенні  $k$  і  $k_E$  частота резонансної взаємодії  $f_2$  збільшується, а частота  $f'_2$  зменшується.

Таким чином, використовуючи зміну частоти та/або амплітуди одного з джерел формування поля можна «штучно» змінити частоти резонансної взаємодії складної електромагнітної хвилі та анізотропного середовища над вуглеводневими покладами.

## 2.2. Частотні характеристики тензора діелектричної проникності в режимі потужного ВЧ сигналу

Даний вид взаємодії характеризується співвідношенням частот та амплітуд, а компоненти тензора діелектричної проникності описуються виразами (2.2).

Проведемо аналіз частотних залежностей  $k_E$  тензора за різних співвідношеннях  $k$  і  $k_E$ .

Залежності  $\text{Re} = \varphi(f_2)$  та  $\text{arg} = \varphi(f_2)$  представлені на рис. 2.7.

Як видно із рис. 2.7, дійсна складова має дві точки переходу через нуль на частотах  $f_2$  та  $f'_2$ , відповідних електронного циклотронного та електронного плазмового резонансів. При збільшенні коефіцієнта  $k_{\omega}$  відбувається збільшення

значення  $f_2$  і зменшення  $f'_2$  для фіксованого співвідношення амплітуд двох електромагнітних хвиль.

Видно, що на окремому відрізку частот спостерігається зміна фази при зміні співвідношення частот  $k\omega$ . Це меншення коефіцієнта  $k\omega$  призводить до незначного збільшення  $\arg$  на частотах  $f_2 \approx (0,1-1)$  ГГц. На інших частотах ВЧ-складової електромагнітної хвилі вплив коефіцієнта  $k$  відсутній.

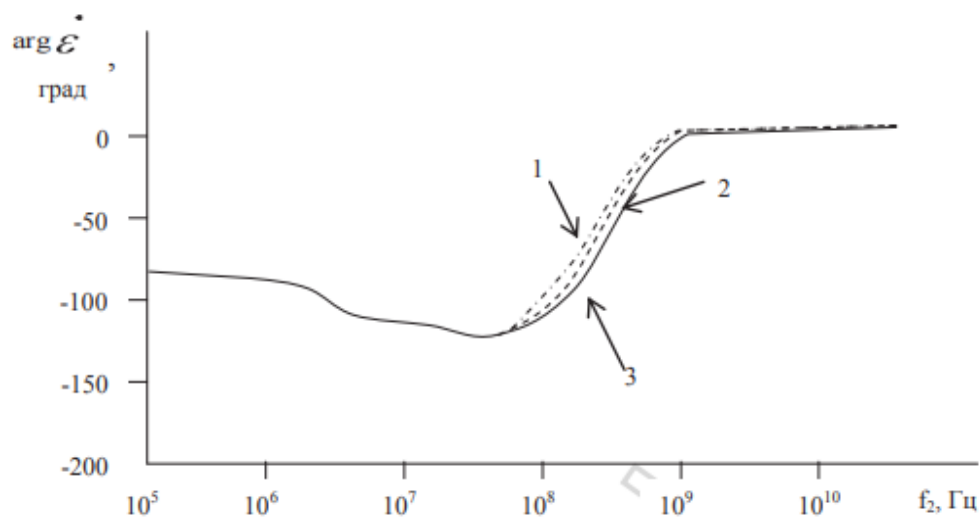


Рисунок 2.7 – Графік залежності  $\operatorname{Re}(\epsilon^*) = \varphi(f_2)$ , коли  $kE = 10$ : 1 – для  $k = 10^{-1}$ ; 2 – для  $k = 10^{-3}$ ; 3 – для  $k = 10^{-6}$ .

З табл. 2.2 видно, що з зміни  $k\omega$  і  $kE$  частоти резонансного взаємодії  $f_2$  і  $f'_2$  змінюються. У порівнянні з режимом впливу потужного НЧ-сигналу на анізотропне середовища, змінюються циклотронний і плазмовий резонанс в малих межах.

Причому при малих значеннях  $kE$  і  $k\omega$  спостерігається найбільше усунення цих частот.

Для досягнення більшої трансформації хвиль електромагнітного поля на кордоні анізотропного середовища необхідно використовувати невеликі співвідношення амплітуд та частот складної електромагнітної хвилі.

Значення частот, для  $\text{Re}(\varepsilon) = 0$ 

$k_\omega$	$k_E$	$f_2$ , Гц	$f'_2$ , Гц
$10^{-3}$	$10^3$	$1,48763 \cdot 10^6$	$2,36730 \cdot 10^8$
$10^{-3}$	$10^2$	$1,47810 \cdot 10^6$	$2,33872 \cdot 10^8$
$10^{-3}$	$10^1$	$1,35400 \cdot 10^6$	$2,15463 \cdot 10^8$
$10^{-3}$	$10^6$	$1,68100 \cdot 10^6$	$2,35000 \cdot 10^8$
$10^{-6}$	$10^6$	$1,49060 \cdot 10^6$	$2,37100 \cdot 10^8$
$10^{-6}$	$10^3$	$1,50000 \cdot 10^6$	$2,35000 \cdot 10^8$
$10^{-6}$	$10^2$	$1,47300 \cdot 10^6$	$2,33000 \cdot 10^8$
$10^{-6}$	$10^1$	$1,35510 \cdot 10^6$	$2,15639 \cdot 10^8$
$10^{-1}$	$10^6$	$1,35400 \cdot 10^6$	$2,15635 \cdot 10^8$
$10^{-1}$	$10^3$	$1,52000 \cdot 10^6$	$2,15462 \cdot 10^8$
$10^{-1}$	$10^2$	$1,51500 \cdot 10^6$	$2,13890 \cdot 10^8$
$10^{-1}$	$10^1$	$1,25260 \cdot 10^6$	$1,9933 \cdot 10^8$

### 2.3. Дослідження частотних характеристик тензора діелектричної проникності середовища при дії модульованих сигналів

#### 2.3.1. Аналіз взаємодії АМ-сигналів з анізотропним середовищем

Оскільки реальні частини  $K_E$  тензора не залежать від параметрів АМ-сигналів, то немає потреби в їх чисельному тестуванні. Разом із тим представляє практичний інтерес аналіз фазових компонентів.

Частотні залежності величини  $\arg$  представлені на рис. 2.8.

У діапазоні частот  $10^5 \dots 10^7$  Гц значення  $\arg \varepsilon$  змінюється несуттєво. На відрізку  $10^7 \text{--} 10^8$  Гц відбувається зменшення фази  $K_E$ . Найбільша зміна величини  $\arg \varepsilon$  спостерігається в діапазоні частот  $10^8 \dots 10^9$  Гц, де фаза стрибком змінюється від значення  $-(1100 \dots 1150)$  до  $(40 \text{--} 200)$ .

Несуча частота, коли від фази КЕ дорівнює нулю, лежить у межах (300...600) МГц. Встановлено, що за варіації коефіцієнта амплітудної модуляції відбувається зміна величини  $\arg \varepsilon$ . На відрізку частот  $10^5 \dots 10^8$  Гц вплив значення  $k_m$  на фазу КЕ практично відсутній.

У діапазоні частот  $10^8 \dots 10^{10}$  Гц відбувається значний вплив коефіцієнта амплітудної модуляції величину  $\arg \varepsilon$ . Так, зі збільшенням  $k_m$  спостерігається зменшення частоти переходу фази КЕ через нуль.

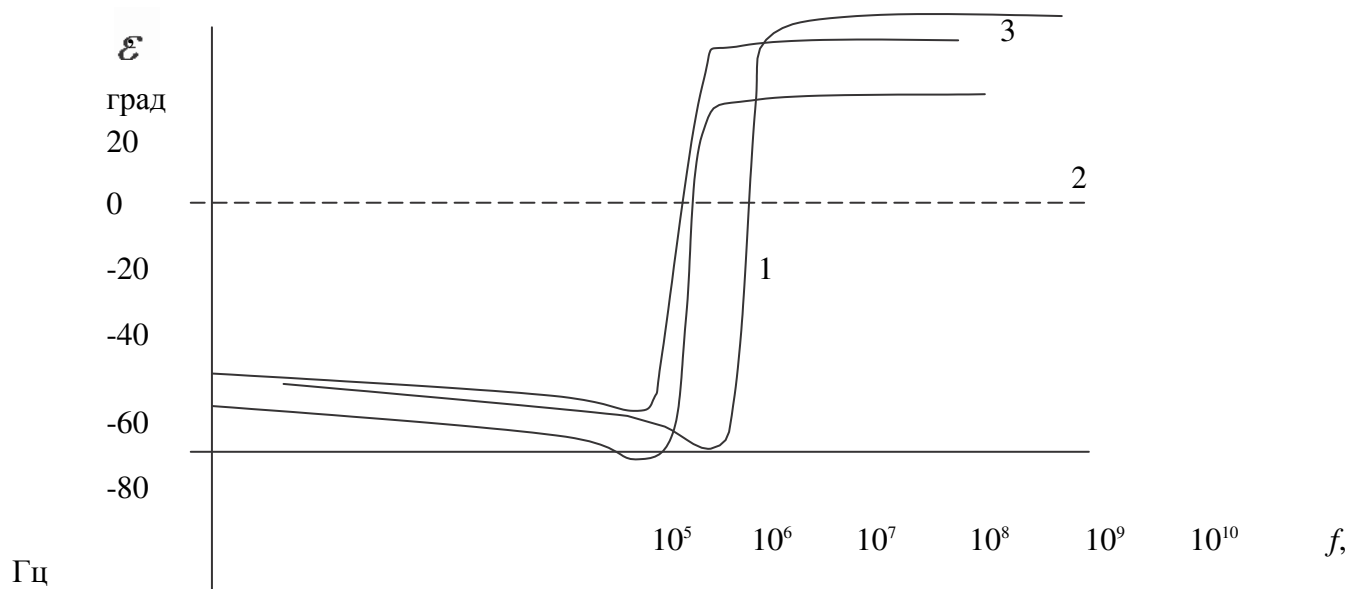


Рисунок 2.8 – Графік залежності  $\operatorname{Re}(\varepsilon) = \varphi(f_2)$

1 – для  $k_m=0,1$  и  $F=100$  МГц; 2 – для  $k_m=0,5$  и  $F=1$  ГГц; 3 – для  $k_m=1$  и  $F=1$  ГГц

Аналіз частотних залежностей величини  $\arg \varepsilon$  показав, що дані характеристики несуттєво відрізняються від аналогічних залежностей

Таким чином, застосування амплітудної модуляції сигналів не веде до зміни КЕ, проте відбувається вплив несучої частоти та коефіцієнта амплітудної модуляції на фазу КЕ.

### 2.3.2. Аналіз взаємодії ЧС-сигналів з анізотропним середовищем

Наведені вище залежності показують, що збільшення індексу модуляції призводить до несуттєвого збільшення частоти циклотронного електронного резонансу та різкого зменшення частоти плазмового резонансу (рис. 2.9). Це характерно й у Re.

Характер фазочастотних характеристик для різних значень не змінюється. При цьому зі зростанням індексу модуляції частота, на якій  $\arg \varepsilon, L = 0$ , що відповідає ВЧ-резонансу, зменшується (рис.2.9).

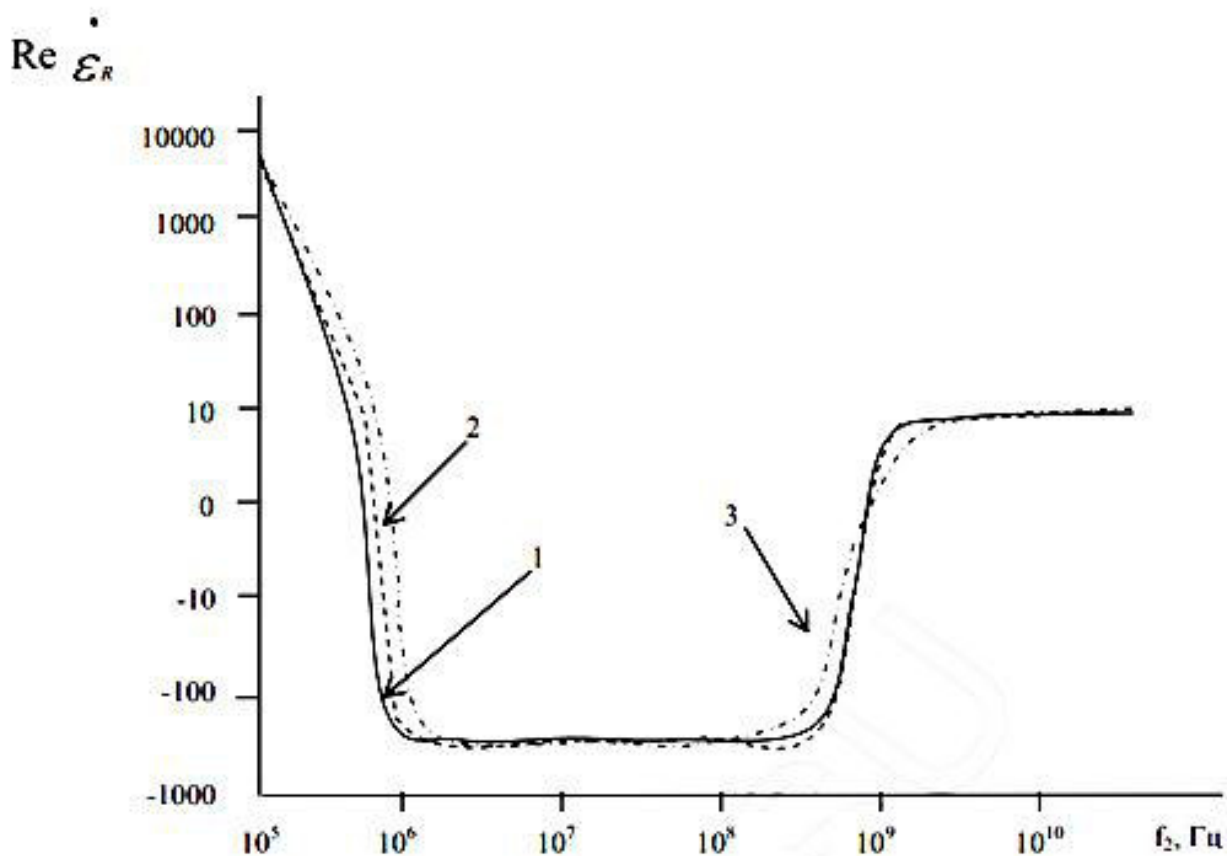


Рисунок 2.9 – Графік залежності  $\text{Re}(\varepsilon) = \varphi(f_2)$ :

1- для  $\beta = 0,5$ ; 2 - для  $\beta = 1$ ; 3 - для  $\beta = 5$

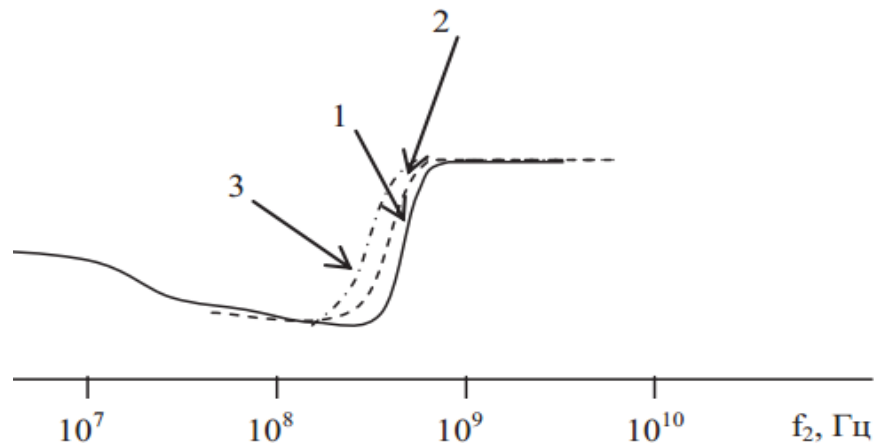


Рисунок 2.10 – Графік залежності  $\text{Re}(\varepsilon) = \varphi(f_2)$ :

1- для  $\beta = 0,75$ ; 2 - для  $\beta = 1$ ; 3 - для  $\beta = 2$

Проведемо аналіз залежностей КЕ тензора від індексу частотної модуляції на частоті несучої  $f_2=1\text{ГГц}$ , що відповідає електронному плазмовому резонансу. Як очевидно з рис.2.10, величина  $\text{Re}$  зменшується за лінійним законом від значення 9,2 при  $\beta = 0$  до нуля при  $\beta \approx 27$ . Аналогічна залежність спостерігається за  $\beta = 43 \dots 100$ , де величина  $\text{Re}$  зменшується від нуля до -18. При значеннях індексу частотної модуляції  $\beta = 27 \dots 43$  відбувається зміна знака  $\text{Re}$  і є три точки переходу цієї величини через нуль: для  $\beta_1=27$ ,  $\beta_2=35$  і  $\beta_3=43$ . Фазочастотна характеристика зменшується від  $-30$  при  $\beta=0$  до  $-108^\circ$  для  $\beta=30^\circ$ , потім відбувається збільшення  $\text{arg}$  до  $-70^\circ$  при  $\beta=40^\circ$ . Для значень індексу частотної модуляції  $\beta=40-60$  відбувається різке зменшення фази від  $-700$  до  $-175^\circ$  і з подальшим зростанням спостерігається несуттєва зміна  $\text{arg } \varepsilon$ .

Залежності  $\text{Re } L$  та  $\text{arg } L$  мають такий самий вигляд, як і  $\text{Re } R$  та  $\text{arg } R$ .

Таким чином, використання ЧМ на частоті несучої  $f_2=1\text{ГГц}$  з індексом  $\beta = 25-45$  може бути використане для пошуку вуглеводнів.

У табл. 2.3 представлені розрахункові значення частот, за яких для випадку ЧМ-сигналів.

Таблиця 2.3

Розрахункові значення частот  $f_2$ ,  $f'_2$  для ЧМ-сигналів

$f_1$ , МГц		$f_2$ , Гц	$f'_2$ , Гц
10	0,1	1.76165E+6	1.14799E+8
	0,5	2.57168E+6	6.37543E+7
	1	4.02059E+6	4.84879E+7
	10	9.17616E+6	2.04799E+7
	100	3.91767E+6	5.98233E+6
100	0,1	1.79256E+6	2.11519E+8
	0,5	3.13477E+6	1.72534E+8
	1	1.27142E+7	1.53332E+8
	10	9.01793E+7	1.11152E+8
	100	2.42684E+6	1.0132E+8

З табл. 2.3 видно, що в межах індексів ЧМ =0,1...10 частота резонансного стягнення  $f'_2$  збільшується, а за =100...1000 відбувається її зменшення. При збільшенні відбувається зменшення частоти  $f'_2$ , крім значення  $\beta = 10^3$  при частоті модуляції  $f_1=10$ МГц, де відбувається збільшення частот електронного плазмового резонансу.

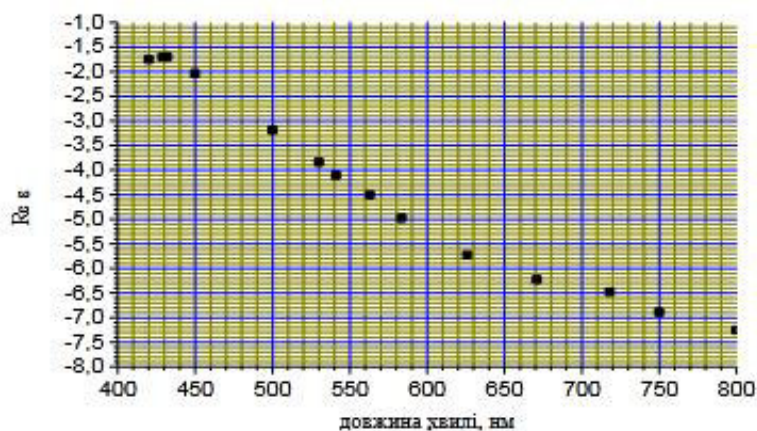


Рисунок 2.11 – Дійсна частина діелектричної проникності середовища

### 2.3.3. Аналіз взаємодії амплітудно-частотної модуляції сигналів з анізотропним середовищем

Компоненти тензора діелектричної проникності були проаналізовані на ЕОМ для тих же значень  $\epsilon_r$ ,  $\sigma_r$ ,  $v_{\text{эф}}$  та  $N_e$ , що і у попередніх випадках.

Численні дослідження показали, що при частоті несучого коливання  $f = (10^5 \dots 10^6)$  Гц не змінюється і приблизно дорівнює нулю, причому вплив частоти модуляції АМ на діелектричну проникність на цьому відрізку частот практично відсутній.

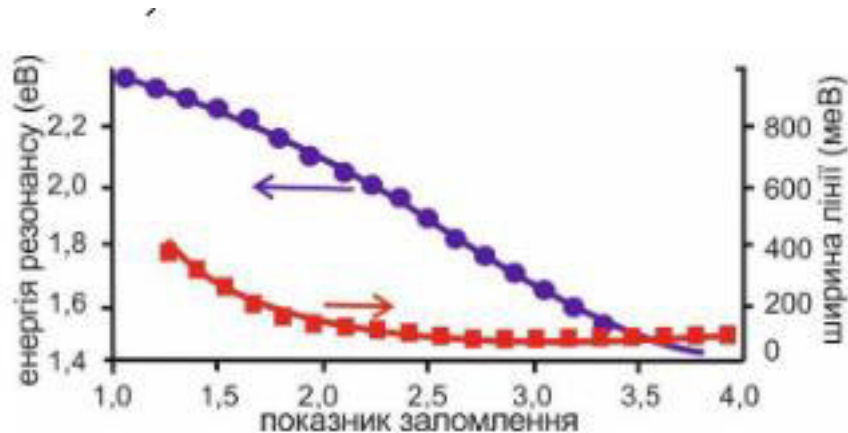


Рисунок 2.12 – Вплив показника заломлення на резонансну частоту

У діапазоні частот  $f=(10^6 \dots 10^9)$  Гц зміна коефіцієнта  $km$  та частоти модуляції  $F$  призводить до суттєвої зміни величини  $Re$ . Збільшення частоти модуляції та коефіцієнта АМ призводить до зменшення  $|Re|$  та зміни частот  $f'_2$  та  $f_2$ . Так, при  $F=1$  МГц,  $km=0,5$  відбувається зменшення  $f'_2$  та збільшення  $f_2$ , а для  $F=10$  МГц,  $km=1$  – збільшення  $f'_2$  і  $f_2$  проти значеннями частот для  $F=100$  кГц та  $km=0,1$ . Індекс ЧМ  $\beta$  не впливає на КЕ  $Re$  та  $Re$ .

Вплив індексу ЧМ на фазу КЕ найбільш істотний при  $\beta=0 \dots 3$ , коли фаза різко змінюється від  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ , і при  $\beta=25 \dots 28$ , коли фаза змінюється від  $180^\circ$  до  $-180^\circ$ . При  $\beta=3 \dots 25$  значення  $\arg \epsilon = 180^\circ$ , а при  $\beta=25 \dots 100$   $\arg \epsilon = -180^\circ$ .

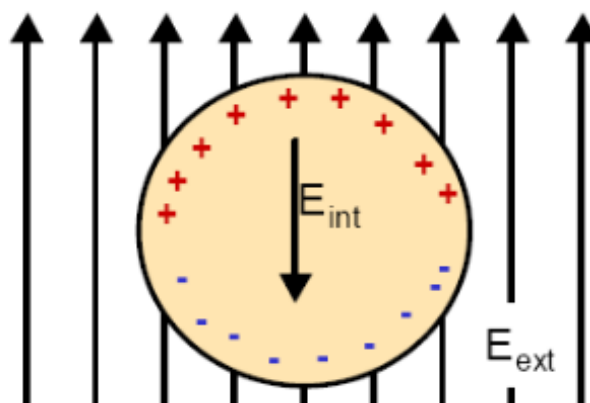


Рисунок 2.13 – Схема збудження коливань для виявлення вуглеводневих покладів

## 2.4. Висновки за розділом

1. Аналіз процесу взаємодії двочастотних електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими покладами показує ефективність використання режиму потужного НЧ- та малопотужного ВЧ-сигналів. Показано, що збільшення співвідношення частот призводить до зростання частоти циклотронного електронного резонансу та несуттєвого зменшення плазмового резонансу взаємодії складної електромагнітної хвилі та середовища над вуглеводневими покладами. Змінюючи частоту однієї з джерел формування поля, можна штучно змінювати частоти резонансної взаємодії.

2. Закономірності трансформації частотних залежностей комбінованих елементів при зміні  $k\omega$  та  $kE$  для двох режимів амплітудно-частотного співвідношення двочастотної електромагнітної хвилі мають відмінності, що зводяться до відмінності усунення частот резонансної взаємодії.

3. Аналіз аргументу компонентів тензора діелектричної проникності під час впливу АМ-сигналу, що визначає процес поширення електромагнітних хвиль у середовищі, свідчить про трансформацію її поляризаційної характеристики.

4. У режимі взаємодії ЧМ-сигналів з анізотропним середовищем зміна індексу ЧМ призводить до зміщення частот циклотронного електронного та електронно-плазмового резонансів.

5. У режимі взаємодії амплітуди ЧМ-сигналів з анізотропним середовищем зміни частоти модуляції та коефіцієнта АМ призводять до зміни частот циклотронного електронного та електронно-плазмового резонансів. Індекс ЧМ впливає на фазу комбінованих елементів, коефіцієнт АМ призводить до зміни комбінованих елементів тензора діелектричної проникності, так і їх фаз (тільки при  $k_m \approx 0 \dots 0,01$ ).

### 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Практична реалізація способу реєстрації природного випромінювання вуглеводневих покладів

У пошуковій геофізиці на стадії уточнення обсягів та контуру вуглеводневих покладів широко використовуються способи георозвідки, що ґрунтуються на застосуванні електромагнітного поля [14].

Недоліками цих способів є низька роздільна здатність і низька точність визначення меж покладів, обумовлена високим рівнем перешкод у діапазоні частот, що використовується, обмеженням відстані між приймачем і передавачем, пов'язаного з кінцевими чутливістю приймача і потужністю передавача, габаритами антен, неоднозначністю ідентифікації і інш.

У першому розділі даної кваліфікаційної роботи магістра проведено аналіз процесу взаємодії електромагнітного поля з вуглеводневими покладами у режимі двочастотного сигналу, що дозволяє підвищити точність визначення меж покладу. Однак рішення задачі обмежується застосуванням фіксованого відношення амплітуд та частот двох сигналів.

Для ефективного виділення проявів вуглеводневих покладів на фоні однорідного підстилаючого середовища необхідне теоретичне дослідження взаємного впливу анізотропного середовища та двочастотної електромагнітної хвилі з різними співвідношеннями параметрів хвиль з метою визначення найбільш оптимальних частот та амплітуд двох сигналів.

Далі досліджується структура електромагнітного поля у дальній зоні незалежної віддаленої радіостанції, що працює на фіксованій частоті  $f_1$ . Інший підхід пов'язаний з використанням результатів [13], в яких поклад вуглеводнів представлений, як система, побудована у вигляді обсягу редукованих порід та

навколишнього геологічного простору, що утворює природний електромагнітний коливальний контур – випромінювальну систему, джерелом збудження якої є природне змінне електричне поле.

Представляючи сигнал випромінюючої системи як гармонійне коливання  $e_2(t)$  з деякою частотою  $f_2$ , а збуджуючу електромагнітну хвилю у вигляді  $e_1(t)$ , можна представити електромагнітного поля як суперпозицію двох хвиль - потужної поверхневої електромагнітної хвилі з частотою  $f_1$  і малопотужною з частотою  $f_2$ .

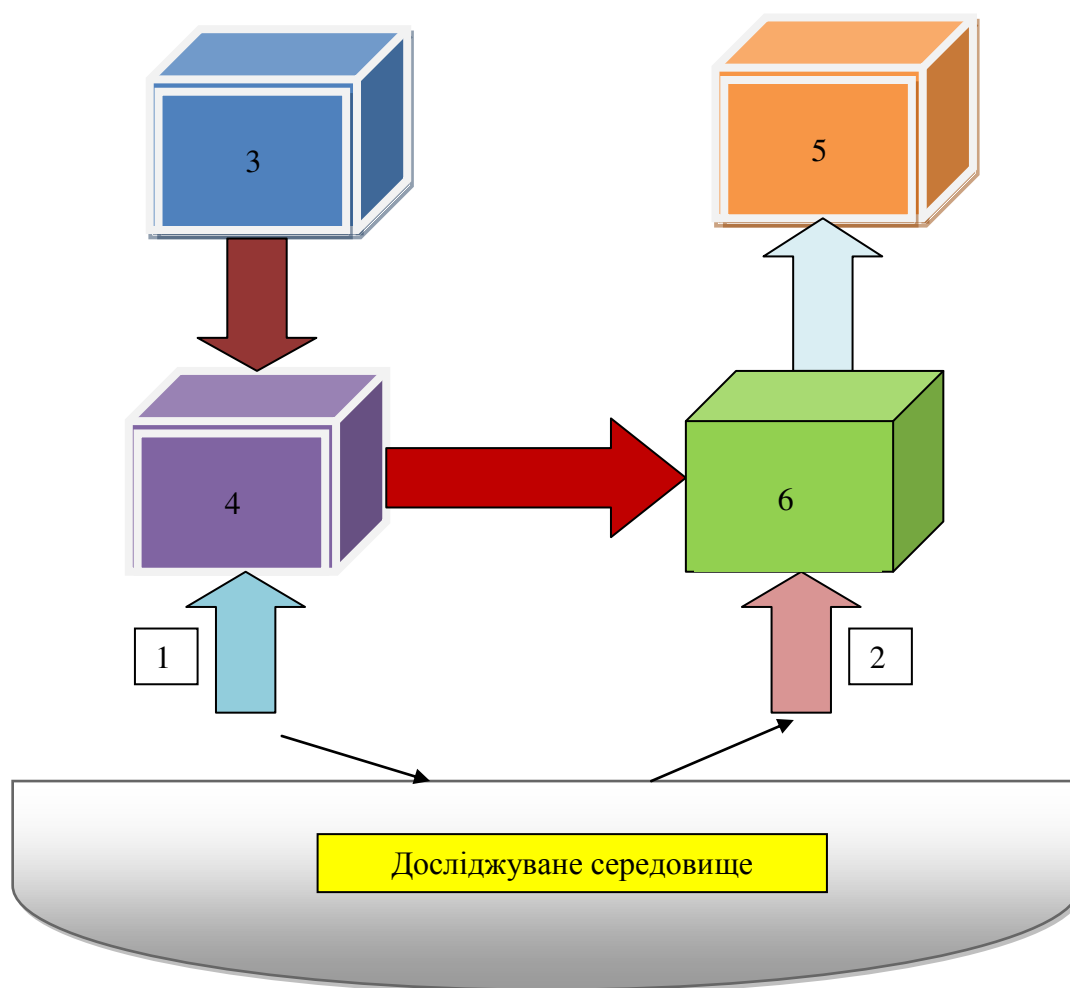


Рисунок 3.1 - Структурна схема пристрою, що реалізує спосіб реєстрації природного випромінювання вуглеводневих покладів:

1, 2 – антени; 3 – генератор; 4 – дільник; 5 – змішувач; 6 – приймач

Численні дослідження компонентів тензора (1.6) при впливі сигналу  $e_1(t)$  в діапазоні частот  $10^2$ - $10^{11}$  Гц для  $\epsilon_r = 5$ - $10$ ,  $\sigma_r = 0,01$  См/м і  $N_e = 10^{16}$ - $10^{17}$  м<sup>-3</sup> показали, що максимальний прояв від нелінійного ефекту взаємодії електромагнітної хвилі 10...30 МГц, коли частота зондувального сигналу  $f_1$  близька або вище частоти зіткнень між електронами та іонами.

За рахунок реєстрації напруженості поля на комбінаційній частоті  $F = f_1 \pm f_{\text{відб}}$ , де  $f_{\text{відб}}$  - відбита хвиля, в якій закладена інформація про природну зміну випромінювання з частотою  $F$  за рахунок використання нелінійного перетворення зондувального сигналу і сигналу природної випромінюючої системи в умовах анізотропії середовища, підвищується достовірність.

У процесі використання зазначеного вище діапазону частот, умови максимального прояву нелінійного ефекту взаємодії отримано аномальний прояв електромагнітного поля на межах вуглеводневого покладу.

На рис. 3.2 наведено результати досліджень, виражених залежністю:

$$V = f(r) = A(r)/E(r); \quad (3.1)$$

де  $A$  – амплітуда сигналу на вході приймача;

$E$  – амплітуда власного випромінювання порід;

$r$  – відстань уздовж досліджуваного профілю.

На графіках пунктирна та суцільна лінії відповідають значенням відношення  $V$  на двох частотах –  $F(1)$  та  $F(2)$ .

Як видно з графіка, межа покладу розташовується на пікеті № 29, т.як величина  $V$  у цій точці має мінімальне значення. Ефект нелінійної взаємодії сигналів проявляється у зниженні амплітуди  $A$ , що призводить до зменшення відношення  $V$  до значень 0,53 та 0,5. Поза контуром ефект відсутній, де величина  $V$  близька до 1, і відхилення становить  $\Delta V = \pm 0,2$  у контрольних точках  $r \geq 32$ .

Пристрій, що реалізує спосіб, містить генератор 3 (стандартний генератор НВЧ із частотою сигналу  $f_1=8,5\text{ГГц}$ ). Сигнал з виходу генератора надходить на вхід дільника 4, як якого використовуються стандартні мостові НВЧ-з'єднання, з виходу якого надходить на два канали. При цьому відбувається розподіл потужності на два сигнали з рівними амплітудами. Один сигнал надходить на антену 1, яка опромінює досліджувану ділянку поверхні на частоті  $f_1$ , а другий сигнал подається на змішувач 5. Відбитий від досліджуваної поверхні сигнал приймається антеною 2.

В якості антен 1 і 2 використовуються рупорні антени (100x150) мм, які встановлюються на фіксованій поверхні. У змішувачі 5 відбувається змішування двох сигналів з частотами  $f_1$  і  $f_1$  відб, в результаті чого на вхід приймача надходить сигнал з амплітудою  $A$  і частотою  $F$ . Приймач виконується за супергетеродинною схемою і налаштовується на дискретну частоту.

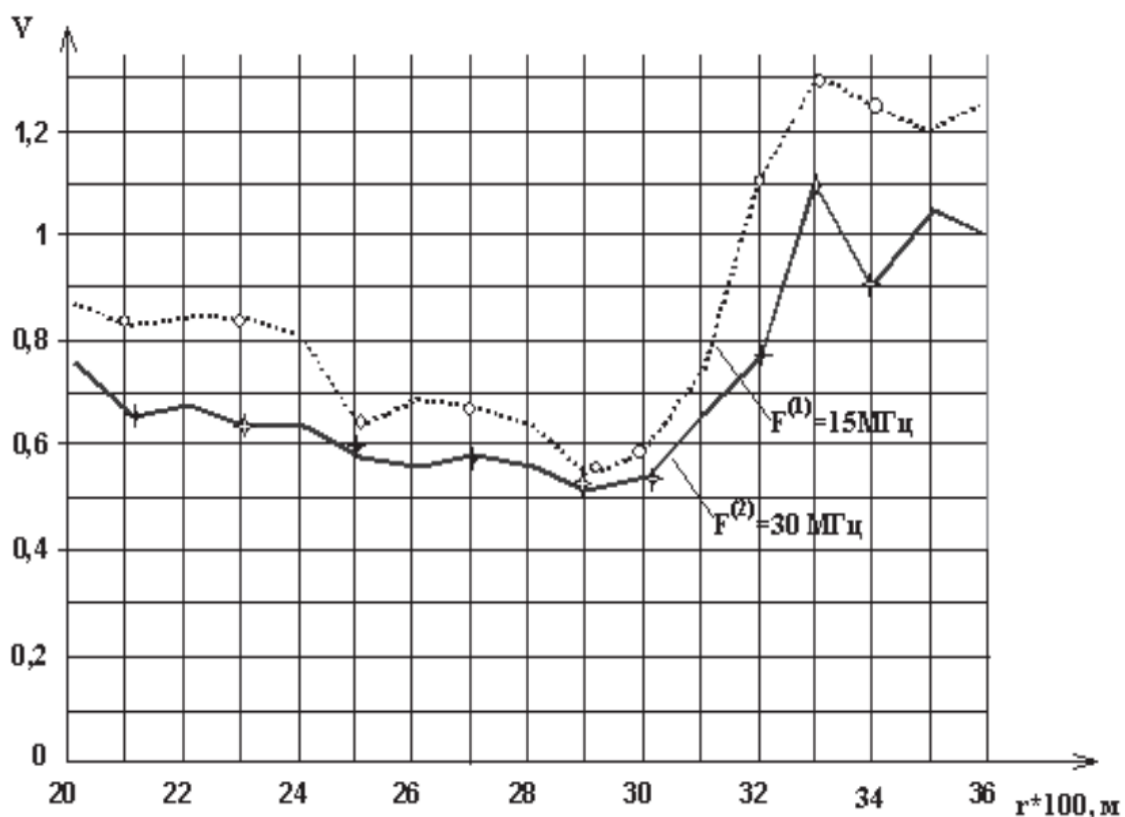


Рисунок 3.2 – Залежність  $V = f(r)$  для реального покладу

Використання запропонованого способу геоелектророзвідки вуглеводневих покладів забезпечує, порівняно з існуючими аналогами, наступні переваги:

1. Підвищення точності визначення меж вуглеводневих покладів;
2. Однозначність визначення скупчень вуглеводнів при використанні ефекту нелінійної взаємодії сигналів в умовах анізотропії;
3. Вибір конкретних частот під час розвідки;
4. Суттєве зниження маси та габаритів пристрою геоелектророзвідки;
5. Підвищення мобільності пристроїв розвідки;
6. Підвищення продуктивності робіт під час пошуку вуглеводнів.

### **3.2 Практичне застосування методу реєстрації кордонів вуглеводневих покладів щодо аномальних змін напруженості електричного поля на двох частотах**

На основі теоретичного аналізу тензорів діелектричної проникності проведено перевірку двочастотної взаємодії електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими покладами.

Дослідження проводилося з урахуванням методу альтернативних частот [15], сутність якого у наступному. Оскільки частотні залежності  $\text{Re}$  мають ділянки, де підстилаюче анізотропне середовище буде поглинаючим або відбиваючим, вимірюючи відношення амплітуд напруженостей електричного поля  $E_1$  і  $E_2$  на двох частотах  $f_1$  і  $f_2$  вздовж конкретного геопрофілю за аномальними значеннями відхилень (3.2) можна зафіксувати межу покладу вуглеводнів.

$$K_E = E_1 / E_2; \quad (3.2)$$

Значення напруженості поля  $E_1$  для електромагнітних хвиль з  $KE \ll 1$  і  $K\omega \ll 1$  у діапазоні частот від 1000 Гц до 1-2 МГц на межі "вміщуючі породи - вилеводневих покладів" має різко зменшитися (рис.3.3).

Аномальний стрибок напруженості у своїй еквівалентній зміні поля поверхневої електромагнітної хвилі. Використання альтернативної частоти  $f_2$  до частоти  $f_1$  з піддіапазону 10 ... 100 МГц дозволяє зареєструвати на межі контуру вилеводневих покладів протилежну до першої аномалії напруженості електричного поля поверхневої електромагнітної хвилі  $E_2$  (рис. 3.3). При цьому аномалія поля поверхневої електромагнітної хвилі на межі покладу буде еквівалентна зміні поля поверхневої електромагнітної хвилі на кордоні. Таким чином, аномалії полів поверхневої електромагнітної хвилі на межі контуру вилеводневих покладів для двох частот  $f_1$  і  $f_2$  виявляються протилежними, що може бути використане для ідентифікації вилеводневих покладів.

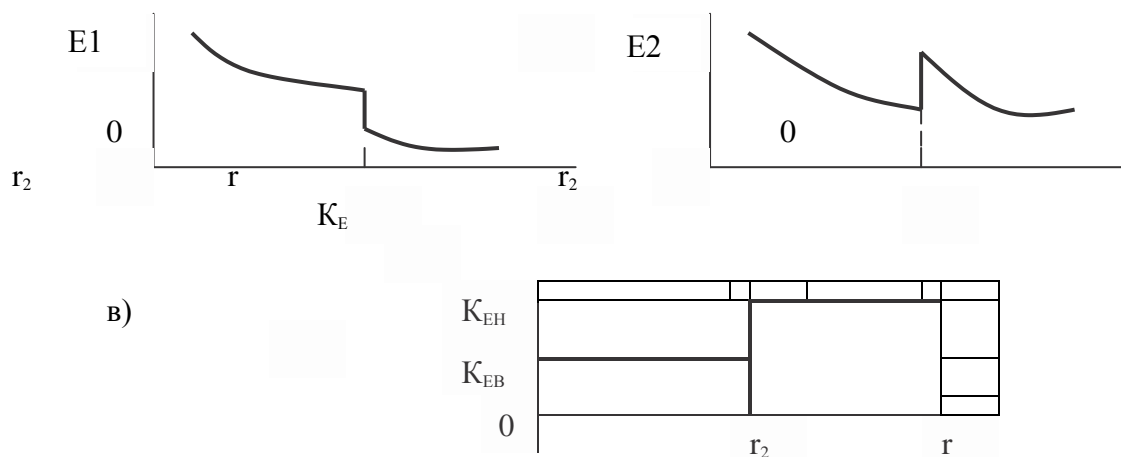


Рисунок 3.3 - Поле поверхневої електромагнітної хвилі на частотах  $f_1$  (а),  $f_2$  (б) і відношення амплитуд поля на цих частотах (в)

Визначаючи відношення напруженостей поля двох частот у фіксованій точці досліджуваного профілю, можна отримати стрибок відношення напруженостей на межі контуру УВЗ, що у кілька разів перевищує аномалію напруженості поля на частоті  $f_2$  (рис. 3.3). Поза контуром покладу, так як і над нею, відношення

напруженостей залишається практично постійним і набуває значення КЕВ і КЕН відповідно. Стрибок відношення в точці  $r_2$  вказує на зміну властивостей підстиляючого середовища та відповідає межі контуру.

Перевірка ефекту нелінійної взаємодії двох електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими покладами проводилася за допомогою радіоелектронної апаратури, структурна схема якої наведена на рис. 3.4.

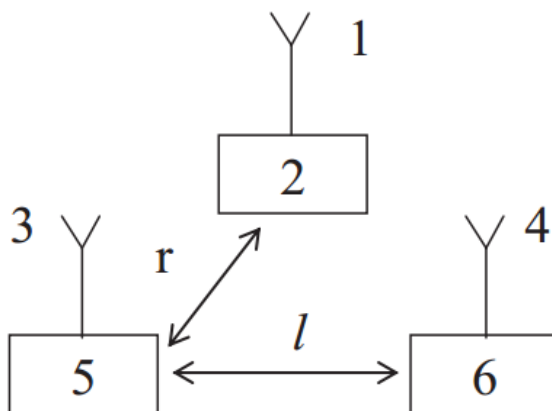


Рисунок 3.4 - Структурна схема установки для реалізації метода альтернативних частот: 1,3,4 – антени; 2 – радіопередавач на частоті  $f_2$ ; 5 – радіоприймач; 6 – радіопередавач на частоті  $f_1$

Результати досліджень, проведених на частотах  $f_1 = 2\text{МГц}$  та  $f_2 = 16\text{МГц}$  (рис.3.5) показали наступне.

При фіксованій відстані між приймачем і передавачем на частоті  $f_1$   $l=10\text{м}$  і зміні розташування передавача, що випромінює сигнал на частоті  $f_2$ , величина  $1/kE$  до пікету 29 досліджуваного профілю має відносно рівномірну поведінку, а після даної точки відбувається її зростання до 2,5 дБ на екстремумі 27,  $1/kE \approx 2,5$  дБ на екстремумі 32).

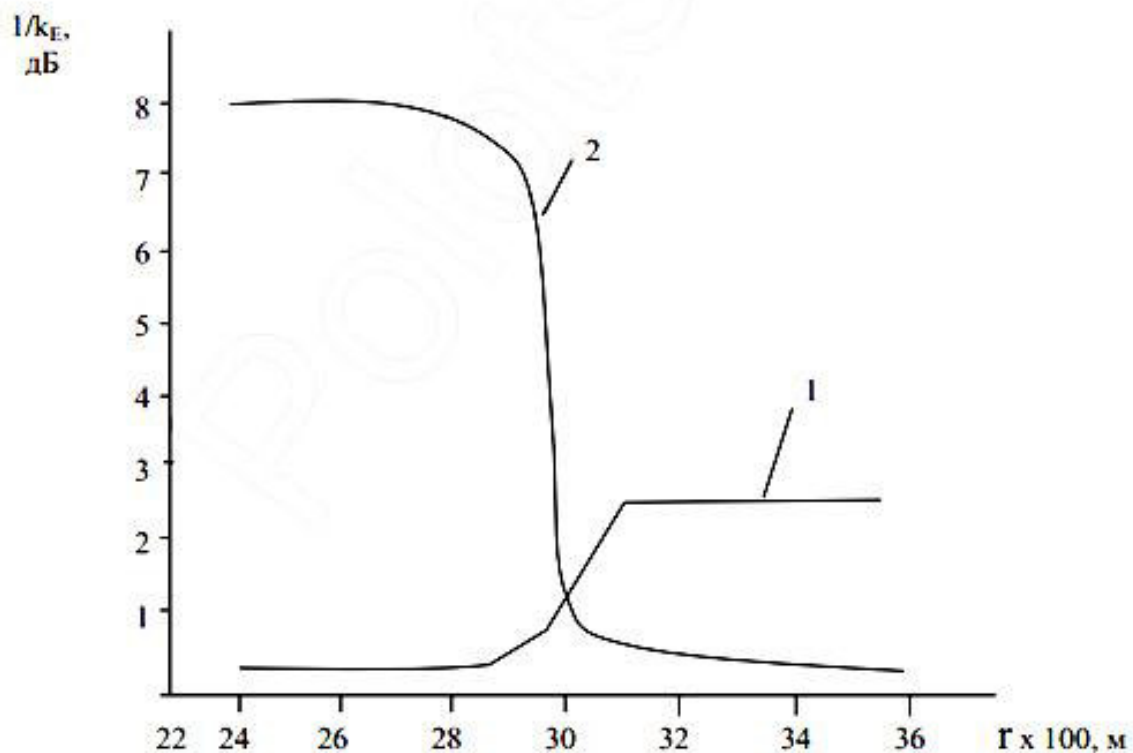


Рисунок 3.5 - Характеристики двочастотної взаємодії електромагнітної хвилі з вуглеводневими покладами: 1 – при розміщенні випромінювачів на анізотропному включенні; 2 – при розміщенні випромінювача поза контуром анізотропії

На екстремумах 30-34 відношення напруженостей поля залишається практично незмінним. При розміщенні передавачів поза контуру (крива 2 рис. 3.5) відношення напруженостей поля на екстремумах 24-28 практично однакове. На екстремумі 29  $1/kE=7,5$  дБ і далі відношення напруженостей поля різко знижується до значення  $1/kE=2,0$  дБ на екстремумі 30. На екстремумі 31-34 величина  $1/kE$  залишається практично постійною.

Даний метод забезпечує підвищення рівня достовірності під час ідентифікації та точності визначення меж вуглеводневих покладів.

На контрольних точках геофізичного профілю проводилися вимірювання відстані  $l$  між антенами передавача та приймача за фіксованим рівнем НЧ-сигналу.

Виходячи зі зміни інтенсивності сигналів досліджуваних частот (рис. 3.5), для оцінки впливу відношення амплітуд та частот на ступінь нелінійного перетворення використовувався режим випромінювання, що відповідає залежності 2 рис. 3.5 (збільшення параметра  $1/kE$  над анізотропною складовою на 7,5 дБ при  $k\omega \approx 0,1$ ).

$$K_H(r) = l / l_0, \quad (3.3)$$

де  $l_0$  – початкова величина рознесення радіоприймача та передавача, де видно зростання КН над анізотропним середовищем зі збільшенням амплітуди зондуємого сигналу (крива 2) та зменшення для електромагнітної хвилі зі спадаючою інтенсивністю поля (крива 1).

Для малопотужного сигналу величина КН 1,0 до екстремуму 29 над вуглеводневими покладами, а далі монотонно зростає до значення КН 1,5. Для потужнішого сигналу  $KH \approx (1,25-1,4)$  на екстремумах 22-29 і поза вуглеводневими покладами зменшується до 0,9 (при  $r > 30$ ).

Таким чином, вимірювання відстані між приймачем і джерелом дозволяє виділяти межі вуглеводневих покладів на змінах величини  $KH(r)$ .

### **3.3 Реєстрація меж анізотропного середовища із використанням акустичного сигналу**

Завдання виявлення вуглеводневих покладів на фоні морського середовища є дуже актуальною. Більшість методів розвідки, присвячених вирішенню цієї задачі, заснована на використанні сейсмічних хвиль.

Метод реєстрації меж анізотропного середовища із використанням акустичного сигналу апробовано для пошуку підводних цілей, що є джерелом акустичних хвиль [16].

Враховуючи можливість виявлення джерел акустичних коливань у щільному морському середовищі ( $\epsilon \approx 80$ ) з'являється інтерес реєстрації ефекту взаємодії акустичного сигналу та поверхневою електромагнітною хвилею над неоднорідністю з частотнозависимими властивостями, якими має середовище над вуглеводневими покладами.

Класична задача дистанційного зондування підводних цілей розсіювання електромагнітних хвиль на поверхні, розглянута в роботі [17], базується на використанні бічних хвиль в діапазоні наднизьких частот. Нетрадиційний спосіб пеленгації точкових джерел акустичних коливань за рахунок реєстрації на водній поверхні електромагнітних сигналів, збуджених у морському середовищі при зміщенні заряджених частинок рідини в геомагнітному полі.

Основними недоліками зазначених способів електромагнітного виявлення підводних джерел акустичних хвиль є великі габарити приймальних антен, громіздкість і конструктивна складність апаратури внаслідок малих рівнів сигналів, що реєструються.

За наявності межі розділу на водній поверхні виникають релеївські хвилі, що швидко загасають, від підводного джерела акустичних коливань, що створюють локальну неоднорідність гідродинамічних властивостей. Так як морська вода може бути представлена багатокомпонентним плазмоподібним середовищем, що володіє в геомагнітному полі анізотропними властивостями, пружні коливання, що виникли, перетворюються в електромагнітні хвилі.

Електродинамічний відгук магнітоактивного середовища на вплив акустичного сигналу та зондувальної електромагнітних хвиль характеризується тензором (1.30). У спектрі частот зондуючого сигналу, що поширюється, виникає НЧ- складова за рахунок перехресної модуляції при зміні ефективної частоти зіткнень заряджених частинок щодо середнього значення і залежне від співвідношення параметрів взаємодіючих хвиль асиметричне (одночастотне) зміщення несучої частоти  $\omega$ , відрізняється (Кроспараметричне перетворення).

Дослідження особливостей поширення сигналу УКХ-діапазону над магнітоактивним середовищем проводилося разом із сейсмологічними випробуваннями на цій же площі.

У процесі зміщення джерела імпульсного акустичного збурення щодо контрольних позначок профілю кут  $\Theta$  між напрямками поширення електромагнітних хвиль та переміщення акустичного фронту змінювався у широких межах (рис. 3.6).

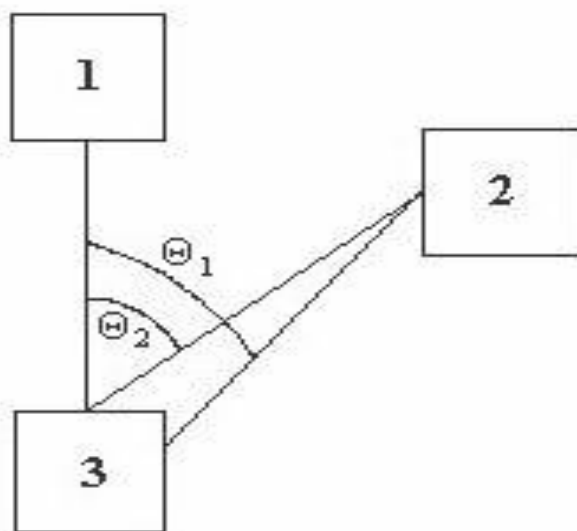


Рисунок 3.6 - Розташування джерела акустичного збурення:

1 – Радіопередавач; 2 – джерело акустичного збурення; 3 – Радіоприймач

Про взаємодію електромагнітної хвилі та акустичної хвилі в магнітоактивному середовищі свідчить зміна в часі амплітуди поверхневої електромагнітної хвилі із частотою 50МГц над анізотропним включенням для кількох значень кута  $\Theta$  (рис. 3.5). Найбільш близько відповідає результатам аналітичних досліджень (1.30) квазігармонічної взаємодії хвиль.

Результати показують, що в режимі взаємодії електромагнітної хвилі та акустичного імпульсу з'являється можливість використання отриманих результатів для пошуку вуглеводневих покладів.

### 3.4 Дослідження локалізації вуглеводневих покладів із використанням модульованих сигналів

Дослідження трансформації поля модулюючих електромагнітних хвиль проведено на моделі середовища з включенням нафти, розташованої під шаром ґрунту, що відповідає піщано-глинистим фракціям.

Для локалізації нафту поміщено у спеціальний контейнер з розмірами  $lk=1\text{м}$ ,  $d=h=0,4\text{м}$ . На відрізці  $lk=1\text{м}$  моделюється ділянка щодо однорідності порід. Модель не враховує анізотропії середовища і призначена для вивчення поведінки поля поверхневої електромагнітної хвилі на межі розділу «породи» – «протяжні нафтові поклади».

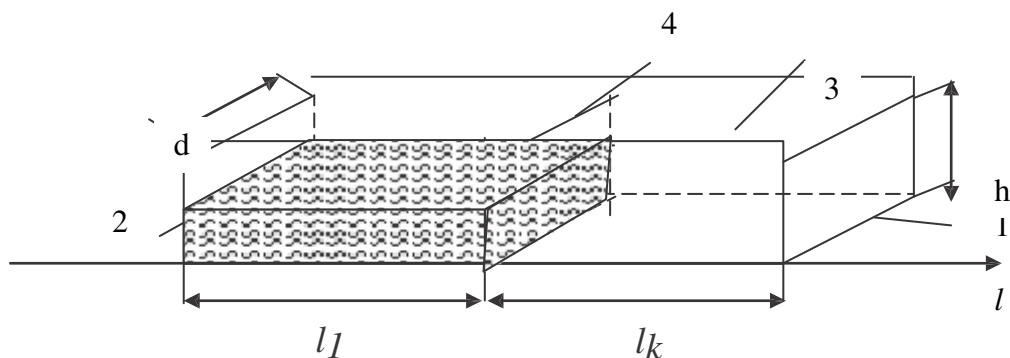


Рисунок 3.7 - Модель покладу вуглеводнів: 1 – контейнер; 2 – спеціальний контейнер; 3 – шар ґрунту; 4 – межа поділу середовищ

Структурна схема дослідження кордону розділу нафта- порода представлена на рис. 3.8:



База даних реалізована у форматі XML.

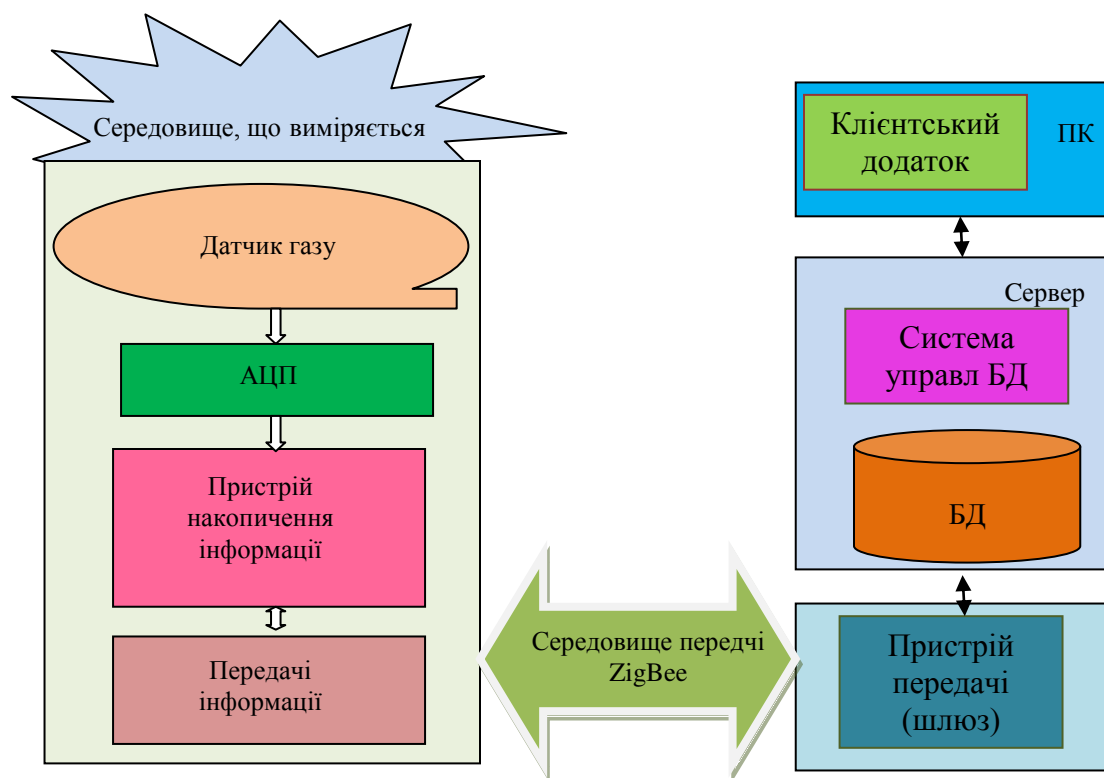


Рисунок 3.9 – Архітектура телекомунікаційної системи виявлення вуглеводнів

У табл. 3.1-3.4 наведено результати моделювання при використанні АМ-сигналів за різних коефіцієнтів амплітудної модуляції. Напруженості електричного поля  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{13}$  і  $E_{14}$  (в дБ) вимірюються в точках досліджуваного профілю  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  і  $l_4$  відповідно, причому відстань  $l_1-l_2$ ,  $l_2-l_3$ ,  $l_3-l_4$  рівні між собою.

Таблиця 3.1

Взаємодія електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими покладами при коефіцієнті модуляції  $K_m=0,3$

f, ГГц	F, МГц	$E_{I1}$	$E_{I2}$	$E_{I3}$	$E_{I4}$
3	10	14	13	14	4
5		16	15	15	3
7		17	16	16	3
8		17	17	18	3
3	50	17	18	17	6
5		19	20	20	5
7		19	19	19	4
8		16	17	16	3
3	150	13	13	12	4
5		13	13	13	5
7		11	12	14	5
8		10	11	10	3
3	250	15	15	15	4
5		16	16	16	7
7		15	15	15	5
8		14	14	14	3
3	350	12	12	12	6
5		12	12	12	4
7		13	12	11	5
8		15	15	15	3

Дані, наведені у табл. 3.1-3.4 свідчать про повну кореляцію аномальної зміни електромагнітних хвиль на межах еквівалента з вуглеводневими покладами без урахування анізотропії.

Таблиця 3.2

Взаємодія електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими покладами при коефіцієнті модуляції  $K_m=0,5$

f,	F,	$E_l$	$E_l$	$E_l$	$E_l$
3	1	14	14	14	8
5		16	16	16	3
7		15	15	15	6
8		16	15	15	5
3	5	17	18	18	5
5		17	17	17	5
7		16	16	16	4
8		17	18	18	5
3	150	13	12	12	6
5		13	13	13	6
7		14	14	14	5
8		15	15	15	3
3	250	16	15	15	2
5		15	15	15	2
7		14	14	14	3
8		14	14	14	3
3	350	12	12	12	3
5		12	12	12	4
7		13	14	14	3
8		16	16	16	2

При коефіцієнті амплітудної модуляції  $k_m = 0,9$  (табл. 3.4) поведінка електромагнітного поля менш аномальна порівняно з меншими  $k_m$ .

Визначається це якістю детектування АМ-сигналу при високих  $k_m$ , які не можуть бути рекомендовані при вирішенні задач пошуку та виділення вуглеводневих покладів.

Результати проведених досліджень свідчать, що амплітудна модуляція призведе до незначних змін реакції середовища над вуглеводневими покладами.

Таблиця 3.3

Взаємодія електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими  
покладами при коефіцієнті модуляції  $K_m=0,7$

f,	F,	E	$E_l$	$E_l$	$E_l/4$
3	10	1	1	16	4
5		1	1	15	3
7		1	1	14	3
8		1	1	15	2
3	50	1	1	14	3
5		1	1	14	3
7		1	1	18	4
8		1	1	12	3
3	150	1	1	13	6
5		1	1	13	5
7		1	1	12	7
8		1	1	13	6
3	250	1	1	17	5
5		1	1	18	5
7		1	1	14	3
8		1	1	14	2
3	350	1	1	12	4
5		1	1	12	3
7		1	1	12	3
8		1	1	15	5

Таблиця 3.4

Взаємодія електромагнітних хвиль із середовищем над вуглеводневими  
покладами при коефіцієнті модуляції  $K_m=0,9$

f,	F,	E	$E_l$	$E_l$	$E_l/4$
3	10	5	5	5	4
5		6	5	4	3
7		4	4	4	3
8		5	5	4	3
3	50	6	5	5	4
5		6	6	6	5
7		7	7	6	4
8		5	5	5	4

3	150	6	6	6	4
5		5	4	4	3
7		5	4	4	3
8		4	4	4	3
3	250	6	5	5	4
5		5	5	4	3
7		4	4	4	3
8		5	5	4	3
3	350	6	6	4	3
5		5	5	4	3
7		4	4	4	3
8		4	3	2	3

Результати досліджень показують, що відбувається трансформація спектрів електромагнітних хвиль, що взаємодіють з анізотропним середовищем, тому для пошуку та виділення вуглеводневих покладів із використанням ЧС-сигналів необхідні інфокомунікаційні системи, що містять спектроаналізатори.

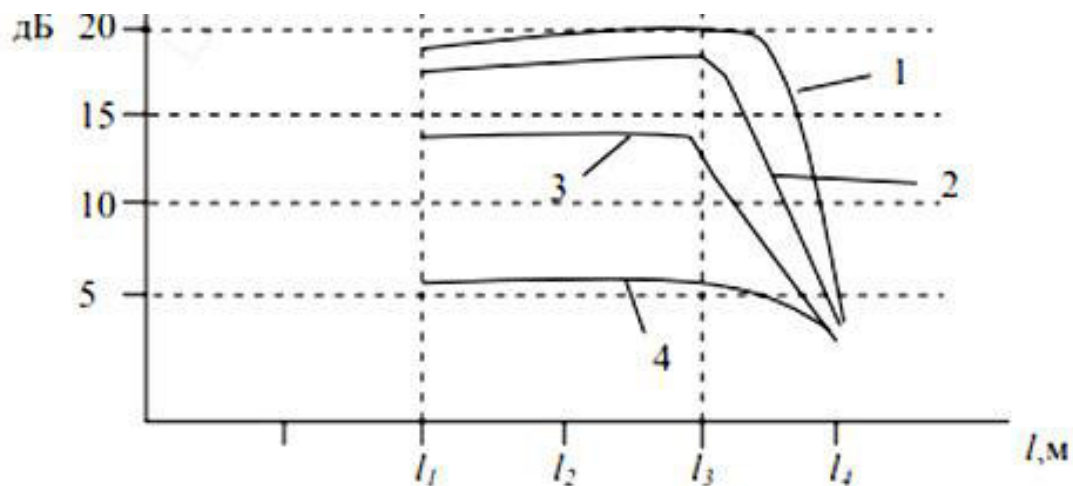


Рисунок 3.10 – Аналітичні залежності  $E$ , для: 1 –  $k_m=0,3$ ; 2 –  $k_m=0,5$ ; 3 –  $k_m=0,7$ ; 4 –  $k_m=0,9$

### 3.5 Використання вимірювань імпедансу антен для виділення анізотропних неоднорідностей

Результати теоретичних досліджень відбивних характеристик свідчать про існування контрастів коефіцієнтів відображення між середовищем над вуглеводневими покладами.

На рис. 3.11 наведено структурну схему вимірювальної установки, використаної для досліджень відношення коефіцієнтів відображення на частотах  $f_1=10\text{ГГц}$  і  $f_2=34\text{ГГц}$ .

На межі анізотропного середовища і нафтовмісткого середовища, спостерігається різке зменшення співвідношення коефіцієнтів відображення (табл. 3.5) та підтверджує анізотропний характер середовища над вуглеводневими покладами.

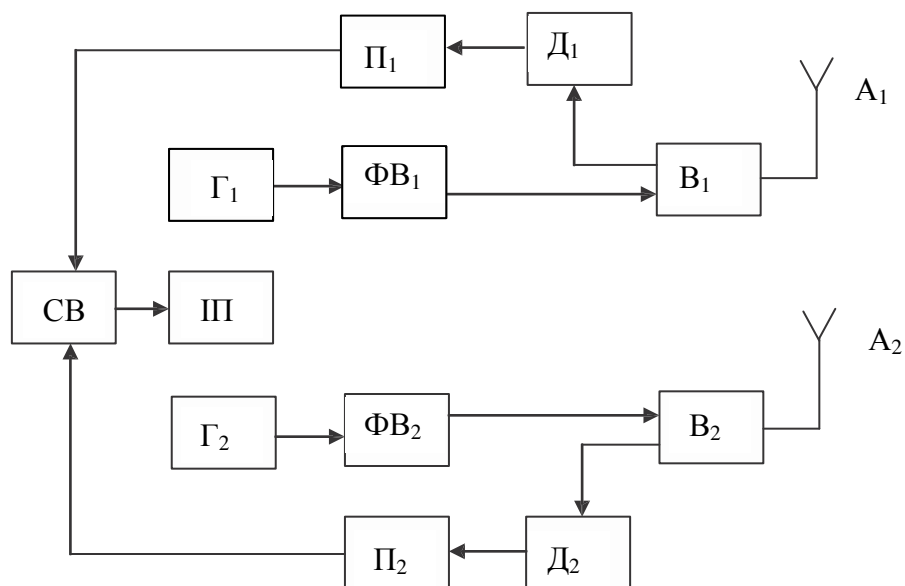


Рисунок 3.11 – Структурна схема пристрою для вимірювання відношення коефіцієнтів відображення на двох частотах

Схема для здійснення вимірювань складається з генераторів  $\Gamma_1$  та  $\Gamma_2$ , феритових вентилів  $\Phi B_1$  та  $\Phi B_2$ , спрямованих відгалужувачів  $B_1$  та  $B_2$ , антен  $A_1$  та  $A_2$ , детекторів  $D_1$  та  $D_2$ , підсилювачів  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$ , схеми відношення СВ, індикаторного приладу  $\Pi$ .

У таблиці 4.5 наведено результати вимірів відношення коефіцієнтів відбиття на двох частотах.

Таблиця 3.5

Результати відношення коефіцієнтів відбиття на частотах  $f_1=10\text{ГГц}$  і  
 $f_2=34\text{ГГц}$

№ пикета	
25	1,22
26	1,23
27	1,22
28	1,17
29	0,78
30	1,54
31	1,46
32	1,44
33	1,44

Вимірювання відношення коефіцієнтів відбиття при нормальному зондуванні на частотах  $f_1=10\text{ГГц}$  та  $f_2=34\text{ГГц}$  показали, що на межі контуру (пикет 29) відбувається зменшення величини до значення 0,78, що пов'язано з протилежним характером аномалій коефіцієнтів відбиття на частотах  $f_1$  та  $f_2$ .

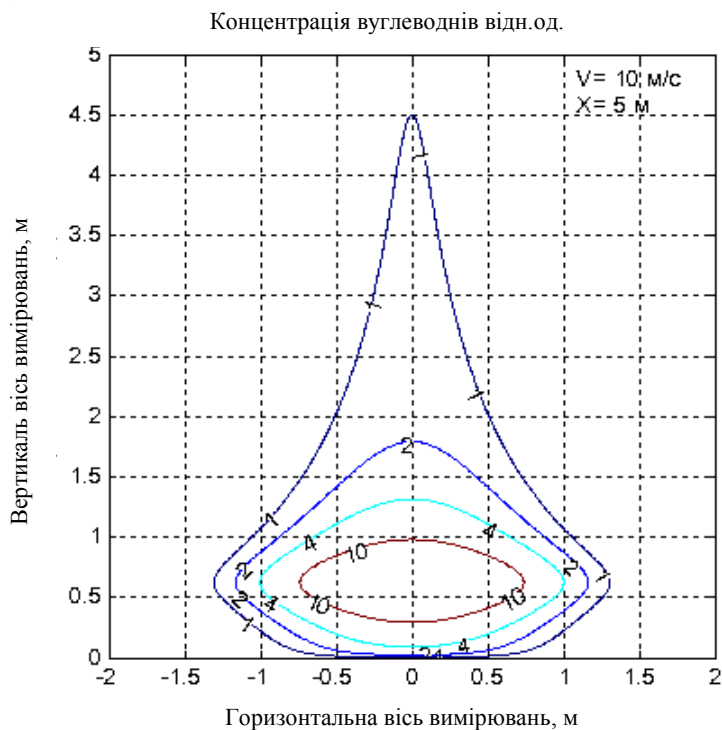


Рисунок 3.12 - Розподіл концентрації вуглеводнів, котрі реагують на поверхневу електромагнітну хвилю заданої частоти

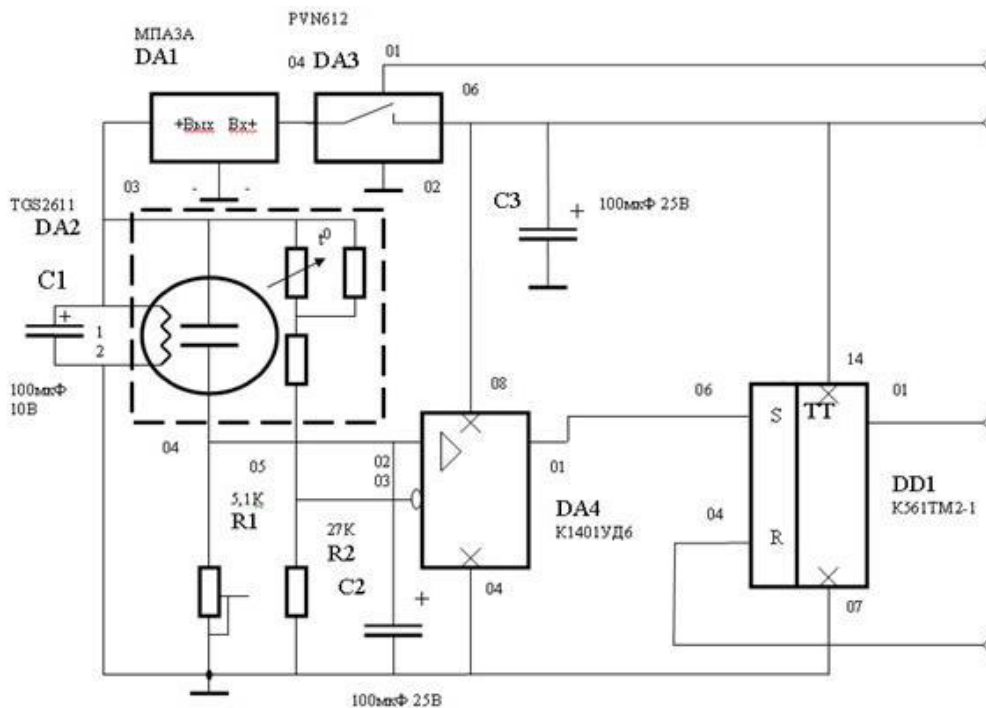


Рисунок 3.13 - Схема електрична принципова датчика для визначення геометрії вуглеводневих покладів

### 3. 6 Аналіз структурної побудови радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів

На основі наведеного теоретичного аналізу, а також результатів моделювання можна провести аналіз структурної побудови радіотехнічних систем для георозвідки покладів нафти та газу на основі двочастотних та модульованих сигналів.

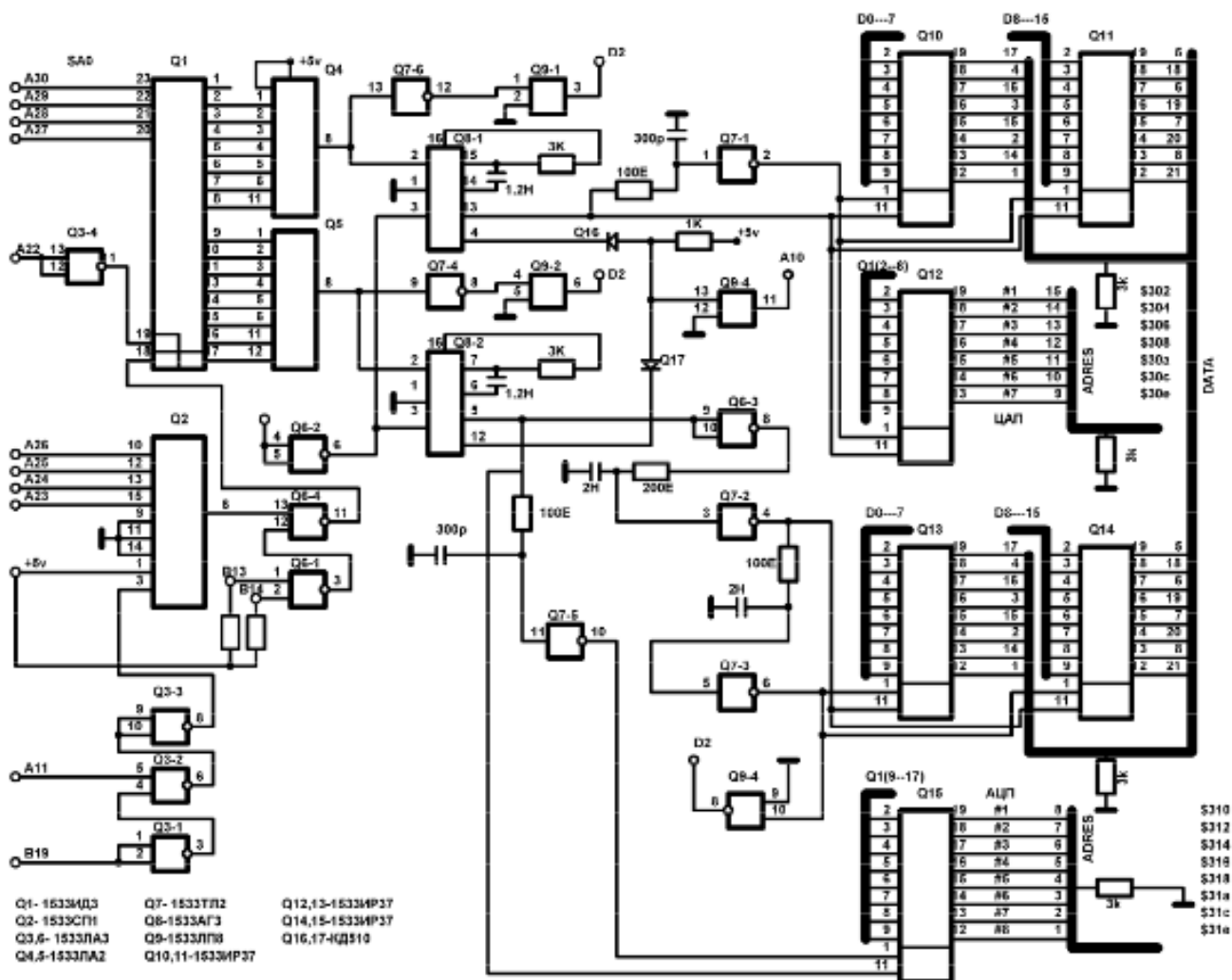


Рисунок 3.14 – Структурна схема радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів



На приймальній стороні можливий спектральний аналіз сигналів, що приймається, це забезпечує достовірне визначення меж вуглеводневих покладів. При цьому для виключення суперпозиції полів електромагнітних хвиль, що випромінюються, в структурі радіотехнічної системи передбачається блок синхронізації (рис. 3.15).

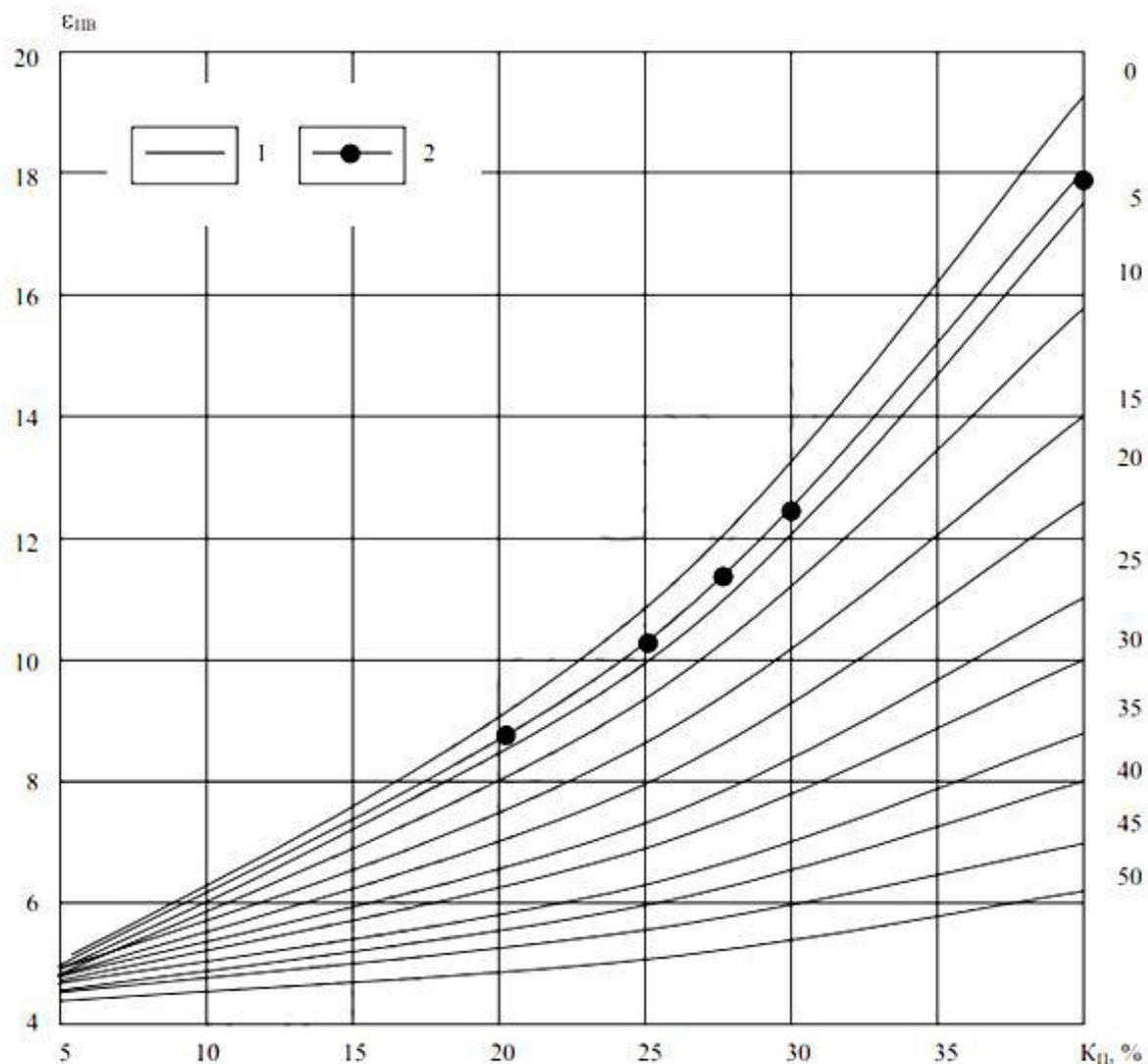


Рисунок 3.16 – Залежності діелектричної проникності порід, в залежності від коефіцієнта пористості: 1 – аналітичні результати; 2 – результати моделювання

Отже, схема побудована на основі методу рівновіддалених приймачів, налаштованих відповідно на частоти  $f_1$  та  $f_2$ . Методика полягає у реєстрації напруженостей електричного поля за двома напрямками на однаковій відстані від стаціонарних передавачів, що працюють на частотах  $f_1$  та  $f_2$

Будується діаграма  $kE=f(l)$  для дискретних точок досліджуваного профілю і аномальному стрибку  $kE$  визначають межу покладу  $l_c$ .

На приймальній стороні потрібне застосування радіотехнічної системи, яка включає спектроаналізatori.

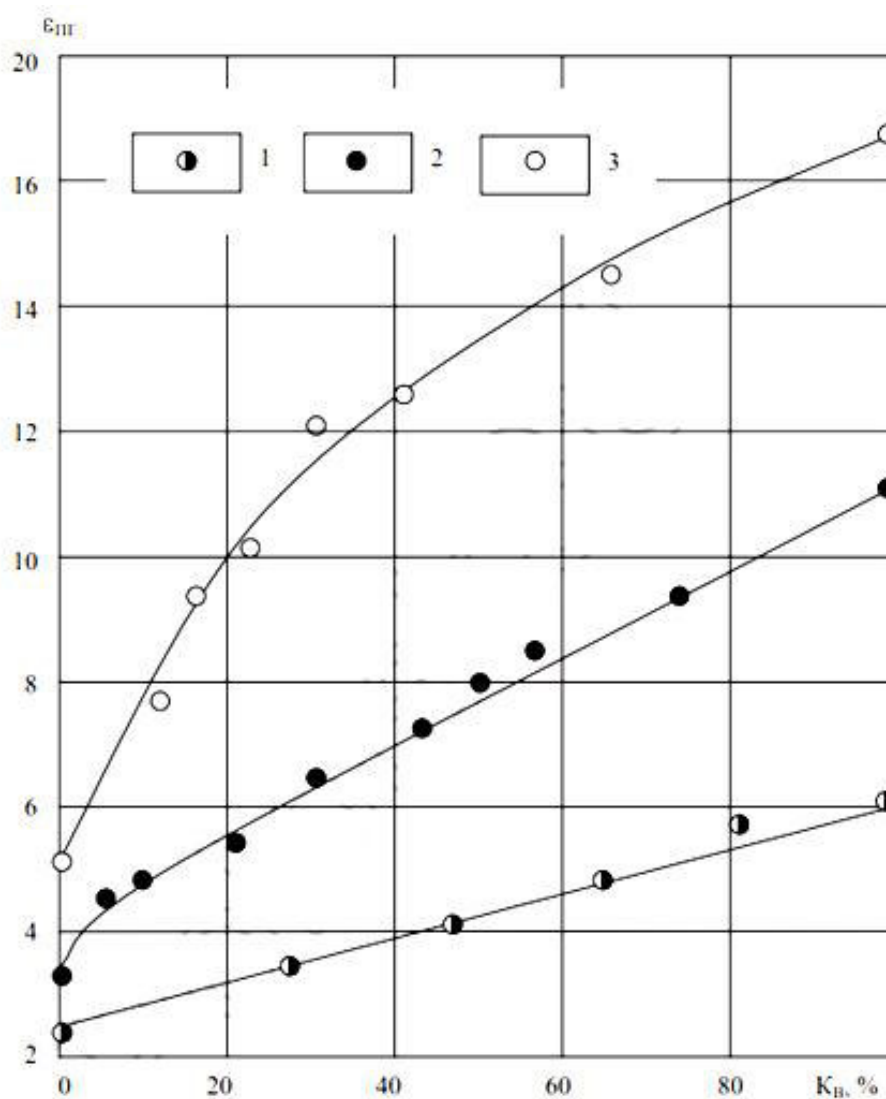


Рисунок 3.17 – Залежності діелектричної проникності порід  $\epsilon$ , в залежності від пористості  $K_{в}$ : 1 – чистий пісок; 2 – суглинок; 3 – чорнозем

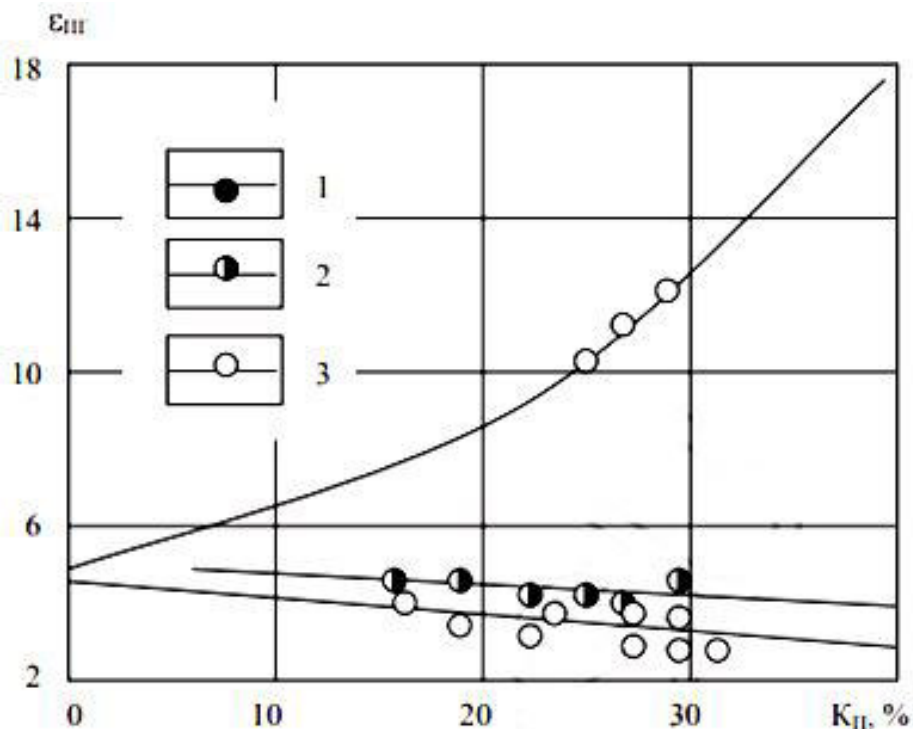


Рисунок 3.18 – Залежності діелектричної проникності порід  $\epsilon$ , в залежності від пористості  $K_p$ : 1 – сухий пісок; 2 – нафтонасичений пісок (100%); 3 – водонасичений пісок

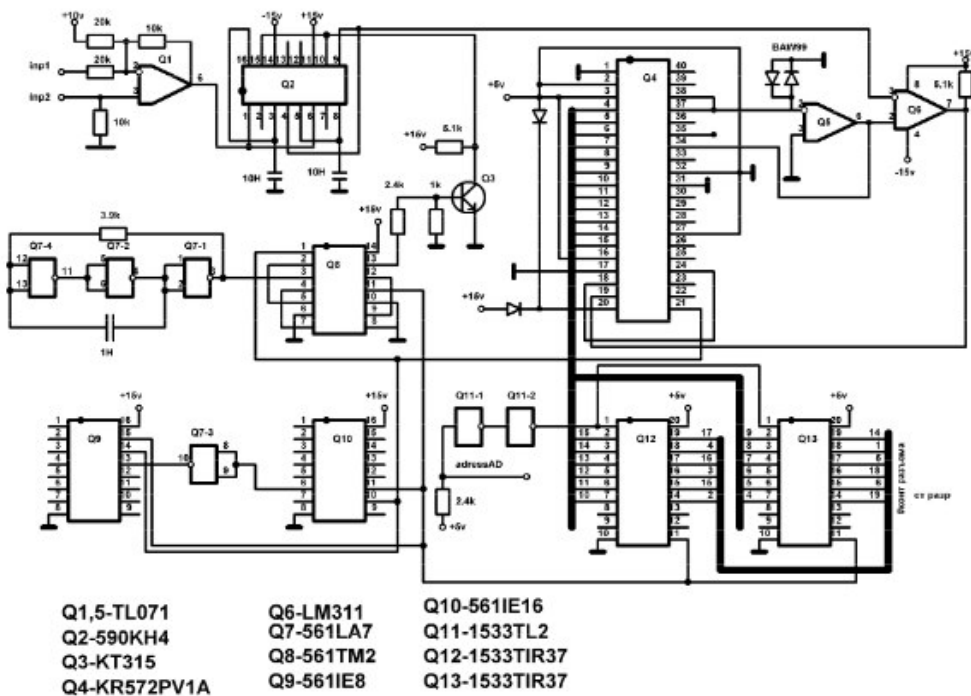


Рисунок 3.19 – Схема електрична принципова АЦП (один канал)

Обчислювальні блоки АЦП (для одного каналу) та ЦАП (для одного каналу), мають принципові електричні схеми наведені на рис. 3.19 та рис. 3.20, відповідно

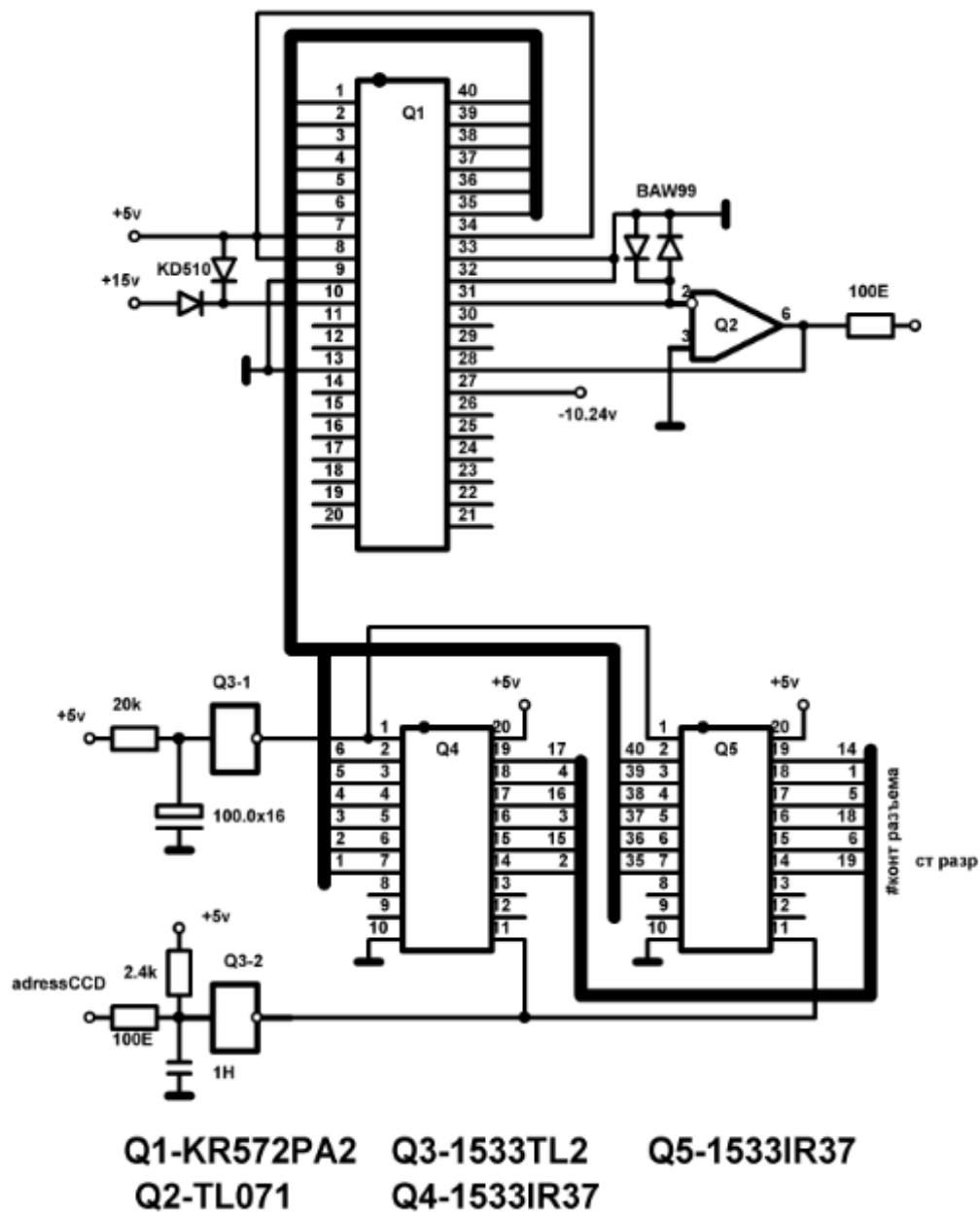


Рисунок 3.20 – Схема електрична принципова АЦП (один канал)

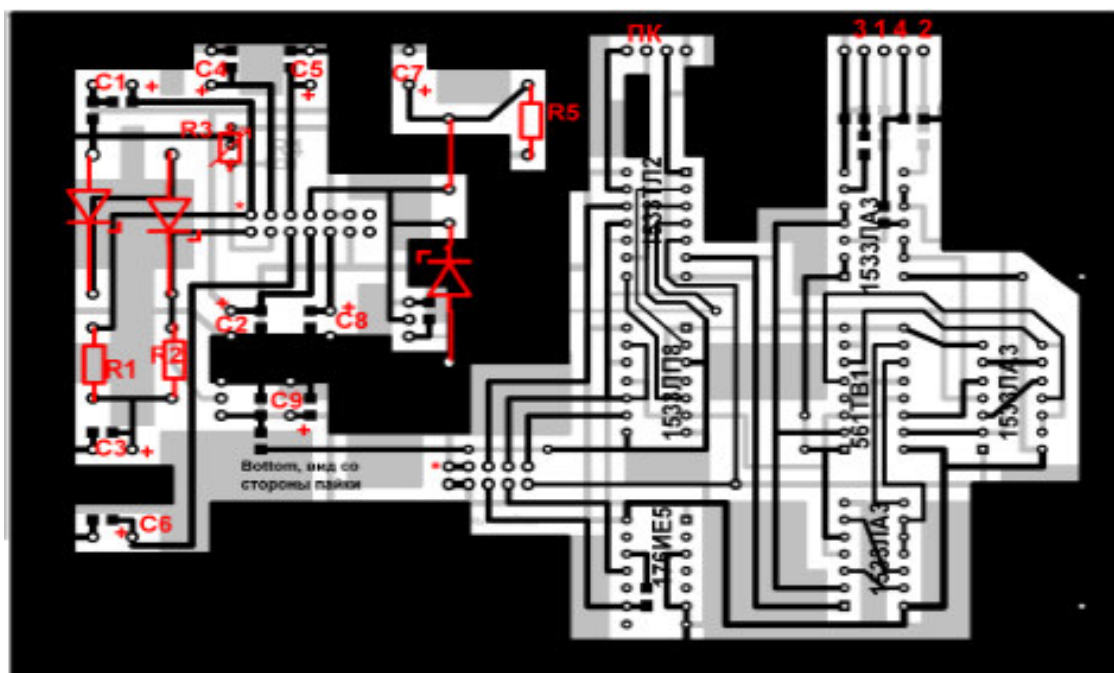


Рисунок 3.21 – Друкована плата блоку синхронізації

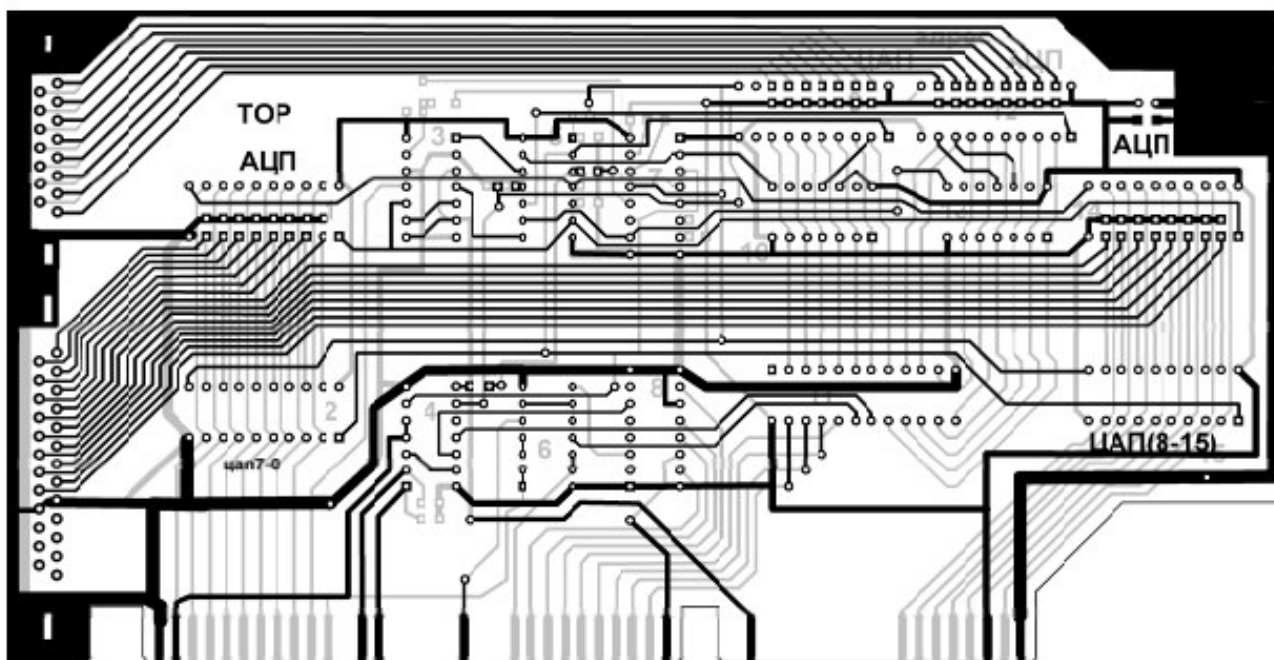


Рисунок 3.22 – Друкована плата блоку АЦП-ЦАП

### 3.7. Висновки за розділом

1. Аналіз результатів досліджень показує можливість використання методів двохчастотного зондування для пошуку та оконтурювання вуглеводневих покладів. Реєстрація сигналу на комбінаційній частоті  $F=f_1+f_1$  відб свідчить про наявність природного випромінювання.

2. Встановлено, що методи георозвідки вуглеводневих покладів можуть бути удосконалені рахунок використання допоміжної частоти.

3. Перевірка методу шляхом моделювання альтернативних частот підтверджує підвищення рівня достовірності та точності визначення меж покладу вуглеводнів. Аномалії амплітуд поля на межі контуру вуглеводневих покладів на частотах 2МГц і 16МГц мають протилежний до нормального поля характер, що підтверджує частотну вибірковість властивостей середовища над вуглеводневих покладів.

4. Дослідження показали, що коефіцієнт нелінійної взаємодії зростає над анізотропним включенням зі збільшенням амплітуди зондувального сигналу та зменшується для електромагнітної хвилі з меншою амплітудою сигналу.

5. Дослідження взаємодії електромагнітної хвилі з гармонійним коливанням 50МГц та акустичним імпульсним впливом на анізотропне включення свідчить про зміну часу амплітуди поверхневої електромагнітної хвилі при зміні кута між і переміщення джерела акустичних коливань.

6. Розроблена структурна схема радіотехнічної системи для пошуку, виділення та ідентифікації вуглеводневих покладів показує можливість підвищення ефективності зі збільшенням кількості вимірювальних каналів.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи магістра досягнуто поставлену мету та вкнано:

1) Проведено аналіз, що дозволив отримати вирази для компонентів тензорів діелектричної проникності середовища над вуглеводневими покладами в умовах дії двочастотних та модульованих сигналів. Встановлено їх частотну залежність.

2) Показано, що співвідношення амплітуд і частот двочастотних хвиль істотно впливає на компоненти тензора, відмінно від режиму потужного ВЧ-сигналу.

3) Визначено особливості взаємодії анізотропного середовища з АМ- та ЧМ-сигналами: поява додаткових складових у тензорі, модуляція діелектричної проникності, зсуви циклотронного та плазмового резонансів, трансформація поляризаційних характеристик.

4) Використання сигналів зі змішаною модуляцією розширює функціональні залежності та підвищує інформативність пошукових методів.

5) Досліджено закономірності трансформації частотних залежностей при зміні параметрів сигналу, встановлено можливість штучної зміни резонансних частот.

6) Показано, що двочастотне зондування дозволяє виявляти природне випромінювання і підвищує достовірність визначення меж покладів, зокрема за рахунок використання допоміжних частот.

7) Моделювання підтвердило частотну вибірковість властивостей середовища та різноспрямовані аномалії амплітуд поля на різних частотах.

8) Виявлено зростання коефіцієнта нелінійної взаємодії зі збільшенням амплітуди зондувального сигналу.

9) Досліджено вплив гармонійного сигналу 50 МГц та акустичних імпульсів на характеристики поверхневої електромагнітної хвилі.

10) Розроблено структурну схему радіотехнічної системи для пошуку та ідентифікації вуглеводневих покладів, яка забезпечує підвищення ефективності зі збільшенням кількості вимірювальних каналів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Геологія нафти і газу: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів (м. Харків, 14 – 15 травня 2019 р.) / Гол. ред. колегії В.А. Пересадько. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019. – 73 с.
2. Вишняков І.Б., Вуль М.Я., Гоник І.О. та ін. Сучасний стан вуглеводневої сировинної бази Західного нафтогазоносного регіону України та основні напрями геологорозвідувальних робіт щодо її освоєння // Мін. ресурси України – 2014 р. – №4. – С.33-38.
3. Nabighian, M. N., & Corbett, J. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Vol. 1. Theory*. Tulsa : Society of Exploration Geophysicists, 1988. – 972 с.
4. Constable, S., & Srnka, L. J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, 2007. – 23 с.
5. Зуєвська, Н. В. Розширення можливостей комплексу сейсмоакустичного контролю урбанізованих масивів введенням блоків контролю шаруватості ґрунтів методом радіокіп / Зуєвська Н. В., Олефір А. О. // Матеріали Аспірантських читань пам'яті професора Артура Праховника : збірник наукових праць (10-11 березня 2021 р., Київ ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2021. – С. 51-53.
6. Миронцов М.Л. Електрометрія нафтогазових свердловин – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2019. – 217 с.
7. Klemens Brunner, Addy van Dijken, Herbert Börner, Jolanda J.A., Bastiaansen. M., Nicole M., Kikken M., Bea M., Langeveld W. Carbazole Compounds as Host Materials for Triplet Emitters in Organic Light-Emitting Diodes: Tuning the HOMO Level without Influencing the Triplet Energy in Small Molecules. *J. Am. Chem. Soc.* 2004. Vol. 126, № 19. P. 6035–6042.
8. L. Akhmetzyanova, E. Alekseev, A. Babueva, S. Smyshlyaev. On Methods of Shortening ElGamal-type Signatures. *Cryptology ePrint Archive*, Paper 2021/148.

9. Rhodes R., Marsh D. Policy Network in British Politics. A Critique of Existing Approaches // Policy Network in British Government / Ed. By D. Marsh and R. Rhodes. – Oxford : Clarendon Press, 1992.

10. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури./ Іванов В. О., Габрусенко Є. І., Ільницький Л. Я., Щербіна О. А – К.: НАУ, 2014. – 312 с.

11. Williams T. EMC for Product Designers. Fifth Edition – Newnes, 2016. – 564 p.

12. Анікеєв С.Г., Степанюк В.П. Гравірозвідка і Магніторозвідка. Навчальний посібник. – Івано-Франківськ. Факел, 2010. – 246с.

13. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія / Куц Ю.В., Щербак Л.М. — Т. :ТДТУ, 2009. — 384 с.

14. Степанюк В.П., Петровський О.П., Анікеєв С.Г. Нафтогазопошукова геофізика. Підручник. – Івано-Франківськ. ІФНТУНГ, 2010. – 296 с.

15. Головін Ю. О. Основи радіозв'язку : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2021. 234 с.

16. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://ukrayinska.libretexts.org/%D1%84%D1%96%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B8/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%96%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%BC/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%81%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%28Staelin%29%2F13%3A%D0%90%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%2F13.01%3A%D0%90%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96>

17. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://weagro.ua/blog/dystancijne-zonduvannya-zemli-vydy-ta-perspektyvy/>

18. Довгий С. О., Воробієнко П. П., Гуляєв К. Д. Сучасні телекомунікації: Мережі, технології, безпека, економіка, регулювання. 2-ге вид., доп. / за ред. Довгого С.О. Київ : Азимут-Україна, 2013. – 608 с.
19. Пахтусов В. В. Основи побудови засобів радіозв'язку : навч. посіб. Київ: ВІПІ, 2004. – 292 с.
20. Нагорний В.П. Технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк: за редакцією В.П. Нагорного; НАН України, Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна, – Київ, 2013. – С. 268.
21. Бартащук О.В., Василенко О.Л. Аналіз раніше виконаних геологорозвідувальних робіт на Приштоковій площі: звіт УкрНДІгаз – Харків, 2017.
22. Правила розробки нафтових і газових родовищ - Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України 15.03.2017 № 118 – 63 с.
23. Barroux C.C., Duchet-Scchaux P, Samier P and Nabil R Linking Reservoir and Surface Simulation: How to improve the coupled Solution, paper SPE 65159, presented at the SPE European Petroleum Conference, Paris, October 24-25, 2000.

# ДОДАТКИ

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Удосконалення технологій телекомунікаційного  
моніторингу для геофізичного виявлення вуглеводневих  
покладів із застосуванням сучасних електромагнітних  
методів**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Павло ЯЩЕНКО

Керівник:

к.г.н., професор

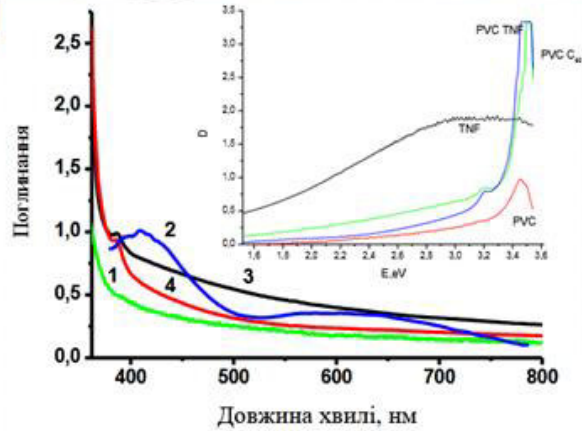
Станіслав ІГНАТЬЄВ

Полтава 2026

**Мета роботи** полягає в розробці та обґрунтуванні удосконаленої технології телекомунікаційного моніторингу геофізичних досліджень із застосуванням електромагнітних методів для підвищення ефективності виявлення вуглеводневих покладів на території Полтавської області.

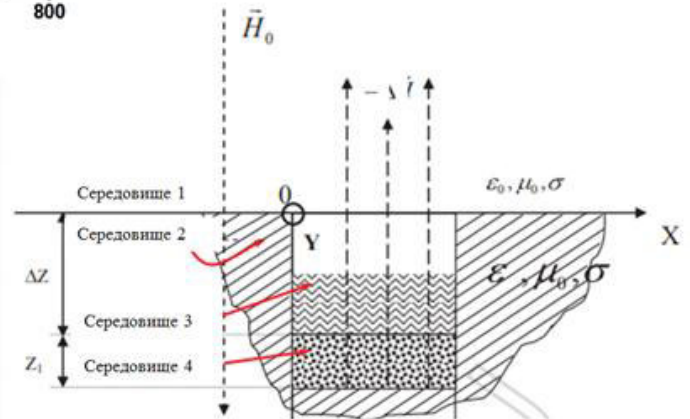
**Об'єктом дослідження** є процеси та технології геофізичного моніторингу, що використовуються для виявлення вуглеводневих покладів у нафтогазоносних регіонах, зокрема в Полтавській області.

**Предметом дослідження** є технології телекомунікаційного моніторингу в системах електромагнітної геофізичної розвідки, їх вплив на ефективність збору, передачі та інтерпретації геофізичних даних під час пошуку вуглеводнів у Полтавському регіоні.



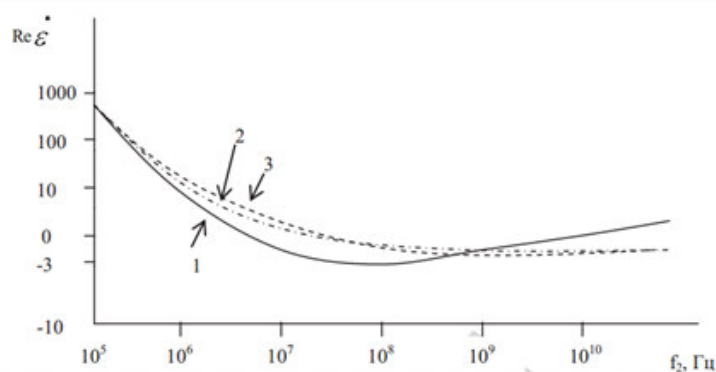
Модель разрізу геологічного профілю над вуглеводородними покладами

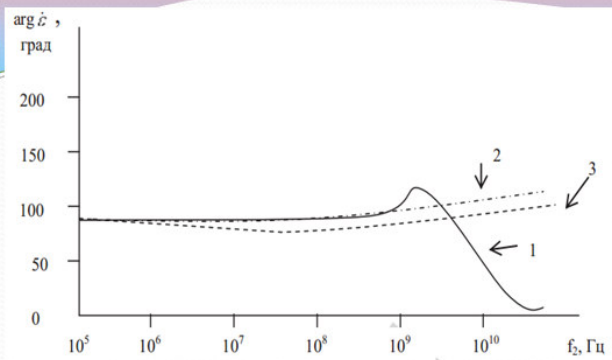
Розподіл коефіцієнта поглинання залежно від довжини хвилі



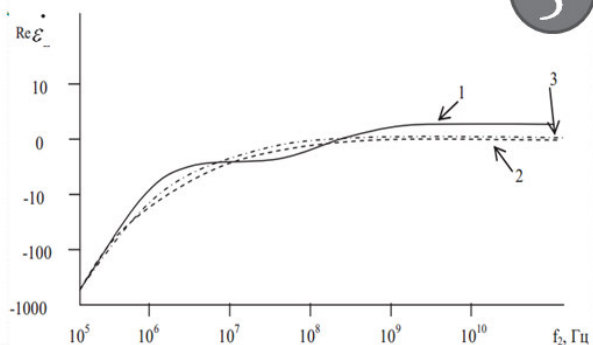
Розрахунок компонентів тензорів діелектричної проникності проводиться на підставі заданих параметрів середовища над покладами вуглеводнів:

- глибини залягання вуглеводнів:  $h=2.0-3.5$  км;
- різниці потенціалів між покладом та земною поверхнею  $\Delta\phi=(0.2-0.4)$  В.
- при середній температурі в області покладу  $T=350$  К;
- відносній зміні питомого електричного опору вміщуючих порід у межах контуру покладу при усереднених значеннях діелектричної проникності;
- негативній геомагнітній аномалії  $H=(8.0\ 15.0)10^3$  А/м
- при значеннях напруженості магнітного поля землі  $H = 89$  А/м
- коефіцієнти іонізації  $ki = 1$

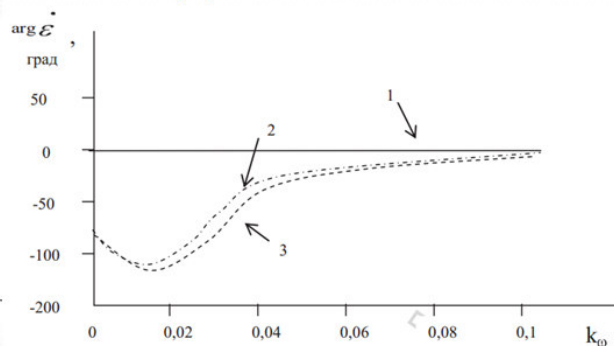
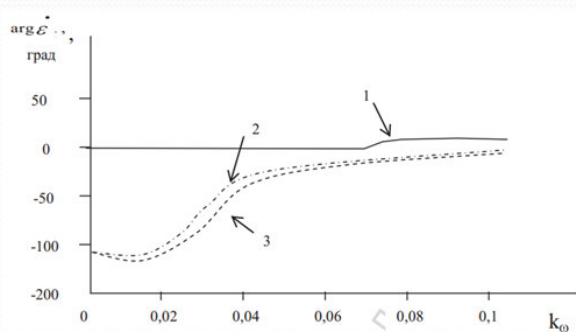




Графік залежності  $\arg \hat{\epsilon}(f_2)$ : 1 – для  $k=10^{-1}$ ; 2 – для  $k=10^{-3}$ ; 3 – для  $k=10^{-6}$



Графік залежності  $\text{Re}(\hat{\epsilon}_2)$ : 1 – для  $k=10^{-1}$ ; 2 – для  $k=10^{-3}$ ; 3 – для  $k=10^{-6}$ .



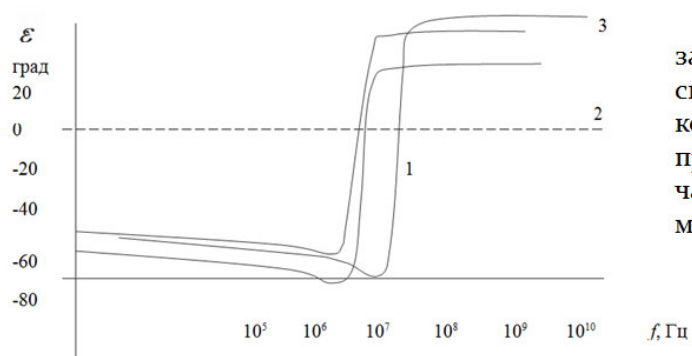
Графіки залежності  $\arg \hat{\epsilon} = \phi(k_0)$  на частоті  $f_2 = 10 \text{ ГГц}$ : 1 – для  $kE=10^{-1}$ ; 2 – для  $kE=10^{-3}$ ; 3 – для  $kE=10^{-6}$  для встановлення динаміки зміни тензора діелектричної проникності середовища

## Розрахункові значення частот

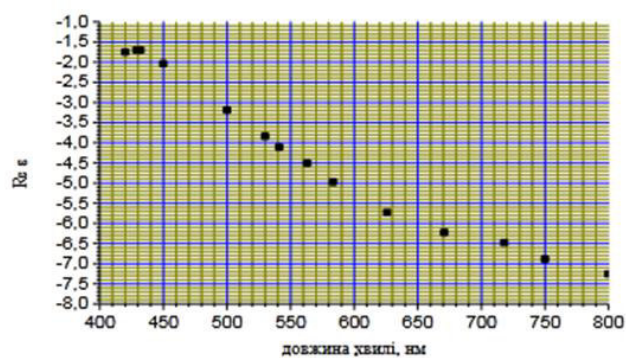
6

$k_{\omega}$	$k_E$	$f$ , Гц	$f'$ , Гц
$10^{-1}$	$10^{-1}$	$1,00045 \cdot 10^7$	$1,17646 \cdot 10^9$
$10^{-1}$	$10^{-3}$	$1,98282 \cdot 10^7$	$2,33153 \cdot 10^9$
$10^{-1}$	$10^{-6}$	$2,00064 \cdot 10^7$	$2,3525 \cdot 10^9$
$10^{-3}$	$10^{-1}$	$1,80419 \cdot 10^7$	$2,12145 \cdot 10^9$
$10^{-3}$	$10^{-3}$	$9,98283 \cdot 10^8$	$1,00598 \cdot 10^9$
$10^{-3}$	$10^{-6}$	-	$1,99891 \cdot 10^9$
$10^{-6}$	$10^{-1}$	$2,13855 \cdot 10^9$	$2,13859 \cdot 10^9$
$10^{-6}$	$10^{-3}$	$1,93517 \cdot 10^9$	$1,99691 \cdot 10^9$

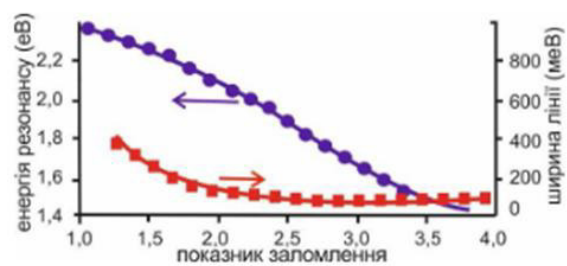
Використовуючи зміну частоти та/або амплітуди одного з джерел формування поля можна «штучно» змінити частоти резонансної взаємодії складної електромагнітної хвилі та анізотропного середовища над вуглеводневими покладами.



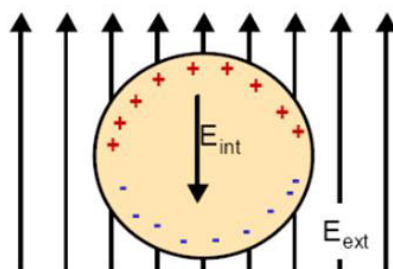
застосування амплітудної модуляції сигналів (1) не веде до зміни комбінованих елементів (KE) тензора, проте відбувається вплив несучої частоти та коефіцієнта амплітудної модуляції на фазу KE (3)



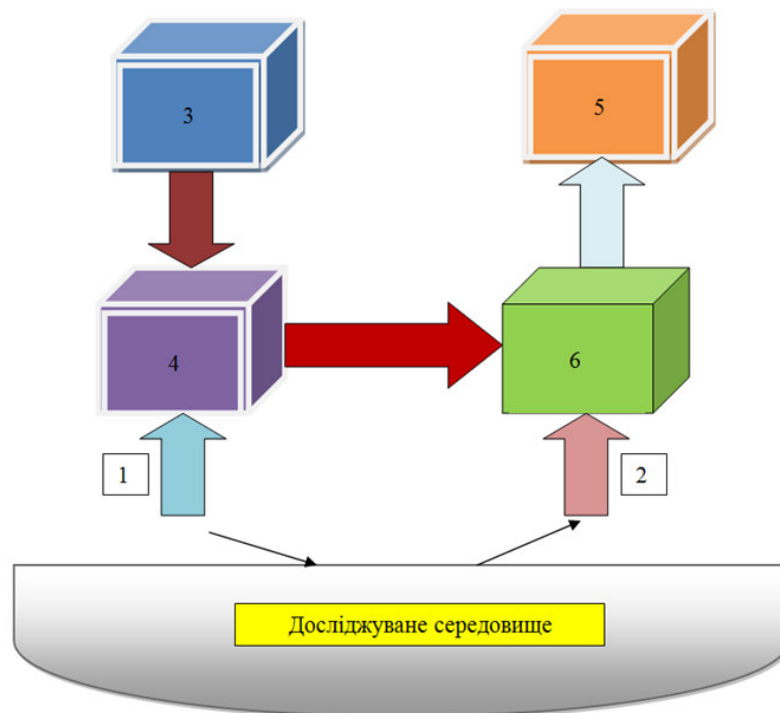
Дійсна частина діелектричної  
проникності середовища



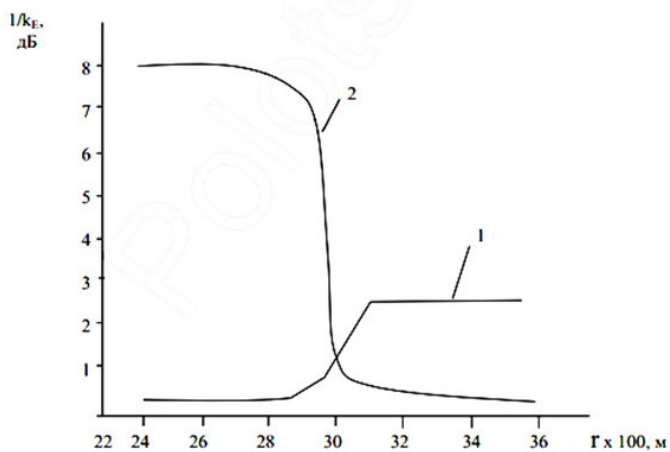
Вплив показника заломлення  
на резонансну частоту



Збудження коливань для виявлення  
вуглеводневих покладів

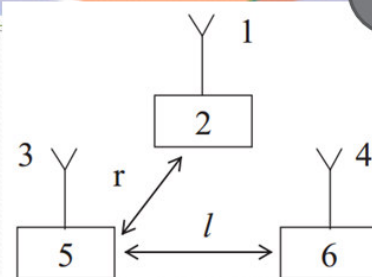


Структурна схема пристрою, що реалізує спосіб реєстрації природного випромінювання вуглеводневих покладів:  
1, 2 – антени; 3 – генератор; 4 – дільник; 5 – змішувач; 6 – приймач

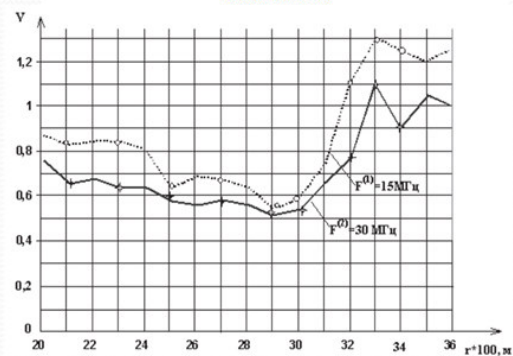


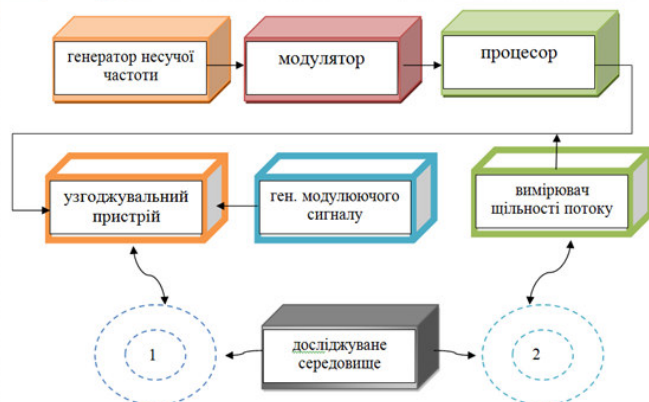
Характеристики двочастотної взаємодії електромагнітної хвилі з вуглецевими покладами: 1 – при розміщенні випромінювачів на анізотропному включенні; 2 – при розміщенні випромінювача поза контуром анізотропії

Характерні властивості пошуку реального покладу



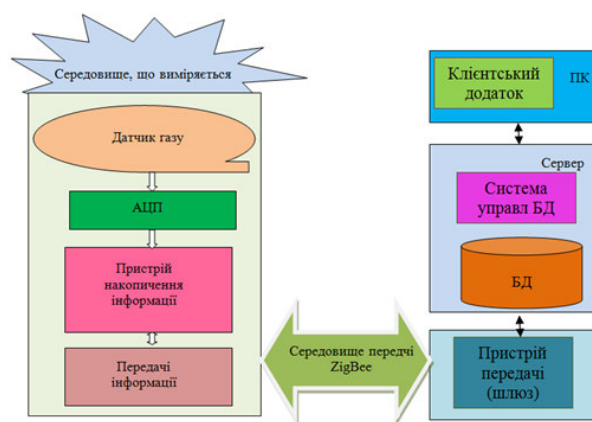
Структурна схема установки для реалізації метода альтернативних частот: 1,3,4 – антени; 2 – радіопередавач на частоті  $f_2$ ; 5 – радіоприймач; 6 – радіопередавач на частоті  $f_1$

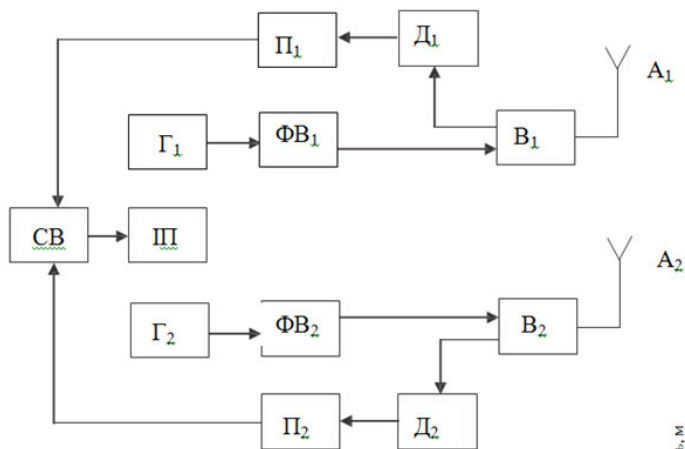




## Архітектура телекомунікаційної системи виявлення вуглеводнів

Структурна схема для дослідження меж нафтових покладів у режимі амплітудно-модулюючих сигналів: 1, 2 - антени





Структурна схема пристрою для вимірювання відношення коефіцієнтів відображення на двох частотах

Розподіл концентрації вуглеводнів, котрі реагують на поверхневу електромагнітну хвилю заданої частоти

Схема для здійснення вимірювань складається з генераторів  $\Gamma_1$  та  $\Gamma_2$ , феритових вентилів  $\Phi В_1$  та  $\Phi В_2$ , спрямованих відгалужувачів  $В_1$  та  $В_2$ , антен  $А_1$  та  $А_2$ , детекторів  $Д_1$  та  $Д_2$ , підсилювачів  $П_1$  та  $П_2$ , схеми відношення СВ, індикаторного приладу ІП.

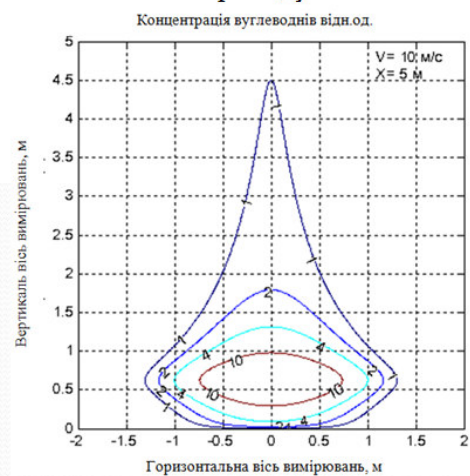
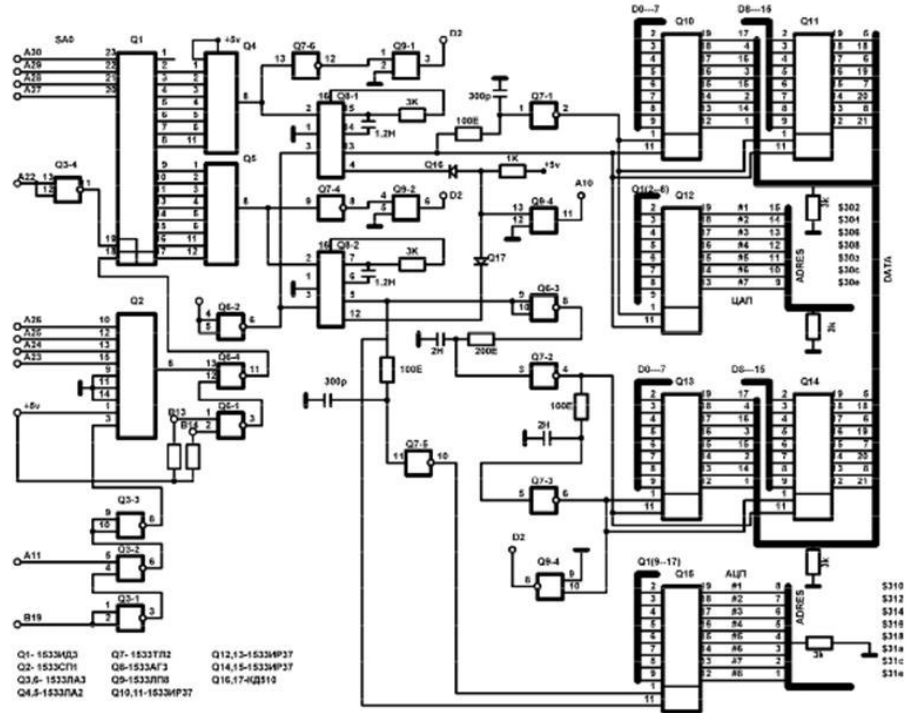
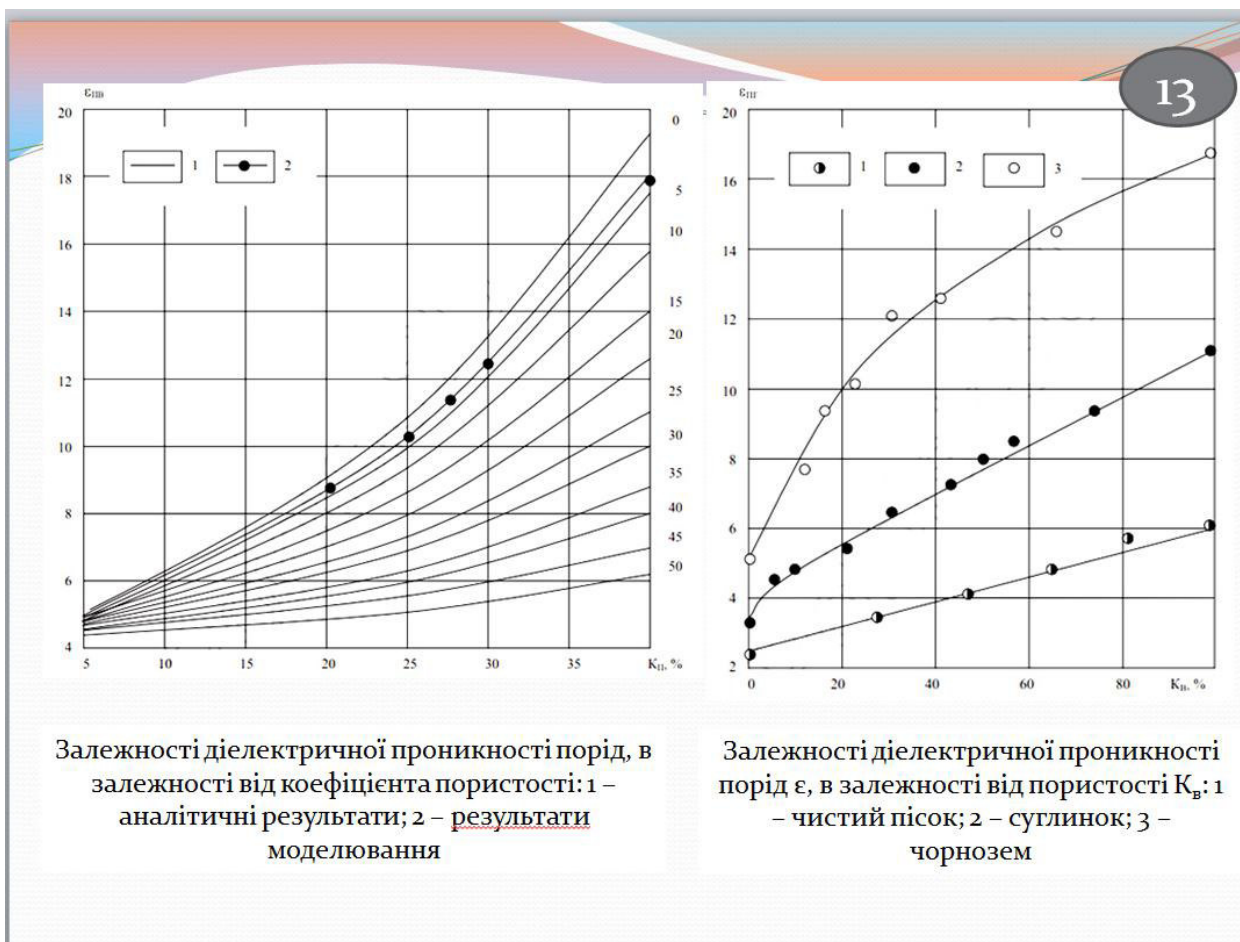


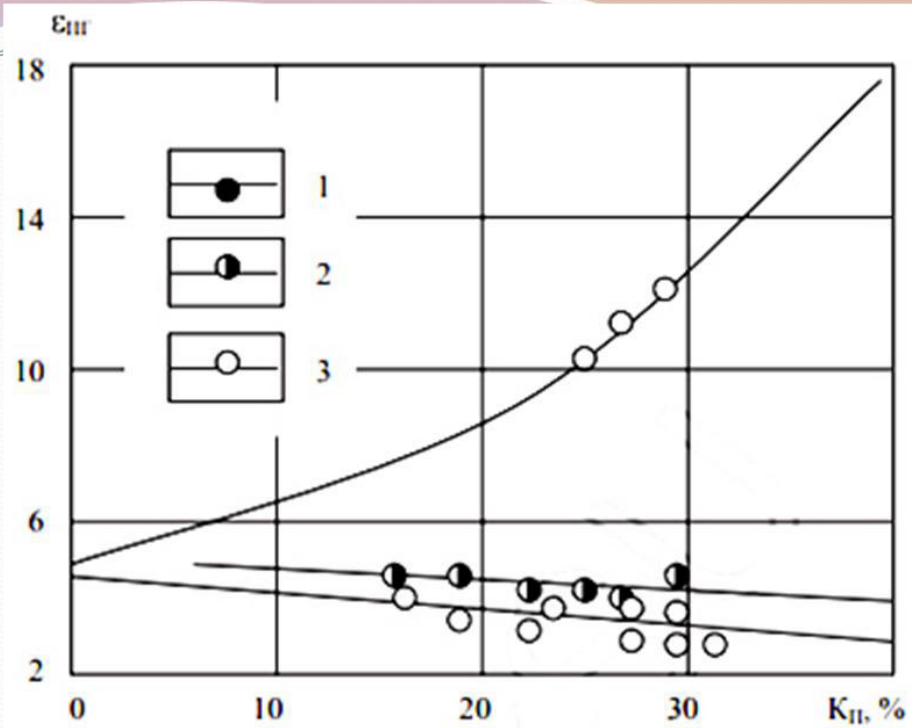
Схема електрична принципова радіотехнічної системи для пошуку вуглеводневих покладів





Залежності діелектричної проникності порід, в залежності від коефіцієнта пористості: 1 – аналітичні результати; 2 – результати моделювання

Залежності діелектричної проникності порід  $\epsilon$ , в залежності від пористості  $K_B$ : 1 – чистий пісок; 2 – суглинок; 3 – чорнозем



Залежності діелектричної проникності порід  $\epsilon$ , в залежності від пористості  $K_p$ : 1 – сухий пісок; 2 – нафтонасичений пісок (100%); 3 – водонасичений пісок

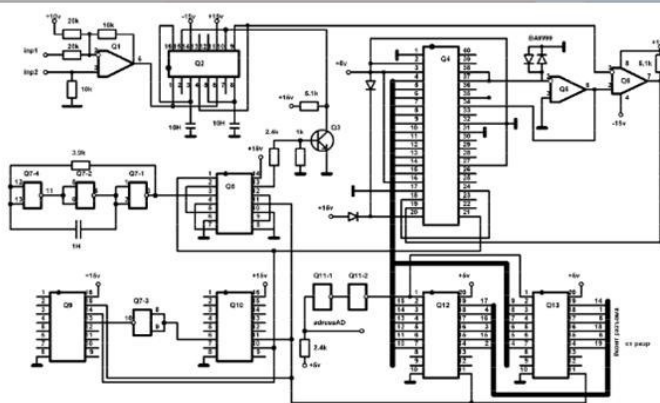
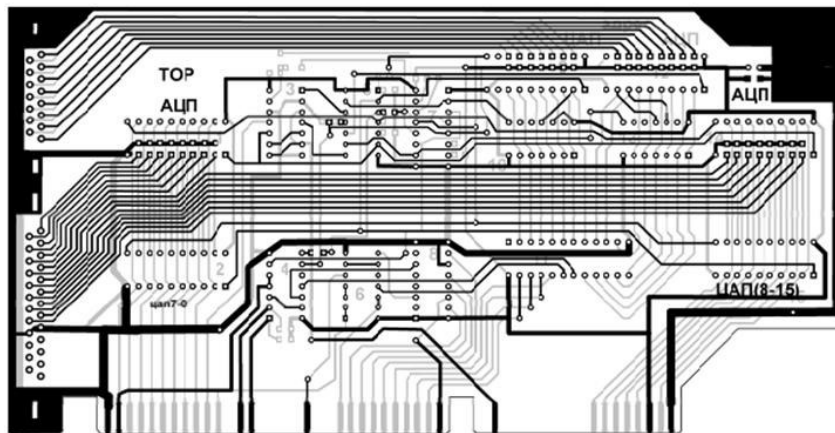


Схема електрична принципова  
АЦП (один канал)

Q1-5-TL071	Q6-LM311	Q10-561IE16
Q2-590KH4	Q7-561LA7	Q11-1533TL2
Q3-KT315	Q8-561TM2	Q12-1533TIR37
Q4-KR572PV1A	Q9-561IE8	Q13-153:

Друкована плата  
блоку АЦП-ЦАП



## Висновки

16

- В ході виконання кваліфікаційної роботи магістра досягнуто поставлену мету та виконано:
- Проведено аналіз, що дозволив отримати вирази для компонентів тензорів діелектричної проникності середовища над вуглеводневими покладами в умовах дії двочастотних та модульованих сигналів. Встановлено їх частотну залежність.
- Показано, що співвідношення амплітуд і частот двочастотних хвиль істотно впливає на компоненти тензора, відмінно від режиму потужного ВЧ-сигналу.
- Визначено особливості взаємодії анізотропного середовища з АМ- та ЧМ-сигналами: поява додаткових складових у тензорі, модуляція діелектричної проникності, зсуви циклотронного та плазмового резонансів, трансформація поляризаційних характеристик.
- Використання сигналів зі змішаною модуляцією розширює функціональні залежності та підвищує інформативність пошукових методів.
- Досліджено закономірності трансформації частотних залежностей при зміні параметрів сигналу, встановлено можливість штучної зміни резонансних частот.
- Показано, що двочастотне зондування дозволяє виявляти природне випромінювання і підвищує достовірність визначення меж покладів, зокрема за рахунок використання допоміжних частот.
- Моделювання підтвердило частотну вибірковість властивостей середовища та різноспрямовані аномалії амплітуд поля на різних частотах.
- Виявлено зростання коефіцієнта нелінійної взаємодії зі збільшенням амплітуди зондувального сигналу.
- Досліджено вплив гармонійного сигналу 50 МГц та акустичних імпульсів на характеристики поверхневої електромагнітної хвилі.
- Розроблено структурну схему радіотехнічної системи для пошуку та ідентифікації вуглеводневих покладів, яка забезпечує підвищення ефективності зі збільшенням кількості вимірювальних каналів.