

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

факультет геологічних наук та технологій  
(факультет)

Кафедра геофізичних методів розвідки  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**кваліфікаційної роботи ступеню** магістра  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Лукашевої Євгенії Андріївни  
(ПІБ)

академічної групи 103М-19-3  
(шифр)

спеціальності 103-Науки про Землю  
(код і назва спеціальності)

спеціалізації<sup>1</sup> Геофізика

за освітньо-професійною програмою Науки про Землю

(офіційна назва)

на тему «Порівняльний аналіз методів обробки результатів МТЗ у часовій та частотній областях»

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Лозовий А. Л.			
розділів:				
<b>Рецензент</b>	Ішков В. В.			
<b>Нормоконтролер</b>	Лозовий А. Л.			

Дніпро  
2020

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ геофізичних методів розвідки  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Довбніч М. М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеню** \_\_\_\_\_ магістра  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту \_\_\_\_\_ Лукашевій Є. А. \_\_\_\_\_ академічної групи \_\_\_\_\_ 103М-19-3 \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності \_\_\_\_\_ 103-Науки про Землю \_\_\_\_\_

спеціалізації<sup>1</sup> \_\_\_\_\_ Геофізика \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою \_\_\_\_\_ Науки про Землю \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (офіційна назва)

на тему «Порівняльний аналіз методів обробки результатів МТЗ у часовій та частотній областях» \_\_\_\_\_

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 16.11.2020 р. № 947-с \_\_\_\_\_

Розділ	Зміст	Термін виконання
<i>Вступ</i>	Постановка завдань, огляд літературних джерел	28.09-10.10
<i>1</i>	Фізичні основи МТЗ та АМТЗ	11.10-28.10
<i>2</i>	Апаратура і методика робіт	29.10-5.11
<i>3</i>	Обробка даних МТЗ в частотній та часовій областях	6.11-2.12
<i>Висновки</i>	Підсумовування та оформлення виконаної роботи, рецензування	3.12-18.12

Завдання видано \_\_\_\_\_ Лозовий А. Л. \_\_\_\_\_  
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі \_\_\_\_\_ 28.09.2020 \_\_\_\_\_

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_ Лукашева Є. А. \_\_\_\_\_  
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

## Зміст:

РЕФЕРАТ .....	4
Вступ:.....	5
1. Фізичні основи МТЗ та АМТЗ.....	6
1.1 Природа магнітотелуричного поля.....	6
1.2 Модифікації МТЗ.....	10
1.3 Основні положення.....	14
1.4 Області застосування методу МТЗ .....	16
2. Апаратура і методика робіт .....	19
2.1 Апаратура V5 System 2000 .....	19
2.2 Методика магнітотелуричних досліджень та польових спостережень .....	23
3. Обробка в частотній та часовій областях .....	27
3.1 Граф обробки даних МТЗ.....	27
3.2 Обробка в частотній області.....	32
3.3 Обробка в часовій області .....	38
Висновок: .....	54
Література: .....	55

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Порівняльний аналіз методів обробки результатів МТЗ у часовій та частотній областях»: 55 с., 20 рис., 2 таблиці, 12 джерел в списку літератури.

**ЦІЛЬ РОБОТИ:** Порівняння способів обробки методу МТЗ в частотній та часовій областях з метою вибору більш оптимального способу

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Часові ряди магнітотелуричного поля

**МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ:** МТЗ

**ОСНОВНІ ЗАДАЧІ:** Вибір оптимального способу обробки даних МТЗ

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Магнітотелуричне поле, МТЗ – магнітотелуричне зондування, частотна область, часова область, перетворення Фур'є, фільтрація, амплітуда, фаза

### **Вступ:**

Метод магнітотелуричного зондування (МТЗ) - один із широко застосовуваних методів розвідувальної геофізики. Він активно використовується при вирішенні різних геологічних задач. Цей метод заснований на використанні природного електромагнітного поля Землі - магнітотелуричного поля (МТ-поля) і дозволяє отримувати інформацію про опір гірських порід в широкому діапазоні глибин. За рахунок явища скін-ефекту більш високочастотні коливання МТ-поля швидше загасають з глибиною, в той час як низькочастотні компоненти спектра проникають на великі глибини. Відповідно, високочастотні складові поля несуть інформацію лише про приповерхностні частини розрізу. Зі зниженням частоти внесок більш глибоких частин розрізу в спостережуване поле зростає, і ми отримуємо інформацію про глибинну частини геоелектричного розрізу. Популярність цього методу обумовлена хорошою інформативністю, відносною дешевизною і екологічністю, розробленістю апарату аналізу та інтерпретації.

На сьогоднішній день застосовується велика кількість методів обробки МТЗ, як в часовій так і в частотній областях. І для цього в даній роботі вирішувалося завдання вибору найбільш оптимального методу, щоб скоротити тривалість польових вимірювань при збереженні точності одержуваних результатів.

# 1. Фізичні основи МТЗ та АМТЗ

## 1.1 Природа магнітотелуричного поля

Спостереження магнітного поля Землі протягом тривалого часу показують, що величина і напрямок цього поля безперервно змінюються в часі. Ці зміни отримали назву варіацій геомагнітного поля. Прийнято розрізняти два види варіацій:

1. варіації, обумовлені внутрішнім джерелом (т.зв. вікові варіації);
2. варіації, викликані зовнішнім джерелом.

Геомагнітні варіації, обумовлені внутрішнім джерелом, мають періоди, які обчислюються багатьма сторіччями, десятиліттями і роками (тому їх часто називають віковими варіаціями). Ці варіації пов'язані з процесами, що відбуваються в глибинних шарах Землі - земне ядро.

Геомагнітні варіації, обумовлені зовнішнім джерелом, мають періоди від часток секунд до 11 років. Вони викликаються процесами, що відбуваються поза Землею - в навколосемному космічному просторі.

Відповідно до законів електромагнітної індукції варіації геомагнітного поля збуджують в Землі змінне електричне поле і відповідно електричний струм. Величина цього струму тим більше, чим швидше змінюється в часі магнітне поле. Вікові варіації пов'язані з настільки повільними змінами магнітного поля, що практично не призводять до появи електричного струму. У той же час варіації, обумовлені зовнішнім джерелом, можуть порушувати в Землі сильні струми, доступні для вимірювання і спостереження. Ці струми отримали назву земних або телуричних струмів. В цілому поле геомагнітних варіацій носить назву магнітотелуричного поля.

Природа магнітотелуричного поля тісно пов'язана з процесами, що відбуваються на Сонці. В результаті цих процесів Сонце безперервно викидає в космічний простір потужні потоки заряджених частинок - корпускул, що утворюють т.зв. сонячний вітер (рис.1а). Основна причина збурень геомагнітного поля Землі пов'язана з існуванням сонячного вітру і з процесами, що відбуваються при взаємодії сонячного вітру з магнітним полем Землі. Корпускулярний потік, що

становить сонячний вітер, має високу електричну провідність, тому магнітне поле Землі не може проникнути всередину нього. При цьому виникає досить чітка межа між областю, де існує магнітне поле Землі (магнітосфера), і областю, де його немає. Найбільш активною зоною, в якій порушуються магнітотелуричних варіації різних типів, є межа магнітосфери і прикордонний шар, що відокремлює її від сонячного вітру. У першому наближенні магнітне поле Землі можна розглядати як поле постійного магнітного диполя, розташованого в центрі Землі. Конфігурація силових ліній такого поля зображена на рисунку 2а, лінія 2. Однак під дією тиску сонячного вітру поле диполя спотворюється. Справді, в сонячному вітрі потік частинок рухається в середньому зі швидкістю 400 км / с, в результаті чого сонячний вітер як би «перекидає» магнітні силові лінії з денною боку на нічну (рис.2а). Таким чином, магнітосфера має вигляд затупленого снаряда, «летить» у бік Сонця. За сучасними даними на денній стороні Землі межа магнітосфери віддалена від земної поверхні приблизно на 60 тис. км, а на нічний - простягається на відстань, рівну 100 радіусів Землі.

Інтенсивність і швидкість сонячного вітру постійно змінюються в часі в зв'язку зі змінами сонячної активності, тобто з внутрішніми процесами, що відбуваються на Сонці. В результаті магнітосфера як би пульсує: магнітні силові лінії то притискаються до Землі, то відходять від неї, викликаючи тим самим варіації геомагнітного поля на її поверхні.

Очевидно, що в той час як поверхня Землі на більшій частині широт «захищена» магнітним полем від безпосереднього попадання заряджених частинок (корпускул) сонячного походження, на високих широтах на денній поверхні Землі силові лінії утворюють своєрідну воронку, складену з конусів, повернених у бік Сонця. Ці широти виявляються відкритими для сонячного випромінювання, тому зазначена область є особливо чутливою до поривів сонячного вітру. При цьому певну кількість заряджених частинок проникає всередину магнітосфери - в іоносферу, утворюючи в ній електричні струми. Розтікаючись по іоносфері, електричні струми концентруються в приполярних зонах, де підвищена електропровідність викликана вторгненням енергійних заряджених частинок. В

результаті виникає струменевий ток (т.зв. полярна електроструя) шириною до сотень і довжиною кілька тисяч кілометрів. Струменевий ток породжує обурення геомагнітного поля, що тривають від півгодини до двох годин.

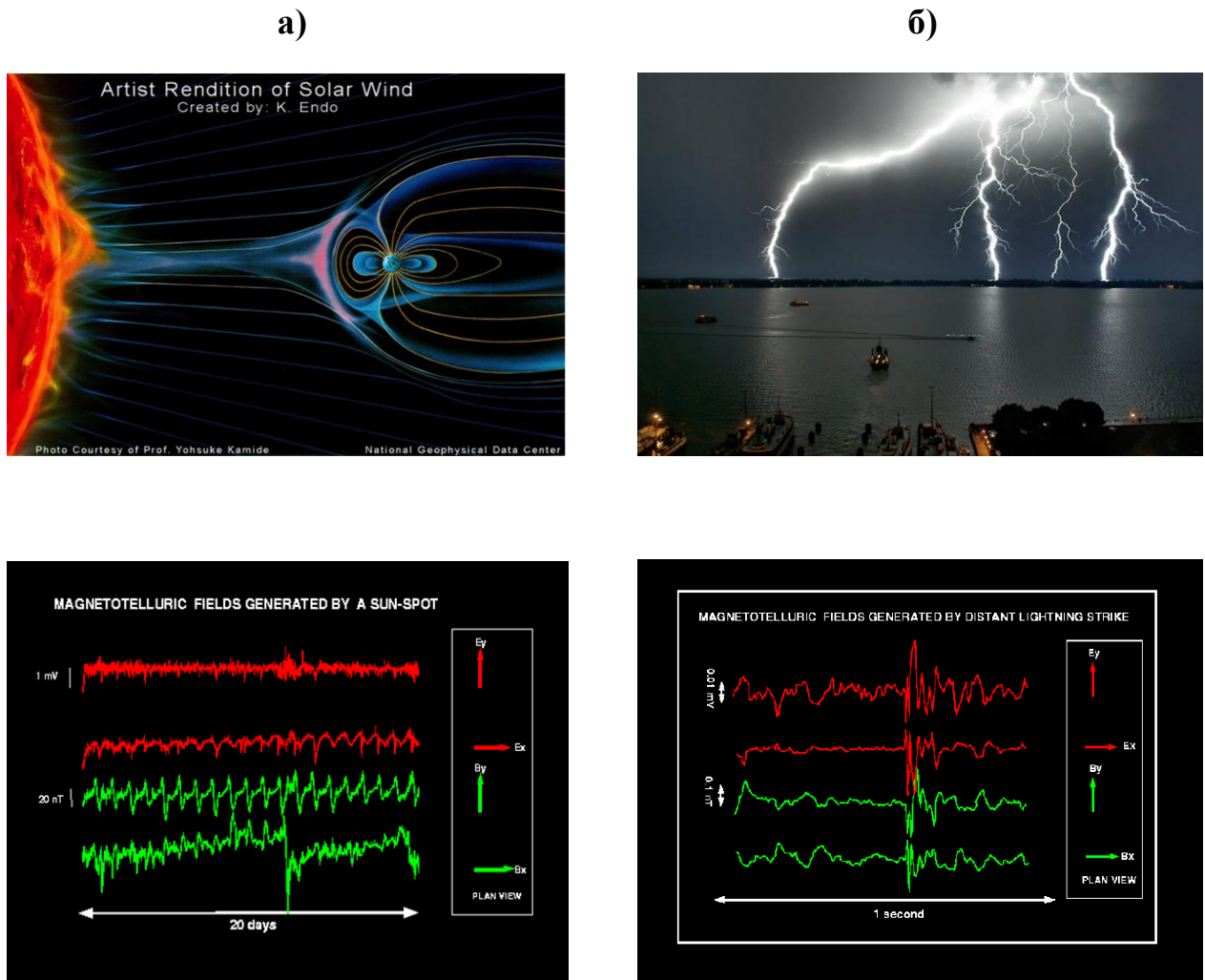
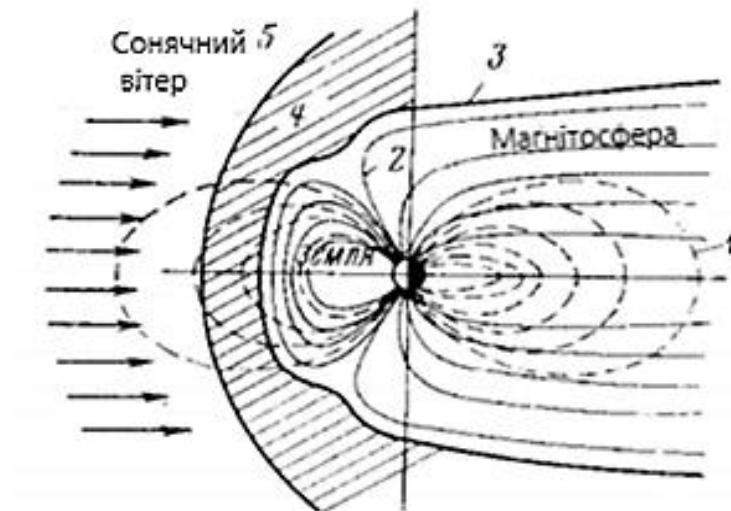


Рисунок 1. «Магнітотелуричні поля, де джерелом виникнення виступає: а – сонячний вітер, б - грозовий розряд.»

Ще однією причиною виникнення МТ-поля являються грозові розряди (рис.1б), які збуджують резонатор іоносфера-Земля (рис. 2б) отримуємо ще одне джерело ЕМ - коливань в діапазоні частот приблизно від перших Гц до 12 КГц, порівнюючи з сонячним вітром, то частота грозових розрядів перевищує частоту сонячного вітру від 10 до 120000 разів.



а)



б)

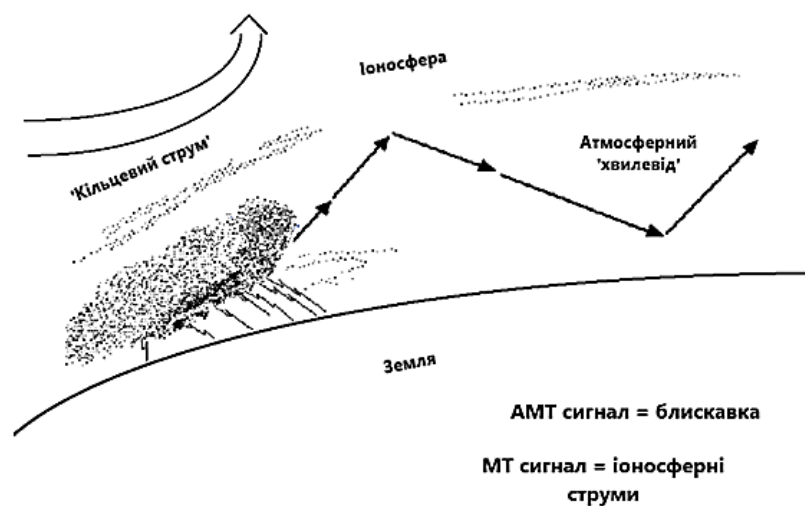


Рисунок 2. «а - Магнітосфера Землі: 1 - силові лінії магнітного поля диполя; 2 - силові лінії геомагнітного поля; 3 - межа магнітосфери; 4 - перехідна зона; 5 - область, зайнята сонячним вітром; б – природа магнітотелуричного поля»

На побутовому рівні ми вважаємо грозою електричні розряди поблизу спостерігача, в геофізичній сенсі грозові розряди відбуваються майже безперервно, якщо розглядати як близькі, так і далекі електричні розряди. Кожну секунду на Землі в середньому відбувається 200 розрядів блискавок.

## 1.2 Модифікації МТЗ

Залежно від розв'язуваних геологічних або інженерно-геологічних завдань (глибина дослідження, детальність, електрична провідність розрізу) розрізняють кілька модифікацій магнітотелуричних зондувань (табл. 1.). В першу чергу, принципова відмінність полягає в регистрируемому діапазоні частот (періодів) і одержуваної глибини зондування. Як наслідок, змінюється в широких межах крок за профілем, час (тривалість) вимірювання на одній точці, режими роботи реєструє апаратури і застосовуються датчики для реєстрації варіацій магнітного поля.

Табл. 1. «Модифікації МТЗ»

<b>Модифікація:</b>	МТЗ - магнітотелуричних зондування	АМТЗ - аудіо магнітотелуричних зондування
<b>Завдання, які вирішуються:</b>	Вивчення осадового чохла і фундаменту. Пошук нафтових і великих рудних родовищ. Пошук геотермальних джерел	Пошук і детальне картування родовищ рудних корисних копалин. Пошук води. Дослідження верхній частині розрізу
<b>Глибина зондування (залежить від провідності розрізу):</b>	Десятки метрів - перші кілометри	Перші десятки метрів - 1-2 км (в умовах високоомного розрізу)
<b>Діапазон частот:</b>	0.0003 - 400 Гц	1 - 10000 Гц
<b>Діапазон періодів:</b>	3600 - 0.0025 с	1 - 0.0001 с
<b>Час реєстрації:</b>	16 - 20 годин	30 хв - 1 година
<b>Крок за профілем:</b>	0.5 - 3 км	50 - 500 м
<b>Довжина профілю:</b>	5 - 500 км	1 - 10 км
<b>Датчики для вимірювання варіацій магнітного поля:</b>	індукційні датчики, оптико-механічні магнітометри	індукційні датчики

Принципові можливості методу магнітотелуричного зондування (МТЗ) і сучасні тенденції підвищення його ефективності в складно побудованих регіонах і областях з високим рівнем індустріальних шумів обговорюються в роботі [Варенцов, 2006]. В рудній геофізиці в залежності від ефективного електричного опору вміщаючого середовища і необхідної глибинності дослідження, цей метод застосовується як в стандартній широкосмуговій модифікації, так і в більш високочастотному аудіо-МТ (АМТ) варіанті. Метод МТЗ широко використовується в геофізиці протягом більш як сорока років. У той же час, його високочастотна модифікація - метод АМТЗ - з'явилася і утвердилася в рудній геофізиці відносно недавно. Магнітотелуричний метод відрізняється від інших методів електророзвідки високою глибинністю, невисокою ціною робіт і портативністю використовуваної апаратури. Це обумовлено тим, що в методі МТЗ використовується природне електромагнітне (ЕМ) поле і, отже, не потрібно застосування громіздких генераторних установок. В даний час метод МТЗ, в порівнянні з іншими електророзвідувальними методами, має найбільш розроблений апарат аналізу та інтерпретації даних, в тому числі і для складно побудованих тривимірно-неоднорідних середовищ. Недоліком методу МТЗ є чутливість до техногенних ЕМ перешкод. Ця проблема вирішується з використанням сучасної апаратури і методики обробки даних на основі проведення синхронних спостережень, як в польових (на площі робіт), так і у віддалених (базових) точках, розташованих на достатній відстані від домінуючих на досліджуваній площі джерел промислових перешкод. Метод АМТЗ має ряд переваг в порівнянні з класичним МТЗ. Перш за все, різко скорочується час проведення вимірювань ЕМ полів на точці спостереження. Якщо класичне МТЗ передбачає тривалість реєстрації ЕМ поля порядку доби (не менше 6-7 годин), то в разі АМТЗ час спостереження становить 30 хв. – 1 год. (табл. 1). Цим забезпечується висока продуктивність - до 10-15 точок в день на одну станцію і можливість оперативного проведення детальних майданних досліджень. Підвищена точність реєстрації вертикальної магнітної складової поля дозволяє визначати значення типпера і векторів індукції з абсолютною похибкою в перші соті частки одиниці. Аналіз

поведінки індукційних векторів сприяє суттєвому підвищенню якості інтерпретації МТ-даних [Варенцов, 2006], не вимагаючи при цьому істотних додаткових витрат.

### *Суть методу МТЗ*

Метод магнітотелуричного зондування (МТЗ) заснований на вивченні природного змінного електромагнітного поля Землі - магнітотелуричного поля. Природне електромагнітне поле містить коливання різної частоти. За рахунок явища скін-ефекту (рис.3) більш високочастотні коливання МТ-поля швидше загасають з глибиною, в той час як низькочастотні компоненти спектра проникають на великі глибини. Відповідно, високочастотні складові поля несуть інформацію лише про приповерхностну частину розрізу. Зі зниженням частоти внесок глибших частин розрізу в спостережуване поле зростає, і ми отримуємо інформацію про глибинну частину геоелектричного розрізу.

Таким чином, МТЗ є різновидом індукційного частотного зондування. На відміну від інших методів індукційного зондування (ЧЗ і ЗС), МТЗ не вимагає використання генераторних установок, і, в той же час, забезпечує глибинність досліджень, які не досягну в методах з контрольованим джерелом [Хмельовський, 1984; Жданов, 1986]. Ще одна істотна відмінність МТ-методів від методів з контрольованим джерелом пов'язано з необхідністю переходу від окремих компонент ЕМ-поля до так званих передавальних функцій, які представляють собою, по суті, відносини певних компонент поля, виміряних в одній або двох точках. Перехід до передавальних функцій дозволяє виключити з розгляду невідомі параметри джерел природного електромагнітного поля.

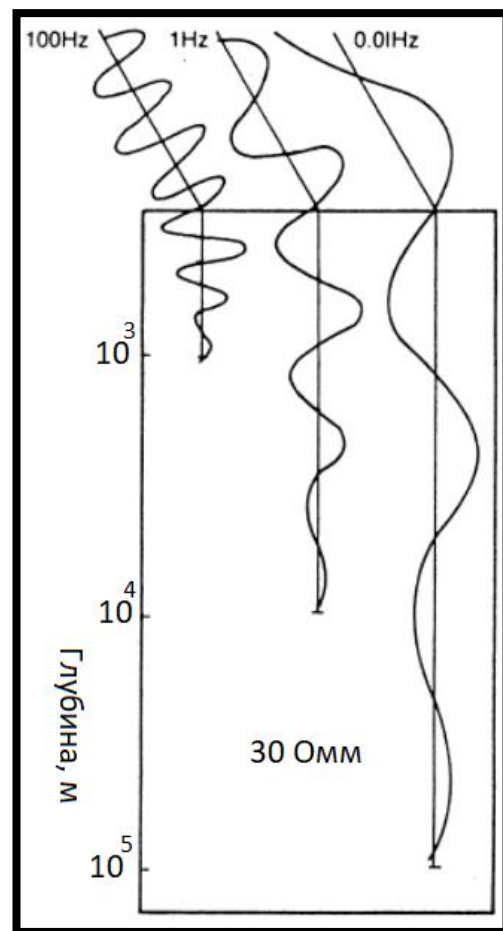


Рисунок 3. «Суть скін-ефекту»

Вимірюваними величинами є електричні ( $E_x$  і  $E_y$ ) і магнітні ( $H_x$ ,  $H_y$  і  $H_z$ ) складові. Величину опору середовища визначає імпеданс - відношення горизонтальних складових електромагнітного поля - електричної до магнітної ( $E_x / H_y$ ) і ( $E_y / H_x$ ) на різних періодах (частотах) коливань поля.

Крім імпедансу застосовуються і інші відносини, такі як ставлення вертикальної і горизонтальної компонент магнітного поля або ставлення однойменних компонент в польовий і базовій точках. Такі прийоми лежать в основі численних модифікацій методу магнітотелуричного зондування. Всі ці відносини є частотно-залежними і можуть розглядатися як частотні характеристики Землі, тому їх називають передавальними функціями.

### ***Методика АМТЗ***

Метод АМТЗ передбачає реєстрацію ЕМ поля в діапазоні частот від 10 КГц до перших Гц. На жаль, існує область низької інтенсивності в його спектрі поля в діапазоні частот 1-4 КГц. Спостереження в цьому частотному діапазоні можна заповнити, реєструючи поля віддалених штучних джерел - як контрольованих, так і неконтрольованих. В даний час велика частина робіт методом АМТЗ виконується з використанням станцій MTU-5A виробництва канадської фірми «Phoenix Geophysics» (рис. 6). Як правило, під час проведення польових робіт на одній ділянці використовується кілька вимірювальних модулів MTU-5A. Реєстрація в польових точках проводиться синхронно з реєстрацією на базовій точці, що дозволяє підвищити точність одержуваних при обробці магнітотелурических передавальних функцій - при 4 синхронної обробці придушуються шуми, некорельованих між рядовий і базовій точками [Варенцов, 2006]. У кожній точці проводиться реєстрація п'яти компонент ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) МТ поля. Компоненти електричного поля вимірюються за допомогою п'ятиелектродної хрестоподібної установки, що складається з електричних диполів довжиною 30-40 м. Центральний електрод використовується для придушення апаратних шумів. В якості заземлень можна використовувати як спеціальні неполярізовані, так і латунні електроди (що, до речі, неможливо при низькочастотних спостереженнях в

класичному МТЗ). Компоненти магнітного поля вимірюються за допомогою індукційних датчиків. Датчики електричного і магнітного полів за відсутності яскравих двовимірних структур орієнтуються по магнітному меридіану і перепендикулярно йому (азимуті 0о і 90о, відповідно). У разі, коли по апріорним даними відомо, що досліджувана ділянка характеризується двовимірної тектоникой, датчики поля орієнтуються уздовж і поперек основних напрямків простягання геологічних структур. Вітрові перешкоди усуваються шляхом прикапування електричних диполів і розміщення індукційних датчиків в канавах.

### 1.3 Основні положення

Головний параметр, що розраховується в результаті проведення МТЗ і АМТЗ, - це імпеданс  $Z$ , або вхідний опір середовища, яке дорівнює відношенню горизонтальних складових напруженості електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів. У методі МТЗ для отримання інформації про електропровідності геологічного середовища зазвичай використовується повний тензор імпедансу з одночасним вимірюванням чотирьох складових електромагнітного поля  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ , орієнтованих в напрямках захід-схід  $X$  і південь-північ  $Y$ . Щоб скористатися магнітоваріаційних характеристиками, додатково до цього включають вимір вертикальної складової магнітного поля  $H_z$ . У разі горизонтально-шаруватого середовища (1).

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}; \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}. \quad (1)$$

Відзначимо, що  $Z$  є комплексним числом. Над однорідним півпростором:

$$|Z| = \sqrt{\omega\mu_0\rho}.$$

Отримавши значення імпедансів, можна розрахувати здаються питомі електричні опори  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  і фазові кути  $\varphi_f$  за формулами:

$$\rho_{xy} = \frac{|Z_{xy}|^2}{(2\pi f\mu_0)}; \quad \rho_{yx} = \frac{|Z_{yx}|^2}{(2\pi f\mu_0)};$$

$$\varphi_f = \arg Z = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} = \varphi_{E_y} - \varphi_{H_x} + 180^\circ,$$

де  $f$  - частота електромагнітного поля, Гц;

$\mu_0$  - магнітна проникність вакууму, Гн / м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ .

Таким чином, за значеннями компонент МТ-поля на поверхні Землі можна розрахувати імпеданс, а далі - визначити опір півпростору. Використовуючи цю формулу на практиці при вивченні неоднорідних середовищ, отримуємо уявний опір.

$$\rho_T = \frac{|Z|^2 T}{2\pi\mu_0} = \frac{|Z|^2}{\omega\mu_0},$$

де  $T$  - період хвилі.

Співвідношення (1) справедливо тільки для горизонтально-шаруватих середовищ. В істотно неоднорідних по горизонталі середовищах, як показали М.Н. Бердичевський і Т. Кантуелл, слід перейти до тензора імпедансу

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix},$$

де комплексні числа  $Z_{xy}$  і  $Z_{yx}$  - головні, а  $Z_{xx}$  і  $Z_{yy}$  - додаткові компоненти тензора імпедансу. В цьому випадку горизонтальні компоненти електричного і магнітного полів зв'язані співвідношеннями:

$$E_x = Z_{xx} \cdot H_x + Z_{xy} \cdot H_y,$$

$$E_y = Z_{yx} \cdot H_x + Z_{yy} \cdot H_y,$$

Структура тензора імпедансу спрощується в одновимірних (1D) і двовимірних (2D) середовищах.

У 1D середовищах  $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ , а  $Z_{xy} = -Z_{yx}$ .

У 2D середовищах, якщо вісь  $x$  збігається з напрямом падіння структур, а вісь  $y$  - із спрямуванням їх простягання, додаткові компоненти також дорівнюють нулю, а основні - розрізняються.

При цьому компонента  $Z_{xy}$ , пов'язана з електричним полем, спрямованим хрестом структур, називається поперечним опором ( $Z_{xy} = Z^\perp$ ), а компонента  $Z_{yx}$ , пов'язана з електричним полем, поляризованим уздовж структур, називається поздовжнім опором ( $Z_{yx} = Z^\parallel$ ).

При інтерпретації даних МТЗ часто використовується так званий ефективний імпеданс:

$$Z_{eff} = \sqrt{Z_{xx} \cdot Z_{yy} - Z_{xy} \cdot Z_{yx}}$$

Важливою властивістю ефективного імпедансу є його інваріантність, тобто незалежність від вибору системи координат.

Амплітудні і фазові криві АМТЗ є, по суті, частотними характеристиками геоелектричного розрізу і відображають зміну електричних властивостей середовища з глибиною. Високочастотні вихрові поля концентруються у верхній частині розрізу, з пониженням частоти глибина проникнення поля зростає і позірний опір починає нести інформацію про всі більш глибоких шарах. Отримані дані є основою для якісної і кількісної інтерпретації результатів АМТЗ. Для вирішення оперативних виробничих завдань цілком достатньо отримання імпедансу середовища в одному напрямку (по лінії профілю). Дана технологія є поширеною практикою при пошуках підземних вод. В цьому випадку для вимірювання електричної складової поля уздовж профілю зручно використовувати незаземлену стелеться лінію, при цьому магнітний датчик спрямований поперек профілю. Запропонована методика робіт дозволяє проводити спостереження аудіомагнітотеллуричних компонент поля в русі (АМТ-зйомка) або з короткими зупинками (АМТ-експрес зондування).

#### **1.4 Области застосування методу МТЗ**

Змінюючи діапазон реєстрованих частот, можна отримувати інформацію про електропровідності геологічного розрізу з різних глибин, в залежності від розв'язуваних завдань. Области застосування МТЗ включають в себе регіональні і нафтогазові дослідження, розвідку твердих корисних копалин, пошуки гідротермальних ресурсів і ряд інших.

При пошуках вуглеводнів магнітотеллуричне зондування ефективно доповнює сейсмозвідувальні дослідження, дозволяючи отримувати інформацію про літологічні і колекторські властивості гірських порід. У ряді випадків, коли сейсмозвідка демонструє низьку ефективність, МТЗ виявляється найбільш інформативним методом при вирішенні структурних завдань. Велика глибинність



зондування обумовлює можливість застосування методу для пошуку великих нафтових родовищ (рис. 4) в глибоких горизонтах осадового чохла складчастих областей.



*Рисунок 4. «Видобуток нафти»*

Регіональні дослідження спрямовані на вивчення регіональних особливостей будови верхньої частини мантії, астеносфери, розподілу проводять зон у земній корі, аналіз поведінки покрівлі кристалічного фундаменту, дослідження глибинних розломів, вивчення основних структурних поверхів осадового чохла.

Магнітотелуричне зондування, і, особливо, його високочастотна модифікація (АМТЗ), є високоефективним інструментом при розвідці твердих корисних копалин, включаючи сульфідні руди і трубки вибуху (рис.5).



*Рисунок 5. «Кімберлітові трубка, ЮАР»*

Нарешті, МТЗ відіграє одну з провідних ролей при пошуках и вивченні гідротермальних родовищ, так як гідротермальні об'єкти, придатні для масштабного використання в ролі джерела енергії для гідротермальних станцій, як правило, представляють собою скупчення добре проводящих мінералізованих вод.

## 2. Апаратура і методика робіт

### 2.1 Апаратура V5 System 2000

Комплект апаратури V5 System 2000 розглянутий і представлений на рис. 6. У комплект входять: приймач MTU-5A; GPS-антена (Global Position System); малошумливі неполяризуючіся електроди PE-2; магнітні датчики одного з наступних типів: МТС-50 (MT-датчики) з робочим діапазоном частот від 2000 с до 400 Гц і МТС-30 (AMT-датчики) з робочим діапазоном частот від 0.35 Гц до 10000 Гц ; сполучні кабелі і дроти прийомних ліній. Живлення приймача проводиться від акумуляторної батареї напругою 12 В.



Рисунок 6. «Комплект апаратури V5 System 2000»

Центральним вузлом апаратури є приймач MTU-5A виробництва фірми «Phoenix Geophysics» (Канада), блок-схема якого представлена на рис. 7. Центральний процесор (ЦП) являє собою стандартний багатофункціональний мікропроцесор зі спеціальним програмним забезпеченням, що встановлюються виробником. У серії при-борів MTU процесор керує всіма діями приладу: фільтрацією і обробкою первинного сигналу, синхронізацією з GPS, управлінням роботи термостата і кварцового годиннику, калібруванням магнітних датчиків, роботою світлового індикатора, записом в довготривалу пам'ять підсумкової інформації і т.д. Процесор встановлюється на платі, подібної материнської плати

комп'ютера, до неї підключаються всі інші вузли і блоки приладу: дві плати електричних каналів, плата магнітних каналів, плата GPS, а також два постійних запам'ятовуючих пристрої (ПЗУ) - жорсткий диск (HDD) і пристрій для читання / запису флеш-карт (CompactFlash), паралельний порт вводу-виводу (LPT) і блок живлення. Для реєстрації складових електричного поля використовуються пари неполяризованих електродів, що складаються з свинцевих спіралей, занурених у розчин солі свинцю, пластикового корпусу і пористого керамічного днища.

Датчики компонент магнітного поля включають в себе чутливий елемент - магнітну котушку і передпідсилювач. При використанні для польових вимірювань датчиків МТС-30 реалізується метод аудіомагнітотелуричні зондування; при використанні датчиків МТС-50 - метод магнітотелуричного зондування. Датчики підключаються до приймача за допомогою кабелю через герметичні роз'єми. Особливість підключення до приймача магнітних каналів полягає в тому, що вони збираються спеціальним трійником в один кабель, який вже і підключається до гніздового роз'єму приладу. Надалі сигнали від різних датчиків обробляються окремо, але ці ідентичні вузли і блоки змонтовані на одну плату (плата Н). Аналогічно сигналу від електричних ліній, сигнал від магнітних каналів посилюється, оцифровується і після процедури фільтрації поступає в центральний процесор.

Плата GPS відповідає за визначення абсолютних координат і часу за допомогою системи глобального супутникового позиціонування. Для отримання сигналу від супутників використовується виносна антена на закрученому кабелі, що встановлюється на триногу. Запуск приймача MTU-5A на реєстрацію здійснюється ЦП після того, як антена впевнено почне приймати сигнали не менше ніж від 4-х супутників. Сигнал з антени надходить на плату GPS, де перетворюється на тимчасові сигнали супутників, за якими розраховуються вертикальні і горизонтальні координати точки спостережень, а також точний час за Гринвічем (UTC). Похибка визначення часу приходу сигналу - 2 нс, що дозволяє досягти горизонтальної точності визначення координат не гірше 2 м. При роботі приладу

на точці, запис координат його місця розташування в постійну пам'ять відбувається автоматично.

Слід зазначити, що в методиці МТЗ з віддаленої опорною точкою, для роботи, по якій і створена серія приладів МТУ, дуже велике значення відіграє синхронізація записів робочої і базової станцій, а, таким чином, визначення точного часу. У разі безвідмовної роботи модуля GPS ця проблема легко вирішується прив'язкою часу за Гринвічем, отриманому зі супутників. В якості такого «аварійного» способу в серії приладів МТУ передбачені високоточні кварцові годинники, для стабілізації роботи годин використовується термостат. Для забезпечення роботи термостата в корпусі приладу є термометр, підключений до ЦП. Залежно від показань термометра процесор регулює роботу термостата, підтримуючи постійну температуру кварцових годин на рівні 37<sup>0</sup>С. Цей блок забезпечує стабільну роботу приладу, але в той же час споживає досить велику кількість енергії.

У приймальному встановлені два ПЗУ - жорсткий диск і пристрій для читання / запису флеш-карт. Вони виконують різні функції. Жорсткий диск використовується для установки програмного забезпечення ЦП, зберігання каліброваних файлів магнітних датчиків, зберігання тимчасових файлів даних і інформації про роботу вузлів і блоків МТУ-5А в усі час проведення записи. Знімні флеш-карти використовуються для передачі приладу завдання на роботу і отримання підсумкових записів. Завдання передається приладу у вигляді спеціального файлу - «стартового табло», який формується оператором. Заключаючі дані записуються на флеш-карту перед закінченням роботи приладу і включають в себе файл статистики реєстрації та файли часових рядів. Обсяг одержуваних підсумкових файлів можна регулювати за допомогою параметрів реєстрації в залежності від обсягу використовуваних флеш-карт.

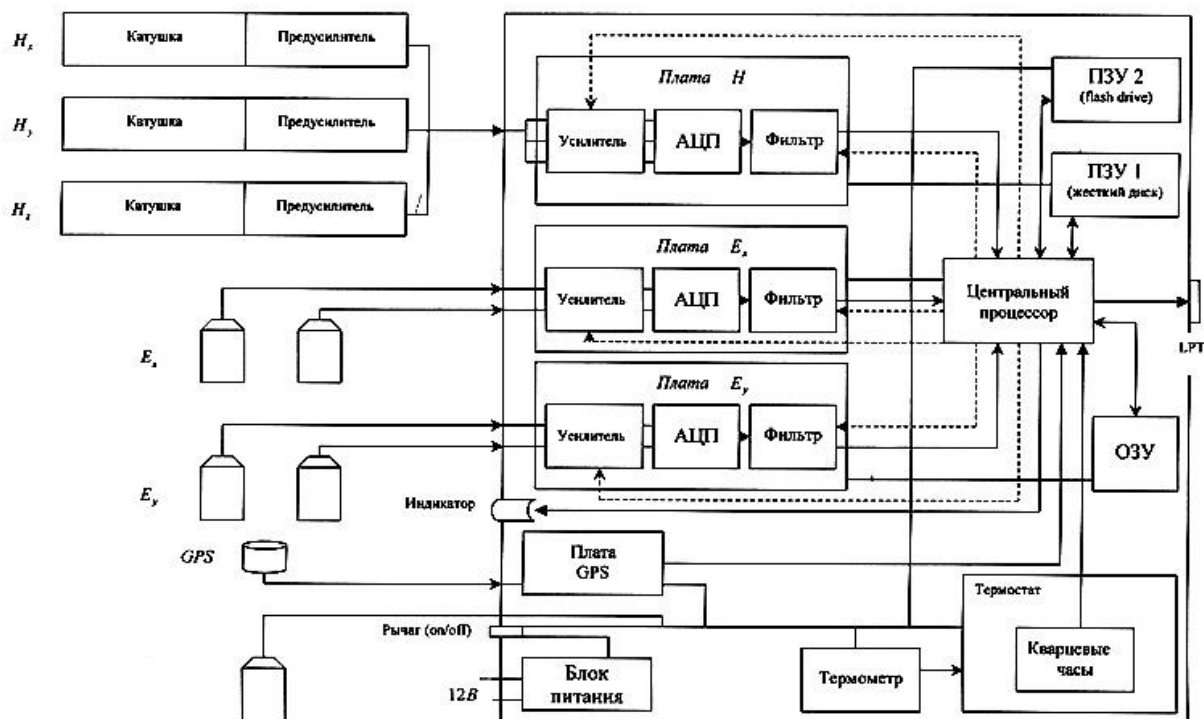


Рисунок 7. «Блок-схема аппаратуры V5 System 2000»

В якості захисту від близького удару блискавки або іншого різкого значного перепаду напруженості електромагнітного поля, здатного по-шкодити апаратуру, використовується захисне заземлення. Для цього служить використовується такий же неполяризований електрод, що і для електричних каналів.

Для підключення приладу до комп'ютера для роботи в режимі реально-го часу (режим ON Line) передбачений спеціальний паралельний LPT-порт, який кабелем зв'язується з аналогічним портом ноутбука. При роботі з приладом в режимі ON Line за допомогою сервісного інтерфейсу "WinHost On-Line Interface" можна спостерігати параметри реєстрації.

Реєстрація сигналів низьких, середніх і високих частот проводиться одночасно, на відміну від аналогічної апаратури інших виробників. Це істотно скорочує тривалість спостережень, підвищує продуктивність і знижує вартість фізичної точки АМТЗ в порівнянні вітчизняною апаратурою.

## 2.2 Методика магніотелуричних досліджень та польових спостережень

Магніотелуричних методи розвідки - комплекс методів електричної розвідки, заснований на вивченні варіацій природного магніотелуричного поля Землі.

Для реєстрації варіацій теллурического поля застосовуються заземлені на кінцях приймальні лінії; геомагнітного поля - магніостатическіе (при періодах понад 10 с) і індукційні (до 10 с) магніометри. Варіації реєструються за допомогою аналогової або цифрової апаратури. Комплекс магнитотеллурических методів розвідки включає в себе методи зондування і профілювання

Зондування здійснюється шляхом реєстрації варіацій в широкому діапазоні частот і дозволяє пошарово по вертикалі диференціювати гірські породи по питомій електричному опору. При профілюванні реєструють варіації в порівняно вузькому діапазоні періодів або одного періоду, що забезпечує вивчення змін електричного опору і потужності шарів в горизонтальному напрямку і необхідну постійну глибинність досліджень.

Метод МТЗ є різновидом частотного зондування. Він заснований на реєстрації варіацій ліній  $E_x$ ,  $E_y$  і  $H_x$ ,  $H_y$  в одній точці. Діапазон періодів - від сотих часток секунди до декількох хвилин (при глибинних дослідженнях - до декількох годин). Спостереження ведеться за допомогою цифрової апаратури ЦЕС і аналогової апаратури МТЛ, МВС.

Вид зйомки (профільна або майданна), а також мережу спостереження визначається завданнями робіт.

Схема розстановки станцій визначається інструкцією та умовами зйомки. Приймальні лінії  $E_x$  і  $E_y$  викладаються в вигляді букви Г уздовж взаємно перпендикулярних осей  $x$  і  $y$ . кут між віссю  $x$  і широтним напрямком не повинен перевищувати  $45^\circ$ . У районах з стійкої лінійної поляризацією поля одну з осей орієнтують по напрямку осі поляризації. Можна використовувати Т-образну або хрестоподібну установки (рис.8). Хрестоподібна установка має переваги в сильно заселеної, заболоченій місцевості через меншу ймовірності помилок в довжині і



азимут прийомних ліній. Точність розкладки проводів по заданому напрямку  $\pm 3\%$ , що досягається розмотуванням їх по заздалегідь наміченим орієнтирів. У густому чагарнику попередньо прорубують візирну лінію. Довжину прийомних ліній визначають по мітках на проводах. У районах з інтенсивними магнітотелуричних варіаціями, але з порівняно однорідними поверхневими геоелектричними умовами оптимальна довжина лінії встановлення не повинна перевищувати 0,3 - 0,5 км. У районах з низьким рівнем магнітотелуричного поля, з неоднорідними поверхневими умовами, наприклад з острівної багаторічної мерзлотою, довжина приймальні установки може досягати 0,8 - 1 км. Приймальні лінії заземляють найчастіше за допомогою неполярізующійся електродів (влітку) або металевих штирьових електродів (взимку) [Інструкція, 1984].

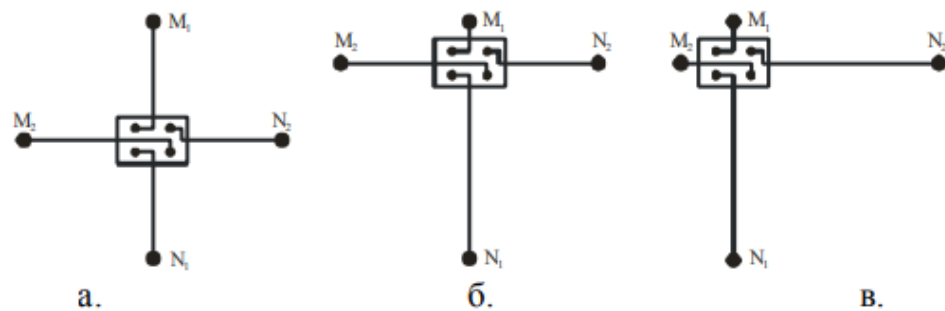


Рисунок 8. Розташування вимірювальних електродів для роботи методом *MTZ*

Датчики для реєстрації варіацій  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  встановлюють в неглибоких ямах на стійких твердих підставах, на відстані між ними не менше 3 м і орієнтують за допомогою знімальної буссоли з похибкою до  $\pm 0,5^\circ$ . Азимут датчика для вимірювання  $H_x$  повинен збігатися з азимутом осі  $x$ , азимут для вимірювання  $H_y$  - з азимутом осі  $y$ . Яма робиться такої глибини, щоб в ній можна було встановити датчик і закрити яму щитами і клейонкою, які не повинні стосуватися корпусу магнітометра, Після закінчення робіт ями засипають раніше виритої землею і закладають раніше знятим дерном.



Зазвичай розстановка здійснюється з використанням наступної методики:

- зондування проводяться на порівняно рівному майданчику розміром 100 x 100 м;
- вітрові перешкоди усуваються шляхом прикапивання електричних диполів і розміщення індукційних датчиків в канавах, прикопують землю (вертикальний магнітний датчик забуривається в землю за допомогою спеціального ручного бура);
- використовується п'ятиелектродная хрестоподібна електрична вимірювальна установка, заземлена слабополяризуючіміся електродами;
- лінії електричних датчиків викладаються по буссоли;
- магнітні датчики виставляються по рівню і буссоли.

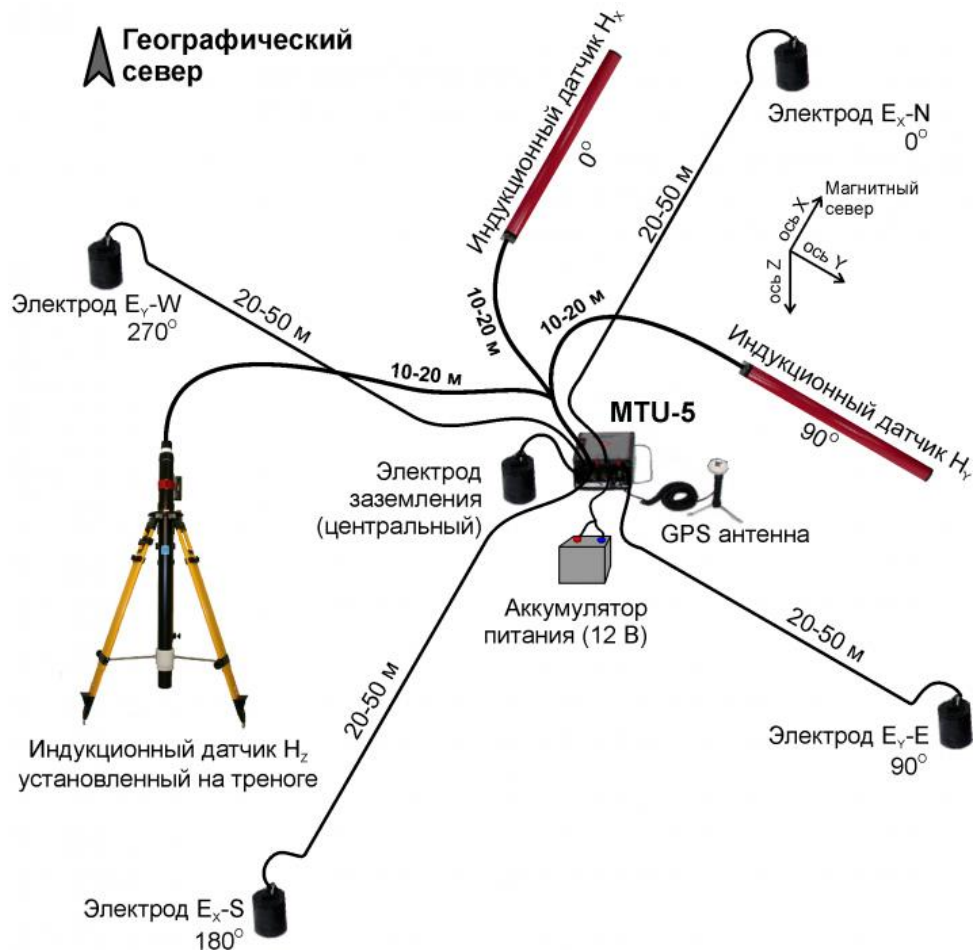


Рисунок 9. «Схема розміщення станції»

Реєстрація проводиться в синхронному режимі одночасно кількома станціями. Це дозволяє обробляти одержуваний матеріал в так званому "синхронному" режимі з метою придушення некорельованих шумів і підвищення якості МТ-даних.

Час реєстрації на рядових пунктах спостереження становить не менше 30 хвилин в режимі АМТЗ, 16 годин у режимі МТЗ (табл.1).

Визначення координат точок здійснюється в автоматичному режимі, з використанням вбудованих в реєструючий модуль GPS.

Обробка спостережень виконується головним чином на комп'ютерах і полягає в спектральному аналізі варіацій і визначенні частотних характеристик тензора імпедансу  $Z$  виражає співвідношення між  $E_x$ ,  $E_y$  і  $H_x$ ,  $H_y$ . Частотні характеристики  $Z$  трансформуються в криві уявного опору  $\rho_T$ . Завдяки скін-ефекту криві  $\rho_T$  відображають зміни питомої опору гірських порід з глибиною.

При інтерпретації кривих криві  $\rho_T$  використовуються графічні та аналітичні методи. В даний час в основному використовуються методи комп'ютерної інтерпретації. Інтерпретація МТЗ дозволяє побудувати геоелектричний розріз досліджуваного району і виділити структури в осадовому чохла і кристалічному фундаменті. Глибинні МТЗ дають інформацію про опір земної кори і верхньої мантії.

### 3. Обробка в частотній та часовій областях

#### 3.1 Граф обробки даних МТЗ

Процес обробки записів МТ-поля можна розділити на три етапи.

Перший етап обробки полягає в перегляді і, можливо, відбракування самих записів (або їх фрагментів). На цьому етапі з подальшого процесу обробки видаляються ділянки записи з сильними перешкодами, виходами за межі динамічного діапазону («зашкалив»). Запис може бути розбита на кілька частин після видалення таких ділянок. На цьому ж етапі здійснюється підготовка файлів для подальшої обробки (створення структури імен вихідних файлів, введення службової інформації і т.п.). На першому етапі контролюються і параметри роботи реєструє апаратури. Роботи на цьому етапі проводяться як в інтерактивному, так і в автоматичному режимах. В результаті обробки ми отримуємо гладкі частотні залежності передавальних функцій. Головні компоненти тензора імпедансу перераховуються в криві уявного опору.



Рисунок 10. «Перегляд записів»

На другому етапі проводиться оцінювання передавальних функцій (тензора імпедансу, вектора Візе-Паркінсона і ряду інших) по записах компонент магнітотелуричного поля. Іноді процедуру обробки називають оцінюванням МТ-передавальних функцій. Основним етапом обробки є поділ записів МТ-поля на спектральні складові, за якими потім знаходяться компоненти шуканих передавальних функцій для заданого набору частот [Жданов, 1986].

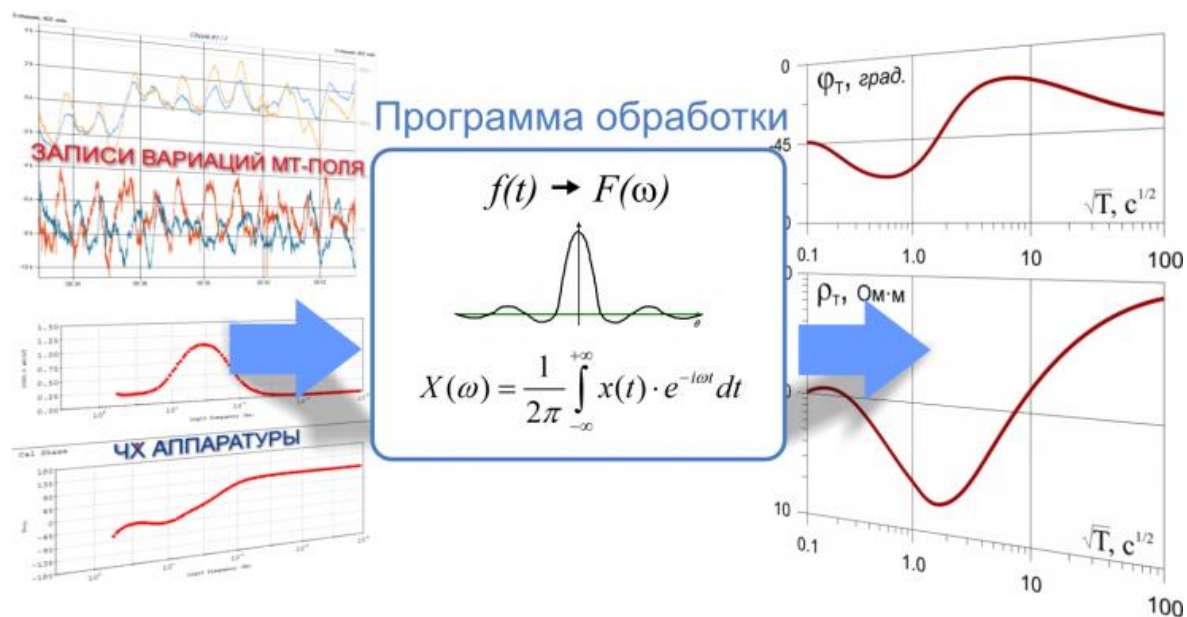


Рисунок 11. «Обробка та оцінювання отриманих даних»

Третій етап полягає в отриманні гладких кривих МТЗ (як імпедансних кривих, так і кривих уявного опору). Програма для інтерактивної обробки даних МТЗ на цьому етапі розроблена в ТОВ «Північно-Захід» і називається «МТ-Corrector». Програма дозволяє не тільки проводити відбраковування використовуючи спеціальні графічні редактори, але і вводити вагові коефіцієнти, відповідні якості даних на різних інтервалах періодів. В якості вихідних даних в програму завантажуються файли, оброблені за різними методиками (наприклад, з використанням у віддаленій базі з кореляцією за різними компонентами електромагнітного поля).

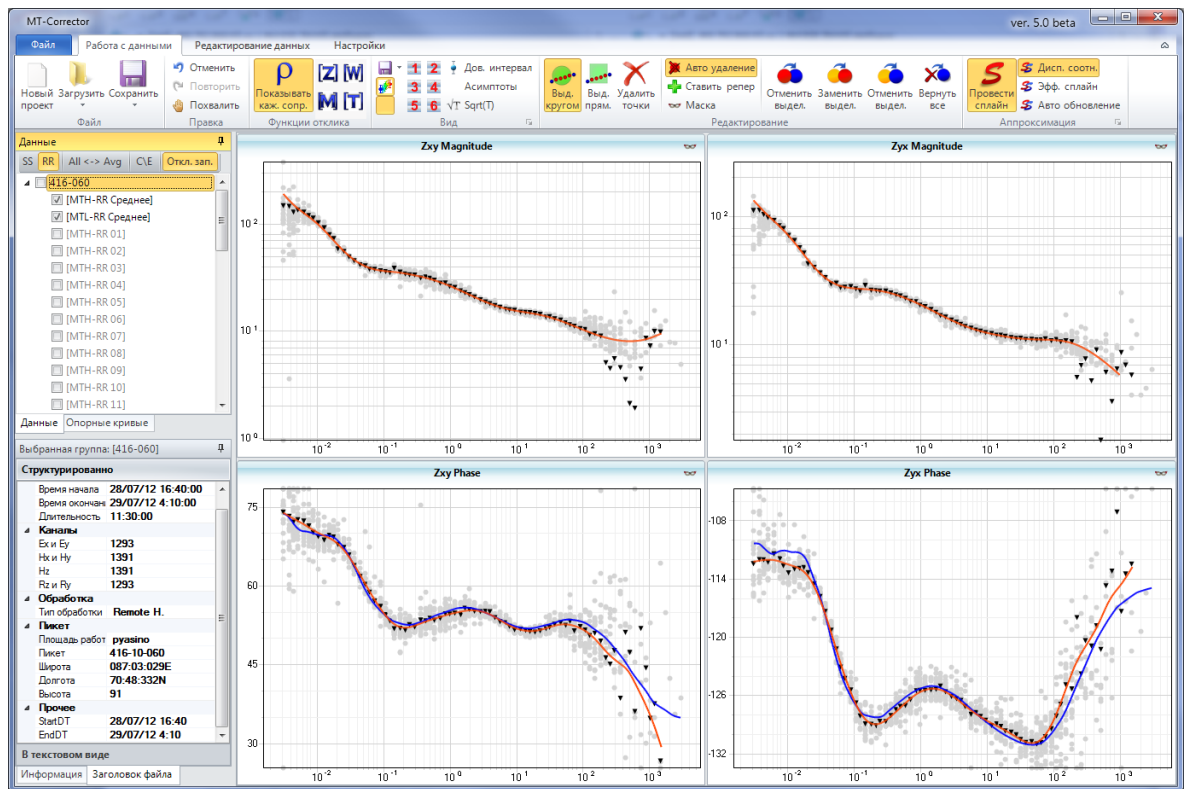


Рисунок 12. «Отримання гладких кривих МТЗ»

Таким чином, в результаті обробки даних МТЗ отримуємо набір кривих модулів і фаз компонент тензора імпедансу, кривих уявного опору, кривих компонент матриці Візе, горизонтального магнітного тензора і т.д.

Суть даної роботи лежить в тому, що обробку отриманих даних можна зробити двома способами: в частотній і часовій областях. І потрібно вибрати який з методів буде більш оптимальним.

В даному пункті буде розглядатися порівняння методів спектрального аналізу на основі перетворення Фур'є та фільтрації. Для цього був використаний пакет програм MatLab.

### Порядок виконання:

Спочатку задаємо параметри.

$F_s = 10000$ ;           % Частота дискретизації

$T = 1/F_s$ ;           % Період вибірки

```
L = 500000;      % Довжина сигналу
t = (0:L-1)*T;   % Час(вектор)
```

Задаємо сигнали з різними характеристиками (рис.13а) та перешкоду (рис.13б).

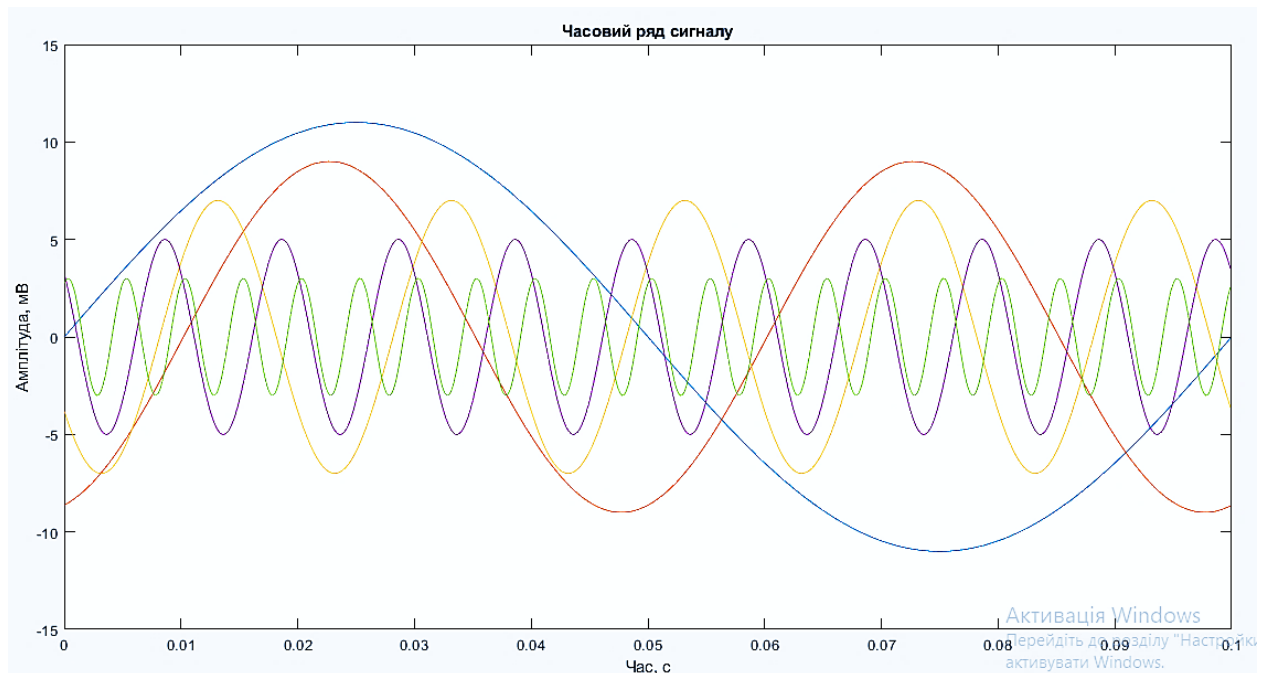
```
a = 11*sin(2*pi*10*t+0/180*pi);
b = 9*sin(2*pi*20*t+5/180*pi);
c = 7*sin(2*pi*50*t+10/180*pi);
d = 5*sin(2*pi*100*t+15/180*pi);
e = 3*sin(2*pi*200*t+20/180*pi);
```

```
s = 12*rand(size(t)); % шум
```

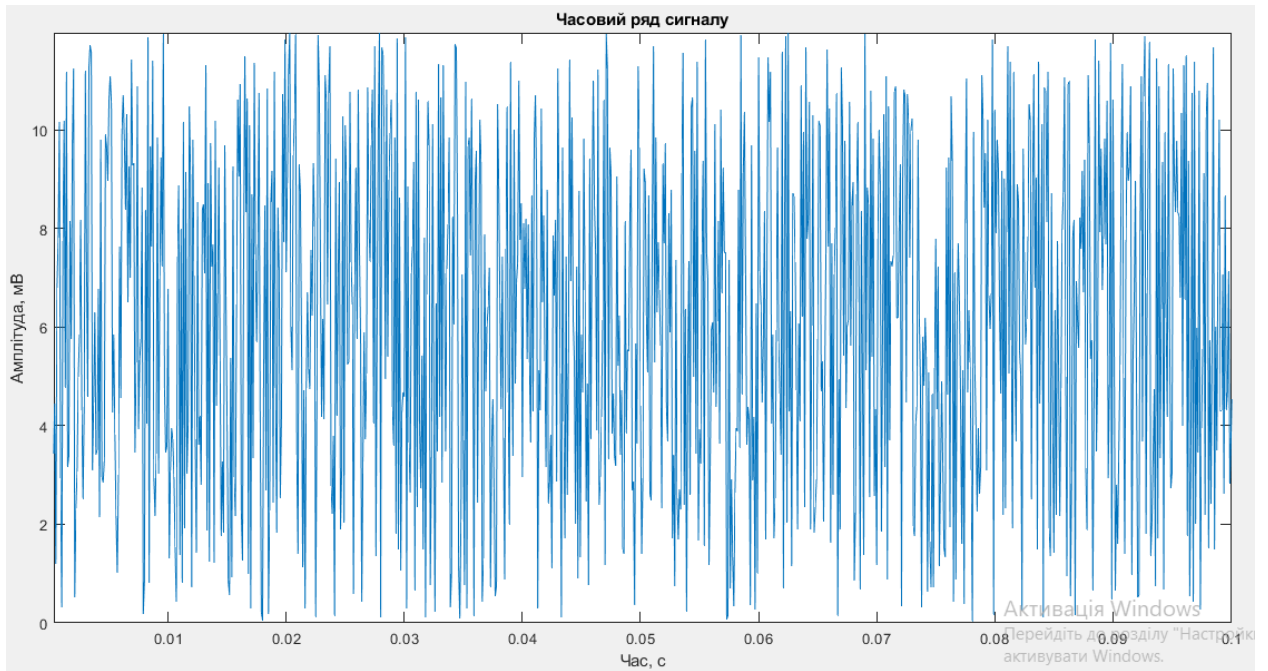
І складаємо всі сигнали і перешкоду в один сумарний сигнал (рис.13в).

```
x = c+a+b+d+e+s;
```

а)



б)



в)

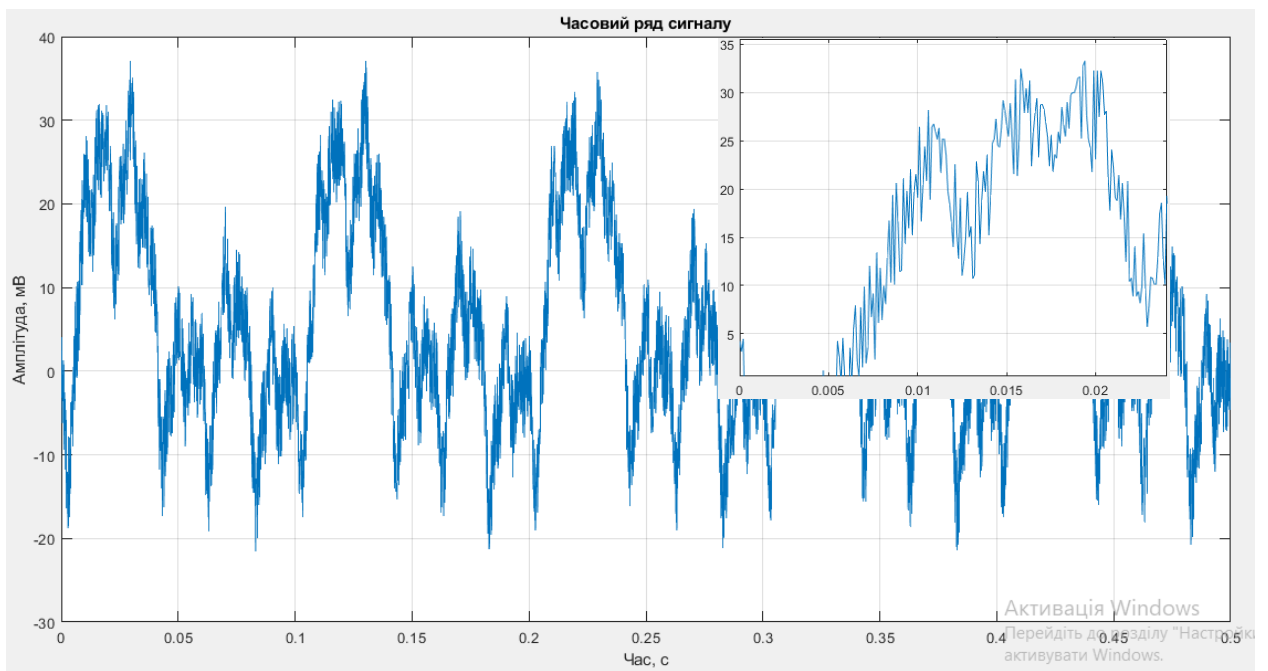


Рисунок 13. «а– часові ряди сигналів різних частот на інтервалі 0-0.1 с., б – випадковий шум, в – сумарний сигнал пошкоджений випадковим шумом»

### 3.2 Обробка в частотній області

Обробка в частотній області виконується за допомогою перетворення Фур'є.

#### 1. Отримання спектра сигналу

Спектром часової залежності (функції)  $x(t)$  називається сукупність її гармонійних складових (гармонік), що утворюють ряд Фур'є. Спектральний аналіз періодичних функцій полягає в знаходженні коефіцієнтів  $a_k$ ,  $b_k$  ряду Фур'є:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos 2\pi f_1 t + b_k \sin 2\pi k f_1 t), \quad (2)$$

де  $f_1$ -частота повторення (або частота першої гармоніки),  
 $k$ -номер гармоніки.

Коефіцієнти ряду Фур'є визначаються виразами:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos 2\pi k f_1 t dt, \quad (3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin 2\pi k f_1 t dt, \quad (4)$$

де  $T = 1 / f_1$ -період повторення періодичної функції  $x(t)$ .

Для опису аналогових і дискретних сигналів в частотній області використовується апарат перетворення Фур'є. Спектром  $X_a(j\omega)$  аналогового сигналу  $x_a(t)$  називають пряме перетворення Фур'є:

$$X_a(j\omega) = \int_0^{\infty} x_a(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

У свою чергу, згідно з зворотньому перетворенню Фур'є:

$$x_a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_a(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (6)$$

Пара перетворень для гратчастої функції (дискретної послідовності)  $x(nT)$  має вигляд:

$$X(e^{j\omega T}) = \Phi\{x(nT)\} = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) e^{-j\omega nT}, \quad (7)$$

$$x(nt) = \Phi^{-1}\{X(e^{j\omega T})\} = \frac{T}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} X(e^{j\omega nT}) d\omega, \quad (8)$$

де  $X(e^{j\omega T})$  Називають спектром дискретного сигналу.



## 2. Дискретне перетворення Фур'є

Нехай  $x(nT)$  - періодична послідовність з періодом  $NT$  (період -  $N$  відліків), тобто  $x(nT) = x(nT + mNT)$ ,  $m$  - ціле. Дискретним перетворенням Фур'є (ДПФ) називають пару взаємно-одназначних перетворень:

$$X(k) = X(k\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)e^{-jkn\Omega T}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (9)$$

$$x(n) = x(nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k\Omega)e^{jkn\Omega T}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (10)$$

де  $\Omega = \frac{2\pi}{NT}$  - основна частота перетворення (бін ДПФ), причому (8) визначає пряме ДПФ, а (10) - зворотне ДПФ.

Дискретне перетворення Фур'є  $X(k)$ , як і сама послідовність  $x(n)$ , є періодичною функцією по аргументу  $k$  з періодом  $N$ . ДПФ може бути використано і для подання послідовності  $x(nT)$  кінцевої довжини  $N$ , визначеної при  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  і рівною нулю поза інтервалу  $[0, N-1]$ . Дійсно таку послідовність можна розглядати як один період відповідної періодичної послідовності і використовувати перетворення (9), (10).

## 3. Швидке перетворення Фур'є (ШПФ)

Дискретне перетворення Фур'є  $X(k)$  кінцевої послідовності  $x(nT)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  визначається згідно (9), (10):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (11)$$

$$x(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-nk}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (12)$$

де  $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ , причому  $W_N$  є періодичною послідовністю з періодом  $N$ , так як  $W_N^{(nk+mN)} = W_N^{nk}$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Безпосереднє обчислення ДПФ (11) при комплексних значеннях  $x(nT)$  вимагає для кожного значення  $k$  ( $N-1$ ) уможовити і ( $N-1$ ) складань комплексних чисел або  $4(N-1)$  уможовити і  $(2N-2)$  додавань дійсних чисел, а для всіх  $N$  значень  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$  потрібно приблизно  $N^2$  уможовити і  $N^2$  складань комплексних чисел. Таким чином, для великих значень  $N$  (порядку декількох сотень або тисяч)

пряме обчислення ДПФ вимагає виконання досить великого числа арифметичних операцій множення і складання, що ускладнює реалізацію обчислення в реальному масштабі часу процесів і спектрів.

*Швидким перетворенням Фур'є* називають набір алгоритмів, реалізація яких призводить до суттєвого зменшення обчислювальної складності ДПФ. Вихідна ідея алгоритмів полягає в тому, що  $N$ -точкова послідовність розбивається на дві коротші, наприклад на дві  $(N/2)$ -точкових послідовності, обчислюються ДПФ для цих більш коротких послідовностей і з цих ДПФ конструюється ДПФ вихідної послідовності. Для двох  $(N/2)$ -точкових послідовностей потрібно приблизно  $(N/2)^2 * 2 = N^2/2$  множень комплексних чисел, тобто число множень (а так само складань) зменшується приблизно в 2 рази. аналогічно замість обчислення ДПФ  $(N/2)$ -точкової послідовності можна обчислити ДПФ для двох  $(N/4)$ -точкових послідовностей і таким чином знову скоротити необхідну кількість операцій множення і додавання. Якщо  $N = 2^v$ ,  $v > 0$  і ціле, то процес зменшення розміру ДПФ може бути продовжений до тих пір, поки не залишаться тільки 2-точкові ДПФ. При цьому загальне число етапів обчислення ДПФ дорівнюватиме  $v = \log_2 N$  раз, а число необхідних операцій для обчислення  $N$ -точкової ДПФ буде порядку  $N^v$ , тобто зменшується приблизно в  $N / \log_2 N$  раз. Так при  $N = 1000$  для прямого обчислення ДПФ потрібно приблизно  $N^2 = 10^6$  операцій комплексних множень і додавань, а при використанні алгоритмів ШПФ таких операцій потрібно всього близько  $10^4$ , тобто об'єм обчислень скорочується приблизно на два порядки. Існують різні алгоритми ШПФ, наприклад, широко поширені алгоритм з проріджуванням по часу, в якому потрібно перестановка відліків вхідної послідовності  $x(nT)$  і алгоритм з проріджуванням по частоті, в якому потрібно перестановка відліків вихідний послідовності  $X(k)$ . В обох алгоритмах ШПФ потрібно приблизно  $N \log_2 N$  операцій (комплексних множень) і обидва алгоритму можуть бути реалізовані за способом із заміщенням, використовуючи тільки один масив осередків пам'яті.

### 3.1 Пряме одномірне дискретне ШПФ - fft

Алгоритм ШПФ реалізований функцією  $y = \text{fft}(x, n)$ . З її допомогою по відомому вектору сигналу  $x(n)$  обчислюється вектор

$$X(k = 1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n + 1) e^{-j(2\pi)/N} \quad (13)$$

де  $N = \text{length}(x)$  - довжина вектора вихідних даних.

Якщо  $N$  є ступінь числа 2, то використовується високоефективний алгоритм ШПФ для речових або комплексних даних. час обчислень для комплексних даних приблизно на 40-50% більше, ніж для дійсних. Якщо  $N$  є простим числом, виконується алгоритм дискретного перетворення Фур'є - ДПФ - за наведеною вище формулою. Якщо  $N < n$ , то відсутні елементи масиву  $x$  доповнюються нулями. Пряме ШПФ переводить уявлення сигналу з часової області в частотну.

### 3.2 Перегрупування вихідного масиву перетворення Фур'є - fftshift

При виконанні прямого ШПФ спектральні компоненти, близькі до нульової частоти, групуються по краях спектрограми. Функція  $y = \text{fftshift}(x)$  забезпечує перегрупування елементів вихідного масиву перетворення Фур'є таким чином, що ці компоненти виявляються в центрі графіка.

### 3.3 Зворотне одномірне дискретне ШПФ - ifft

Зворотне дискретне перетворення Фур'є реалізується формулою:

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k + 1) e^{-j2\pi/N}, \text{ де } N = \text{length}(x) \quad (14)$$

Все сказане про алгоритм ШПФ відноситься і до зворотного перетворенню, яке реалізується функцією  $y = \text{ifft}(x, n)$ . Для перевірки функцій  $\text{fft}$  і  $\text{ifft}$  можна використовувати наступний приклад:

$x = [1 \ 2 \ 3 \ 4];$

$X = \text{fft}(x)$

$X = \rangle 10.0000 \quad -2.0000 + 2.0000i \quad -2.0000 \quad -2.0000 - 2.0000i$

$x = \text{ifft}(X)$

$x = \rangle 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4$

Тут вихідний вектор піддається спочатку прямому, а потім зворотного перетворенню Фур'є. Як і слід було очікувати, після ланцюжка таких перетворень знову виходить вихідний вектор.

Зауваження:

Отриманий результат, однак, можливий тільки для простих, чисто тестових та демонстраційних прикладів. При векторах великого розміру це вже не зовсім так, а в разі введення обмежень на число гармонік, отриманих при прямому ШПФ, спотворення синтезованого сигналу можуть бути вельми помітними.

### ***3.4 Матриця дискретного перетворення Фур'є - dftmtx***

Функція  $A = \text{dftmtx}(n)$  повертає матрицю дискретного перетворення Фур'є розміру  $n \times n$ , таку, що матричний вираз  $y = A * x$  задає пряме дискретне перетворення Фур'є. Наступний приклад демонструє застосування функції `dftmtx`:

```
>> x = [1 2 3 4]; y1 = fft(x);
>> n = length(x); y2 = x * dftmtx(n)
y1 = > 10.0000    -2.0000 + 2.0000i    -2.0000    -2.0000-2.0000i
y2 = > 10.0000    -2.0000 + 2.0000i    -2.0000-0.0000i    -2.0000-2.0000i
>> norm(y1-y2)
ans = 2.3019e-015
```

Тут для вектора  $x$  виконано пряме дискретне ШПФ спочатку з допомогою функції `fft`, а потім із застосуванням функції `dftmtx`. Результати збігаються з точністю до машинної похибки. Величина похибки оцінюється нормою різниці векторів  $v1$  і  $v2$ , отриманих в цьому прикладі.

Матриця  $A_i = \text{conj}(\text{dftmtx}(n)) / n$ , відповідно, забезпечує зворотне дискретне перетворення Фур'є.

Зауваження:

При всій привабливості використання функції `dftmtx`, для обчислення ДПФ ефективніше використовувати функцію `fft`. В якості прикладу, ілюструє падіння точності обчислення при використанні функції `dftmtx` на великих вибірках.

### Порядок виконання:

У програмі було задано сумарний сигнал (рис.13в), складений 5 сигналів з частотою 10 Гц, 20 Гц, 50 Гц, 100 Гц і 200 Гц. Їх амплітуди: 11 мВ, 9 мВ, 7 мВ, 5 мВ, 3 мВ і фази  $0^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  відповідно. Потім для нього було проведено пряме одномірне дискретне ШПФ (fft) і побудовано амплітудний (рис.14) та фазовий (рис.15) спектри.

```
Y = fft(x);      % ШПФ
P2 = abs(Y/L);   % Двосторонній спектр
P1 = P2(1:L/2+1); % Односторонній спектр
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L; % Частотна область
plot(f,P1); hold on
grid on

plot(f,rad2deg((angle(Y(1:length(f)))))+90);
grid on
```

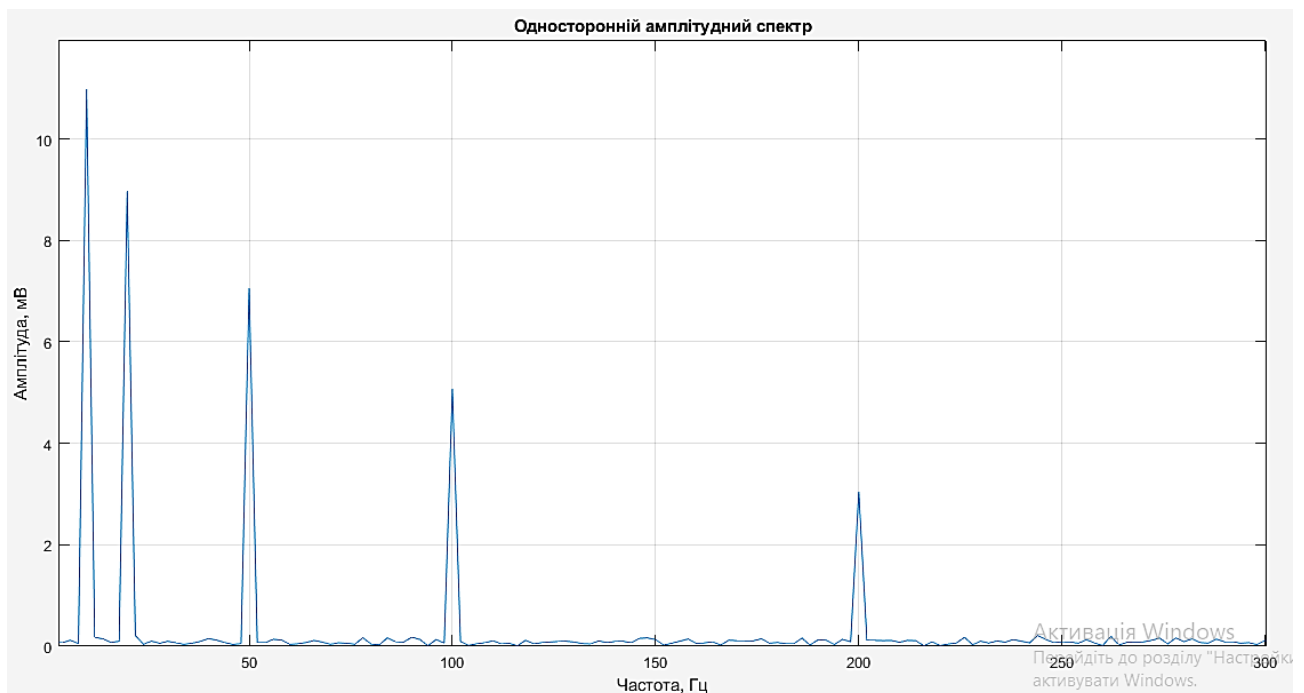


Рисунок 14. «Односторонній амплітудний спектр»

Побудувавши графік частотного спектра амплітуд (рис.14) вихідної функції можна бачити п'ять піків. Ці піки відповідають тим п'ятьом амплітудам початково заданих сигналів.

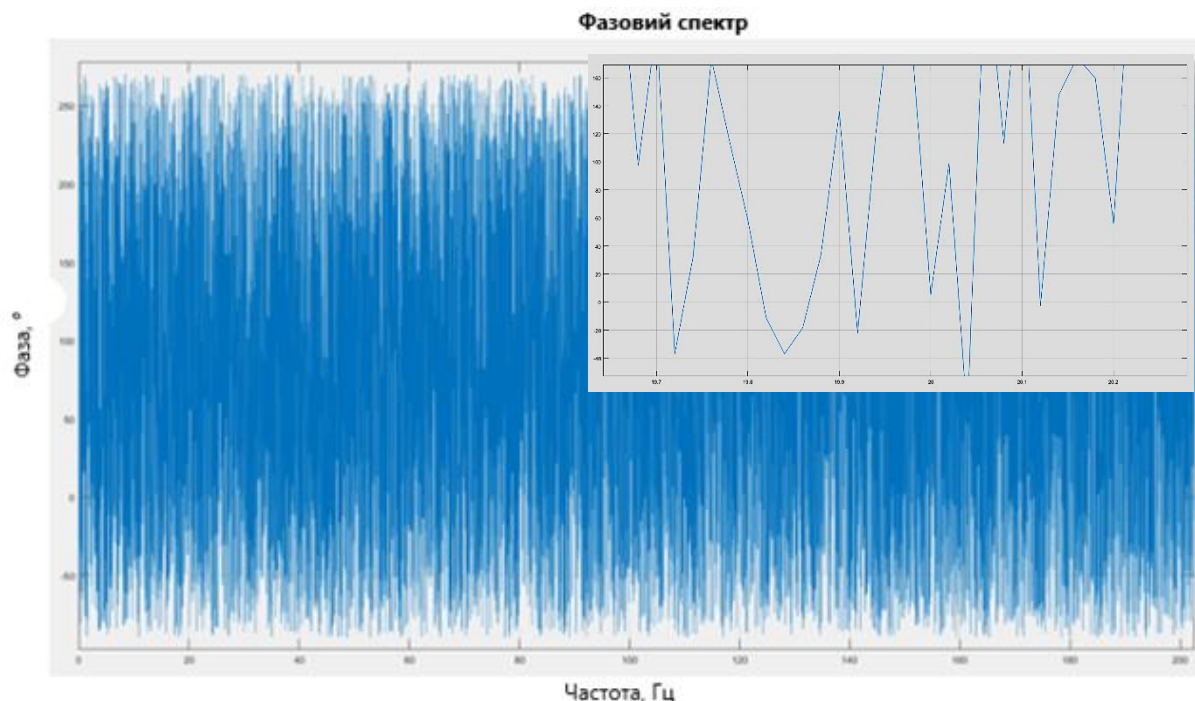


Рисунок 15. «Фазовий спектр»

На графіку фазового спектра (рис.15) ми також бачимо, що фазові значення відповідають значенням заданих частот.

### 3.3 Обробка в часовій області

До числа найбільш поширених засобів обробки сигналів відноситься їх фільтрація. Мета фільтрації зазвичай полягає у виділенні корисного сигналу з суміші цього сигналу з іншими сигналами і шумами. С математичної точки зору фільтрацією називається ефект від множення спектрів сигналів при пакунку. Коли спектри множаться як комплексні числа, відбувається множення амплітуд гармонік  $S_i$  вихідного сигналу і ядра згортки (а фази складаються). Таким чином, ми отримуємо можливість змінювати спектр сигналу. Це операція застосовується в звукозапису, в обробці зображень. У цій роботі фільтрація служить для поділу

різних сигналів, змішаних в один, і очищення сигналу від шумів. Також фільтрація є складовим компонентом багатьох інших, більш складних процесів. Ядро згортки при фільтрації зазвичай називають фільтром. Часто фільтром називається також весь пристрій, яке здійснює процес фільтрації. Довжина (розмір) фільтра - це довжина ядра згортки. У загальному випадку, фільтр міняє в спектрі сигналу і амплітуди гармонік, і їх фази. Однак фільтри можна проектувати так, щоб вони не змінювали фазу сигналу. Такі фільтри називаються фільтрами з лінійною фазою. Це означає, що якщо вони і змінюють фазу сигналу, то роблять це так, що всі гармоніки сигналу зсуваються по часу на одну і ту ж величину.

Основна властивість будь-якого фільтра - це його частотна і фазова характеристики. Вони показують, який вплив фільтр надає на амплітуду і фазу різних гармонік оброблюваного сигналу. Якщо фільтр має лінійну фазу, то розглядається лише частотна характеристика фільтра. Зазвичай частотна характеристика зображується у вигляді графіка залежності амплітуди від частоти. Пакет Signal Processing Toolbox має великі кошти для проектування фільтрувальних ланцюгів, що виділяють частотні компоненти сигналів в тій чи іншій частотній області. Під проектуванням фільтрів мається на увазі визначення їх електричних параметрів, що дозволяють отримати амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики (АЧХ і ФЧХ) заданого типу і з заданими параметрами. Під амплітудно-частотної характеристикою розуміють залежність коефіцієнта передачі фільтра від частоти при подачі на його вхід сигналів з незмінною амплітудою і з заданим діапазоном зміни частоти. Фазо-частотна характеристика являє собою залежність від частоти фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами, що визначаються в радіанах або градусах. Фільтри нерідко мають широкий діапазон зміни фази, що веде до характерних розривів фазо-частотної характеристики в точках, де фазовий зсув перевищує по модулю або 180.

Проектовані фільтри діляться на дві категорії - аналогові (безперервні) і цифрові. По виду залежності модуля коефіцієнта передачі від частоти фільтри також діляться на такі види:

- lowpass - низькочастотні, пропускають сигнали до деякої граничної частоти;

- `highpass` - високочастотні, пропускають сигнали після деякої граничної частоти;
- `bandpass` - смугові, пропускають сигнали в деякій смузі частот;
- `stoppass` - ослаблюють сигнали в деякій смузі частот.

У середовищі MATLAB цифрові фільтри можна розрахувати щонайменше трьома способами:

- в командному вікні;
- за допомогою пакета `sptool`;
- за допомогою пакета `fdatool`.

## ***1. Розрахунок цифрових фільтрів в командному вікні***

1.1 Розрахунок коефіцієнтів  $a_k$  нерекурсивного фільтра за допомогою функції `fir1`.

Функція `fir1` реалізує обчислення за методом зворотного перетворення Фур'є з використанням вікон:

`a = fir1 (n, Wn, 'ftype', window, 'normalization')`

де,  $n$  - порядок фільтра - ціле парне число (кількість коефіцієнтів фільтра дорівнює  $n + 1$ );

$W_n$  - відносна частота зрізу (по відношенню до частоти Найквіста, рівній половині частоти дискретизації  $F_d$ ) - число в діапазоні  $(0,1)$ ; є вектором з двох чисел, якщо фільтр смуговий або режекторний;

'`ftype`' - тип фільтра (якщо відсутня або '`low`' - фільтр нижніх частот (ФНЧ); '`high`' - фільтр верхніх частот (ФВЧ); '`bandpass`' - смуговий; '`stop`' - режекторний);

`window` - вектор-стовпець з  $n + 1$  елементів (за замовчуванням застосовується вікно Хеммінга `hamming (n + 1)`);

'`normalization`' - нормировка АЧХ і ПЧХ (за замовчуванням значення '`scale`' - середнє арифметичне значення АЧХ в центрі смуги пропускання; '`noscale`' - нормировка не проводиться).

*Приклад:*

`window = rectwin (7)`                      % синтез прямокутного вікна з 7 відліків



a = fir1 (6,0.5, window) % розрахунок коеф-в КІХ-фільтра з нормалізацією

*Результат:*

a = [-0.1148 0.0000 0.3443 0.5409 0.3443 0.0000 -0.1148]

Порівнюючи ці результати з розрахованими вручну коефіцієнтами, неважко бачити різницю. Наприклад, ручні розрахунки дають  $a_0 = 0.5$ , тоді як в MATLAB ми отримали  $a_0 = 0.5409$ . Природно припустити, що причиною тому що проводиться за замовчуванням нормировка ПХ. перевіримо це припущення, задаючи в програмі значення 'noscale' для параметра нормалізації:

window = rectwin(7) % синтез прямокутного вікна з 7 відліків

a = fir1 (6,0.5, window, 'noscale') % розрахунок коеф-в КІХ-фільтра без нормалізації.

*Результат:*

a = [-0.1061 0.0000 0.3183 0.5000 0.3183 0.0000 -0.1061]

### 1.2 Розрахунок коефіцієнтів $a_k$ і $b_k$ рекурсивного фільтра

Команда генерування коефіцієнтів  $a_k$  і  $b_k$  рекурсивного фільтра Баттерворта:

[a, b] = butter (n, Wn, 'ftype')

Сенс позначень той же, що і для нерекурсивних фільтрів.

Якщо  $W_n$  є двоелементною вектором, тобто  $W_n = [w_1 \ w_2]$ , функція butter повертає коефіцієнти смугового фільтра порядку  $2n$  з смугою пропускання (або затримування - для режекторних фільтрів)  $w_1 < w < w_2$ .

### 1.3 Побудова графіків АЧХ і ФЧХ

Здійснюється командою

freqz (a, b)

або

freqz (a, b, N) % N - число відліків АЧХ і ФЧХ

Графіки АЧХ і ФЧХ будуються в діапазоні 0 - 1 нормованих (по частоті Найквіста  $F_d / 2$ ) значень частоти частот (рис.16).

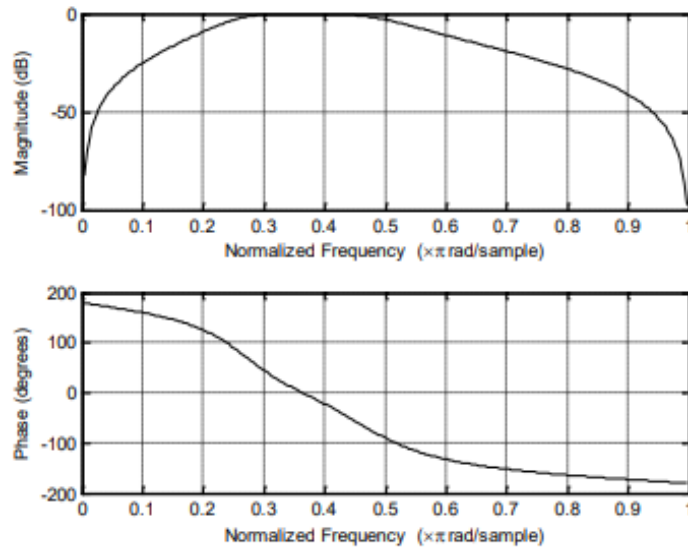


Рисунок 16. «АЧХ і ФЧХ смугового фільтра Баттерворта 2-го порядку для  $w1 = 0.25, w2 = 0.5$ »

#### 1.4 Побудова графіка імпульсної перехідної характеристики (ІПХ)

Побудова графіка ІПХ здійснюється парою команд:

```
[h, t] = impz (a, b);
```

```
stem (t, h)
```

При цьому в разі рекурсивного фільтра кількість виведених відліків ІПХ вибирається автоматично (рис.17).

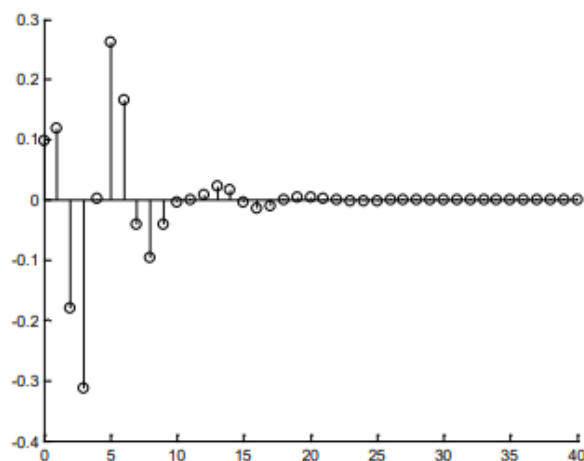


Рисунок 17. «ІПХ смугового фільтра Баттерворта 2-го порядку для  $w1 = 0.25, w2 = 0.5$ »

Пара команд

```
[h, t] = impz (a, b, N); % N - число відліків ІПХ
```

```
stem (t, h)
```

дозволяє вивести на графік N відліків ППХ.

### 1.5 Моделювання процесу цифрової фільтрації

Таке моделювання проводиться в 3 етапи:

- 1) моделювання вхідного процесу  $x_n$  і побудова його графіка;
- 2) цифрова фільтрація процесу  $x_n$ , в результаті якої отримуємо процес  $y_n$ ;
- 3) побудова графіка процесу  $y_n$  і зіставлення його з графіком процесу  $x_n$ .

#### 1.5.1. Моделювання вхідного процесу $x_n$ і побудова його графіка

Моделювання відрізка вхідного процесу  $x_n$  у вигляді гармонійного сигналу частотою  $f_0$ , тривалістю T с, дискретизованого з частотою Fd:

$$t = 0: 1 / Fd: T;$$

$$x = \sin (2 * \pi * f_0 * t);$$

Побудова графіка процесу  $x_n$ :

$$\text{plot} (t, x);$$

Моделювання відрізка вхідного процесу  $s_n$  у вигляді прямокутних імпульсів одиничної висоти, що слідує з частотою  $f_0$ , тривалістю  $\tau = \frac{1}{f_0}$  с, дискретизованого з частотою Fd:

$$t = 0: 1 / Fd: T;$$

$$s = (\text{square} (2 * \pi * f_0 * t, f_0 * \tau * 100) + 1) / 2;$$

Моделювання відрізка шуму  $r_n$  у вигляді (0; 1) -Нормально білого шуму тієї ж тривалості T с, дискретизованого з частотою Fd:

$$r = \text{randn} (1, \text{length} (t));$$

Моделювання відрізка вхідного процесу у вигляді адитивної суміші гармонійного сигналу одиничної амплітуди і (0; 1) -Нормально білого шуму:

$$x_r = x + r;$$

#### 1.5.2 Два способи фільтрації в командному вікні

Два способи:

- 1) за допомогою функції згортки:

$$y = \text{conv} (x, a);$$

- 2) за допомогою функції дискретної фільтрації:

$y = \text{filter}(a, b, x)$

Особливості фільтрації за допомогою функції згортки:

1) можна працювати тільки з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ) фільтра;

2) довжина відгуку дорівнює сумі довжин впливу і ППХ мінус одиниця.

Особливості фільтрації за допомогою функції дискретної фільтрації:

1) можна працювати як з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ), так і з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ) фільтрів;

2) довжина відгуку дорівнює довжині впливу.

## ***2. Розрахунок фільтра $a_k$ за допомогою пакета *sptool****

### **2.1 Інтерактивна оболонка SPTool**

Процедура SPTool активізує графічну інтерактивну оболонку пакету Signal, що включає:

- засіб пошуку та перегляду сигналів - Signal Browser;
- проектувальник фільтрів - Filter Designer;
- засіб перегляду характеристик фільтрів - Filter Viewer;
- засіб перегляду спектра - Spectrum Viewer.

Оболонка активізується шляхом введення в командному вікні MATLAB команди `sptool`. В результаті на екрані з'являється вікно.

Вікно SPTool складається з трьох областей - Signals (Сигнали), Filters (Фільтри) і Spectra (Спектри), під кожною з яких є кнопки, вказують на те, що можна зробити з об'єктами, розташованими в цих областях. Так, під областю Signals знаходиться лише кнопка View. Це означає,

що об'єкти (сигнали), імена яких розташовані в цій галузі, можуть бути тільки переглянуті.

Під областю Filters знаходяться чотири кнопки, які вказують на те, що об'єкти (фільтри), імена яких розміщуються всередині нього, можуть бути:

- створені (кнопка New Design);

- відредаговані (кнопка Edit Design);
- переглянуті (кнопка View);
- застосовані до одного або декількох об'єктів, виділених в області Signal (кнопка Apply).

Аналогічно, з об'єктами області Spectra (спектрами) можна виробляти такі дії:

- створювати (кнопка Create);
- переглядати (кнопка View);
- оновлювати, тобто створювати заново під тим же ім'ям (кнопка Update).

У середині областей зазвичай розміщуються імена (ідентифікатори) відповідних змінних або процедур, що входять у відкритий в SPTool файл з розширенням .spt (ім'я цього файлу вказується в заголовку вікна SPTool).

При першому зверненні в заголовку вікна знаходиться ім'я untitled.spt, все три області - порожні, а з кнопок, розташованих нижче, активною є тільки одна - New Design. Таким чином, після входження в оболонку SPTool доступною є тільки операція створення нового фільтра. Щоб активізувати інші кнопки, необхідно звідкись імпортувати дані про якийсь (або якихось) сигнали (сигналах). Такі дані повинні бути сформовані іншими засобами, ніж сама оболонка SPTool, (наприклад, вони можуть бути результатом виконання деякої програми MATLAB або результатом моделювання в середовищі SimuLink) і записані як деякі змінні або в робочому просторі (Workspace), або на диску в файлі з розширенням .mat.

## 2.2 Приклад

Для активізації пакета набираємо в командному вікні команду sptool. Потім у вікні в колонці кнопок "Filters" необхідно натиснути кнопку "New".

У вікні «Filter Designer» необхідно:

- 1) встановлення частоти дискретизації (задаємо 100 Гц);
- 2) вибрати в позиції Algorithm значення Kaiser Window FIR (вибираємо з 3-х варіантів: Equiripple FIR, Least Square FIR і Kaiser Window FIR);
- 3) відключити прапорець Minimum Order;
- 4) задати Order = 6;

- 5) задати Type = lowpass;
- 6) задати Passband Fp = 25;
- 7) відключити прапорець Autodesigne;
- 8) закрити вікно Filter Designer;
- 9) у вікні sptool в колонці Filters натиснути кнопку View;
- 10) у вікні Filter Viewer спостерігаємо графіки АЧХ, ФЧХ, ІПХ (ІПХ спостерігаємо після активізації відповідного прапорця).

*Примітка 1:* ми вибрали в позиції Algoritm значення Kaiser Window FIR. Крім цього алгоритму, є ще два алгоритму: Equiripple FIR, Least Square FIR. З усіх цих 3-х алгоритмів тільки алгоритм Кайзера реалізує метод зворотного перетворення Фур'є з ваговим вікном Кайзера. При значенні параметра 0 вікно Кайзера перетворюється в звичайне прямокутне вікно.

Як показує експеримент, розраховані таким чином коефіцієнти ФНЧ виявляються ненормованими, тобто будуть в точності рівними обчисленим вручну.

*Примітка 2:* щоб дізнатися значення коефіцієнтів, потрібно:

- 1) активізувати графік ІПХ, клацнувши по ньому мишкою;
- 2) активізувати вертикальні маркери (кнопкою, розташованої під меню);
- 3) помістити один з маркерів (всього є 2 маркера - 1-й зображується суцільною вертикальною лінією. 2-й - пунктирною) навпроти потрібного відліку ІПХ;
- 4) вважати значення відліку ІПХ в спеціальному віконці.

На рис.18 показано вікно Filter Viewer (в режимі переддрукарського перегляду) для даного конкретного випадку (маркер 1 встановлено проти максимального відліку, рівного 0.5, а маркер 2 - проти суміжного відліку, рівного 0.3183).

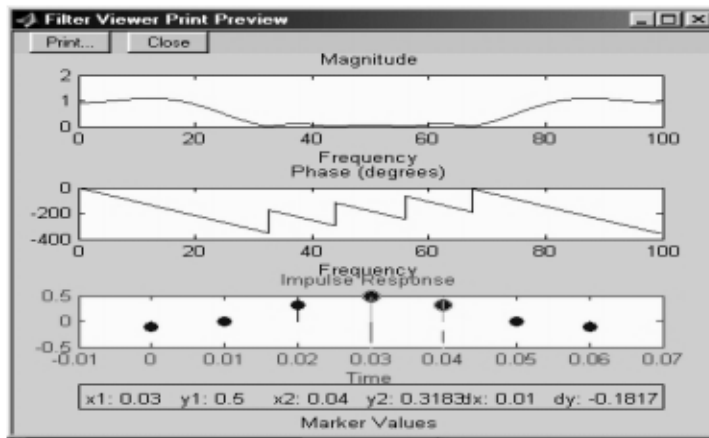


Рисунок 18. «Вікно Filter Viewer»

Пакет `sptool` дозволяє моделювати процес фільтрації за допомогою розрахованого фільтра. Для цього в середу пакета `sptool` (як уже було сказано) потрібно імпортувати вхідний сигнал, що згенерував в робочому вікні програми MATLAB. Фільтрація відбувається після натискання кнопки `Apply`.

### 3. Розрахунок фільтра $a_k$ за допомогою пакета `fdatool`

Для активізації пакета потрібно в командному вікні набрати команду `fdatool`. Потім у вікні в розділі `Design Filter` задати:

- 1) `Design Method: FIR = Window`;
- 2) `Window Specifications: Window = Rectangular`;
- 3) `Filter order: Specify order = 6`;
- 4) встановлення частоти дискретизації ( $F_s = 100$  Гц);
- 5) задати `Filter Type = lowpass`;
- 6) задати `Passband  $F_c = 25$` ;
- 7) за допомогою кнопок під меню включаємо режим перегляду коефіцієнтів фільтра.

В результаті проведених розрахунків переконуємося, що тут за замовчуванням виробляється нормування ППХ (див. вище `fir1`).

Пакет `fdatool` не дозволяє моделювати процес фільтрації за допомогою розрахованого фільтра. Однак розраховані коефіцієнти фільтра можна імпортувати

з-поміж fdatool в середу MATLAB, де їх можна використовувати для моделювання фільтрації.

#### 4. Зіставлення способів розрахунку

Розрахунки в командному вікні: гідність - гнучкість управління розрахунками; недолік - складний синтаксис команд; особливість - коефіцієнти фільтра за умовчанням є нормованими, хоча завданням значення 'noscale' параметра 'normalization' можна відмовитися від нормування.

Розрахунки за допомогою пакета sptool: гідність - не потрібно пам'ятати синтаксис команд; недолік - обмежений набір вікон для методу зворотного перетворення Фур'є (тільки вікно Кайзера); особливість – обчислюються тільки ненормовані коефіцієнти фільтра.

Розрахунки за допомогою пакета fdatool: гідність - не потрібно пам'ятати синтаксис команд; особливість - обчислюються тільки нормовані коефіцієнти фільтра.

#### Порядок виконання:

Тут також беремо заданий сумарний сигнал і проводимо смугову фільтрацію Баттерворта с КЧХ (рис.19)

```
F = 10;           % Частота
polosa = 1;      % 1/2 ширини плоси пропускання фільтра в процентах
                  від величини середньої частоти

dF = polosa*F/100;
Fmi = F-dF;
Fma = F+dF;
dpFilt = designfilt ( ' bandpassiir ' , 'FilterOrder' , F, 'HalfPowerFrequency1' ,
Fmi, 'HalfPowerFrequency2' , Fma, 'SampleRate' , Fs);
ch0F = filter(bpFilt, x);
sr = mean(findpeaks(abs(ch0F(400000:end))))
```



Для визначення фази синусоїд в часовій області, було проведено порівняння кожної з них з синтетичної синусоїдою з такою ж частотою, але з нульовим фазовим зрушенням. Це було виконано за допомогою готової процедури фільтрації Гільберта (рис.20).

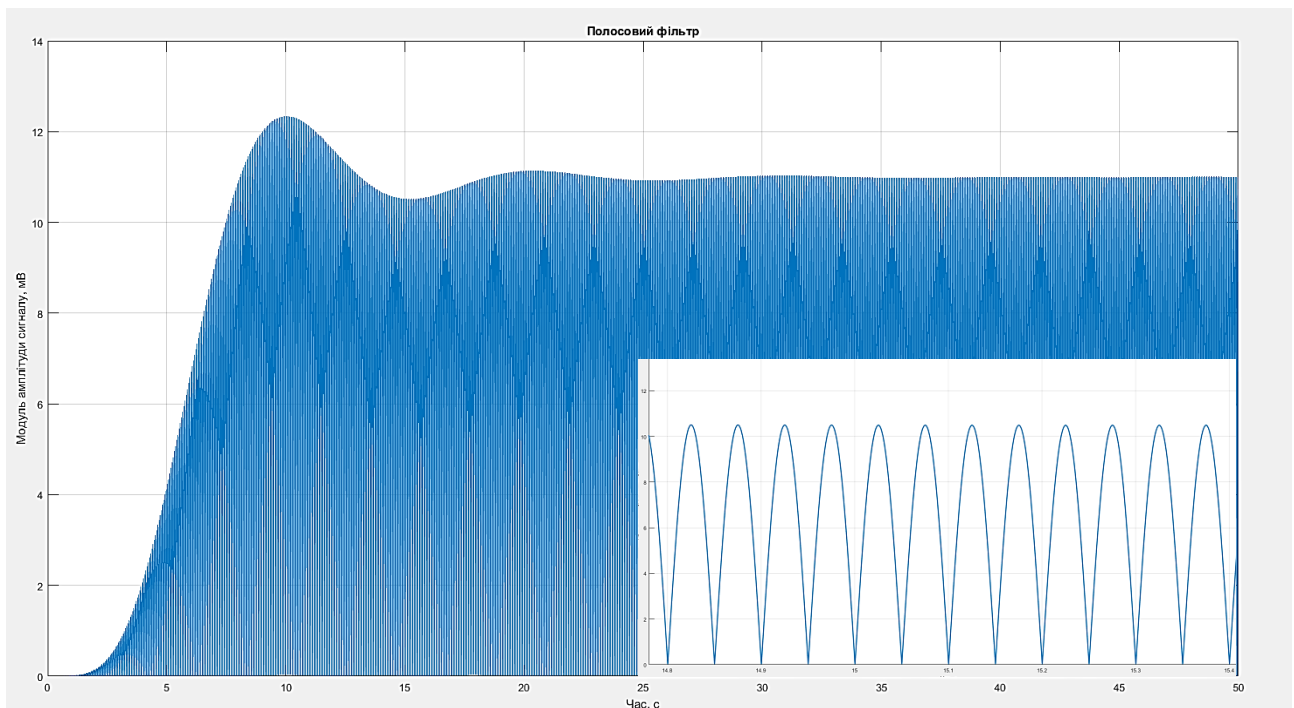
```

ch1 = 9*sin(2*pi*F*t);
ch1F = filter(bpFilt, ch1);
plot(t(400000:end),ch1F(400000:end), 'Color', 'k', 'LineWidth', 1, 'Marker', 'o',
'MarkerSize', 4, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerFaceColor', 'k'); hold on
plot(t(400000:end),ch0F(400000:end), 'Color', 'r', 'LineWidth', 1, 'Marker', 'o',
'MarkerSize', 4, 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r'); hold on
grid on

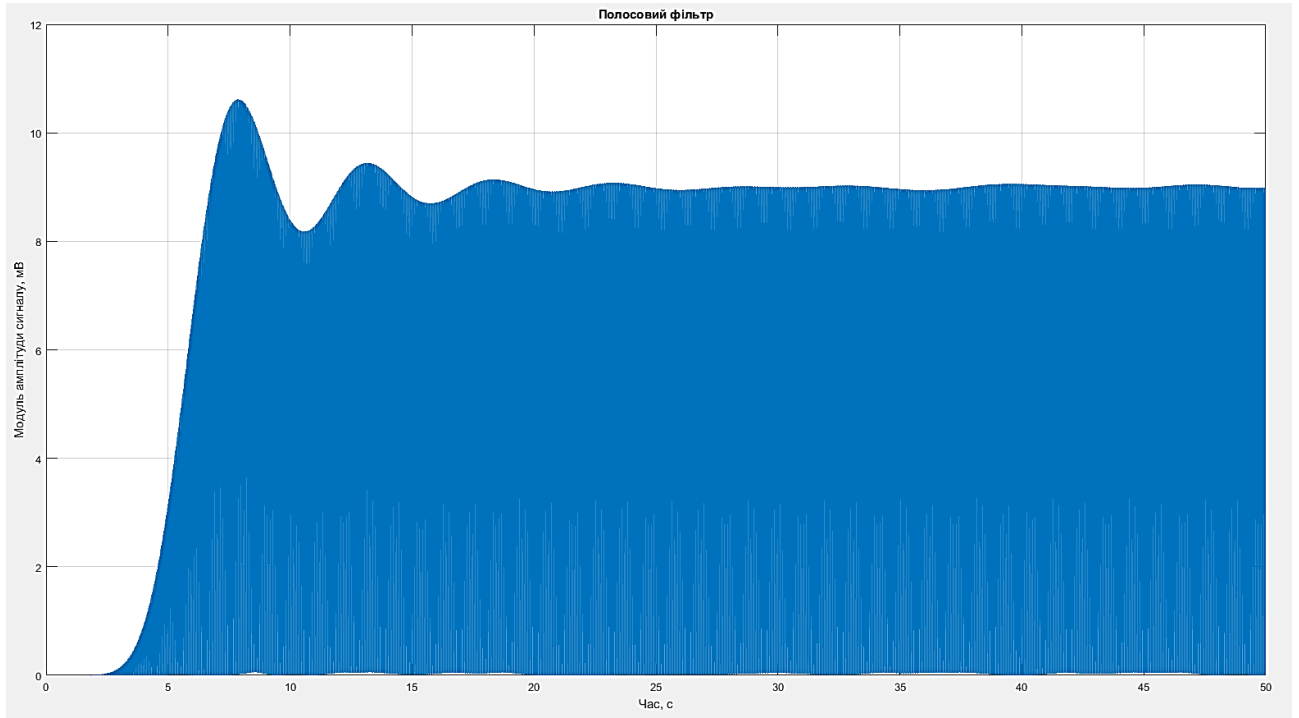
H0 = hilbert(ch0F(400000:end));
H1=hilbert(ch1F(400000:end));
Fase = unwrap(angle(H1 / H0)/pi*180)

```

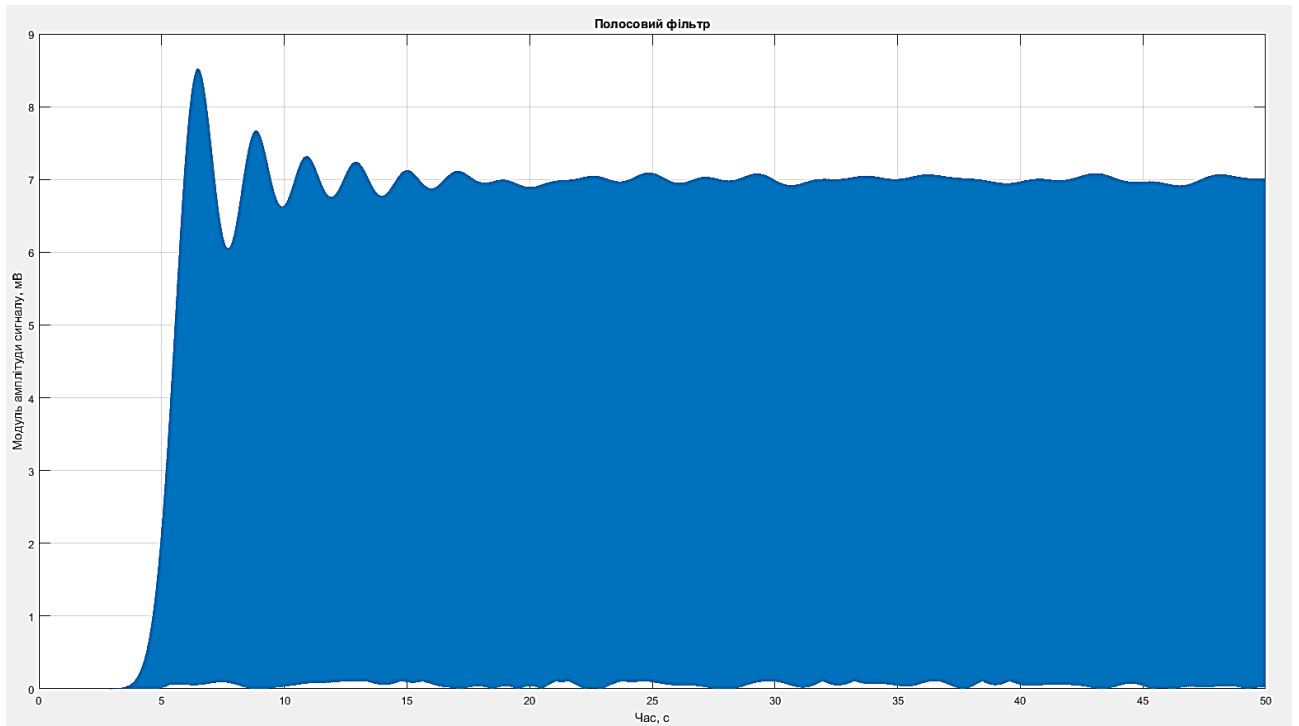
a)



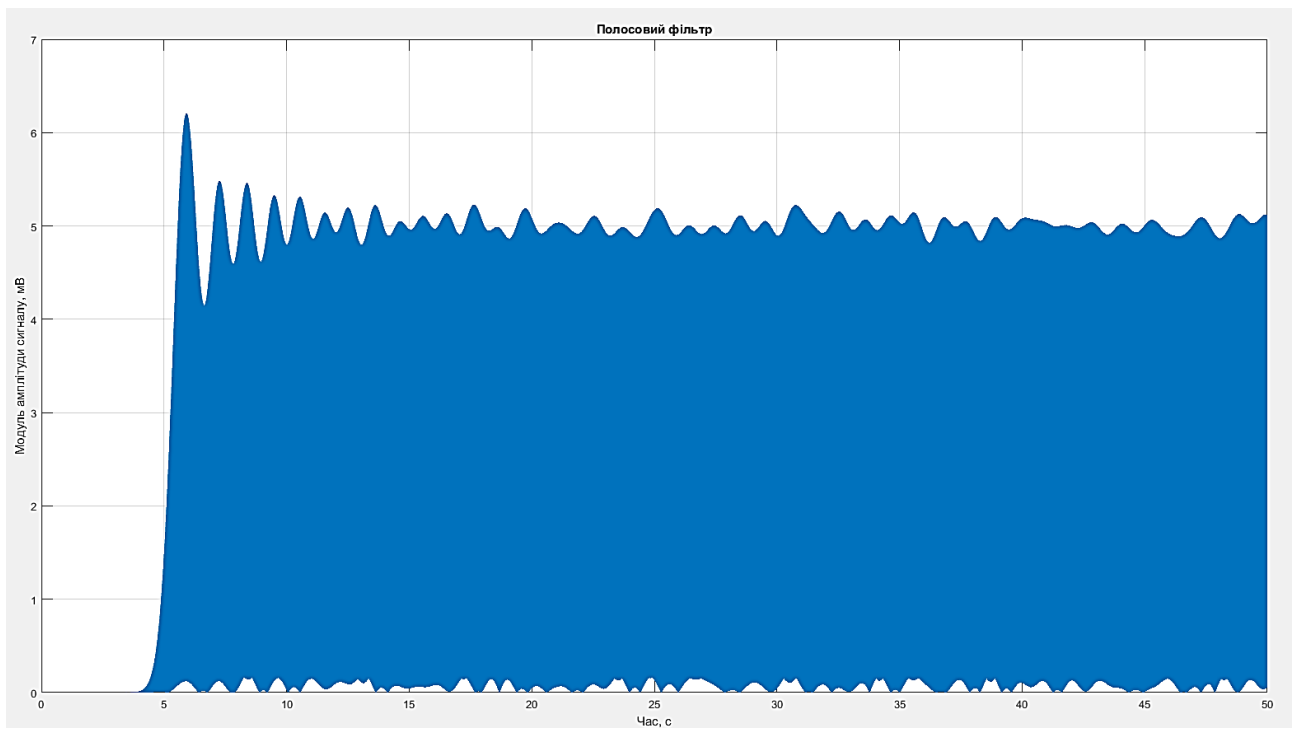
**б)**



**в)**



**г)**



Д)

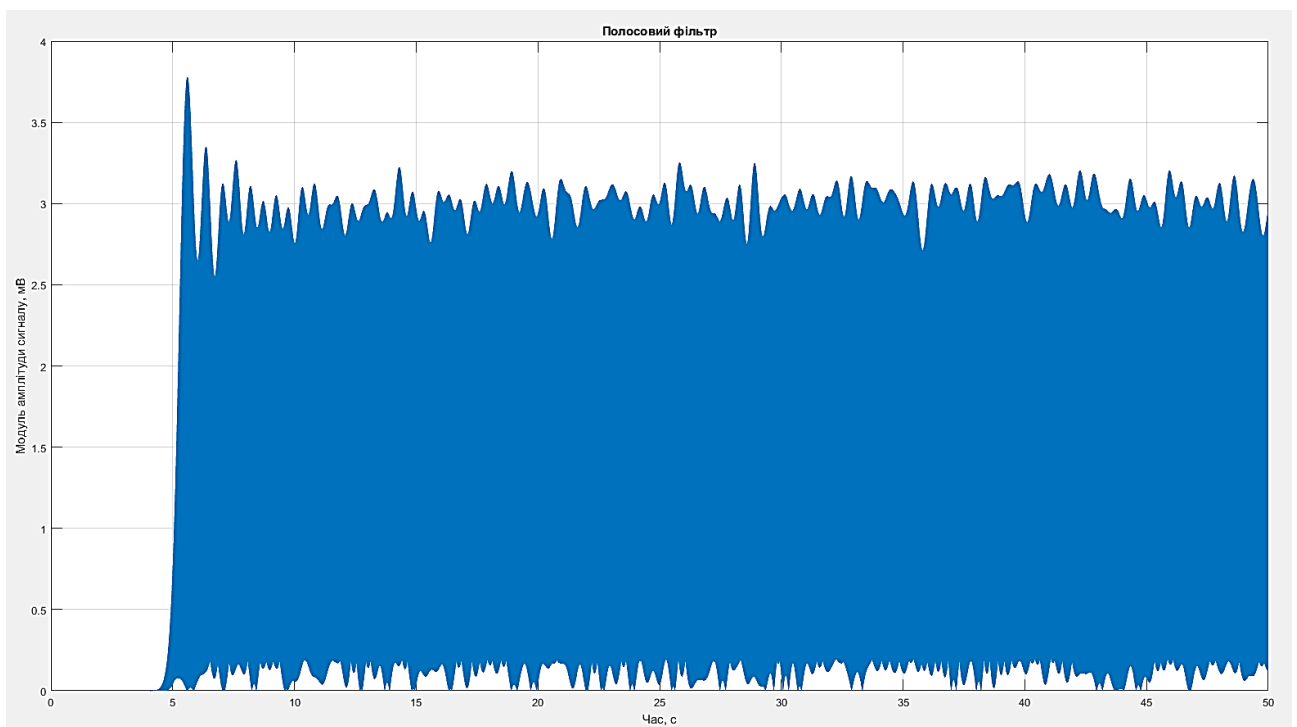


Рисунок 19. «Полосові фільтри на різних частотах: а – 10 Гц, б – 20 Гц, в – 50 Гц, г – 100 Гц, д – 200 Гц»

На полосових фільтрах спочатку спостерігається великий скачок, який швидко стабілізується. На різній частоті час стабілізації відрізняється. І для цього на кожній частоті по формулі  $t = n * \frac{1}{f}$  було розраховано період виходу синусоїд на стабільну роботу.

На частоті 10 Гц  $n$  дорівнює 280, для 20 Гц – 500, 50 Гц – 1000, 100 Гц – 1500, 200 Гц – 1600. Тобто, чим більша частота, тим більше періодів треба відступити, щоб отримати стабільний сигнал.

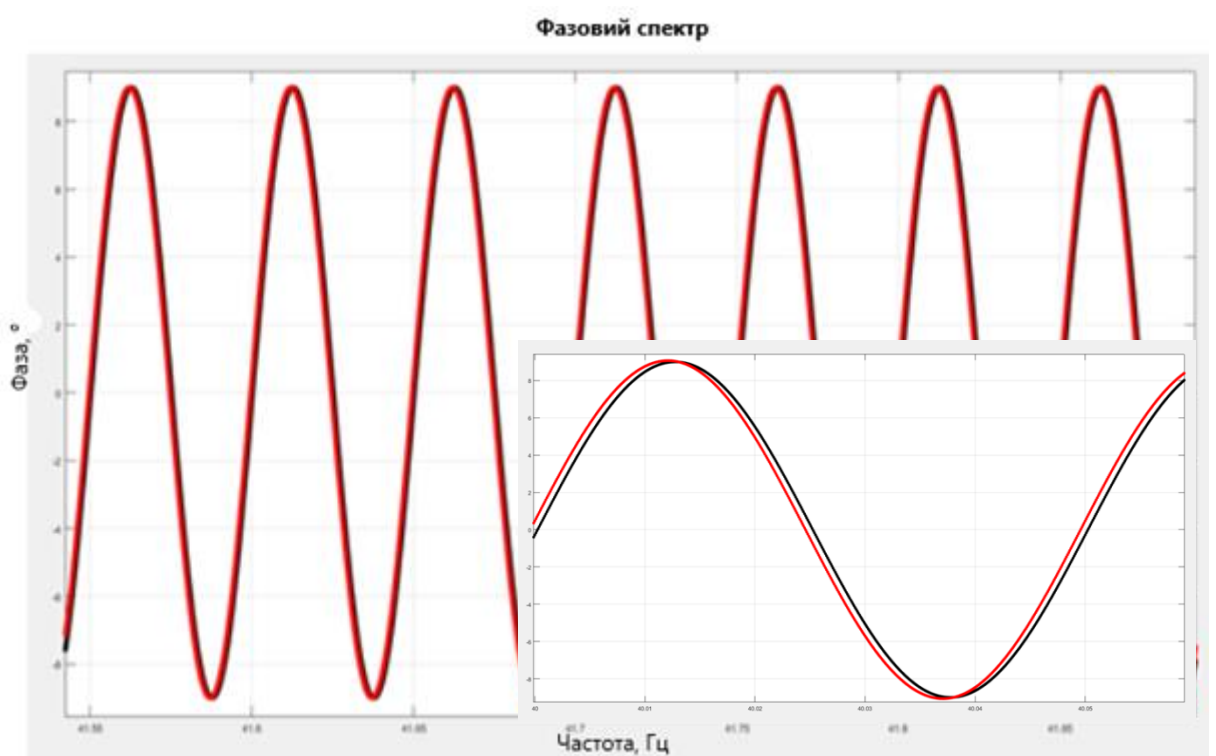


Рисунок 20. «Фазовий спектр»

З допомогою програми було знято точні значення амплітуд та фаз. Та для вирішення найліпшого методу обробки було розраховано середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  (табл. 2). Переводячи в проценти видно, що при обробці в часовій області амплітудні та фазові характеристики відрізняються на 0,256 % та 0,569 % відповідно. А при обробці в частотній області – на 0,016 % та 0,112 %.

Табл. 2 « Порівняння амплітудних та фазових характеристик при обробці в частотній та часовій областях»

	Фаза			Амплітуда		
	L	L фур.	L філ.	A	A фур.	A філ.
	0	-0,02033	0,06559	11	10,99301	10,9682
	5	5,070734	5,107057	9	8,999345	9,013116
	10	9,949127	9,936954	7	7,003865	6,994633
	15	15,14991	15,20257	5	4,992204	5,0025
	20	19,91011	19,87255	3	2,998163	2,999267
<b>X</b>	10	10,01191	10,03694	7	6,997317	6,995543
<b>D(x)</b>	50	49,8877	49,4329	8	7,997486	7,959011
<b><math>\sigma</math></b>	7,071068	7,063122	7,030854	2,828427	2,827983	2,821172
<b>%</b>		0,112367	0,568716		0,015716	0,256509

Отже, для того щоб досягти більш точного результату, слід робити обробку в частотній області з допомогою перетворення Фур'є.

### **Висновок:**

У даній роботі стояла проблема вибору методу обробки даних МТЗ. Був вибір між способом обробки в частотній області за допомогою перетворення Фур'є і в часовій області з використанням фільтрації. Порівняння відбувалося за допомогою пакета програм MatLab. З її допомогою був побудований синтетичний сумарний сигнал складається з 5 сигналів з різними амплітудами і частотами і з додаванням випадкового шуму. Потім за допомогою фільтрації і ШПФ були побудовані амплітудний і фазовий спектри. З них були зняті точні значення амплітуд і фаз, які в подальшому були порівняні з даними вихідного сигналу. Порівняння відбувалося за допомогою рівняння середньквдратичного відхилення. При пререкладі в відсотки було виявлено, що при обробці за допомогою фільтрації вихідні дані відрізняються від початкових на 0,256% і 0,596%, а за допомогою перетворення Фур'є на 0,016% і на 0,112%.

Отже, можна зробити висновок, для того щоб досягти більш точного результату, слід робити обробку в частотній області з допомогою претворення Фур'є. Також при виборі обробки в частотній області ми знижуємо час вимірювань польових робіт, тому що при обробці в часовій області велика кількість часу йде на вихід сигналу на стабільну роботу. У підсумку це підвищує продуктивність робіт і знижує собівартість польових робіт на точці.

### Литература:

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, Научный мир, 2009.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. Москва, Недра, 1992.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. Москва, Диалог-МГУ, 1997.
4. Семенов В. Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985.
5. Варенцов Ив.М. Разрешающая способность современных ЭМ геофизических методов с естественным возбуждением поля // Разведка и охрана недр. № 8. 2006., Настоящее издание. С. xx-xx.
6. Алексеев Д. А., Куликов В. А., Яковлев А. Г. и др. Опыт применения метода АМТЗ при поисках полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2004.
7. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Изд-во МГУ, 1984.
8. Жданов М. С. Электроразведка М: Недра, 1986.
9. Инструкция по электроразведке. - Л.: Недра, 1984.
10. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. Matlab. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб.: ПИТЕР, 2002.
11. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: ПИТЕР, 2002.
12. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: второе издание, 2006 г.