

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
Міністерство освіти і науки України

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

ЯРМОЛАЙ ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396.967

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИКА СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ
ВИБУХОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ ВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ**

126 Інформаційні системи та технології
Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І.О. Ярмолай

Науковий керівник – Пампуха Ігор Володимирович, кандидат технічних наук,
доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Ярмолай І.О. Методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю **126** - інформаційні системи та технології (галузь знань **12** - інформаційні технології) – Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України. - Київ, 2026.

В умовах довготривалої збройної агресії російської федерації проти України безпека людини, суспільства й держави суттєво залежать від надійного функціонування оборони країни. Ключовим аспектом в обороні держави є розвідка. Розвідка є найважливішим вид забезпечення військ інформацією про стан супротивника. Одним з таких видів є пасивна дистанційна розвідка на основі сейсмоакустичного моніторингу. Пасивна сейсмоакустична розвідка - це збір даних про об'єкти або території без безпосереднього контакту з ними за допомогою сейсмічних та акустичних сенсорів.

Ведення розвідки на основі сейсмічного моніторингу базується на фізичних явищах та властивостях пружних хвиль, що поширюються в природних та техногенних об'єктах. Ці хвилі можуть бути викликані, як зовнішніми процесами (вибухи, переміщення техніки, проліт літальних апаратів тощо), так і внутрішніми процесами (старіння та втома будівельних об'єктів, розповсюдження сейсмічних хвиль в Земній поверхні тощо). При цьому, ведення розвідки на основі акустичного моніторингу базується на поширенні та реєстрації звукових (акустичних) хвиль, а також на властивостях середовищ,

через які ці хвилі проходять. Завдяки різниці швидкості поширення акустичних хвиль відносно сейсмічних в повітрі і твердому середовищі дає змогу отримувати

додаткову інформацію про відстань до об'єкта та місце (координати) розташування. Тому ведення дистанційної розвідки на основі акустичного моніторингу доповнює ведення дистанційної розвідки на основі сейсмічного моніторингу.

В роботі сформульована і поставлена наукова задача, яка полягає в розробці методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

У роботі розглянуто загальні положення щодо ведення пасивної дистанційної розвідки (моніторингу). Розглянуто існуючі акустичні та сейсмічні системи дистанційної розвідки, надано аналіз існуючих математичних моделей, методів і методик, що використовуються в сейсмоакустичній розвідці, їх переваги та недоліки. Проведено аналіз існуючих систем пасивної дистанційної розвідки у військовій сфері на основі моніторингу сейсмічних і акустичних полів.

Запропоновано новий метод сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Суть якого полягає у відображенні вибухового поля у вектор вільних параметрів параметричної математичної моделі, динаміка якого характеризує, як саме вибухове поле, так і джерело вибухів.

Представлена розробка нової параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки, та зроблено обґрунтування вибору виду параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Проведено обґрунтування вибору критеріїв та параметрів для математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Проведена перевірка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухового поля, яка показала, що ухилення параметричної моделі від даних спостереження не перевищує 7 % в метриці L_2 .

Представлена нова параметрична математична модель нероздільних сигналів моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу, як узагальнення моделі роздільних сигналів вибухових полів на випадок їх нероздільності. Для оцінки її адекватності проведено імітаційне моделювання вибухового поля, яке моделюється реалізацією стохастичного процесу в кожній точці спостереження. По результатам імітаційного моделювання можна зробити висновок, адекватність моделі нероздільних сигналів моніторингу вибухових полів для імітованого нероздільного сигналу не перевищує 5%.

Представлено удосконалену методику моніторингу сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. Сутність методики полягає у апроксимації роздільних і не роздільних сигналів вибухових полів параметричними математичними моделями, що відображають ці сигнали у векторний Евклідовий простір інформативних параметрів. При цьому, кожний вектор в Евклідовому просторі інформативних параметрів описує сигнал вибухового поля, який порівнюється в вибраній метриці з еталонними векторами інформативних параметрів сигналів вибухових полів. Методика відрізняється від існуючих тим, що створюються параметричні математичні моделі роздільних і не роздільних сигналів та здійснюється їх класифікація шляхом порівняння вектору інформативних параметрів поточного сигналу вибухового поля з еталонними векторами інформативних параметрів сигналів

вибухових полів. Для проведення моніторингу вибухових полів, необхідно набрати статистику для різних сигналів вибухових полів та передаточних функцій середовищ, в яких розповсюджується сигнал. Це забезпечить апріорні уявлення як про вибухове поле в точках дослідження, так і про самі сигнали вибухових полів. Апріорне знання випадкового процесу завад дозволить значною мірою послабити їх вплив на отримання оцінок сигналу вибухового поля, що досліджується. Це ослаблення досягається оптимізацією процедур обробки, що враховують апріорні статистики випадкового процесу перешкод. В роботі враховується вплив нестабільності параметрів процесу дослідження та оптимізації процедури обробки спостережених даних за критеріями, що враховують характеристики природного фону завад. Процес моніторингу вибухових полів зводиться до оцінки інформативних параметрів параметричних математичних моделей роздільних та нероздільних сигналів вибухового поля, суперпозиція яких формує саме вибухове поле.

Представлена розробка методичних рекомендацій щодо застосування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Представлені в роботі математичні моделі, метод і методика орієновані на інтеграцію в алгоритми штучного інтелекту для автоматизованих систем сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. В сучасних умовах розвитку технологій автоматизовані системи сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки є необхідною складовою ведення пасивної розвідки.

Ключові слова: сейсмоакустичний моніторинг, моніторинг, сейсмоакустичні дослідження, математична модель, множини, сейсмічна розвідка (сейсморозвідка), метод, розповсюдження, прийняття рішення, критерії, реальний час, сейсмоакустичний сигнал, моделі, класифікація, імітаційне моделювання.

ABSTRACT

Yarmolai I.O. Methodology for applying seismoacoustic monitoring of explosive fields for conducting remote sensing.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 126 Information Systems and Technologies – (Field of Study 12 Information Technologies). Taras Shevchenko National University of Kyiv.– Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2026.

In the context of the Russian Federation's long-term armed aggression against Ukraine, the security of the individual, society, and the state depends significantly on the reliable functioning of the country's defense. A key aspect of the state's defense is intelligence. Intelligence is the most critical type of providing troops with information about the enemy's condition. One of these types is passive remote reconnaissance based on seismoacoustic monitoring. Passive seismoacoustic reconnaissance is the collection of data about objects or territories without direct contact with them using seismic and acoustic sensors.

Conducting reconnaissance using seismic monitoring relies on the physical phenomena and properties of elastic waves that propagate in natural and artificial objects. These waves can be caused by both external processes (explosions, equipment movement, aircraft flight, etc.) and internal processes (aging and fatigue of construction objects, propagation of seismic waves along the Earth's surface, etc.). At the same time, reconnaissance based on acoustic monitoring is based on the propagation and registration of sound (acoustic) waves, as well as on the properties of the media through which these waves pass. The difference in the propagation speed of acoustic waves relative to seismic waves in air and solid media enables additional information to be obtained about the distance to the object and its location (coordinates). Therefore, remote reconnaissance based on acoustic monitoring complements that based on seismic monitoring.

Thus, the work formulates a scientific problem: to develop a methodology for seismoacoustic monitoring of explosive fields to support remote reconnaissance.

The work examines the hidden conditions for conducting passive remote reconnaissance (monitoring). The central acoustic and seismic remote-sensing systems are reviewed, and the principal mathematical models, methods, and techniques employed in seismic-acoustic sensing are analyzed, along with their advantages. An analysis of existing passive remote reconnaissance systems in the military domain was conducted by monitoring seismic and acoustic fields.

A new method for seismoacoustic monitoring of individual vibrator-field signals for remote reconnaissance has been proposed. The essence of this lies in the imaged Vibuch field as a vector of parameters of a parametric mathematical model, whose dynamics characterize both the Vibuch field itself and the group of Vibuchs.

A new parametric mathematical model for seismoacoustic monitoring of individual signals in vibrator fields for remote reconnaissance is presented, and the selection of the appropriate model for this purpose is detailed.

The selection of criteria and parameters for mathematical models of seismoacoustic monitoring of vibrator fields for remote reconnaissance was carried out.

The adequacy of the parametric mathematical model for seismoacoustic monitoring of individual signals in the explosive field was assessed, and it was found that the model's deviation from the observational data does not exceed 7% in the metric L_2 .

A new parametric mathematical model of indivisible signals for monitoring explosive fields for remote reconnaissance, based on seismoacoustic analysis, is presented as a generalization of the model for separate signals in the case of indivisibility. To assess the adequacy of the model of indivisible signals for monitoring explosive fields, a simulation of the explosive field was conducted by implementing a stochastic process at each observation point. Based on simulation

modeling results, the model's adequacy for monitoring explosive fields with simulated indivisible signals does not exceed 5%.

An improved method of monitoring explosive field signals for remote reconnaissance based on seismoacoustic analysis is presented. The essence of the method lies in approximating separate and non-separable signals in explosive fields using parametric mathematical models that represent these signals in the vector Euclidean space of informative parameters. In this case, each vector in the Euclidean space of informative parameters represents a blast-field signal, and the signal is compared against the reference vectors of informative parameters for the blast field. The method differs from existing methods in that parametric mathematical models of both separable and non-separable signals are constructed, and classification is performed by comparing the vector of informative parameters of the current blast field signal with reference vectors of informative parameters of blast field signals. To monitor blast fields, it is necessary to collect statistics on various blast-field signals and on the transfer functions of the environments in which the signals propagate. This will provide a priori ideas about both the blast field at the study points and the blast field signals themselves. A priori knowledge of the random process of interference will significantly reduce its influence on obtaining estimates of the blast field signal under study. This reduction is achieved by optimizing processing procedures that account for the a priori statistics of the random interference process. The work accounts for parameter instability in the research process. It optimizes the procedure for processing observed data according to criteria that reflect the characteristics of the natural background of interference. The process of monitoring explosive fields is reduced to assessing informative parameters of parametric mathematical models of individual and inseparable signals of the explosive field, the superposition of which constitutes the field itself.

The development of methodological recommendations for the use of an improved seismoacoustic monitoring method in explosive fields to conduct remote reconnaissance is presented.

The dissertation presents mathematical models, methods, and techniques for integrating piece intelligence into algorithms for automated seismoacoustic monitoring of vibration fields for remote monitoring intelligence. In current practice, the development of technology for automated seismoacoustic monitoring of vibrator fields for remote reconnaissance and the necessary storage of passive reconnaissance data.

Keywords: seismoacoustic monitoring, monitoring, seismoacoustic research, mathematical model, sets, seismic exploration (seismic exploration), method, distribution, decision-making, criteria, real-time, seismoacoustic signal, models, classification, simulation modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП	13
РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ІСНУЮЧИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА МЕТОДИК ВЕДЕННЯ ПАСИВНОЇ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ НА ОСНОВІ СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ.....	
1.1 Аналіз основних підходів щодо ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу	25
1.2 Аналіз існуючих математичних моделей, методів і методик, що використовуються в сейсмоакустичній розвідці	42
1.2.1 Аналіз сейсмоакустичних моделей ведення дистанційної розвідки	42
1.2.2 Аналіз сейсмоакустичних методів ведення дистанційної розвідки та їх недоліки	45
1.2.3 Аналіз сейсмоакустичних методик ведення дистанційної розвідки та їх недоліки	52
Висновки до першого розділу	54
РОЗДІЛ II. МЕТОД СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИБУХОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ ВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ	
2.1 Метод сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	55

2.2 Розробка параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	62
2.2.1 Параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	62
2.2.2 Вирішення параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки відносно її вільних параметрів	64
2.2.3 Перевірка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	72
Висновки до другого розділу	82

РОЗДІЛ III. УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИБУХОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ ВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ (ВПВДР)

3.1 Обґрунтування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	84
3.2 Параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	85
3.2.1 Математична модель вибухового поля	86
3.2.2 Параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	92
3.2.3 Оцінка адекватності параметричної математичної моделі	

сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	95
3.3 Удосконалена методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	103
3.4 Розробка методичних рекомендацій щодо застосування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки	110
Висновки до третього розділу	114
<hr/>	
ВИСНОВКИ	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	118
ДОДАТКИ	126

ВСТУП

Актуальність теми дисертаційних досліджень впливає із сучасних умов життєдіяльності нашої держави. В умовах військової агресії російської федерації проти нашої держави, ключову роль відіграє дистанційна розвідка, яка дає можливість не вступаючи в безпосередній контакт з супротивником здійснювати пошук як живої сили супротивника, так і його техніку і зброю [1,2]. Це дає можливість знешкоджувати військовий ресурс супротивника, зберігаючи свій. З початком широкомасштабного вторгнення російської федерації в Україну значно зросла інтенсивність ведення вогню. В умовах бойових дій оцінка типу озброєння і військової техніки, з метою визначення належності даного типу до сторони ведення дій, разом з визначенням місцеположення джерела вибухів, дає можливість вражати ворога, застосовуючи методи дистанційної розвідки, та мінімізувати ймовірність враження своїх цілей. Застосування противником нових засобів ураження, висока мобільність військ та логістики висувають підвищені вимоги до розвідки, фактично розширюючи фазу активних дій розвідки до цілодобової. Це потребує вдосконалення системи моніторингу та управління безпекою в сучасних умовах ведення бойових дій [2]. Одним з підходів збору корисної інформації про супротивника є ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу. Пасивна розвідка – це вид розвідки, який не потребує прямого контакту з об'єктом або генерації власного сигналу, а базується на аналізі сигналів, що надходять від об'єкта або навколишнього середовища. Розвиток автоматизованих систем моніторингу хвильових полів різної природи, таких як

акустичних, сейсмічних, тощо, дає можливість вести дистанційну розвідку за допомогою оцінки динаміки цих полів. Сейсмічна розвідка є складною динамічною системою [3,4]. У ній відбуваються процеси перетворення енергії і інформації, найважливішими з яких є збудження сейсмічним джерелом первинних хвиль, поширення їх в геологічному середовищі і акустичних хвиль, прийом і запис пружних коливань в точках спостереження, обробка і інтерпретація записів [5].

Ведення розвідки на основі сейсмічного моніторингу базується на фізичних явищах та властивостях пружних хвиль, які поширюються в природних та техногенних об'єктах [6]. Ці хвилі можуть бути викликані, як зовнішніми процесами (вибухи, переміщення техніки, проліт літальних апаратів тощо), так і внутрішніми процесами (старіння та втома будівельних об'єктів, розповсюдження сейсмічних хвиль в Земній поверхні тощо) [3]. Дистанційна розвідка на основі сейсмічного моніторингу має наступні переваги перед веденням дистанційної розвідки на основі акустичного моніторингу:

- забезпечується дослідження об'єкта в більш широкому спектральному діапазоні;
- дає змогу отримувати інформацію на значно більшу дистанцію завдяки тому, що затухання хвиль в твердому матеріалі суттєво менше ніж в повітрі;
- можливість отримувати інформацію майже в реальному часі, оскільки швидкість пружних хвиль в твердому матеріалі в рази більше ніж швидкість хвиль в повітрі.

Ведення розвідки на основі акустичного моніторингу базується на поширенні й реєстрації звукових (акустичних) хвиль, а також на властивостях середовищ, через які ці хвилі проходять [4]. Перевагами ведення дистанційної розвідки на основі акустичного моніторингу перед веденням дистанційної розвідки на основі сейсмічного моніторингу практично відсутні. При цьому, різниця швидкості поширення хвиль в повітрі і твердому середовищі дає

можливість отримувати додаткову інформацію про об'єкти, що досліджується [3]. Таким чином, акустичний моніторинг є додатковим інформативним каналом.

Узагальнюючи вище зазначене, можна стверджувати, ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу дозволяє:

1. Дистанційно отримувати інформацію;
2. Динаміка змін поведінки об'єкта спостереження досліджується в реальному часі або майже в реальному часі;
3. Порівняно невеликий об'єм пам'яті для збереження записів дозволяє оцінити динаміку процесу на великій передісторії;
4. Сучасне обладнання для ведення сейсмічного і акустичного моніторингу забезпечує дослідження об'єкта в широкому спектральному, та динамічному діапазоні;
5. Отримувати інформацію не генеруючи поля, які би міг зареєструвати супротивник, тобто приховане ведення розвідки.

В даній роботі запропоновано використовувати сейсмоакустичний моніторинг для дослідження вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Для сейсмоакустичного моніторингу хвильове поле вибухових сигналів моделюється стохастичним процесом, реалізація якого реєструється в певних точках простору в реальному часі [4]. Зареєстрована реалізація стохастичного процесу являє собою детерміновану функцію, яка містить в собі інформацію про джерела вибухових сигналів.

Для отримання корисної інформації від зареєстрованої реалізації стохастичного процесу необхідно побудувати параметричну математичну модель з інформативними параметрами, тобто параметрами які несуть корисну інформацію про стохастичний процес [4]. Таким чином динаміка вектору параметрів моделі буде характеризувати стохастичний процес в цілому. Такий підхід положено в основу для розроблених математичних моделей, методу та

удосконаленої методики ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу.

Отримання інформації про противника із використанням високотехнологічних засобів вимагає застосування принципів системного аналізу і методів синтезу різночасових даних від фізично різних за своєю будовою засобів добування інформації [7]. Для якісного процесу перетворення вхідного потоку окремих даних від усіх засобів в єдиний завершений результат у вигляді відомостей про склад, угруповання, ймовірний характер дій і наміри противника варто розглянути можливості застосування технологій обробки великих масивів даних. Основою для формування такого роду відомостей має стати тематична обробка даних автоматизованих систем дистанційної розвідки.

Основними перевагами використання сейсмоакустичних систем в автоматизованих системах дистанційної розвідки є:

а) стійке автоматичне функціонування: у складних метеоумовах (дощ, сніг, туман); в умовах поганої оптичної видимості (ніч); у напрямках на джерела сильної освітленості (сонце); в умовах сильного задимлення і запилення; в умовах пересіченого рельєфу місцевості (пагорби, гірські перевали, ущелини, русла річок і інше);

б) скритність (прихованість), оскільки не формують зондуючі сигналів, що дозволяють визначити їх наявність і місце розташування. Це виключає їх завчасне виявлення і знищення;

в) можливість дистанційного ведення розвідки (на достатньо великих відстанях);

Задачею сейсмоакустичних систем розвідки є виявлення присутності в середовищі розповсюдження сейсмічних та акустичних хвиль, які виникають під час пересування техніки, особового складу та застосування зброї супротивником в зоні спостереження, за допомогою сейсмічних та акустичних датчиків. Це дозволяє дистанційно проводити розвідку, а саме виявити противника, визначити

координати та видати інформацію споживачам для оперативного прийняття рішення. При цьому використання сейсмоакустичних систем дозволить виключити втрати особового складу та застосувати в якості елемента системи ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. Таким чином, постає наукова задача щодо удосконалення методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Актуальність теми дослідження в контексті наукових програм і проектів.

Робота має безпосередній зв'язок із сучасними потребами застосування наукових методів і методик введення дистанційної розвідки. Тематика дисертації відповідає основним напрямам розвитку науки і техніки відповідно до Постанови від 30.04.2024 № 476 "Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні". Результати дисертаційної роботи використані під час виконання науково-дослідних робіт на тему: "Побудова адаптивних сенсорних мереж спеціального призначення для забезпечення їх зв'язності в умовах заводової обстановки та кібервпливу" (відповідно до Плану науково, науково-технічної діяльності Збройних Сил України на 2024 рік, яка виконувалися в Військовому інституті Київського національного університету імені Тараса Шевченка); "Методи управління станом захищеності інформаційних ресурсів в умовах впливу кібератак на військових об'єктах та об'єктах критичної інфраструктури держави» (відповідно до Плану науково, науково-технічної діяльності Збройних Сил України на 2025 рік, яка виконувалися в Військовому інституті Київського національного університету імені Тараса Шевченка); "Обґрунтування пріоритетних напрямів нарощування функціональності автоматизованих систем управління на етапах серійного виробництва, експлуатації та впровадження" (відповідно до Плану науково, науково-

технічної діяльності Збройних Сил України на 2025 рік, яка виконувалися в Центральному науково-дослідному інституті Збройних Сил України).

Мета за завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення достовірності класифікації сигналів при проведенні сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Для досягнення поставленої мети вирішені такі завдання:

1. Проведено аналіз основних підходів щодо ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу.

2. Проведено аналіз математичних моделей, методів і методик, що використовуються в сейсмоакустичній розвідці.

3. Проведено аналіз систем моніторингу сейсмоакустичних полів.

4. Розроблено метод сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

5. Побудовано і вирішено параметричну математичну модель сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

6. Перевірена адекватність параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на даних натурних досліджень.

7. Розроблено і вирішено параметричну математичну модель нероздільних сигналів вибухових полів, як удосконалення математичної моделі роздільних сигналів.

8. Проведена оцінка адекватності моделі нероздільних сигналів вибухового поля в рамках імітаційного моделювання сигналів вибухового поля удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу на основі сейсмоакустичного аналізу).

9. Розроблена удосконалена методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу.

10. Розроблено методичні рекомендації щодо застосування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу сейсмоакустичних полів, що генеруються вибухами.

Предметом дослідження є математичні моделі, методи і методики моніторингу сейсмоакустичних полів.

Методи досліджень. Для розв'язання науково-прикладних задач у дисертації застосовувалися: методи теорії ймовірностей, теорії стохастичних процесів та математичної статистики; методи математичного аналізу, функціонального аналізу та лінійної алгебри; методологія стохастичної оптимізації; теорія прийняття рішень; комп'ютерне моделювання.

Проведення статистичного аналізу експериментальних даних здійснювалося із залученням таких методів: теоретичні методи, які включають математичне моделювання сейсмоакустичного поля поверхневих вибухів, системно-структурний аналіз процесу моніторингу, спектрально-хвильовий аналіз сигналів; чисельні методи використовувались для вирішення задачі нелінійної регресії при вирішенні математичних моделей сейсмоакустичного моніторингу роздільних та нероздільних сигналів; експериментальні методи передбачають польові вимірювання, оцінку завадостійкості в умовах військових фонів; методи обробки результатів включають спектральний-аналіз, статистичну фільтрацію шумів, оцінку похибок і параметрів а для визначення достовірності математичних моделей сейсмоакустичного моніторингу роздільних та нероздільних сигналів.

В дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше створено метод сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР на основі аналізу потоків роздільних і не роздільних сейсмоакустичних сигналів. Сутність методу полягає в представленні сигналів вибухових полів вектором Евклідового простору інформативних параметрів, який описує сигнал вибухового поля. Метод відрізняється від існуючих тим, що кожний сигнал вибухового поля описується множиною інформативних параметрів, які відповідно до вибраного критерію порівнюються з еталонними параметрами сигналів вибухових полів.

2. Вперше розроблено параметричні математичні моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки роздільних і не роздільних сигналів. Сутність даних моделей полягає у виборі та обґрунтуванні простору інформативних параметрів, що характеризують сигнали вибухових полів. Вони відрізняються від існуючих, тим, що враховують фізичні характеристики сигналів вибухових полів (спектральні характеристики та їх декременти) та суттєво зменшують розмірність простору інформативних параметрів. При цьому, для роздільних сигналів розглядається параметрична математична модель суперпозиції осциляторів, а для не роздільних сигналів - параметрична математична модель суперпозиції роздільних сигналів.

3. Удосконалено методику сейсмоакустичного моніторингу сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Сутність методики полягає у апроксимації роздільних і не роздільних сигналів вибухових полів параметричними математичними моделями, що відображають ці сигнали у векторний Евклідовий простір інформативних параметрів. При цьому, кожний вектор в Евклідовому просторі інформативних параметрів описує сигнал вибухового поля, який порівнюється в вибраній метриці з еталонними векторами інформативних параметрів сигналів вибухових полів. Методика відрізняється від існуючих тим, що створюються параметричні математичні

моделі роздільних і не роздільних сигналів та здійснюється їх класифікація шляхом порівняння вектору інформативних параметрів поточного сигналу вибухового поля з еталонними векторами інформативних параметрів сигналів вибухових полів.

Особистий внесок здобувача

Усі наукові результати, що становлять зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. За результатами виконаних досліджень опубліковано 8 наукових праць.

У роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать:

У [51] автору належить розробка і співавторство в вирішенні параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибуху окремого міномета.

У [52] автору належить розробка і вирішення математичної моделі для автоматизованих систем сейсмоакустичного моніторингу класифікації мінометного вибуху для ведення дистанційної розвідки.

У [59] автору належить співавторство в вирішенні математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу природніх та інженерних об'єктів.

Огляд попередніх робіт. Результати інших авторів.

1. Д.В. Зайцев, А.П. Наконечний, С.О. Пахарєв, І.О. Луценко Військова розвідка: навчальний посібник. Київський університет, 2016. –335 с.

2. Д. Зайцев, Я. Король, Ю. Лісніченко, Актуальні проблеми ведення військової розвідки в умовах сучасного міста. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України Том 82 № 1 (2020), с. 45-57.

3. Francis S.H. 1975. Global propagation of atmospheric gravity waves. A review: Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 37, pp. 1011-1054.

4. Gossaro E.Hooken. 1975. Waves in the Atmosphere. Elsevier Scientific Publishing Company, P. 532.

5. Liu SC, Fagel LW. Earthquake interaction by fast Fourier transform. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1971 Aug;97(4):1223-37.
6. Artru J. Ducic V. и другие. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis. 2005. *Geophys. J. Int.*, 160, pp. 840-848.
7. Konyukh G.V., Mikhailenko B.G., Mikhailov A. A. Application of the integral Laguerre transforms for forward seismic modeling // *J. Comput. Acoustics*. 2001. V. 9, N 4. P. 1523–1541.
8. Mikhailenko B.G., Mikhailov A. A., Reshetova G.V. Numerical viscoelastic modeling by the spectral Laguerre method // *Geophys. Prospecting*. 2003. N 51. P. 37-48.
9. В. Г. Суярко, В. М. Величко, О. В. Гаврилюк, В. В. Сухов, О. В. Нижник, В. С. Білецький, А. В. Матвеев, О. А. Улицький, О. В. Чуєнко. Інженерна геологія (з основами геотехніки): підручник для студентів вищих навчальних закладів / Колектив авторів: — Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2019. — 278 с
10. Карташов М.В. Імовірність, процеси, статистика.— Київ ВПЦ Київський університет, 2007.— 504 с.
11. Mikhailenko B.G. Spectral Laguerre method for the approximation solution of time-dependent problems. *Appl. Math. Lett.*, 12, 1999. pp. 105-110.
12. Stein S., Wysession M. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. London: Wiley-Blackwell, 2002. P. 400
13. Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. and Reshetova G.V. 2003. Numerical Modeling of transient seismic fields in viscoelastic media based on the Laguerre spectral method. *Pure Appl. Geophys.*, 160, 1207-1224.
14. David H. von Seggern. *CRC Standard Curves and Surfaces with Mathematica*, Third Edition Publish-er: CRC Press 2016. 460 p.
15. V.S. Mostovyi, S.V, Mostovyi Mathematical model of seismic signal, as a flow of physically non realizable single seismic waves // *Geophysical journal* 2016, Vol. 38, № 5, p. 166-169.

16. Нікіфоров М.М., Пампуха І.В., Лоза В.М., Щербина С.В., Шевцов А.Г. Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів / Геофізичний журнал, № 6, том 40, 2018, С 150 – 156.

17. V. Mostovyi, S. Toliupa, A. Shevchenko Optimization of the dynamic parameters of an object in a mathematical model of seismo-acoustic monitoring of natural and engineering objects Science based technologies NAU № 2(58), 2023 pp 112-119.

18. V. Mostovyy. Mathematical model of the signal emission dynamics in seismic-acoustic monitoring systems of building structures // information systems and technologies security № 2(8), 2024 p.86-90.

19. Anton Panda, Volodymyr Nahorni, Sergey Shcherbina, Vasily Mostovoy. Management Systems in Production Engineering 2025, Volume 33, Issue 4, pp. 525-530, DOI 10.2478/mspe-2025-0053.

20. Cherevko, I., Kril, T., Mostovyy V., Shcherbyna, S., Structural health monitoring of heritage buildings under military actions. International Journal of Conservation Science. Volume 16, Issue 4, 2025, pp. 1755-1774, https://ijcs.ro/public/IJCS-25-04_09_Cherevko.pdf.

Апробація результатів дисертації. Основні інтерпольовані результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-практичних семінарах «Структурний аналіз та ідентифікація динамічних параметрів структури систем сейсмоакустичного моніторингу» XVIII «Міжнародної науково-практичної конференції Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє», Київ 2022. «Оптимальні оцінки параметрів моделі сейсмічного моніторингу» XVIII «Міжнародної науково-практичної конференції Військова освіта і наука: сьогодення та майбутнє», Київ 2022.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 8 робіт, з яких 6 це статті у фахових журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку

фахових видань МОН та 2 – публікації у матеріалах конференцій (у тому числі, міжнародних)

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків. Дисертація містить 23 рисунки, 1 таблицю, список використаних джерел зі 68 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 129 сторінок.

РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ІСНУЮЧИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА МЕТОДИК ВЕДЕННЯ ПАСИВНОЇ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ НА ОСНОВІ СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

1.1 Аналіз основних підходів щодо ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу

Розвідка - найважливіший вид забезпечення бойових дій військ, що є комплексом заходів командирів і штабів усіх ланок з метою своєчасного отримання інформації про противника, місцевості, кліматичних та погодних умов у районі майбутніх бойових дій для найбільш ефективного застосування своїх сил і засобів по розгрому противника [1]. Нині обсяг завдань, розв'язуваних розвідкою, значно зріс. Водночас суттєво скоротилися терміни їх виконання. Збільшилися вимоги до часу передачі і точності визначення координат об'єктів (цілей) противника [1,2]. Застосування противником нових далекобійних, високоточних, всепогодних засобів поразки, висока мобільність військ, їх мобільні та рішучі дії під час бою висувають підвищені вимоги до розвідки, фактично розширюючи фазу активних дій розвідки до цілодобової [2].

Одним з підходів збору корисної інформації про супротивника є ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу. Пасивна розвідка – це вид розвідки, який не потребує прямого контакту з об'єктом або генерації власного сигналу, а базується на аналізі сигналів, що надходять від об'єкта або навколишнього середовища [7].

Активна розвідка – це вид розвідки, який потребує прямого контакту з об'єктом або генерації власного сигналу. Активна розвідка базується на аналізі сигналів, які є відгуком на власні сигнали, які генерує спостерігач [1].

На відміну від активної розвідки, пасивна розвідка дозволяє збирати інформацію, залишаючись невиявленим. При пасивній розвідці система дослідження не генерує активних сигналів, тому її важко виявити засобами радіоелектронної боротьби.

Під пасивною сейсмічною розвідкою (ПСР) розуміється добування інформації шляхом виявлення і аналізу деформаційних та зсувних полів в земній поверхні, що виникають під впливом різних вибухів [3]. ПСР визначає: координати епіцентру вибуху, потужність і час вибуху, кількість вибухів в групі. Сейсмічний метод виявлення і ідентифікації ядерних вибухів отримав загальне визнання як один з основних, крім вибухів в космосі і в повітрі на великих висотах (понад декілька десятків кілометрів) [4]. Сейсмічний метод застосовний для виявлення ядерних вибухів як на малих, так і на великих відстанях, що досягають до 17 000 км.

Сейсмічна розвідка є складною динамічною системою. У ній відбуваються процеси перетворення енергії і інформації, найважливішими з яких є збудження сейсмічним джерелом первинних хвиль, поширення їх в геологічному середовищі з утворенням у неоднорідних середовищах вторинних хвиль, прийом і запис пружниділх коливань в точках спостереження, обробка і інтерпретація сейсмічних записів [3].

В даний час недостатньо просто виявити супротивника. Чинник часу дедалі більше виходить першому плані, тобто на граничне скорочення циклу «виявлення-доповідь-реагування». Це вимагає такої точності визначення розташування противника, яка дозволяла б негайно завдати йому шкоди. При цьому сам процес виявлення противника зазнає змін у зв'язку із застосуванням ним різних засобів, як пасивних – приховування своїх дій, так і активних – проведення контррозвідувальних заходів.

Сучасний розвиток автоматизованих систем моніторингу хвильових полів різної природи, таких як акустичних, сейсмічних, сейсмоакустичних,

електромагнітних, тощо, дає можливість вести дистанційну розвідку за допомогою оцінки динаміки цих полів [4]. Такий підхід дає можливість вести розвідку в повітрі (дослідження літальних апаратів різного типу), на землі, під землею(дослідження тунелів) та при дослідженні об'єктів різної інфраструктури, таких як колекторні мережі, трубопроводи, тощо [4].

Системи акустичної розвідки призначені для виявлення, ідентифікації та визначення розташування джерел звуку, використовуючи різні акустичні датчики та спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу звукових сигналів [7]. Їхнє застосування охоплює як військову сферу (наприклад, для пошуку підводних човнів або виявлення наземної техніки), так і цивільні завдання (моніторинг навколишнього середовища, забезпечення безпеки).

Акустичний моніторинг охоплює звуковий, та ультразвуковий діапазон частот. Сейсмоакустичний моніторинг охоплює діапазон частот від інфразвукового до ультразвукового [4].

Для прийому, реєстрації та аналізу акустичних сигналів, властивих промисловим, військово-промисловим об'єктам, а також різним видам бойової техніки, застосовуються звуко- та вібровимірювальні прилади.

Дальність дії акустичних приладів лежить у межах від кількох десятків метрів до кількох кілометрів і залежить від потужності акустичних сигналів та стану середовища поширення.

Акустичні розвідувальні прилади використовуються:

- вимірювальні мікрофони, що перекривають інфразвуковий, звуковий та ультразвуковий діапазони;

- прецизійні шумоміри, що дозволяють з великою точністю вимірювати рівні шумів, звуку та вібрацій у широкому діапазоні частот (у комплекті з аналізаторами спектра акустичних сигналів);

- геофонні датчики, що вимірюють сейсмічні хвилі;

- частотні аналізатори та спектрометри, що забезпечують визначення АЧХ джерел акустичних шумів.

Для акустичних вимірювань зазвичай використовуються кілька комплектів звуко- та вібровимірювальних приладів, до складу яких входять:

- вимірювальні конденсаторні мікрофони, що забезпечують прийом акустичних коливань в діапазоні частот від 0,01 Гц до 140 кГц;

- імпульсні прецизійні шумоміри, призначені для вимірювання звуку та вібрацій (моделі 2209 та 2203).

Динамічний діапазон вимірюваних рівнів – 15 – 160 дБ (модель 2209) та 15 – 150 дБ (модель 2203).

Діапазон частот: 2 Гц - 70 кГц (модель 2209) та 10 Гц - 25 кГц (модель 2203).

Шумоміри моделей 2209 і 2203 у комплекті з набором фільтрів можуть використовуватися як портативні звукоаналізатори.

Сейсмічний моніторинг відрізняється тим, що має свій, специфічний, діапазон частот. Він охоплює інфразвуковий та нижню частину звукового діапазону [4]. Для кожного з об'єктів моніторингу його характеристики змінюються повільно в часі, і в той же час іноді процеси проходять дуже швидко (інколи катастрофічно). Він має справу з об'єктами різних геометричних розмірів, від оцінки переміщення людей та малих літальних апаратів, аж до розмірів Земної кулі, пари оцінці землетрусів. Але останнім часом значну частку дослідження займає активний – це такий експеримент, який пов'язаний із генерацією зондувальних сигналів різного типу, як за спектральним складом, так і за тривалістю та потужністю [4].

Сейсмоакустичний моніторинг являє собою множину режимних спостережень, причому режим самих спостережень і характеристики сигналів зондування залежать від цілей, переслідуюваних даним дослідженням [4].

Під активним моніторингом розумітимемо моніторинг функції відгуку на сигнал зондування, тобто вхідний для об'єкта, що досліджується, сигнал [4]. Пасивний сейсмоакустичний моніторинг це режимні спостереження за динамікою сейсмічного поля з метою отримання інформації про об'єкт дослідження [4].

Оскільки для розвідки, що використовує активний моніторинг, генерується сигнал, який зондує середовище, то процес моніторингу може бути розкритий супротивником шляхом реєстрації та дослідження зондувального сигналу. При пасивному моніторингу таке дослідження не можливе через відсутність активного випромінювання дослідницькою апаратурою. У цій роботі розглядається виключно пасивний сейсмоакустичний моніторинг. Для ведення пасивної розвідки перш за все, необхідно побудувати математичну модель дослідження, в якій відображалися б найбільш суттєві моменти процесу моніторингу, включаючи як сам процес, так і супутні цьому процесу перешкоди і природний шумовий фон, що накладається на дослідження [4]. Априорне знання випадкового процесу перешкод дозволить значною мірою послабити його вплив на отримання оцінок параметрів процесу, що сприймається як корисний сигнал. Це ослаблення досягається оптимізацією процедур обробки, що враховують априорні статистики випадкового процесу перешкод [4].

Пасивний моніторинг заснований на можливості будувати фізично змістовні висновки про динаміку процесу дослідження, що базуються на аналізі сигналів, що генерують сейсмоакустичне поле [4].

Оскільки дослідницька апаратура та її можливості в точних вимірах і можливості комп'ютерної техніки багато в чому визначають змістовність фізичних висновків обробки отриманої інформації, ми зупинимося на основних принципах отримання запису сейсмоакустичного поля, пов'язаних з різними осциляціями, зокрема, коливаннями ґрунту [3]. Обговоренню принципів сейсмічного запису та розробці сейсмометрів присвячено багато робіт. Перші

сейсмографи були винайдені в 1870-х і 1880-х роках. Перший сейсмограф був виготовлений Філіппо Чеккі приблизно в 1875 році. Сеймоскоп запускав запис на пристрої, а потім поверхня запису автоматично створювала графічну ілюстрацію поштовхів (сейсмограму). Однак прилад був недостатньо чутливим, і перша сейсмограма, отримана за його допомогою, була отримана в 1887 році, до того часу Джон Мілн вже продемонстрував свою конструкцію в Японії. [5]. Сучасні прилади використовують електронні датчики, підсилювачі та реєструючі пристрої. Більшість із них широкосмугові та охоплюють широкий діапазон частот. Деякі сейсмометри можуть вимірювати коливання частот від 500 Гц до 0,00118 Гц (від $1/500 = 0,002$ секунди за цикл до $1/0,00118 = 850$ секунд за цикл). Деякі сучасні прилади використовують «тріаксіальну» або «гальперинську» конструкцію, в якій три ідентичні датчики руху встановлюються під одним кутом до вертикалі, але на 120 градусів один від одного по горизонталі. Вертикальні та горизонтальні рухи можна обчислити за вихідними сигналами трьох датчиків [5]. Сейсмометри неминуче вносять деякі спотворення у вимірювані сигнали, але професійно розроблені системи мають ретельно охарактеризовані частотні перетворення. Сучасні прилади розрізняються за чутливістю у трьох широких діапазонах: геофони – від 50 до 750 В/м; локальні геологічні сейсмографи – близько 1500 В/м; та телесеїсмографи, які використовуються для обстеження Землі, – близько 20 000 В/м. [3,5]. Прилади бувають трьох основних типів: короткоперіодні, довгоперіодні та широкосмугові. Короткоперіодні та довгоперіодні прилади вимірюють швидкість і дуже чутливі; однак вони «обрізають» сигнал або виходять за межі шкали при коливаннях ґрунту, які досить сильні, щоб їх відчувала людина [6]. 24-бітовий аналого-цифровий канал перетворення широко використовується [5]. Практичні пристрої лінійні приблизно до мільйонної частки. Сейсмометри поставляються з двома типами вихідних сигналів: аналоговими та цифровими. Аналогові сейсмографи вимагають аналогового

реєструючого обладнання, можливо, включає аналого-цифровий перетворювач. Вихідні дані цифрового сейсмографа можна передати на комп'ютер. Він представляє дані в стандартному цифровому форматі (часто SE2 по Ethernet).

Для систем сейсмоакустичного моніторингу використовуються датчики з частотним діапазоном від тисячних до сотень Гц [3-5]. Нижче наведені приклади датчики закордонного та вітчизняного виробництва.

Guralp CMG-40T - це міцний трикомпонентний широкосмуговий сейсмометр зі стандартним часом відгуку від 60 секунд (0,017 Гц) до 100 Гц, що характеризується конструкцією зі зворотним зв'язком по силі, петлею з високим коефіцієнтом посилення (що усуває механічну нелінійність) та корпусом з нержавіючої сталі. Основні характеристики включають прямі виходи швидкості, низьке енергоспоживання (780 мВт) та вагу близько 2,5 кг. Він підходить як для тимчасових, так і для напівпостійних установок у районах з помірним шумом і доступний як інтегрований блок (CMG-40TD) або як свердловинний зонд (CMG-40T-B). Країна виробник, Німеччина

PCE-AC50GLF акселерометр (IEPE стандарт) 0,5...5000 Гц ; Чутливість, 100 mV/g Країна виробник, Німеччина

Geophone 4.5hz Sensor Seismic Survey Equipment High Sensitivity 28.8 V/m/s (0,01 hz 100hz) Країна виробник, Німеччина

VTV121 ; Діапазон виміру вібрації 0...50; mm/s; Частотний діапазон 10...1000 Гц. Виробництво США.

Trillium Compact 120: 0,008 Гц. – 100 Гц.; чутливість :25 мм/с. Виробник ТОВ NORMA-C Україна.

АС: 0,005 Гц. – 200 Гц. чутливість :25 V/m/s. Виробник ТОВ РОДЕН Україна.

Історичні успіхи застосування сейсmodатчиків в розвідувально-сигналізаційних приладах (РСП), призначених для розвідки наземних рухомих об'єктів належать США. Висока ефективність застосування РСП привела до

оснащення цими приладами збройних сил союзників США, а також до розробки їх аналогів у ряді інших країн. Типовими зразками таких автоматичних систем являються [7]:

Система CLASSIC 2000 (фірма Thales, Франція). Система використовується в 42 країнах світу, включаючи 12 країн, що входять до складу НАТО. Сейсмічний датчик системи забезпечує виявлення людини в діапазоні від 1 до 80 метрів, а легкової машини – до 250 метрів;

Система REMBASS II (фірма L - 3 Communications - East, США). Система знаходиться на озброєнні сил спеціальних операцій, сухопутних військ і військово-повітряних сил США і Ізраїлю, успішно застосовувалася в Іраку і Афганістані. Комплексний датчик системи, що має сейсмічний і акустичний канали, забезпечує виявлення людини на дальності до 75 метрів, вантажного автомобіля - до 250 метрів, гусеничної машини - до 350 метрів;

Система Improved Air Delivered Sensor (IADS) (фірма Northrop Grumman Electronic Systems sector - ATE/Simulation, США), забезпечує виявлення як наземних, так і повітряних об'єктів. Наступний варіант системи IADS II додатково забезпечуватиме вимір координат і розпізнавання об'єктів;

Система SEMAG (фірма Hirttenberger AG, Австрія). Система включає сейсмічні і магнітометричні датчики і застосовується для виявлення танків і управління мінами. Ця система є прикладом широкого класу систем управління мінами і мінними полями.

Під акустичною розвідкою розуміється отримання інформації шляхом прийому і аналізу акустичних сигналів інфразвукового, звукового, ультразвукового діапазонів, що поширюються в повітряному середовищі від об'єктів розвідки [7]. Акустична розвідка (АР) забезпечує отримання інформації, що міститься безпосередньо у виголошуваній або відтворній промові (акустична мовна розвідка), а також в параметрах акустичних сигналів, які є супутніми при

роботі озброєння і військової техніки, механічних облаштувань оргтехніки і інших технічних систем (акустична сигнальна розвідка) [7].

Попри те, що деякі з існуючих РСП здатні виявляти літальні апарати, останнім часом підвищений інтерес проявляється до нових систем, спеціально сконструйованих для виявлення вертольотів і літаків на малих висотах. Такі системи вже з'явилися на озброєнні сухопутних військ США, Франції і Ізраїлю [8]. До таких систем відносяться:

Американська система MANPAC - 100. Забезпечує виявлення, розпізнавання, визначення азимута і кута місця вертольотів, що летять низько, гвинтових літаків і дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БЛА). Ця система у кінці 1990-х років проходила польові випробування і призначена для використання сухопутними військами в передових підрозділах протиповітряної оборони, озброєних переносними зенітними ракетними комплексами "Стингер" [9].

Французька система HELISPOT (Balise Acoustique Classification Helicoptere). Система може застосовуватися як окрема акустична система або в групі для утворення "бар'єру" виявлення в широкому секторі. Вона формує пеленги на виявлені об'єкти і з вірогідністю забезпечує автоматичне розпізнавання десяти типів вертольотів, акустичні портрети яких закладені в облаштування системи. Інформація про тип і пеленг виявленого гелікоптера передається вбудованим в систему ультракороткохвильовим (УКВ) передавачем на центральний процесор, що знаходиться на посту спостереження, який може одночасно приймати і обробляти дані від 16 систем. Система забезпечує виявлення легких вертольотів в нормальних погодних умовах на відстані 2 - 5 км, важких, - до 12 км (при сильному вітрі - до 4 км), а також їх пеленгація з точністю від 2 до 20 град., залежною від відстані і умов [9].

Ізраїльська система HELISPOT. Вона включає акустичний прилад, що розміщується на землі або транспортному засобі. Система забезпечує

виявлення, розпізнавання і пеленгацію вертольотів, що летять низько, та БЛА на дальності до 3 км з точністю до 3 град. Акустичний прилад включає мікрофон і класифікатор, що визначає тип цілі по спектру акустичного сигналу, що приймається. Інформація про виявлену ціль передається по УКВ радіоканалу або дротяній лінії зв'язку на пост збору розвідданих [9].

Ізраїльська система ROAD використовує акустичний прилад, що забезпечує виявлення середніх вертольотів на відстані 1 - 2 км, великих вертольотів - до 2,7 км, а також вертольотів що зависають на малих висотах - до 2,5-3 км. [9].

Розглянуті системи використовують тільки акустичні хвилі, що поширюються в повітрі. В той же час експериментальні дослідження показують, що нарівні з акустичними хвилями можна ефективно використати і сейсмічні хвилі, що поширюються в землі. Комбінована обробка акустичних і сейсмічних хвиль може істотно підвищити ефективність розвідки. Акустичні хвилі, що поширюються в повітрі, приймаються акустичними мікрофонами, що перетворюють акустичний тиск в електричний сигнал [6]. Аналогічно сейсмічні хвилі поширюються в поверхневому шарі землі і перетворюються сейсмічними датчиками в електричний сигнал, що відповідає коливанням ґрунту [3-6].

Поширення акустичних хвиль залежить від стану атмосфери, а поширення сейсмічних хвиль - від структури, складу і стану поверхневого шару землі [10].

У сухопутних військах США на озброєнні знаходяться розвідувальне-сигналізаційні прибори (РСП) "Рембасс" (REmotely Monitored BAttlefield Sensor System - REMBASS) трьох поколінь [7]. Вони призначені для раннього виявлення, визначення місця розташування і ідентифікації наземних рухливих об'єктів і цілей, в першу чергу мобільних пускових установок оперативно-тактичних ракет, зенітних ракетних комплексів і бойових машин. Системи "Рембасс" усіх поколінь розгортаються в тактичній глибині бойових порядків супротивника, а також у бойових порядках та тилу своїх військ [9]. До їх складу

входять РСП, радіоретранслятори, засоби прийому і обробки даних. Розвідувально-сигналізаційні прилади розгортаються на відстані 50-350 м один від одного на найбільш вірогідних напрямках руху мобільних об'єктів (дороги, переправи та ін.). Вони можуть встановлюватися як вручну, так і за допомогою авіації, і артилерії. Кожен РСП включає датчик, радіопередавач, електронний блок і акумуляторну батарею. Деякі прилади можуть бути забезпечені пристроями самоліквідації і фотоелементами для їх включення тільки в темний час доби [9].

Сейсмічні датчики уловлюють коливання ґрунту, рухи людини, що відбуваються в результаті його руху - до 75м. та транспортного засобу - до 350м. В якості чутливих елементів в них використовуються заглиблені у ґрунт геофони. Дальність дії цих приладів залежить від рівня і характеру фону навколишнього сейсмічного шуму і типу ґрунту [3].

На озброєнні росії знаходиться комплекси розвідувально-сигналізаційних засобів 1К18 "Реалія", який призначений для дистанційного виявлення пересування особового складу (до 70 м) та техніки (до 500 м) у тилу супротивника і на границях вірогідного зіткнення з ним та передачі відомостей про виявлені об'єкти по радіоканалу в масштабі часі, близькому до реального [9].

Малогабаритна розвідувально-сигналізаційної апаратура 1К124 " Табун" призначена для дистанційного виявлення пересування особового складу - до 50 м. та техніки - до 200 м. [9].

Британська переносна система дистанційного спостереження Tobias має вагу без батарей живлення 6,35 кг і 80 сейсмічних датчиків (вага кожного 0,075 кг), що сполучаються дротами. Дальність виявлення людини, що рухається, до 300 метрів, а сама система перекриває простір радіусом 2,4 км.

Подальшим розвитком принципів об'єднання даних, що характеризують окремі об'єкти спостереження, є ідея "поєднання датчиків". Термін "поєднання

датчиків" визначається також як "злиття розвідувальних даних" (intelligence fusion) [7].

Поєднання датчиків припускає інтеграцію і аналіз даних від засобів виявлення і є процесом збору і узагальнення даних за визначенням місця розташування і ідентифікації, отриманих від різних датчиків (видовій інформації, РЛС, розпізнавання сигналів (Signal Intelligence SIGINT), виявлення руху), в цілях отримання єдиної комплексної картини навколишнього оточення [9]. Поєднання датчиків, в процесі якого обробляються дані, що поступають від різних джерел, спрямоване на отримання точнішої, надійнішої і повнішої інформації в порівнянні з інформацією, що отримується від окремого джерела індивідуально [10]. Під інтегрованою системою моніторингу (ICM) навколишнього простору розуміють сукупність спільно функціонуючих датчиків, засобів зв'язку, обчислювальних і програмних засобів, засобів управління і індикації, призначених для отримання інформації про різного роду об'єктах, об'єднання інформації, що поступає, від датчиків і відображення результуючої інформації. Найважливішу роль в ICM грають інформаційні датчики, тактико-технічні характеристики яких визначають можливості високоефективного функціонування [9].

Інша ситуація може складатися з отриманням відомостей про стан об'єктів або процесів на великій території при обмеженій дальності дії інформаційних датчиків. В цьому випадку доводиться об'єднувати інформацію, що поступає від просторово рознесених датчиків, сукупна зона огляду яких забезпечує перекриття усієї площі території, що контролюється [8]. Найбільш складним є поєднання датчиків в системах геопросторової розвідки (Geospatial Intelligence Systems - GIS), що представляють важливий інструмент ведення бойових дій [7.]. Прикладом такої системи є багатозадачна мережева розвідувальна система Imilite ізраїльській компанії Rafael Advancend Defence Systems [7]. Система

призначена для використання декількох видових датчиків, отримання і обробки даних в уніфікованому виді для поширення користувачам і клієнтам.

Поєднання датчиків сприяє збільшенню чіткості зображень [4.10]. Зокрема, коли використовується тільки один тип датчика, то при його функціонуванні в умовах поганої погоди або дії несприятливих чинників, обумовлених веденням бойових дій, отримання чіткого зображення може виявитися неможливим.

Проведений аналіз різнорідних систем розвідки дозволяє виділити сейсмоакустичні системи, як найбільш ефективні для вирішення задач по виявленню та пеленгації позицій стріляючої артилерії та задачі визначення факту порушення кордону з подальшою ідентифікацією, за умови ведення військової розвідки [9]. Дане твердження базується на тому, що сейсмоакустичні системи володіють наступними перевагами:

Вони забезпечують стійке автоматичне функціонування: в складних метео умовах (дощ, сніг, туман); в умовах поганої оптичної видимості (ніч); в напрямках на джерела яскравого світла (сонце); в умовах сильної задимленості і запиленості; в умовах порізаного рельєфу місцевості (пагорби, гірські перевали, ущелини, русла річок та інше);

Сейсмоакустичні системи мають повну скритність, так як не формують зондуючих сигналів, це виключає їх завчасне виявлення. Найважливішим якістю цих систем є збереження працездатності в умовах сучасного радіоелектронного придушення.

Такі системи мають малі габарити, низьке енергоспоживання і краще у порівнянні з іншими системи (радіолокаційними, оптико-електронними та ін.) відповідають критеріям «ефективність - вартість».

Таким чином, ефективне застосування пасивної дистанційної розвідки повинно містити інтегровану пасивну систему моніторингу навколишнього простору зі сукупністю спільно функціонуючих сейсмо-акустичних та оптико-

електронних датчиків, засобів зв'язку, обчислювальних і програмних засобів, засобів управління і індикації, призначених для отримання інформації про різного роду об'єктах, об'єднання інформації, що поступає, від датчиків і відображення результуючої інформації. Використання трьох різнорідних інформаційних потоків значно зменшує похибку при визначенні координат цілі.

Функціонування такої системи дозволить підвищити живучість, а отже, і ефективність застосування своїх засобів [10]. У цьому випадку ситуація не буде виглядати як дуельна (нападаючому для виключення можливого впливу по ньому буде потрібно нейтралізувати певну безліч об'єктів розвідки, що не завжди піддається реалізації).

Зокрема, використання ресурсів такої системи дає суттєву основу для розробки нових способів застосування як озброєння, так і підрозділів [7]. Таким чином, розвиток сучасних технологій, засобів обробки інформації дозволяють зробити ще один крок у вдосконаленні практики застосування систем озброєння, зокрема виробити нові концептуальні підходи, щодо створення єдиної інформаційної розвідувальної системи [9].

На сьогодні стан забезпечення Збройних Сил України інформацією про місцевість і об'єкти, що розташовані на ній характеризується недостатнім використанням можливостей інформаційних технологій в процесах створення та обробки геопросторової інформації. Одним із завдань ведення пасивної дистанційної розвідки є виявлення координат противника [7]. В подальшому ці координати необхідно представити у зручному для користувача вигляді.

Зміни у змісті пасивної розвідки пов'язані саме з використанням геоінформаційних систем (ГІС), які поєднують можливості збору, обробки інформації про місцевість з гідрометеорологією, оперативно-тактичною, розвідувальною та іншою інформацією, що забезпечує можливість проведення якісного аналізу та моделювання найбільш раціональних рішень в інтересах ведення збройної боротьби [9]. Постійне збільшення об'єму потрібної

інформації та зменшення часу на прийняття рішення обумовлює актуальність задачі, для вирішення якої необхідно розробляти геоінформаційні системи і використовувати їх при плануванні та управлінні бойовими діями частин і підрозділів Збройних Сил України [1]. Це досягається шляхом створення військових інформаційних систем різного призначення, важливою складовою яких є засоби обробки цифрової інформації про місцевість у взаємодії з різноманітними даними про противника та свої війська [9].

У сучасних умовах успішне виконання завдань збройними силами неможливе без інформаційних систем здатних надавати інформацію про місцевість і зміни на ній в режимі реального часу. Досвід зарубіжних держав свідчить, що застосування геоінформаційних систем дозволяє більш точно і оперативно вирішувати більшість завдань як повсякденної діяльності військ, так і планування та ведення бойових дій. Ефективність сучасних збройних сил значною мірою залежить від рівня їх інформатизації – насиченості на всіх рівнях управління комп'ютерами і засобами комунікації, базами даних і електронними носіями інформації, а також уміння всіх військовослужбовців ефективно використовувати всі ці засоби.

Геоінформаційна система (ГІС) дає можливість створювати інформаційні продукти, які відображають інформацію, що точно відповідає потребам користувача [10]. Тривимірне відображення місцевості з конкретної точки місцезнаходження спостерігача або віртуальний обліт місцевості з нанесеною бойовою обстановкою, дасть більш повне розуміння задачі командирові будь-якої ланки, ніж просто паперова карта з нанесеними на ній об'єктами. ГІС-технології інтегрують просторові дані з великої кількості джерел на всіх рівнях [10].

Тематиці геоінформаційних систем військового призначення присвячено ряд робіт вітчизняних та зарубіжних вчених: Михайленко О.П., Попов М.О.,

Порхун О.А., Зацерковний В.І., Тішасв І.В., Віршило І.В., Демидов В.К., Де Мерс М.Н., Бонэм-Картер Г.

В сейсмоакустиці існує ряд методів виявлення координат джерела збудження сигналу (штучного або ж природнього) [10]. Усі вони зводяться до математичного розрахунку, після якого ми отримуємо певні значення (координати). Проте подальше використання цих координат та сам механізм їх представлення є досі не зовсім зручним для кінцевого користувача. Як варіант вирішення даної проблеми є використання геоінформаційних систем. Наприклад такого програмного продукту, як ArcGIS. Розробивши технічне рішення щодо реалізації дистанційної розвідки у вигляді плагіну до програмного продукту ArcGIS, стане можливим відображення координат об'єкту, що досліджується на цифровій карті. Це дозволить відслідковувати зміни координат об'єкту на цифровій карті в режимі реального часу.

Вдосконалення сучасних і поява новітніх типів та зразків зброї докорінно змінили характер і способи ведення бойових дій [2]. Швидкоплинність бойових дій у значній мірі скорочує час, необхідний для прийняття рішення командиром на управління боєм, що значно ускладнює процес управління військами. Все більше зростає залежність бойових можливостей військ від рівня інформаційних систем, якості та повноти інформації, яка в них використовується [8].

Можливості ГІС можуть бути задіяні в найрізноманітніших сферах діяльності, зокрема [9]:

- адміністративно-територіальному управлінні:
 - ситуаційне управління;
 - міське планування і проектування об'єктів;
 - ведення кадастрів інженерних комунікацій, земельного, містобудівного, зелених насаджень;

- прогнозування надзвичайних ситуацій техногенно-екологічного характеру;

- керування транспортними потоками та маршрутами міського транспорту;
- побудова мереж екологічного моніторингу;
- інженерно-геологічне районування міста;
 - телекомунікаціях:
- транковий і стільниковий зв'язок, традиційні телекомунікаційні мережі;
- стратегічне планування телекомунікаційних мереж;
- оптимальне розташування антен, ретрансляторів тощо;
- визначення маршрутів прокладки кабелю;
- моніторинг стану мереж;
- оперативне диспетчерське управління;
 - інженерних комунікаціях:
- оцінка потреб у мережах водопостачання і каналізації;
- моделювання наслідків стихійних ситуацій для систем інженерних комунікацій;

- проектування інженерних мереж;
- моніторинг стану інженерних мереж і запобігання аварійних ситуацій;
 - транспорті:
- автомобільний, залізничний, водний, трубопровідний, авіатранспорт;
- керування транспортною інфраструктурою та її розвитком;
- керування парком рухомих засобів і логістика;
- керування рухом, оптимізація маршрутів і аналіз вантажопотоків;
- навігації.

ГІС також можливо використовувати у військовій розвідці:

- моніторинг військових баз, портів і аеродромів потенційних супротивників;

- виявлення цілей для нанесення ударів;
- виявлення скупчення і місць дислокації потенційного супротивника;
- виявлення місць розташування стратегічної зброї.

1.2 Аналіз існуючих математичних моделей, методів і методик, що використовуються в сейсмоакустичній розвідці

1.2.1 Аналіз сейсмоакустичних моделей ведення дистанційної розвідки

При математичному моделюванні розповсюдження сейсмічних хвиль від вибухів або інших штучних впливів зазвичай припускають, що поверхня землі межує з вакуумом та вводяться відповідні граничні умови на вільній поверхні [7]. При цьому нехтується ефектом генерації сейсмічними хвилями акусто-гравітаційних хвиль в неоднорідній атмосфері та їх взаємодією при розповсюдженні на кордоні Земля-Атмосфера. При цьому існує велика кількість робіт, які присвячені математичному моделюванню процесів розповсюдження акусто-гравітаційних хвиль в атмосфері від природніх та штучних джерел [11]. Історично це пов'язано з розвитком акустичного (інфразвукового) методу моніторингу повітряних ядерних та хімічних вибухів. Для вирішення цих задач кордон Земля-Атмосфера апроксимувалась абсолютно відбиваючим кордоном, що виключає ефекти генерації сейсмічних хвиль в земній корі [11].

Однак як показують теоретичні та практичні роботи останніх десятиліть, існує високий ступінь зв'язку між хвильовими процесами в літосфері та атмосфері [11]. Повітря незначно впливає на коефіцієнти відбиття сейсмічних хвиль, в той час як вплив повітря на еванісцентні (неоднорідні) пружні хвилі може бути вельми значним.

Наприклад, в роботі [11] експериментально зареєстрований ефект акустично-сейсмічної індукції. Він полягає в тому, що акустична хвиля від потужного вібратора завдяки явищу рефракції в атмосфері збуджує на відстані декількох десятків кілометрів інтенсивні поверхневі сейсмічні хвилі. Сейсмічні хвилі в літосфері від землетрусів та вибухів генерують акусто-гравітаційні хвилі в атмосфері. У зв'язку з експоненціальним спаданням щільності атмосфери з висотою, амплітуда акусто-гравітаційних хвиль у верхній атмосфері та іоносфері значно зростає. Це призводить до коливань щільності іонізованих частинок. Ці коливання реєструються за допомогою дистанційного доплеровського радіозондування [12].

Теоретичні дослідження хвильових процесів на кордоні пружного однорідного полу простору з ізотермічною моделлю однорідної атмосфери присвячені роботи [13]. В них встановлені та досліджуються властивості поверхневої хвилі Стоунлі-Шолте та модифікованої хвилі Лемба.

На основі чисельно-аналітичного методу досліджуються хвильові процеси для неоднорідної моделі Земля-Атмосфера [12]. Алгоритм оснований на комплексуванні інтегральних перетворень Бесселя по радіальній координаті та перетворення Лагерра за часом з кінцево-разносним методом по вертикальній координаті [13]. Для неоднорідно-пружного напівпростору вищезазначений алгоритм запропонований і розвинений в роботах [14-17]. Особливістю алгоритму є застосування перетворення Лагерра по тимчасовій координаті [15]. Після перетворення Бесселя і подальшого застосування з кінцево-разносного методу по вертикальній координаті задача зводиться до вирішення алгебраїчної системи рівнянь, в якій параметр розділення p (ступінь поліномів Лагерра) присутній тільки в правій частині рівнянь і має рекурентну залежність [16]. Матриця системи отримує добре обумовлену і не залежить від параметрів поділу p , в відмінності від матриці, яка отримується після перетворення Фур'є або Лапласа [17]. Це дозволяє використовувати швидкі алгоритми рішення

систем лінійних алгебраїчних рівнянь для багатьох правових частин, наприклад, на основі розкладання по методу Холецького [18].

Використання перетворення Фур'є по просторовій координаті, в направленні якої середа рахується однорідною, дозволяє реалізувати ефективно розпаралелювання рішення. В цьому випадку на кожному процесорі буде вирішуватись незалежна задача для кожної гармоніки перетворення Фур'є [17]. Додатково при проведенні розрахунків на кластерних обчислювальних комплексах з малим об'ємом оперативної пам'яті, що доступні одному процесору, для вирішення великих просторових задач (більше 100 довжин хвиль) було здійснено розпаралелювання рішення двомірної просторової задачі [17]. На цьому етапі розрахунків була реалізована розпаралелювання версія методу пов'язаних градієнтів для вирішення системи алгебраїчних рівнянь для кожної гармоніки Фур'є. На рівні вихідних даних, коли задається модель середи, це рівносильно декомпозиції вихідної області на декілька підобластей двомірної задачі по координаті z . Такий підхід дає можливість розподілення пам'яті як при заданні вхідних параметрів моделі, так і при подальшій численній реалізації алгоритму в під областях.

1.2.2 Аналіз сейсмоакустичних методів ведення дистанційної розвідки та їх недоліки

Актуальним питанням є пошук шляхів використання сейсмоакустичних засобів для моніторингу подій у зоні бойових дій. Також промислові вибухи та вибухи на потенційно небезпечних об'єктах, землетруси з епіцентрами на території України та суміжних держав свідчать про необхідність оперативного визначення факту сейсмічної події, оцінювання її параметрів та можливих наслідків з метою своєчасного надання інформації для проведення відповідних заходів [3].

Модернізація сейсмічних та акустичних засобів спостереження, передачі та обробки вимірювальних даних, перехід на цифрову обробку інформації дозволяють перейти на якісно новий рівень моніторингу сейсмічної та акустичної обстановки [19]. Однак методологічні підходи, що використовуються для обробки вимірювальних даних, потребують суттєвого удосконалення для розширення можливостей мережі сейсмічних та акустичних спостережень щодо вирішення поставлених завдань [19]. Таким чином, задача розробки нових та удосконалення існуючих методів виявлення сейсмічних та акустичних сигналів є актуальною.

Питанням сейсмічного моніторингу присвячена низка робіт, як фундаментальних так і дослідницьких [11, 13–18]. Однак більшість запропонованих підходів спрямовані на вирішення окремих проблем, вимагають значних обчислювальних витрат та використовуються у постоперативному режимі часу.

На даний час основна тенденція виявлення сейсмічної події в автоматичному режимі полягає у використанні відносно простих процедур обробки вимірювальних даних, які дозволяють оперативно здійснювати аналіз даних [4], але при цьому збільшується щільність мережі сейсмічних

спостережень. Територіальна обмеженість мережі сейсмічних спостережень зумовлює необхідність розробки методологічних засад вирішення завдань сейсмічного моніторингу окремим пунктом спостереження [20]. Тому виникає необхідність провести аналіз існуючих методів виявлення сейсмічних сигналів з метою визначення пріоритетних напрямків досліджень та надання рекомендацій щодо удосконалення існуючих та розробки нових методів виявлення сейсмічних сигналів, ідентифікації їх складових, визначення місцеположення осередку сейсмічної події та оцінки її параметрів.

Вирішення завдань сейсмічного моніторингу складається з наступних етапів: виявлення сейсмічного сигналу, ідентифікація складових сейсмічного запису (встановлення типів сейсмічних хвиль), локація осередку сейсмічної події, оцінка параметрів сейсмічного джерела [9]. При однопозиційних спостереженнях останні два етапи вирішуються за умови впевненого вирішення задачі виявлення та визначення основних складових сейсмічного запису. Тому, при аналізі існуючих методів виявлення та обробки сейсмічних даних основна увага приділятиметься саме можливості вирішення цих задач.

Розглянемо основні методи виявлення сейсмічних сигналів, які використовуються у Міжнародному та Національних центрах обробки сейсмічних даних.

Алгоритм STA/LTA. На даний час основна тенденція виявлення сейсмічної події у автоматичному режимі полягає у використанні відносно простих процедур обробки вимірювальних даних, таких як, наприклад, алгоритм STA/LTA [7]. Даний алгоритм дозволяє здійснювати аналіз даних за рахунок порівняння енергії сейсмічного сигналу в ковзних вікнах. Автоматична локація сейсмічної події та визначення її параметрів при використанні зазначеного підходу потребує значного часу. Так для Міжнародної системи моніторингу [7] при використанні результатів реєстрації мережі первинних станцій час надання попередньої інформації становить 1 годину. Час надання

даних про сейсмічну подію за даними первинної та допоміжної мережі становить 10 годин. Остаточна інформація про сейсмічну подію надається протягом 48 годин після її виявлення.

Обмеженість мережі сейсмічних спостережень обмежують можливості застосування наведених підходів, а розширення мережі вимагає значних фінансових витрат. Тому, окрім системного аналізу результатів реєстрації доцільним є використання методів обробки вимірювальних даних в автоматичному режимі.

Алгоритм кумулятивних сум. Алгоритм являє собою послідовний критерій відношення ймовірностей для двох простих гіпотез H_1 та H_2 . Ідея алгоритму полягає в аналізі поведінки кумулятивної суми [10, 19]:

$$S_t = S_{t+1} + \ln \frac{\omega(X_t/\Theta_1)}{\omega(X_t/\Theta_0)}$$

де $\omega(X_t/\Theta_1)$ - щільність імовірності параметра Θ ($\Theta=\Theta_1$ для H_1 і $\Theta=\Theta_0$ для H_0), яка порівнюється на кожному кроці з двома порогами ε та h ($\varepsilon, h > 0$), які задаються, виходячи з умов забезпечення припустимих похибок першого та другого роду. Якщо значення кумулятивної суми стає меншим, ніж ε , то вона обнуляється, і робота алгоритму починається знову. При перевищенні значення кумулятивної суми порога h приймається рішення про наявність сигналу [10].

Даний підхід потребує незалежності елементів часового ряду, що не має місця при аналізі вимірювальних даних сейсмічного поля. Крім того, даний підхід дозволяє виявити лише вступ сейсмічного сигналу.

Узгоджена фільтрація. Узгоджений фільтр будується на основі критерію максимуму пікового відношення сигнал/шум та призначений для встановлення факту наявності сейсмічного сигналу у прийнятій реалізації [10]. При цьому вважається, що корисний сигнал заданий за формою та її викривлення при

фільтрації не мають істотного значення. Частотна характеристика узгодженого фільтра має вигляд:

$$H(\omega) = S^*(\omega)/W(\omega)$$

де $H(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика фільтра; $S^*(\omega)$ - комплексно спряжений спектр сигналу, що очікується; $W(\omega)$ - амплітудно-частотний спектр шуму [19].

Створення алгоритму узгодженої фільтрації не вимагає значних затрат, якщо перешкоду можна вважати білим шумом. Реально сейсмічний шум значно відрізняється від білого. Це призводить до неоптимальності виявлення сигналів. Крім того, синтез узгодженого фільтра вимагає знання форми сигналу або його частотного спектра, що не завжди має місце. Даний підхід використовується лише при вирішенні завдань моніторингу певних районів, для виявлення сигналів техногенного походження [17].

Алгоритм Вейса-Аллена. Суть цього способу полягає в обчисленні модифікованої функції $f_i = x_i - x_{i-1}$ за першими різницями цифрових відліків та порівнянні її з функцією , що являє собою середнє значення диференційної функції, помножене на константу, яка характеризує відношення сигнал/шум [11]:

$$f_0 = k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$$

Фактично алгоритм Вейса-Аллена реалізує смугову фільтрацію запису та пошук моменту перевищення сигналу у вибраній смузі частот певного рівня амплітуд. Основним недоліком даного методу є значний час реактивації алгоритму, що призведе до пропуску виявлення наступних складових сейсмічного запису [11].

Методи розпізнавання образів. Дані методи засновані на виявленні характерних ознак (сигнатур), які необхідно розпізнавати [11]. Основою їх застосування є етап навчання на еталонних сигнатурах. Виявлення сейсмічного сигналу з осередком у підконтрольному районі здійснюється шляхом оцінки його відповідності відповідним «образам», які у свою чергу були зформовані на підставі ознак раніше зареєстрованих сигналів. Порівняння зареєстрованої вибірки з набором «образів» відбувається шляхом розрахунку когерентності на декількох рівнях за потужністю спектрів. Основним недоліком даного підходу є необхідність наявності еталонних сигнатур від конкретних подій з осередками у підконтрольних районах [11].

Поляризаційний аналіз. На даний час основними найбільш раціональними напрямками обробки вимірювальних даних є використання апарату поляризаційного аналізу та поляризаційної фільтрації [14–17].

Записи сейсмічних хвиль від вибухів, землетрусів та інших джерел сейсмічних збурень характеризуються лінійною поляризацією коливань, в той час як шуми являють собою результат суперпозиції хвиль, що приходять на станцію від різних джерел та мають низький рівень лінійності поляризації [13]. Ці відмінності сигналів та шумів можуть бути виявлені за допомогою поляризаційного аналізу коливань, а зменшення рівня шумів за даною ознакою може здійснюватися за допомогою поляризаційної фільтрації [15]. В результаті виділяються додаткові фази, що є надзвичайно важливим при обробці слабких подій та локації осередку події [17]. Крім того вони є особливо корисними при виявленні сигналів, що мають частоту, близьку до частоти шуму, де частотна фільтрація виявляється малоефективною.

Поляризаційний аналіз сейсмічного запису дозволяє чисельно оцінити, наскільки близько коливання описують фігуру, що за формою відповідає еліпсоїду. З цією метою за трикомпонентним записом $\{x, y, z\}$ обчислюється матриця коваріацій [15]:

$$M = \begin{vmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \end{vmatrix}$$

Квадратична форма (еліпсоїд), що задається цією матрицею, приводиться до головних осей. Велика вісь еліпсоїда характеризує орієнтацію в просторі повного вектора зміщення певного типу сейсмічної хвилі кутами θ та i , а відношення малої (b) до великої (a) півосі – ступінь витягнутості еліпсоїда, тобто рівень прямолінійності поляризації коливань [15].

В [16] для виявлення сейсмічних сигналів пропонується використовувати апарат поляризаційної фільтрації для всіх можливих напрямків надходження сейсмічної хвилі:

$$P(\alpha, \gamma) = \sum_{i=1}^N g_i G^{\alpha\gamma}$$

де $P(\alpha, \gamma)$ - проекція повного вектору зміщення ґрунту на напрямок $G^{\alpha\gamma}$; N – розмір ділянки сейсмічного запису, для якого розраховується функція $P(\alpha, \gamma)$; g_i – поточне значення зміщення ґрунту $g_i = \{n_i, e_i, z_i\}$; $G^{\alpha\gamma}$ –напрямок, для якого проводиться поляризаційна фільтрація $G^{\alpha\gamma} = \{x, y, z\}$, де координати x, y, z пов'язані з азимутом α та кутом виходу γ [16]:

$$\begin{cases} n = \cos(\gamma) \cos(\alpha) \\ e = \cos(\gamma) \sin(\alpha) \\ z = \sin(\gamma) \end{cases}$$

Для сейсмічних хвиль функція $P(\alpha, \gamma)$ достатньо добре апроксимується еліпсоїдом, ступінь лінійності якого визначається як:

$$G = 1 - \frac{b}{a}$$

де b та a – відповідно мала та велика півосі еліпсоїда, які в свою чергу відповідають мінімальному та максимальному значенням функції $P(\alpha, \gamma)$. Рішення про наявність сигналу приймається при виконанні умови:

$$G(t) > G_h$$

де $G(t)$ – поточне значення коефіцієнта лінійності значення; G_h – порогове значення.

Поріг визначається за критерієм Неймана-Пірсона [16], згідно з яким мінімізується величина ймовірності пропуску сигналу β за умови, що ймовірність виявлення хибного сигналу α не перевищує заданої величини α_0 , тобто $\min \beta$ при $\alpha = \alpha_0$.

Використання поляризаційних властивостей складових сейсмічного сигналу може бути покладено в основу алгоритмічних підходів щодо виявлення сейсмічних сигналів та його окремих складових. Однак реалізовані на даний час методологічні підходи щодо поляризаційного аналізу засновані на апроксимації траєкторії руху часток ґрунту еліпсоїдом та оцінки його параметрів, які пов'язані з положенням осередку сейсмічної події, та потребують подальшого удосконалення [18].

1.2.3 Аналіз сейсмоакустичних методик ведення дистанційної розвідки та їх недоліки

Сейсмоакустичні методики дистанційної розвідки займають важливе місце серед сучасних засобів добування розвідувальної інформації, особливо в умовах обмеженої оптичної видимості, складної радіоелектронної обстановки та необхідності прихованого спостереження [1]. Їх застосування базується на реєстрації та аналізі механічних коливань ґрунту й акустичних хвиль у повітрі, що виникають унаслідок діяльності природних або техногенних джерел [3]

Основні методики сейсмоакустичної розвідки:

Пасивний моніторинг та обробка решіток: Використання сенсорних решіток (антенних систем) для виявлення сейсмічних хвиль у землі та акустичних хвиль у повітрі, що дозволяє створювати комплексні «хвильові портрети» подій у режимі реального часу [4].

Тріангуляція та пеленгація: Використання кількох просторово розділених, мережевих датчиків для розрахунку азимуту та відстані до цілі (наприклад, транспортних засобів, вогню зі зброї) за допомогою аналізу різниці часу прибуття (TDOA) [3].

Частотно-хвильовий аналіз (F-K) [17]: Методика, що використовується для оцінки азимутальних напрямків акустичних/сейсмічних сигналів, особливо ефективний для ідентифікації джерел, таких як кар'єри або колони транспортних засобів.

Локалізація на основі хвильової форми (наприклад, МССС): Використання багатоканальної крос-кореляції (МССС) для вирівнювання ідентичних сейсмічних фаз різних датчиків, що забезпечує високоточну локалізацію джерела [3].

Інтеграція AI/ML: Використання нейронних мереж (наприклад, Transformer, U-Net, нечітка кластеризація C-means) для класифікації сигналів та

відділення цільових сигналів від шуму навколишнього середовища, природного та техногенного шуму [12].

Сценарії застосування

Периметральна оборона та безпека: Моніторинг кордонів або критичної інфраструктури на предмет незаконної діяльності, оскільки ці системи можуть працювати в умовах низької видимості, високого рівня шуму або віддалених середовищ.

Ідентифікація та локалізація цілей: використання сейсмічних станцій для ідентифікації, класифікації та визначення місцезнаходження точок ураження, наприклад, ворожої артилерії, ефективно обходячи необхідність прямої видимості [9].

Дистанційний моніторинг промислової діяльності: ідентифікація та моніторинг, наприклад, вибухів у кар'єрах. Ключові технології та обробка даних

Точна синхронізація часу: необхідна для точного визначення цілісності цілей (TDOA), часто досягається за допомогою датчиків, синхронізованих з GPS.

Адаптивна фільтрація сигналів: застосування таких методик, як вейвлет-шумоутворення, для покращення співвідношення сигнал/шум [15].

Віртуальні збори даних (VSG): використання навколишнього шуму, а не прямого активного джерела, за допомогою таких методик, як крос-кореляція (CC) або багатовимірна деконволюція (MDD), для "зображення" або моніторингу областей.

Висновки до першого розділу.

1. Проведено аналіз основних підходів щодо ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу. В рамках якого розглянуто існуючі математичні моделі, методи і методики, ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу.

2. Розглянуто існуючі вітчизняні та закордонні, системи ВДПР, та математичні моделі, методи та методики, які в них використовувались. Проведено аналіз їх недоліків та переваг. З чого можна зробити висновок, що проаналізовані моделі, методи та методики не дають змоги проведення сейсмоакустичного моніторингу ВПДР на основі аналізу потоків роздільних і не роздільних сейсмоакустичних сигналів. Методологічні підходи, що використовуються для систем сейсмоакустичного моніторингу ВПДР, потребують суттєвого удосконалення для розширення можливостей таких систем. Задача розробки нових та удосконалення існуючих методик, методів та математичних моделей таких систем для виявлення і обробки сейсмічних та акустичних сигналів є актуальною.

РОЗДІЛ II. МЕТОД СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИБУХОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ ВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ

2.1 Метод сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

При оцінці параметрів математичної моделі для систем сейсмоакустичного моніторингу вибухового поля в загальному випадку, ми зіштовхуємося з таким поданням моделі сейсмоакустичного поля на основі даних спостереження $r(t,x)$ які ускладнені адитивною завадою $n(t,x)$ (t – часова, x – просторові координати). Власне модель процесу формування поля $M(\mathbf{l},\boldsymbol{\eta},t,x)$ визначається двома векторами вільних параметрів моделі \mathbf{l} і $\boldsymbol{\eta}$, а сама модель є гіпотезою дослідника про процес, що моделюється. Вектор \mathbf{l} входить у модель лінійно, а $\boldsymbol{\eta}$ - нелінійно [20]. Ця відмінність істотна в оцінці вільних параметрів, оскільки вимагають різних за складністю процедур їх визначення.

Узагальному випадку математична модель для систем сейсмоакустичного моніторингу сигналу вибухового поля можна представити у наступному вигляді [20]:

$$y(t,x)=M(\mathbf{l},\boldsymbol{\eta},t,x)+n(t,x) \quad (2.1)$$

де $M(\mathbf{l},\boldsymbol{\eta},t,x)$ - математична модель сигналу вибухового поля;

\mathbf{l} – вектор параметрів, що входить в модель лінійно;

$\boldsymbol{\eta}$ – вектор параметрів, що нелінійно входить в модель;

$n(t,x)$ - адитивна перешкода;

x – просторова координата (у загальному випадку трьох вимірний вектор);

t – часова координата.

В загальному випадку розмірність векторів є параметром моделі. Модель $M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})$ можна представити у вигляді лінійної комбінації моделей $l_i M_i(\boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})$ де n розмірність вектора l , тоді модель (2.1) набуває вигляду [20]:

$$M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n l_i M_i(\boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \quad (2.2)$$

Вирішити задачу (2.2) означає визначити для обраної моделі $M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})$ два вектори вільних параметрів моделі l та $\boldsymbol{\eta}$. Для обчислених l та $\boldsymbol{\eta}$ оцінюється норма ухилення $n(t, \mathbf{x})$. У загальному випадку розмірності цих векторів вільних параметрів моделі також підлягають визначенню. Надалі будемо мати на увазі роздільну процедуру оцінки векторів l та $\boldsymbol{\eta}$, припускаючи, що l , може належати лише множині Λ , а $\boldsymbol{\eta}$ - множині N де Λ , та N можливі значення всіх параметрів, які входять в модель відповідно лінійно та не лінійно [20].

Для рішення моделі (2.1) можна запропонувати спосіб підбору [21], тобто здійснюється пошук таких значень векторів параметрів, які для обраного скалярного добутку в Гільбертовому просторі дають мінімальне ухилення моделі $M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})$ від спостережених даних $r(t, \mathbf{x})$. Гільбертовий простір вибирається з урахуванням стахостичних характеристик процесу $n(t, \mathbf{x})$. Отже, ми приходимо до необхідності знаходження мінімуму моделі (2.1) по всім її вільним параметрам. Визначення скалярного добутку є квадрат норми шуму в точці $x - (n(t, \mathbf{x}), n(t, \mathbf{x}))$ [4]

$$\min_{\substack{l \in \Lambda \\ \boldsymbol{\eta} \in N}} \left[(y(t, \mathbf{x}) - M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}), y(t, \mathbf{x}) - M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})) \right] < \varepsilon \quad (2.3)$$

де ε – поріг обмеження, тобто компроміс між прийнятним рівнем помилок першого та другого родів [20].

Величина ε визначається суб'єктивно як ставлення дослідника до якості моделі з урахуванням помилок двох родів [21]. Такому підходу присвячено багато робіт [22-42]. Якщо (2.3) виконується, тобто ухилення моделі від даних спостереження не перевищує встановлений дослідником поріг обмеження, то приймається рішення про адекватність гіпотетичної моделі) $M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})$ процесу $y(t, \mathbf{x})$.

В (2.3) визначені оптимальні оцінки параметрів моделі (2.1) як точку у просторі параметрів, в якій обраний критерій досягає свого глобального мінімуму. [25]

Оскільки мінімум критерію (2.3) є квадрат норми шумової складової в точці x , то природно виборати скалярний добуток. Його треба вибрати таким чином, щоб норма шуму була мінімальною [35]. Квадратом цієї норми є дисперсія випадкового процесу у точці t :

$$\left(n(t, x_1), n(t, x_2) \right) = E \left(n(t, x_1) n(t, x_2) \right) \quad (2.4)$$

де E - оператор обчислення математичного очікування випадкового процесу з нульовим математичним очікуванням у точці t ;

x_1 та x_2 – координати просторового вектора .

Для обраного скалярного добутку (2.4), при фіксованому значенні вектора $\boldsymbol{\eta}$, мінімум критерію (2.3) досягається в точці простору лінійних параметрів \mathbf{l} , яка задовольняє рівнянню [20]:

$$\frac{\partial (r(t, \mathbf{x}) - M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}), r(t, \mathbf{x}) - M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}))}{\partial \mathbf{l}} = 0 \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{l}}, M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \right) - \left(\frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{l}}, r(t, \mathbf{x}) \right) = 0 \quad (2.6)$$

В (2.5) під виразом $\frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{l}}$ мається на увазі вектор стовбчик:

$$\frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{l}} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_1} \\ \dots \\ \frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_n} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Систему лінійних рівнянь (2.5) відносно вектору параметрів \mathbf{l} при фіксованому значенні вектора $\boldsymbol{\eta}$ можна представити у вигляді системи лінійних рівнянь [20]:

$$\begin{Bmatrix} \left. \frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_1}, M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \right\} \\ \dots \\ \left. \frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_n}, M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \right\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left. \frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_1}, r(t, \mathbf{x}) \right\} \\ \dots \\ \left. \frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_n}, r(t, \mathbf{x}) \right\} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

Систему лінійних рівнянь (2.7) представимо у векторному вигляді:

$$\left(\frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_s}, M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \right) = \left(\frac{\partial M(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})}{\partial l_s}, r(t, \mathbf{x}) \right), \quad s = \overline{1, n} \quad (2.9)$$

В окремому випадку, коли модель має вигляд (2.2), ця система рівнянь набуває вигляду системи лінійних рівнянь щодо вектора \mathbf{l} :

$$\sum_{i=1}^n l_i \left(M_i(\boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \cdot M_s(\boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \right) = \left(r(t, \mathbf{x}) \cdot M_s(\boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) \right), \quad s = \overline{1, n} \quad (2.10)$$

Обчислений таким чином вектора параметрів \mathbf{l} буде оптимальним (у сенсі обраного критерію) за фіксованого вектора нелінійних параметрів $\boldsymbol{\eta}$ [27]. Для отримання оптимальних оцінок \mathbf{l} і $\boldsymbol{\eta}$ необхідно перебором локальних мінімумів мінімізувати критерій (2.3) по $\boldsymbol{\eta}$ [33]. При цьому, можуть бути застосовані й інші методи, наприклад, градієнтні методи або метод Монте-Карло з використанням спеціальних послідовностей [43-47].

У виборі скалярного добутку критерія (2.3) необхідно враховувати евристичні уявлення, які засновані на досвіді. У зв'язку з цим постає питання, чи можуть бути формалізовані евристики, пов'язані з очікуваним характером фону $n(t, x)$, наприклад, високочастотне, та низькочастотне і т. д [35]. З цієї точки зору, природно використовувати в першому наближенні моделі існуючих випадкових процесів.

Оптимізовану процедуру оцінки параметрів сигналів вибухових полів з характеристиками в області сейсмоакустичного діапазону частот в моделі (2.1) для моніторингового дослідження роздільних сигналів вибухів, розглянемо на даних натурних досліджень рисунок 2.1. Вхідні дані в континуальній моделі (2.1) при натурних дослідженнях дані спостереження представлені в вигляді дискретної функції, представленої матрицею [29]. На рисунку 2.1 представлено фрагмент запису сигналу вибуху і фонового шуму зробленого сейсмічним датчиком типу акселерометра.

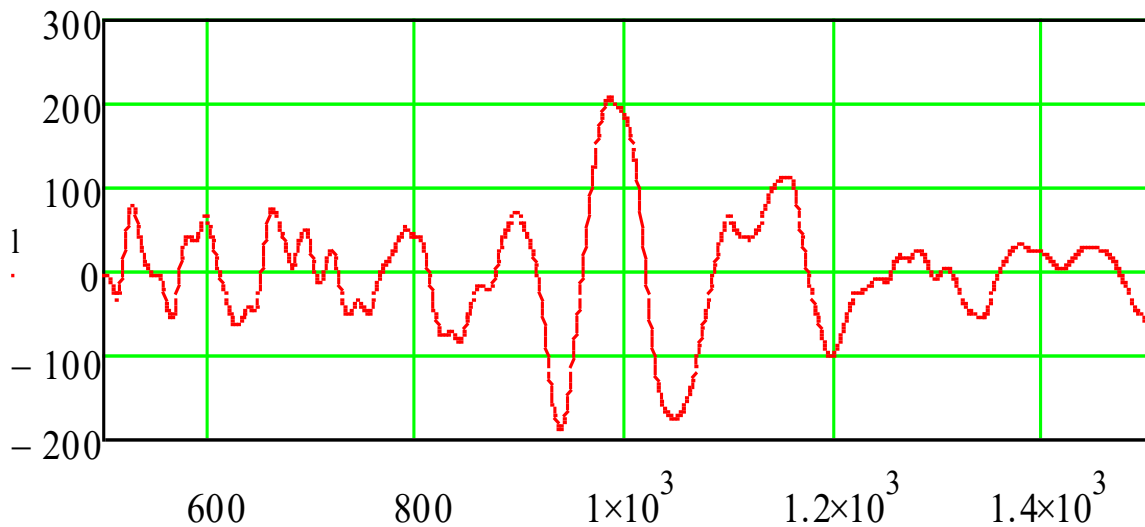


Рисунок 2.1 - Фрагмент запису сигналу вибухового поля на тлі шуму фону. По осі абсцис представлено час у мілісекундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

Таким чином, можна сформулювати етапи методу сейсмоакустичного моніторингу вибухового поля для ведення дистанційної розвідки [20]:

Перший етап – Вибір параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки здійснюється відповідно до аналітичного виразу 2.2. При цьому, враховуються умови ведення моніторингу, специфіку оточуючого середовища та фізичну доцільність дослідник має вибрати вид параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів [27].

Другий етап – Вибір критерію визначення інформативних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки здійснюється відповідно до аналітичного виразу 2.4. Вибір критерію визначення інформативних параметрів математичної моделі здійснюється відповідно до вибраної параметричної модель сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки (1 етап) та предаточної функції середовища розповсюдження вибухового сигналу [28].

Третій етап – Визначення вектору інформативних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки здійснюється відповідно до аналітичних виразів 2.5-2.7. Для визначення інформативних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки вирішується задача нелінійної регресії математичної моделі з даними спостереження, застосовуючи критерій вибраний на 2 етапі [29].

Четвертий етап – Вибір критерію оцінки ухилення математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки від даних спостереження та порогу максимального ухилення даних спостереження здійснюється відповідно до п.п 2.8. Критерій оцінки ухилення математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки від даних спостереження здійснюється експертом враховуючи результати попередньої статистики дослідження [28].

П'ятий етап - Оцінка адекватності розробленої математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухового поля для ведення дистанційної розвідки. Відповідно до обраного на 5 етапі критерію оцінки ухилення математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухового поля для ведення дистанційної розвідки та порогу максимального ухилення даних спостереження (4 етап) приймається рішення про адекватність моделі. Якщо ухилення моделі в (2.8) не перевищує обраний на 4 етапі поріг, приймається рішення про адекватність моделі, тобто вона використовується для класифікації сигналів, для сейсмоакустичного моніторингу вибухового поля для ведення дистанційної розвідки [27]. В протилежному випадку здійснюється вибір нової математичної моделі сигналу вибухового поля, відповідно до етапу 1.

2.2 Розробка параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

2.2.1 Параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

Сейсмоакустичне поле вибухових сигналів є суперпозицією сейсмоакустичних хвиль, викликаних вибухами та сейсмоакустичного фонового шуму [33]. Тому, задача оцінки параметрів сейсмічних хвиль за заданим значенням хвильового поля в деякій точці передбачає необхідність оцінки параметрів сигналів вибухових полів одного класу на тлі деякої адитивної перешкоди і суперпозиції потоків сигналів інших класів. В цьому випадку вони не оцінюються і не ідентифікуються та можуть розглядатися як перешкода [35]. Тоді випадковою функцією перешкоди буде суперпозиція потоків сигналів вибухових полів, що не ідентифікуються, і випадкової функції фонового шуму. Таким чином, реалізація сейсмоакустичного поля представляє собою суперпозицію функцій, що описують маятник, такими функціями є осцилятори[34].

Для сейсмоакустичних сигналів вибухових полів з метою їх ідентифікації необхідно обирати такі параметричні математичні моделі, які інтегрувалися б для автоматизації процесу сейсмоакустичного моніторингу. Таким чином, враховуючі вищезазначені фактори параметричну математичну модель сейсмоакустичного моніторингу сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки доцільно представити у вигляді суперпозиції осциляторів (згасаючих синусоїд) [34].

Фізичні уявлення про природу сигналу вибухового поля, враховуючи мультимодальність його спектру, дозволяють висунути гіпотезу про можливість його представлення в наступному вигляді [21]:

$$y_m(t) = \sum_{l=1}^L S_{ml} \exp\{-\mu_{ml}t\} \sin(\omega_{ml}t + \varphi_{ml}) + n_m(t) \quad (2.14)$$

де m – номер сенсору, який рккструє сигнал вибуху, $m = \overline{1, M}$, M – кількість сигналів вибухів;

$S_{ml}, \mu_{ml}, \omega_{ml}, \varphi_{ml}$ – вільні параметри моделі:

S_{ml} амплітуда l - ї гаомоніки;

μ_{ml} коефіцієнт згасання синусоїди l - ї гаомоніки;

ω_{ml} частота l - ї гаомоніки;

φ_{ml} зсув фази l - ї гаомоніки;

$n_m(t)$ - адитивний шум у вимірах m -го вибуху;

L – множина аналітичних однотипних підмоделей, суперпозиція яких моделює процес $y_m(t)$, $l \in \Lambda$:

$$\mathbf{y} = \{y_m(t)\}; \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.15)$$

де \mathbf{y} – вектор функція, компоненти якої є дані спостереження кожного з M сенсорних датчиків.

Для вирішення моделі (2.14) необхідно підібрати такі вільні параметри моделі, щоб ухилення моделі в рамках, вибраного з умов фізичної доцільності критерію, давало найменше значення. Вирішення цієї задачі є задача нелінійної

регресії [21]. Рішення задачі (2.14) приведено в наступному пункті цього параграфа.

2.2.2 Вирішення параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки відносно її вільних параметрів

Вирішення параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки полягає у оптимальному визначенні вільних параметрів моделі. Критерієм оптимальності вибирається ступінь близькості моделі до спостережених даних у вибраній метриці [21]. З точки зору автора з фізичних умов постановки завдач, доцільним є вибрати метрику L_2 , оскільки фізичний сенс даної метрики є оцінка енергії даних спостереження. Тому в даній роботі в якості критерію було вибрано ухилення моделі від даних спостереження в L_2 . У метриці L_2 критерій є функціонал кожної з компонент виду:

$$F_m(\mathbf{P}_m) = \left\| \sum_{l=1}^L S_{ml} \exp\{-\mu_{ml}t\} \sin(\omega_{ml}t + \varphi_{ml}) - y_m(t) \right\|_{L_2}, \quad m = \overline{1, M} \quad (2.16)$$

де \mathbf{P}_m матриця вільних параметрів моделі, яка складається з векторів моделей що описує кожний сигнал вибуху з номером $m = \overline{1, M}$

Позначемо вектор вільних параметрів однотипної підмоделі з номером l , $\mathbf{P}_m^{(l)}$ Таким чином l - номер стовпця у цій матриці. M – кількість точок спостереження.

:

$$\mathbf{P}_m^{(l)} = \left\{ \begin{array}{c} S_{ml} \\ \mu_{ml} \\ \omega_{ml} \\ \varphi_{ml} \end{array} \right\}, \quad l = \overline{1, L}$$

де L кількість параметрів кожного з осциляторів в моделі (2.16).

Зафіксувавши L приведемо матрицю \mathbf{P}_m розмірністю $4 \times L$ вектору:

$$\mathbf{P}_m = \{P_{m,j}\}, \quad j = \overline{1, 4L}$$

де \mathbf{P}_m – це вільні параметри моделі; розмірність цього вектора дорівнює $4 \times L$ так що перші 4 елементи вектора це параметри першої підмоделі, наступні чотири – другої підмоделі, і так далі:

$$F(\mathbf{P}^*) = \min_{\mathbf{P} \in \mathcal{A}} F(\mathbf{P}) \quad (2.17)$$

$y(t)$ – одновимірний вектор y (2.15) тобто $y(t) = \mathbf{y} = \{y_m(t)\}; \quad m = \overline{1, M}, \quad M = 1, \quad y(t)$ це аналітична апроксимація вектора значень оброблених даних спостережень, представлених на рисунку 2.1. \mathcal{A} – множина можливих значень вектора \mathbf{P} . З теоретичної та практичної точки зору для якісної оцінки вектора вільних параметрів \mathbf{P} слід вибирати так, щоб точка \mathbf{P}^* знаходилася всередині множини \mathcal{A} [48]. Оптимізаційну задачу знаходження оптимального вектора вільних параметрів можна вирішувати у різний спосіб. В дослідженні, задача (2.17) вирішувалася чисельними методами за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта [49], який повторюється для різних стахостично отриманих точок \mathcal{A} в околі яких шукається локальний екстремум. Далі на кінечній множині всіх

локальних екстремумів знаходиться глобальній екстремум. Для вибору точок, в околиці яких шукається локальний екстремум, використовується метод представлений в роботі [50]. Сбіжність алгоритму досліджено у роботі [50]

Для вирішення моделі (2.14) необхідно знайти глобальний екстремум на множині всіх знайдених локальних екстремумів [21]. Сбіжність алгоритма досліджена в околиці вибраних методом Монте-Карло за апіорними розподілами, точок [4].

Рішення задачі (2.16) є рішення задачі нелінійної регресії в просторі ознак, який має розмірність $L \cdot 4$, при $L = 5$ це буде 20-ти вимірний простір. На рисунках 2.2 - 2.5 видно, що для параметрів, які входять в модель (2.14) нелінійно, задача (2.16) не стійка, що при великих значеннях L привести може до розбіжності рішення. Якщо врахувати, що кожен параметр моделі вносить в модель шум (це явище в статистиці носить назву «прокляття розмірності»), то для даного випадку модель з 20 - ма вільними параметрами є граничною за складністю для моделей обраного типу для отриманих даних в цьому дослідженні [21]. Тому у розрахунках використовується позначення для 20-ї параметричної моделі, при $L = 5$. Для інтегрування моделі (2.14) в алгоритми автоматичної обробки представимо цю модель у наступному вигляді:

$$M(t, \mathbf{P}_m), M(t, \mathbf{P}_m) = \sum_{l=1}^L P_{m,1+4(l-1)} \left\{ \exp[-P_{m,2+4(l-1)} t] \times \sin[P_{m,3+4(l-1)} (t - P_{m,4+4(l-1)})] \right\} \quad (2.17)$$

де $P_{m,1+4(l-1)}, P_{m,2+4(l-1)}, P_{m,3+4(l-1)}, P_{m,4+4(l-1)}$ – це вільні параметри моделі (2.17) для кожної з підмоделей $l = \overline{1, L}$:

$P_{m,1+4(l-1)}$ – амплітуди для кожної з підмоделей $l = \overline{1, L}$.;

$P_{m,2+4(l-1)}$ – логарифмічні декременти для кожної з підмоделей $l = \overline{1, L}$.;

$P_{m,3+4(l-1)}$ – кутові частоти для кожної з підмоделей $l = \overline{1, L}$.;

$P_{m,4+4(l-1)}$ – та зсуви фаз для кожної з підмоделей $l = \overline{1, L}$.

Для визначення точок екстремуму критерію $F_m(\mathbf{P}_m)$, шукається $\min\{F_m(\mathbf{P}_m)\}$; $m = \overline{1, M}$; $\mathbf{P}_m \in \mathcal{A}_m$ на множині \mathcal{A}_m можливих значень. \mathbf{P}_m вектор-функція, що складається з часткових похідних моделі $\partial M(t, \mathbf{P}_m) / \partial P_{m,j} = 0$; $j = \overline{0, 15}$ по кожному з параметрів $\partial P_{m,j}$:

$$\frac{\partial M(t, \mathbf{P}_m)}{\partial P_{m,1+4(l-1)}} = \exp[-P_{m,2+4(l-1)}t] \times \sin[P_{m,3+4(l-1)}(t - P_{m,4+4(l-1)})], \quad l = \overline{1, L} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial M(t, \mathbf{P}_m)}{\partial P_{m,2+4(l-1)}} = -tP_{m,1+4(l-1)} \exp[-P_{m,2+4(l-1)}t] \times \sin[P_{m,3+4(l-1)}(t - P_{m,4+4(l-1)})], \quad l = \overline{1, L}$$

$$\frac{\partial M(t, \mathbf{P}_m)}{\partial P_{m,3+4(l-1)}} = P_{m,1+4(l-1)}(t - P_{m,4+4(l-1)}) \exp[-P_{m,2+4(l-1)}t] \times \cos[P_{m,3+4(l-1)}(t - P_{m,4+4(l-1)})], \quad l = \overline{1, L}$$

$$\frac{\partial M(t, \mathbf{P}_m)}{\partial P_{m,4+4(l-1)}} = -P_{m,1+4(l-1)}(t - P_{m,4+4(l-1)}) \exp[-P_{m,2+4(l-1)}t] \times \cos[P_{m,3+4(l-1)}(t - P_{m,4+4(l-1)})], \quad l = \overline{1, L}$$

Методом Монте-Карло, по апіорним розподілам, береться точка в n -мірному просторі, в околиці якої знаходиться локальний екстремум і знаходимо значення вектора вільних параметрів моделі (2.17), що дає мінімум критерію (2.16), а саме вілхилення моделі (2.17) від даних спостереження в метриці L_2 . [4].

Отже, ми знаходимо глобальний мінімум функціоналу $F_m(\mathbf{P}_m)$ на множині допустимих, з відомим апіорі розподілом, векторів \mathbf{P}_m з множини \mathcal{A}_m . Де \mathcal{A}_m множина всіх можливих значень вектора вільних параметрів моделі (2.17)

$$\min_{\mathbf{P}_m} \{F_m(\mathbf{P}_m)\}; \quad m = \overline{1, M}; \quad \mathbf{P}_m \in \mathcal{A}_m$$

Результати розрахунків для моделі з n згасають гармонік зведені у вектори розмірності n , що поєднують одновимірні параметри, тобто. розглядається параметрична модель розмірності $n \times 4$.

На рисунку 2.2 представлена залежність критерію згоди моделі від параметрів, що нелінійно входять в модель, а саме частот першої та другої гармонік, при фіксованих інших параметрах 12-вимірного вектора, при $L = 3$. Ці параметри входять у модель нелінійно [21]. Ми бачимо складну топографію поверхні з множини локальних екстремумів. Такий вид критерію і зумовив підхід до пошуку глобального мінімуму прийнятого в цій роботі, а саме методу випадкового пошуку за апріорними розподілами.

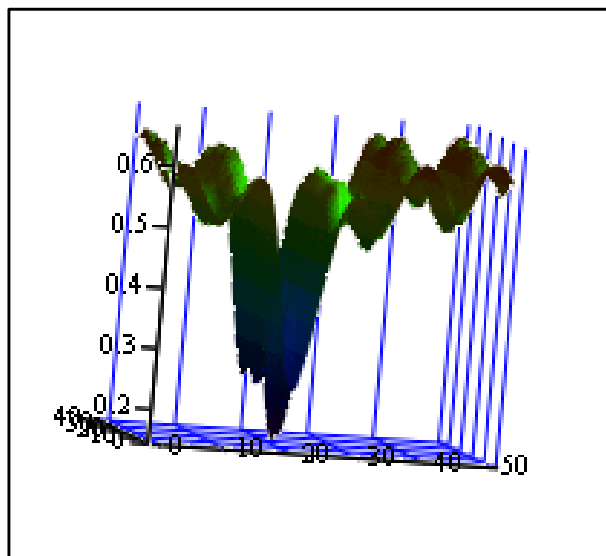


Рисунок 2.2 - Залежність критерію згоди моделі від параметрів, що нелінійно входять у модель параметрів: частот першої (осі абсцис) і другої (осі ординат) гармонік осциляцій

Цей рисунок дає уявлення про те, як близько в просторі параметрів потрібно потрапити до точки глобального мінімуму в методі Монте-Карло, щоб не вийти на локальний мінімум, і отримати оптимальне рішення [21].

Для параметрів, що лінійно входять у модель ситуація значно простіше, оскільки для цих параметрів функціонал (2.16) (при фіксованих нелінійних параметрах) є увігнутим і має один екстремум. Це можна простежити

аналізуючи рисунок 2.2, де дві незалежні змінні критерія (2.16) є значення амплітуд першої та другої гармонік, при цьому інші параметри зафіксовані.

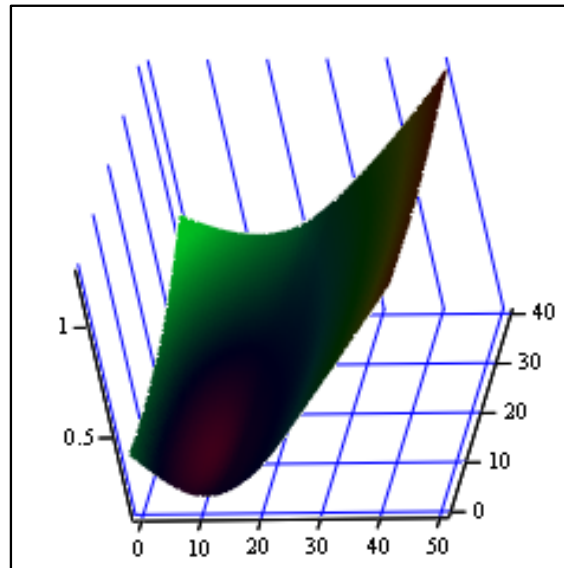


Рисунок 2.3 - Залежність критерію (2.16) моделі від параметрів, що лінійно входять у модель (2.14), а саме: амплітуд першої (осі абсцис) і другий (осі ординат) гармонік осциляцій в точці спостереження (при фіксованих інших параметрах)

Характер нелінійності параметрів, що входять у модель (2.14), дозволяє будувати прогнози щодо поведінки критерію при зміні тих чи інших параметрів моделі. Параметри, які визначають фазу відповідних гармонік входять у модель нелінійно, мають період 2π , тому апріорні розподіли у методі Монте-Карло розглядаються на інтервалі $[-\pi, \pi]$. Це можна побачити аналізуючи рисунок 2.4, де представлений критерій як функція зсуву фаз та кругової частоти першої гармоніки при фіксованих інших параметрах моделі [21].

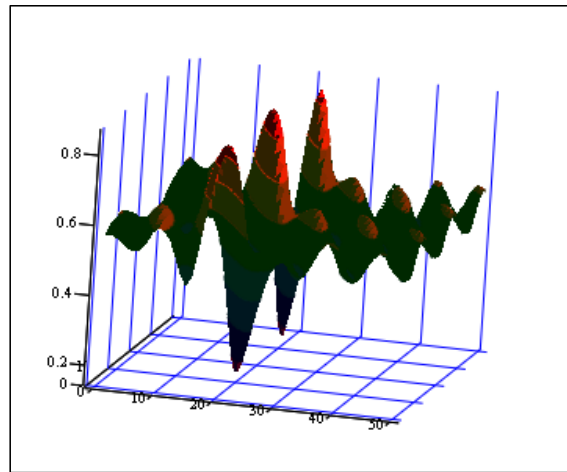


Рисунок 2.4 - Критерій (2.16) як функція зсуву фаз та кругової частоти першої гармоніки при фіксованих інших параметрах. По осі абсцис частоти, по осі ординат зсув фаз

Якщо в якості двох незалежних змінних критерію (2.16) обрані значення показника ступеня загасаючої експоненти третьої гармоніки та її частота, при цьому інші параметри моделі зафіксовані, то в цьому випадку у тривимірному просторі критерій (2.16) представлено на рисунку 2.5.

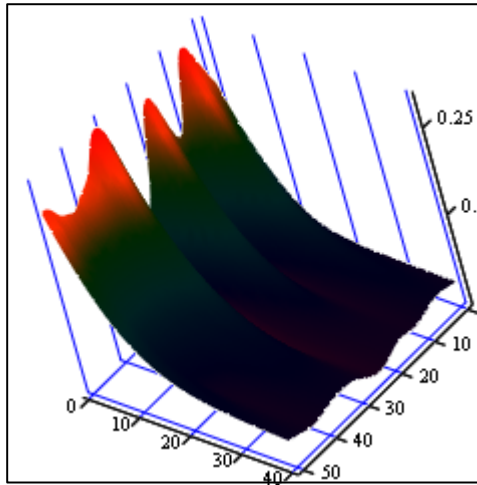


Рисунок 2.5 - Критерій (2.16) як функція показника ступеня загасаючої експоненти третьої гармоніки та її частоти при фіксованих інших параметрах, де вісь абсцис – частота; вісь ординат – показник ступеня експоненти

Вище наведені розрахунки представлено з метою показати порядок оцінки вільних параметрів моделі при використанні комп'ютеризованій технології. Розрахунки приведені лише для однієї з компонентів запису прискорення коливання ґрунту викликаного сигналом вибухового поля [21].

Далі представлено оптимальні, з точки зору критерія (2.16) параметри моделі (2.14) для реально зареєстрованого сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм):

$S^T = \{3.7546, 3.1946, 3.1181, 2.8887, 2.7766\}$ – транспонований вектор амплітуд власних частот;

$\mu^T = \{0.521 \ 0.685 \ 0.093 \ 0.3570.248\}$ – транспонований вектор декрементів на власних частотах;

$\omega^T = \{7.1853, 10.1790, 7.7840, 10.7780, 6.5865\}$ – транспонований вектор власних частот Гц;

$\Phi^T = \{1,154 \ 2,734 \ 1,347 \ 0,542 \ 0,953\}$ рад – транспонований вектор зсувів фаз в радіанах;

Для класифікації сигналів вибухового поля особливо важливими є значення частот та логарифмічного декременту, оскільки амплітуда та зсув фаз вибухового сигналу залежить від координат як, епіцентру вибуху, так і точки реєстрації вибухового сигналу [51,52]. Для знаходження оптимального з точки зору критерія (2.17) вектору вільних параметрів моделі (2.14) є параметри амплітуд, і зсуву фаз.

Метод Монте-Карло, що використовується в даній роботі, дає збіжність до рішення лише за ймовірністю [47]. Кількість циклів обчислень має бути досить великою для впевненості у правильності результату, що стає складним при великій розмірності моделі (2.14), або потрібно мати близькі до реальних апріорні уявлення про очікуване значення вектору вільних параметрів моделі (2.14) [44].

2.2.3 Перевірка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Для проведення оцінки адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу (2.14) необхідно здійснити:

1. Синтез осциляторів за параметрами моделі (2.14) змодельованого сигналу вибухового поля.
2. Оцінку ухилення моделі (2.14) від даних спостереження для обраного критерію (2.16).

На рисунку 2.6 представлено фрагмент запису 1-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу

осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

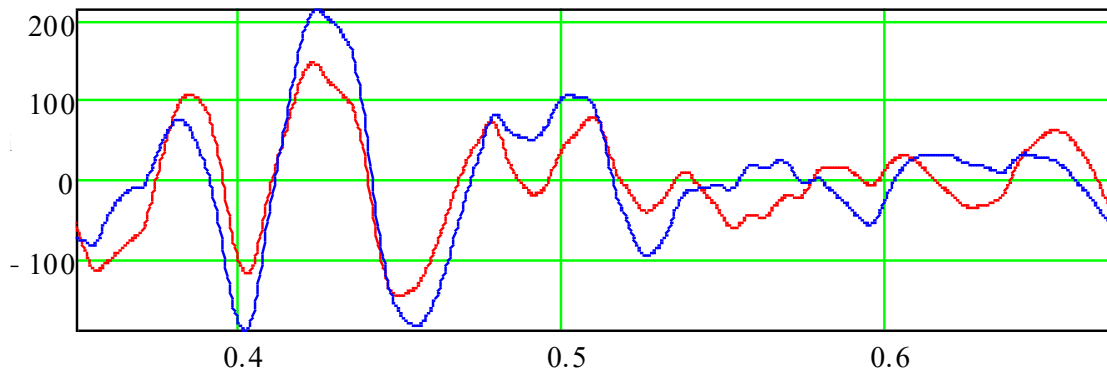


Рисунок 2.6 - Фрагмент запису 1-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях.

На рисунку 2.7 представлено відхил 12-ти параметричної моделі (2.14) і сигналу вибухового поля викликаного мінометним вибухом (заряд міномету калібру 120 мм). Ухилення між даними на рисунку складає 8 % в метриці L_2 .

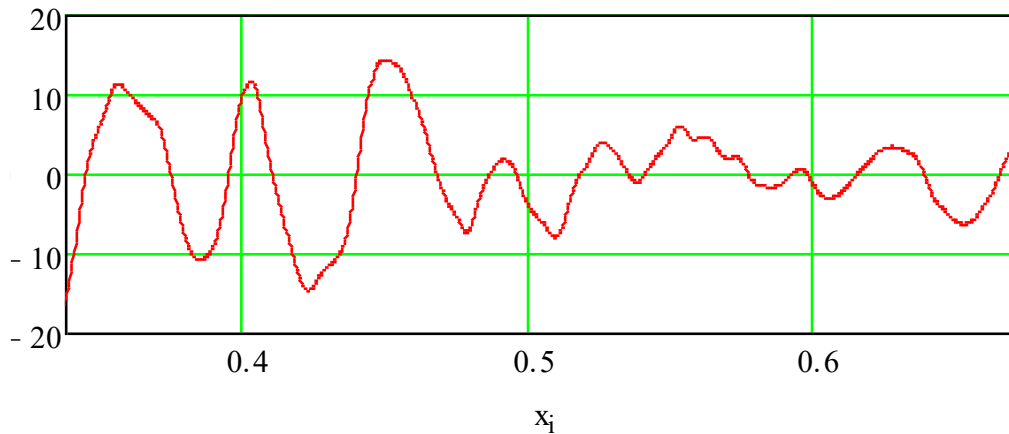


Рисунок 2.7 - ухилення 12-ти параметричної моделі та сигналу вибухового поля викликаного мінометним вибухом (заряд міномету калібру 120 мм).. Ухилення між даними на рисунку складає 8 % в метриці L_2 .). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

Використовуючи метод сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки, вирішимо математичну модель (2.14) для множини роздільних сигналів вибухових полів

На рисунку 2.8 представлено фрагмент запису 2-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52] .

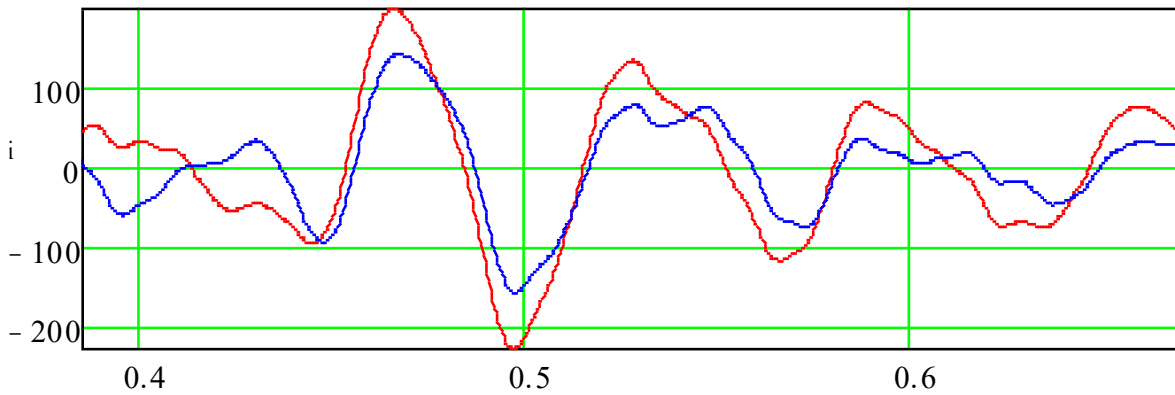


Рисунок 2.8 - Фрагмент запису 2-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.9. представлено фрагмент запису 3-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

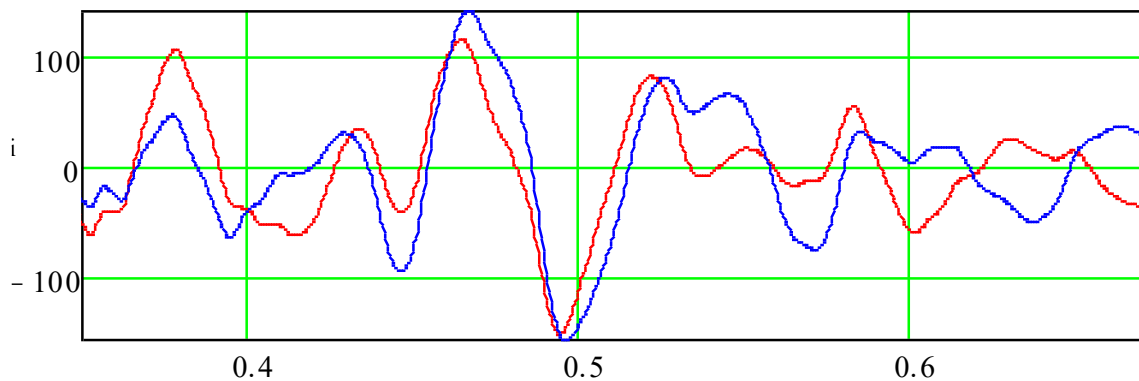


Рисунок 2.9 - Фрагмент запису 3-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний

сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.10. представлено фрагмент запису 4-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

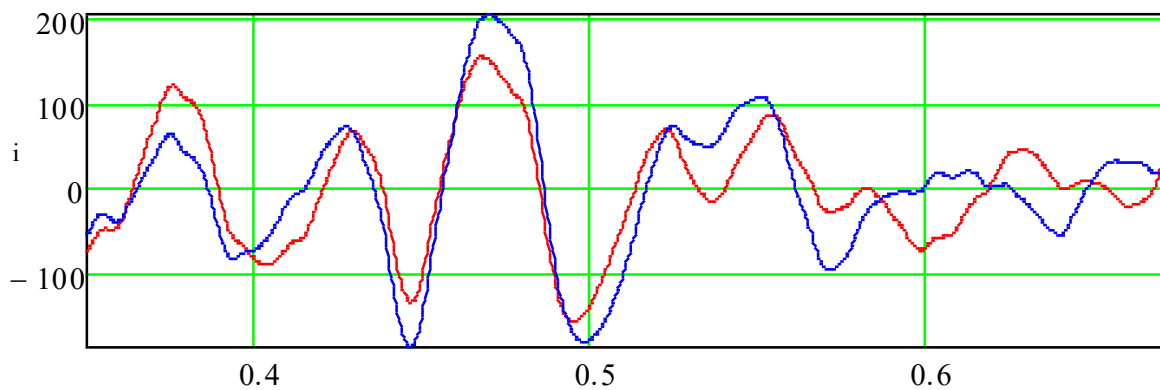


Рисунок 2.10 - Фрагмент запису 4-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.11 представлено фрагмент запису 5-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона

лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

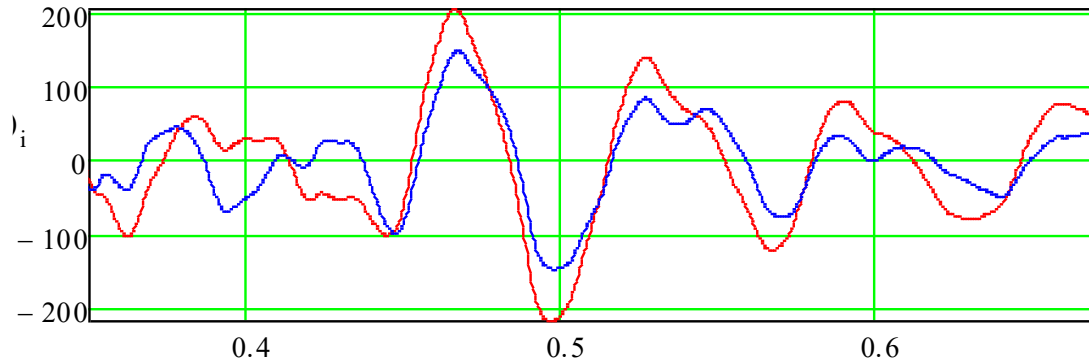


Рисунок. 2.11. Фрагмент запису 5-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.12 представлено фрагмент запису 6-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

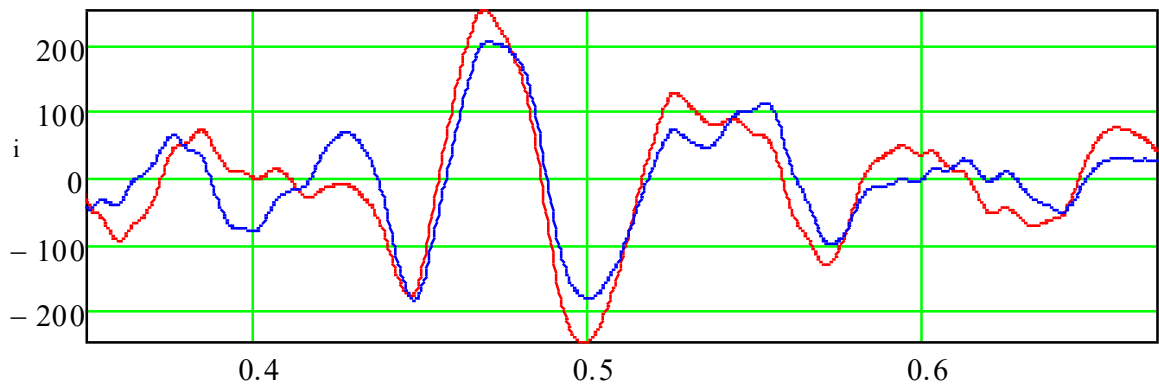


Рисунок 2.12 - Фрагмент запису 6-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.13 представлено фрагмент запису 7-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

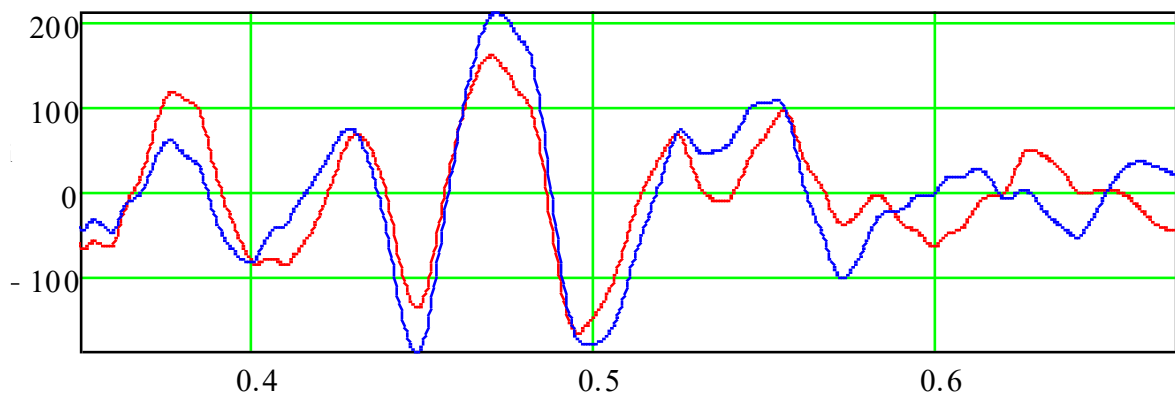


Рисунок 2.13 - Фрагмент запису 7-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку.2.14. представлено фрагмент запису 8-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

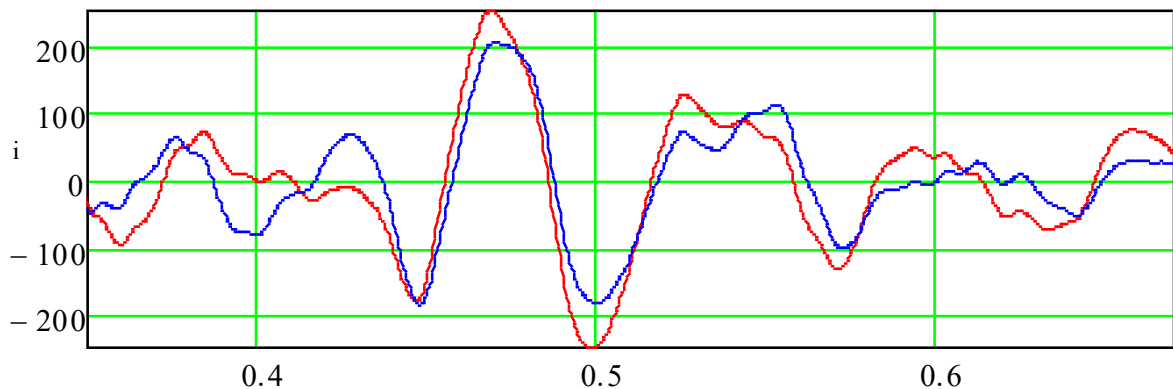


Рисунок 2.14 - Фрагмент запису 8-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.15 представлено фрагмент запису 9-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу

осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

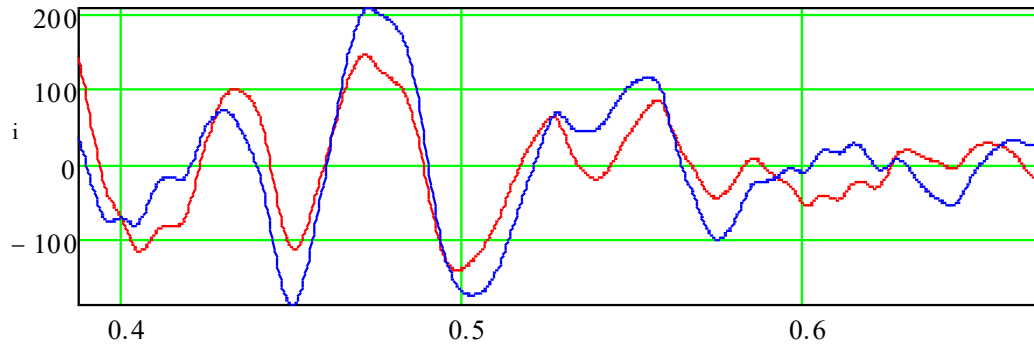


Рисунок 2.15 - Фрагмент запису 9-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

На рисунку 2.16 представлено фрагмент запису 10-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія) та синтезу осциляторів моделі (2.14), що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.6) (червона лінія). При цьому, отримані параметри моделі (2.14) при вирішенні рівняння (2.17) підставляються в модель (2.14), як фіксовані [52].

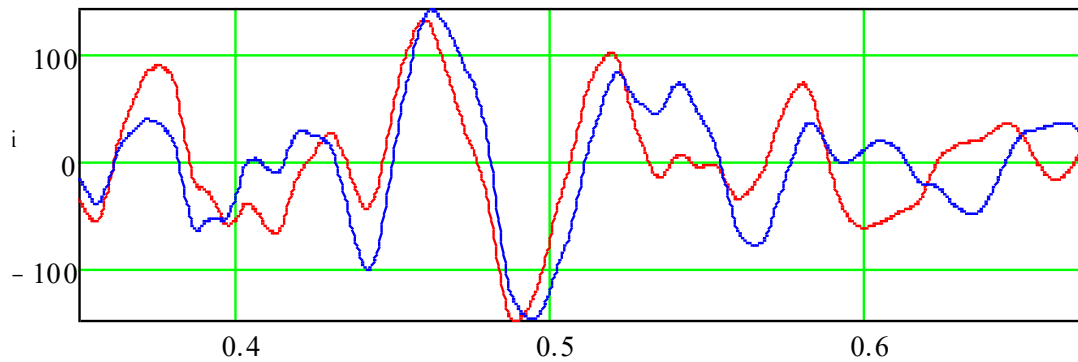


Рисунок 2.16 - Фрагмент запису 10-го сигналу вибухового поля (заряд міномету калібру 120 мм) на тлі шуму фону (синя лінія). Модель, що апроксимує даний сигнал, вільні параметри якої отримані в результаті оцінки оптимальних параметрів критерію (2.16) (червона лінія). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда швидкості коливань у відносних одиницях

Оскільки інформативними параметрами моделі (2.14), що характеризують сигнал вибухового поля, є частоти і декрименти, а амплітуди і фази необхідні для точного рішення моделі, то представимо значення інформативних параметрів, саме частот і декриментів за кожним із трьох асциляторів, десяти сигналів представлених у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Інформативні параметри вирішеної моделі, отриманих під час випробувань на полігоні

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
1	7.185	10.179	7.784	10.7780	6.586	0.521	0.685	0.093	0.357	0.248
2	7.291	10.485	7.825	10.802	6.594	0.575	0.621	0.099	0.329	0.231
3	7.259	9.235	7.535	10.829	6.529	0.553	0.673	0.092	0.345	0.285
4	7.349	10.265	8.147	10.737	6.752	0.582	0.635	0.097	0.373	0.237
5	7.352	10.426	7.925	10.936	6.852	0.523	0.684	0.091	0.325	0.248
6	7.538	10.343	7.756	10.752	6.493	0.575	0.712	0.095	0.336	0.255
7	7.581	10.251	7.924	10.985	6.852	0.593	0.674	0.103	0.392	0.275
8	6.901	10.369	7.527	10.753	6.714	0.538	0.697	0.098	0.325	0.235
8	7.15	10.539	7.746	10.928	6.925	0.517	0.731	0.097	0.412	0.229
10	7.29	10.190	7.739	10.751	6.715	0.541	0.639	0.091	0.378	0.278

В метриці L_2 . різниця між моделлю (2.14) та даними спостереження не перевищує 7% для кожного з десяти випробувань. Таким чином можна стверджувати, що апроксимація даних спостереження при використанні моделі (2.14) дає високу згоду.

Висновки до другого розділу.

1. В роботі вперше представлено метод сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Надано етапи методу сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

2. В рамках запропонованого методу, вперше представлена параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Надано вирішення параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки відносно її вільних параметрів.

3. Проведена перевірка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Яка показала, що в метриці L_2 . різниця між моделлю сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки та даними спостереження не перевищує 7% випробування.

РОЗДІЛ III. УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИБУХОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ ВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ (ВПВДР)

3.1 Обґрунтування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

Сейсмоакустичний моніторинг має свої специфічні діапазони частот, інфразвуковий та акустичний. Для сейсмоакустичного моніторингу об'єктами дослідження є об'єкти різної природи, різних геометричних розмірів, фізичного складу та різною динамікою процесів. Тому режими ведення моніторингу унікальні для кожного об'єкту, і залежать від його унікальних характеристик та цілей дослідження [4].

Сейсмоакустичний моніторинг вибухових полів для ведення дистанційної розвідки являє собою множину режимних спостережень, причому режим самих спостережень і спектральних параметрів об'єкта, що досліджуються, залежать від постановки задачі дослідження. Підвищення достовірності класифікації вибухових сигналів досягається за рахунок використання інформаційних технологій в дистанційній розвідці на основі сейсмоакустичного моніторингу. Термін «режимні спостереження», що використовуються вище, передбачає чіткій порядок дій [27].

Перш за все, необхідно побудувати математичну модель нероздільного сигналу вибухового поля, в якій відображала б найбільш суттєві моменти процесу моніторингу сигналів вибухових полів. В процесі побудови такої моделі необхідно врахувати як параметри, що описують сам процес, так і параметри завади й природного шумового фон, та специфіку передаточної функції середовища. Для проведення моніторингу вибухових полів, необхідно набрати статистику для різних сигналів вибухових полів та передаточних

функцій середовищ, в яких розповсюджується сигнал. Це забезпечить апріорні уявлення як про вибухове поле в точках дослідження, так і про самі сигнали вибухових полів. Апріорне знання випадкового процесу завад дозволить значною мірою послабити їх вплив на отримання оцінок сигналу вибухового поля, що досліджується [37]. Це ослаблення досягається оптимізацією процедур обробки, що враховують апріорні статистики випадкового процесу перешкод. В роботі враховується вплив нестабільності параметрів процесу дослідження та оптимізації процедури обробки спостережених даних за критеріями, що враховують характеристики природного фону завад [41].

Процес моніторингу вибухових полів зводиться до оцінки інформативних параметрів параметричних математичних моделей роздільних та нероздільних сигналів вибухового поля, суперпозиція яких формує саме вибухове поле. Множина всіх інформативних параметрів кожного сигналу вибухового поля формує вектор цих параметрів в n - вимірному Евклідовому просторі. Кожен з цих векторів однозначно характеризує сигнал, параметри математичної моделі якого і є цей вектор [21]. Таким чином класифікація вирішених і нероздільних сигналів вибухових полів зводиться до класифікації цих векторів в n - вимірному Евклідовому просторі [52].

3.2 Параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

3.2.1 Математична модель вибухового поля

В задачах оцінки параметрів сейсмічних сигналів вибухового поля в певній точці реєстрації, виникає необхідність оцінювати параметри сигналів одного класу, які характеризують, сигнал вибухового поля певного класу [4]. Оцінка параметрів цих сигналів проводиться на тлі деякої адитивної перешкоди

$n(t)$ та суперпозиції потоків вибухових сигналів інших класів. Передбачається можливим прийняти наступну модель процесу формування вибухового поля $y(t, \zeta)$ в точці реєстрації ζ :

$$y(t, \zeta) = \sum_{k=0}^N \sum_{i=1}^{q_k} \theta_{ki}(\zeta) U_k(t, \tau_{ki}(\zeta)) + n(t, \zeta) \quad (3.1)$$

де $U_k(t, \tau_{ki}(\zeta))$ - одиночний сигнал k -го потоку, який є фізично здійсненою нормованою функцією (3.2), $n(t)$ - адитивна перешкода, N - число потоків, що формують (3.1).

Фізично здійсненна нормована функція задовольняє умовам причинності та стабільності:

$$U_k(t, \tau_{ki}(\zeta)) = \begin{cases} U_k(t, \tau_{ki}(\zeta)), & t \geq \tau_{ki}(\zeta) \\ 0, & t < \tau_{ki}(\zeta) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\int_{\tau_{ki}}^{\infty} U_k^2(t, \tau_{ki}(\zeta)) dt = 1$$

Надалі розглянемо реєстрацію поля у фіксованій точці ζ , тому в подальших розрахунках координату сенсора враховувати не будемо.

Під потоком сигналів одного класу розглядається сукупність сигналів що вступають у випадкові моменти τ_{ki} і які не відрізняються за формою. Як видно з (3.2), форма сигналу залежить від моменту його початку [4]. Передбачається, що сигнали вибухового поля флюктують по амплітуді так, що коефіцієнти θ_{ki} випадкові незалежні величини з функцією розподілу $H_k(x)$ та щільністю $h_k(x)$ з відповідною характеристичною функцією $\psi_k(\varpi)$. Вважатимемо, що відома одномірна щільність і відповідна їй характеристична функція $\beta(t, \varpi)$ адитивної

перешкоди $n(t)$. При оцінці параметрів сигналів одного потоку, наприклад нульового, випадковим шумом моделі (3.1) буде функція:

$$W(t) = \sum_{k=1}^N W_k(t) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{q_k} \theta_{ki} U_k(t, \tau_{ki}) + n(t) \quad (3.3)$$

Нижче будується характеристична функція розподілу значень процесу (3.3) у кожній точці, коли потоки хвиль кожного класу приймаються Пуассонівськими з відповідними кожному класу інтенсивностями λ_k . Це означає, що модель процесу формування є суперпозицією N незалежних класів сигналів, кожен з яких є потоком сигналів, що вступають у випадкові моменти τ_{ki} , які утворюють потік з відповідною інтенсивністю [4]. Так, якщо на інтервалі $(0, t)$ було q_k надходжень сигналів одного класу, то випадкові моменти $\tau_{k1}, \dots, \tau_{kq_k}$ розподілені як упорядковані спостереження з рівномірного розподілу на інтервалі $(0, t)$ [53].

Розподіл значення процесу $W(t)$ в точці t , в силу незалежності потоків, визначається за розподілами кожного з його складових процесів $W_k(t)$ і фонового шуму $n(t)$, тому достатньо знайти розподіл $W_k(t)$, $k = 1, \dots, N$

Нехай $\xi_{k1}, \dots, \xi_{kq_k}$ послідовність рівномірно розподілених на $(0, t)$ випадкових величин така, що $\tau_{k1} = \min\{\xi_{k1}, \dots, \xi_{kq_k}\}$; τ_{k2} - другий за величиною елемент з множини $\{\xi_{k1}, \dots, \xi_{kq_k}\}$ і т. д. Тоді процес $W_k(t)$ можна записати у наступному вигляді:

$$W_k(t) = \sum_{i=1}^{q_k} \theta_{ki} U_k(t, \tau_{ki}) = \sum_{i=1}^{q_k} \theta_{ki} U_k(t, \xi_{ki}) \quad (3.4)$$

де ξ_{ki} -значення амплітуди сигналу, що вступив у момент τ .

Якщо позначити $\theta_{ki} U_k(t, \xi_{ki})$ через $\alpha_{ki}(t)$, то через прийняті припущення $\alpha_{ki}(t)$, незалежні випадкові величини при фіксованому t . Нехай $f(x, t)$ – щільність розподілу $\alpha_{ki}(t)$, та $\varphi_t(\varpi)$ відповідна характеристична функція [54,55]

$$\begin{aligned} P\{\alpha_{ki}(t) \leq x\} &= \frac{1}{t} \int_0^t P\{\alpha_{ki}(t) \leq x | \xi_{ki} = \tau\} d\tau = \\ &= \frac{1}{t} \int_0^t P\{\xi_{ki} \leq x U_k^{-1}(t, \xi_{ki}) | \xi_{ki} = \tau\} d\tau = \\ &= \frac{1}{t} \int_0^t H_k(x U_k^{-1}(t, \tau)) d\tau \end{aligned} \quad (3.5)$$

З іншого боку, за визначенням щільності:

$$P\{\alpha(t) \leq x\} = \int f(z, t) dz \quad (3.6)$$

Тоді з результатів (3.5) та (3.6) випливає:

$$\begin{aligned} \int f(z, t) dz &= \frac{1}{t} \int H(x U(t, \tau)) d\tau \\ f_i(x, i) &= \frac{1}{t} \int_0^t \frac{\partial}{\partial x} H_k(x U_k^{-1}(t, \tau)) d\tau = \\ &= \frac{1}{t} \int_0^t h_k(x U_k^{-1}(t, \tau)) |U_k^{-1}(t, \tau)| d\tau \end{aligned} \quad (3.7)$$

Характеристична функція для моделі (3.4) буде:

$$\frac{1}{t} \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} h_k(x U_k^{-1}(t, \tau)) |U_k^{-1}(t, \tau)| e^{-i\alpha x} dx d\tau \quad (3.8)$$

де $\gamma_k(t, \omega)$ - характеристична функція розподілу $W(t)$, тоді:

$$\begin{aligned} \gamma_k(t, \omega) &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega x} \frac{\partial}{\partial x} P\{W_k(t) \leq x | q_k = n\} * e^{-\lambda_k t} \frac{(\lambda_k t)^n}{n!} = \right. \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\lambda_k t} \frac{(\lambda_k t)^n}{n!} \left[\frac{1}{t} \int_0^t \psi_k(\omega U_k(t, \tau)) d\tau \right]^n = \\ &= \exp \left\{ -\lambda_k \int_0^t [1 \pm \psi_k(\omega U_k(t, \tau))] d\tau \right\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Оскільки $W_k(t), k = I, \dots, N$ незалежні, то характеристична функція $\gamma(t, \omega)$ розподілу $W(t)$ визначається як добуток характеристичних функцій $\gamma_k(t, \omega)$:

$$\gamma(t, \omega) = \prod_{k=1}^N \gamma_k(t, \omega) = \exp \left\{ -\sum_{k=1}^N \lambda_k \int_0^t [1 \pm \Psi(\omega U_k(t, \tau))] d\tau \right\} \beta(t, \omega). \quad (3.10)$$

З виразу (3.7) видно, що у разі стаціонарної перешкоди $n(t)$ шум $W(t)$ нестаціонарний, оскільки характеристична функція залежить від моменту t . Вираз (3.7) дозволяє обчислити моменти значень процесу у кожний момент t . Наведемо значення першого моменту $\mu_1[W(t)]$ та другого моменту $\mu_2[W^2(t)]$.

$$\mu_1(t) = \frac{\partial \gamma(\omega, t)}{\partial \omega} (-1) |_{\omega=0} = \mu_1[n(t)] + \sum_k \lambda_k \mu_1(\theta_k) \int_0^t U_k(t, \tau) d\tau. \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \mu_2(t) &= -\frac{\partial^2 \gamma(\omega, t)}{\partial \omega^2} |_{\omega=0} = 2\mu_1[n(t)] \sum_k \lambda_k \mu_1(\theta_k) \int_0^t U_k(t, \tau) d\tau + \\ &+ \sum_k \sum_s \lambda_k \lambda_s \mu_1(\theta_k) \mu_1(\theta_s) \int_0^t U_k(t, \tau) d\tau \int_0^t U_s(t, \tau) d\tau + \\ &+ \mu_2(n(t)) + \sum_k \lambda_k \mu_2(\theta_k) \int_0^t U_k^2(t, \tau) d(\tau). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Вирази першого і другого моментів показують, що стаціонарність навіть у широком сенсі для шумового фону в вибуховому полі немає місця, навіть якщо розглянути стаціонарний випадок для сигналів, а саме у випадку коли $U_k(t, \tau) = U_k(t - \tau)$. В цьому випадку довжина інтервалу інтегрування залежить від інтервалу часу [54]. Якщо тривалість сигналу пропорційна цьому інтервалу має місце інтегральний ефект, тобто накопичення сигналів з початку процесу $W(t)$.

Припущення про стаціонарності у широкому сенсі процесу $W(t)$ може бути справедливо лише для коротких сигналів, час існування яких набагато менше інтервалу спостереження. Тут доречно порівняти отриманий результат з відомими формулами Кемпбелла [53,56] для моделі дробового ефекту, отриманими для коротких, фізично здійснених сигналів, що утворюють Пуассонівський потік. Слово короткий означає, що сигнал менший за тривалістю, ніж інтенсивність Пуассонівського потоку. Фізична нездійсненність сигналів у цих формулах прийнята за першим пунктом визначення фізичної здійсненності сигналу (3.2), тобто за умовою причинності.

$$\mu_1(x(t)) = \lambda \mu_1(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} U(t) dt \quad (3.13)$$

$$\mu_2(x(t)) = \mu_1^2(x(t)) + \lambda \mu_2(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) dt. \quad (3.14)$$

Формули Кемпбелла показують, що для дробового ефекту ні перший ні другий моменти не залежить від часу і це означає стаціонарність процесу у широкому сенсі.

Результат (3.11) і (3.12) отримано рандомізацією флуктуючих коефіцієнтів θ_{ki} та моментів вступу сигналів τ_{ki} у моделі (3.1).

Використовуємо цей прийом для обчислення моментів процесу (3.3) для потоку Бернуллі [54]. Флуктуації вважатимемо, як і раніше, незалежними випадковими величинами з першим моментом $\mu_1(\theta)$ і другим $\mu_2(\theta)$

В цьому випадку перший момент $\mu_1(W(t))$ процесу $W(t)$ буде:

$$\begin{aligned}
 E(W(t)) &= E\left(\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{K_k} \theta_{ki} \cdot U_k(t, \tau_{ki}) + n(t)\right) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{K_k} \mu_1(\theta_{ki}) \cdot \int_{(K_k)}^t U_k(t, \tau_{ki}) \cdot \pi_{K_k}(\bar{\tau}_{K_k}, \Omega) \cdot d\bar{\tau}_{K_k} + \\
 &+ \mu_1(n(t)) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{K_k} \mu_1(\theta_{ki}) \cdot \int_{(K_k)}^t U_k(t, \tau_{ki}) \cdot \prod_{i=1}^{K_k} e_{ki}(\tau_{ki}) \cdot d\bar{\tau}_{K_k} + \mu_1(n(t)) = \\
 &= \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{K_k} \mu_1(\theta_{ki}) \cdot \int_{(K-1)}^t \prod_{ij \neq i}^{K_k} e_{kj}(\tau_{kj}) \cdot d\bar{\tau}_{K_k-1} \cdot \int_0^t U_k(t, \tau_{ki}) \cdot e_{ki}(\tau_{ki}) \cdot d\tau_{ki} + \mu_1(n(t)) = \\
 &= \mu_1(n(t)) + \sum_{k=1}^N K_k! \cdot P_k \mu_1(\theta) \sum_{s=1}^{K_k} \frac{\bar{u}_{ks}(t)}{P_{ks}}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

де p_k – ймовірність появи всіх сигналів k -ого потоку;

p_{ks} – ймовірність появи s -го сигналу в k -му потоці;

$\bar{U}_{ks}(t)$ – усереднений за моментами вступу s -ий сигнал k -го потоку;

K – кількість сигналів в k -му потоці.

Моделі (3.13) і (3.14) це два перші моменти Пуассонівського потоку сигналів, а модель (3.15) дана для потоку Бернуллі [54].

Оцінка параметрів цих сигналів проводиться на тлі деякої адитивної перешкоди $n(t)$ та суперпозиції потоків вибухових сигналів інших класів. які у разі не оцінюються і не ідентифікуються і можуть розглядатися як перешкода. В цьому випадку випадковою функцією перешкоди буде суперпозиція потоків сигналів вибухових полів, що не класифікуються і фоновий шум [4].

3.2.2 Параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

Сигнали вибухового поля входять в модель (3.1) як нероздільні сигнали. Тобто модель (3.1) являє собою суперпозицію нероздільних сигналів. Нероздільні сигнали - це сигнали, які не можуть бути однозначно визначені або виділені один від одного із загальної форми сигналу [51]. Тобто в кожній точці реєстрації вибухового поля нероздільні сигнали представлені потоком роздільних сигналів, які накладаються один на одний в загальній формі сигналу.

В якості моделі роздільного сигналу вибухового поля вибираємо суперпозицію рішень диференціального рівняння другого порядку, яка описує суперпозицію осциляторів, які вступили в різні моменти часу, що мають свої амплітуди та власні частоти [52]. З метою інтеграції моделі роздільних сигналів (2.14) в модель вибухового поля (3.1) представимо модель роздільних сигналів у наступному вигляді:

$$M(t, \lambda) = \sum_{i=0}^I \Phi(t - l_{0+4i}) l_{1+4i} \gamma^{-l_{2+4i}(t - l_{0+4i})} \sin[l_{3+4i}(t - l_{0+4i})] \quad \lambda = \{l_{p+4i}\}_{i=0,1;p=0,4}. \quad (3.16)$$

де λ – вектор вільних параметрів моделі; I – кількість підмоделей, які входять до суперпозиції; p – номер відповідної підмоделі; $\Phi(t)$ – функція Гевісайда [57]; i – порядковий номер підмоделі; l_{0+4i} – час вступу сигналу; l_{1+4i} – амплітуда сигналу; l_{2+4i} – коефіцієнт затухання сигналу; l_{3+4i} – частота сигналу.

Оптимальна оцінка параметрів сигналу полягає у визначенні вектора вільних параметрів, що мінімізують значення критерію згоди моделі з даними спостереження [52]. Така модель вона дає гарну згоду у разі моделювання

лінійної системи осцилюючих об'єктів і тим самим враховує осцилюючий характер вибухових сигналів. В якості критерія згоди виберемо величину норми L_2 (інтеграл квадрата ухилення моделі від спостережених даних $y(t)$) або L_1 (інтеграл модуля ухилення моделі від спостережених даних $y(t)$) [52]. У першому випадку критерій набуває $F(\lambda)$ вигляду: $F(\lambda) = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)]^2 dt$.

В другому випадку: $F(\lambda) = \int_T |y(t) - M(t, \lambda)| dt$.

Оптимальна оцінка вільних параметрів λ^* – це точка в просторі параметрів, яка мінімізує $F(\lambda)$:

$$F(\lambda^*) = \min_{\lambda \in \Lambda} F(\lambda) \quad (3.17)$$

$y(t)$ - аналітична апроксимація вектор функції значень спостережених даних. Λ - множина всіх можливих значень вектора λ . Щоб знайти мінімум критерію, нам необхідно обчислити часкові похідні $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$ і, прирівнявши їх до нуля, створити систему рівнянь, яка має вигляд:

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k} = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)] \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_k} dt = 0 \quad k = \overline{0, K}$$

Система приводиться:

$$\int_T [y(t) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt = \int_T [M(t, \lambda) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt$$

де $\mathbf{D}(M(t, \lambda))$ – вектор, складений з функцій, кожна з яких – це похідна моделі за всіма відповідними компонентами вектора λ .

Для моделі (3.16) цей вектор має вигляд:

$$\mathbf{D}(M(t, \lambda)) = \left\{ \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_{p+i}} \right\}; \quad p = \overline{0, 3}; \quad i = \overline{0, I}, \quad (3.18)$$

Актуальність варіаційного підходу у вирішенні задач сейсмоакустичного моніторингу можна простежити, наприклад, у [58].

Пошук мінімуму критерію (3.17) здійснюється за алгоритмом Лівенберга-Маркварда [49], для апріорі випадковим чином обраної точки у просторі вільних параметрів моделі (3.16)

Модель (3.16) може бути узагальнена на випадок потоку нероздільних сигналів, тобто коли носії сигналів перетинаються. Тоді модель потоку нероздільних сигналів приймає вигляд :

$$M(t, \lambda) = \prod_{s=1}^S \prod_{i=0}^I e^{\Phi(t - l_{0+i,s})} l_{1+i,s}^{\frac{1}{2}} e^{-l_{2+i,s}(t - l_{0+i,s})} \sin[l_{3+i,s}(t - l_{0+i,s})] \quad (3.19)$$

де S - кількість сигналів, що перетинаються в групі; λ – матриця вільних параметрів моделі; I – кількість підмоделей, які входять до суперпозиції; p – номер відповідної підмоделі; $\Phi(t)$ – функція Гевісайда [57]; i – порядковий номер підмоделі; $l_{0+4i,s}$ – час вступу S -го сигналу; $l_{1+4i,s}$ – амплітуда S -го сигналу; $l_{2+4i,s}$ – коефіцієнт затухання S -го сигналу; $l_{3+4i,s}$ – частота S -го сигналу [51].

Тобто модель (3.19) складається з S окремих роздільних сигналів. У загальному випадку S - випадкова величина. У матриці вільних параметрів

моделі $\Lambda = \{l_{k,s}\}; k = \overline{0, K}; s = \overline{1, S}; K = 4I;$ стовпчик з номером $s \in$ вектором параметрів s -го сигналу. У цьому векторі параметрів $\text{mod}(k, 4)$ - це номер $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2,$ або λ_3 параметра відповідної згасаючої (або зростаючої) гармоніки. Ця гармоніка має номер $\text{ant}(k, 4)$. Ми приймаємо таку символіку: $\text{mod}(k, 4)$ - це залишок від розподілу числа k на 4, а $\text{ant}(k, 4)$ - це ціла частина від ділення k на 4 [51]. Розглянутий вище приклад моделі (3.16) можна вважати окремим випадком більш загальної моделі (3.19), у випадку коли $l_{0+i,s}$ не залежить від i .

Оптимальна оцінка матриці вільних параметрів моделі (3.19) Λ , визначається значення вільних параметрів, що дають мінімальне значення критерію (3.17), на множині локальних мінімумів цього критерію. Процедура отримання оптимальної оцінки полягає в тому, що для множини з M матриць Λ визначаються точки локальних екстремумів, найближчі до кожної з них, і далі на множині локальних мінімумів вибирається глобальний [52].

Точка, яка дає цей мінімум критерію у $(K+1) \cdot S$ мірному просторі вибирається як оптимальна для вільних параметрів сигналу моделі. У такій процедурі забезпечена збіжність до оптимального рішення за ймовірністю зі зростанням кількості M . У цьому випадку можна вважати, що ми отримали в результаті рішення суперпозицію M роздільних сигналів (3.16), що почалися в різний час [51].

3.2.3 Оцінка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Для оцінки адекватності моделі (3.19) проведемо імітаційне моделювання вибухового поля, яке моделюються реалізацією стохастичного процесу в

кожній точці спостереження. Імітаційне моделювання проводилося в програмному середовищі Mathcad 6.0.0.0.

Для вирішення цієї задачі необхідно імітувати як мікросейсмічний фон, який супроводжує спостереження, так і суперпозицію нероздільних один відносно одного, сигналів, які імітують сигнали вибухового поля. Сигнали вибухового поля та сигнали завади імітуються сигналами Берлаге, тому що фізично здійснений сигнал добре апроксимується імпульсами Берлаге [59]:

$$y(t) = \eta(t)te^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (3.20)$$

Для врахування переднього фронту сигналу вибухового поля узагальнення імпульсу Берлаге можна представити в наступному вигляді:

$$y(t) = A\eta(t-\tau)(t-\tau)^\beta \exp\{-\alpha(t-\tau)\} \sin[\omega(t-\tau)] \quad (3.21)$$

де $\eta(t-\tau)$ – це функція Гевісайда [57], для імпульсу Берлаге, що вступив в момент часу τ ;

- $y(t)$ – дані, що спостерігаються;
- $\{A, \tau, \alpha, \omega, \beta\}$ вектор вільних параметрів моделі, де A - амплітуда коливань;
- τ - час отримання сигналу;
- α - параметр характеризує згасання сигналу (декремент);
- ω - частота сигналу;
- β - параметр, який характеризує фронт сигналу.

Відповідно проведеним дослідженням, які надані в п. 2.2 доцільно імітувати мікросейсмічний фон у вигляді суперпозиції з 30 узагальнених імпульсів Берлаге (3.21) з амплітудами, які не перевищують 0,4 відносних одиниць (рисунок 3.1) [55].

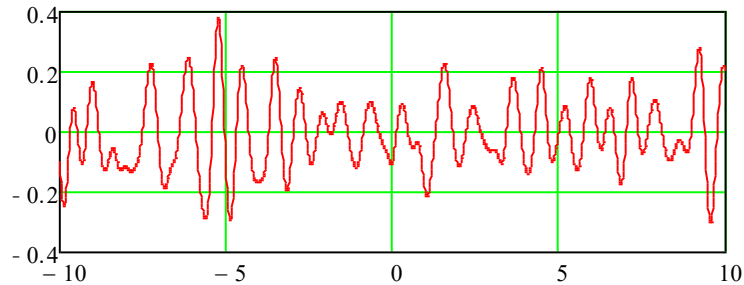


Рисунок 3.1 - Фрагмент імітаційного моделювання мікросейсмічного фону. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

Для оцінки адекватності моделі (3.19) побудуємо три нероздільні один відносно одного сигнали, які імітують сигнали вибухового поля узагальненими імпульсами Берлаге (3.21) з амплітудами 0.8, 1.2 та 1.5 у відносних одиницях (рисунки 3.2-3.6). Вибір форми сигналу зроблено відповідно до проведених досліджень, які надані в п. 2.2, Три нероздільні сигнали вибрано з точки зору наглядності проведення моделювання [60].

На рисунку 3.2 представлено результат імітаційного моделювання 1-го сигналу вибухового поля імпульсом Берлаге з амплітудою 0.8 відносних одиниць, частотою 0.6 Гц. і декрементом 0.28. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях.

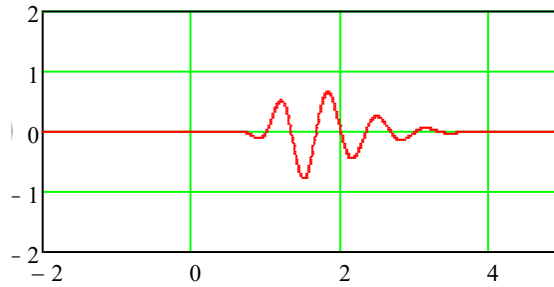


Рисунок 3.2 - Імітаційне моделювання 1-го сигналу вибухового поля імпульсом Берлаге з амплітудою 0.8 відносних одиниць. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

На рисунку 3.3 представлено результат імітаційного моделювання 2-го сигналу вибухового поля імпульсом Берлаге з амплітудою 1.2 відносних одиниць, частотою 0.8 Гц. та декриментом 0.36 . По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях.

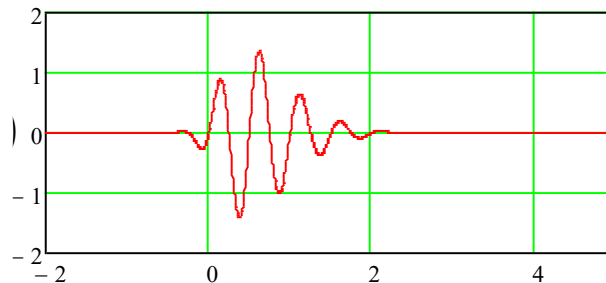


Рисунок 3.3 - Імітаційне моделювання 2-го сигналу вибухового поля імпульсом Берлаге з амплітудою 1.2 відносних одиниць. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

На рисунку 3.4 представлено результат імітаційного 3-го сигналу вибухового поля імпульсом Берлаге з амплітудою 1,5 відносних одиниць, частотою 0,7 Гц та декрементом 0,25. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях.

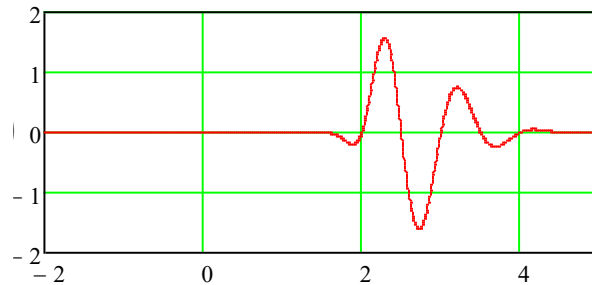


Рисунок 3.4 - Результат імітаційного моделювання 3-го сигналу вибухового поля x імпульсом Берлаге з амплітудою 1.5 відносних одиниць. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

На рисунку 3.5 представлено результати імітаційного моделювання трьох нероздільних сигналів вибухового поля, імітованих імпульсами Берлаге з амплітудами 1.5 (чорна крива), 0.8 (червона крива) та 1.2 (зелена крива) відносних одиниць. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях.

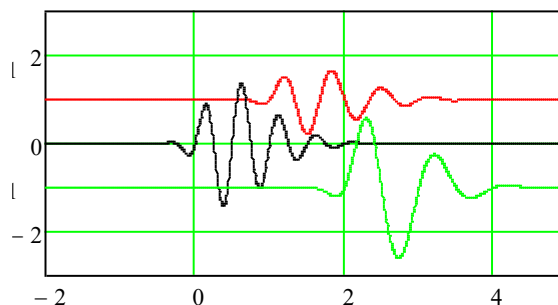


Рисунок 3.5 - Результати імітаційного моделювання трьох нероздільних сигналів вибухового поля імітованих імпульсами Берлаге з амплітудами 1.5 (чорна крива), 0.8 (червона крива) та 1.2 (зелена крива) відносних одиниць. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

Для імітаційного моделювання нероздільних вибухових сигналів на тлі мікросейсмічного фону здійснюється моделювання у вигляді суперпозиції трьох нероздільних сигналів вибухового поля, рисунок 3.5, та мікросейсмічного фону, рисунок 3.1. На рисунку 3.6 представлено результат імітаційного моделювання трьох нероздільних один відносно одного сигналів вибухового поля на тлі мікросейсмічного фону імпульсами Берлаге. Амплітуди імпульсів Берлаге, які імітують сигнали вибухового поля 0.8, 1.2 та 1.5 відносні одиниці, а амплітуди імпульсів Берлаге, які імітують мікросейсмічний фон не перевищує 0.4 відносних одиниць [60].

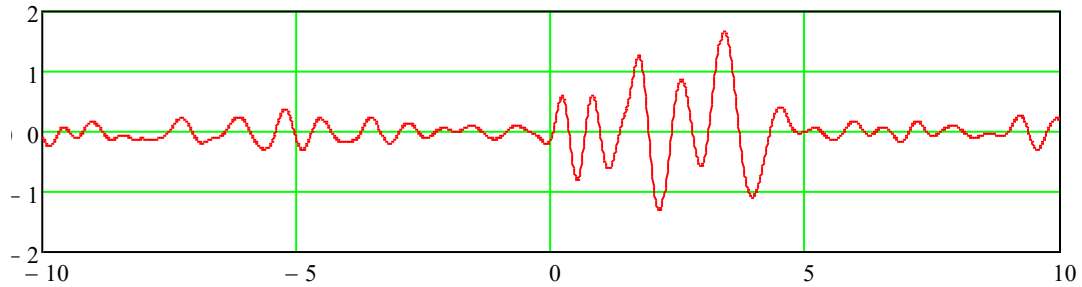


Рисунок 3.6 - Імітаційне моделювання суперпозиції трьох нероздільних один відносно одного сигналів вибухового поля на тлі мікросейсмічного фону. По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

Результат вирішення моделі (3.19) для трьох імітованих сигналів вибухового поля імпульсами Берлаге з амплітудами 0.8, 1.2 та 1.5 відносних одиниць, на тлі мікросейсмічного фону імітуваного у вигляді суперпозиції з 30 імпульсів Берлаге з амплітудами, які не перевищують 0.4 відносних одиниць представлено на рисунку 3.7. Для отримання параметрів зареєстрованих вибухових сигналів даних на рисунку 3.6, застосовується модель (3.19). Для вирішення моделі (3.19), яка є суперпозицією роздільних сигналів (3.16), вирішується модель (3.16) для кожного роздільного сигналу, тоді як всі інші сигнали розглядаються як шум. Вирішення моделі (3.16) представлено в розділі 2 (2.14 – 2.19). В данному прикладі було вирішено модель (3.16) для кожного з трьох роздільних сигналів вибухового поля, які входять адитивно в нероздільний сигнал, який представлено на рисунку 3.6. Результат першого сигналу, амплітуда 0.79, частота 0.63 Гц., декремент 0.28. Результат другого сигналу, амплітуда 1.22, частота 0.82 Гц., декремент 0.33. Результат третього сигналу, амплітуда 1.57, частота 0.72 Гц., декремент 0.23 [60].

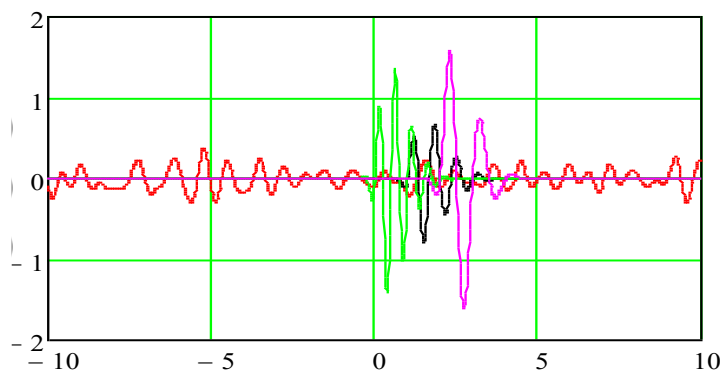


Рисунок 3.7 - Результат імітаційного моделювання моделі (3.19) (сигнали вибухового поля імпульсами Берлаге з амплітудами 1.22 (зелена крива), 0.79 (чорна крива), 1.57 (бузкова крива) відносних одиниць на тлі мікросейсмічного фону). По осі абсцис представлено час у секундах, по осі ординат амплітуда прискорення коливань у відносних одиницях

Таким чином модель вибухового поля (3.1) можна представити у вигляді суперпозиції нероздільних сигналів (3.19), кожен з яких є суперпозицією роздільних сигналів (3.16). Для вирішення моделі (3.19), яка є суперпозицією роздільних сигналів (3.16), кожний роздільний сигнал вибухового поля (3.16) розглядається окремо, в той час як всі інші роздільні сигнали, які формують нероздільний сигнал (3.19), розглядаються як шум. Для кожного такого сигналу вирішується задача (2.14), рішення якої формує вектор кожного з сигналів моделі вибухового поля (3.1) [60].

Таким чином можна зробити наступний висновок, адекватність моделі (3.19) для імітованого нероздільного сигналу не перевищує 5%.

3.3 Удосконалена методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

Для проведення сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР представлено удосконалену методику сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР [60]. Сутність удосконалення методики полягає у відображенні сигналів вибухових полів у векторний простір інформативних параметрів математичної моделі сигналу вибухового поля з метою їх класифікації, які генеруються вибуховим полем. Представлення сигналів вибухових полів у векторний простір вільних параметрів здійснюється з урахуванням фізичних властивостей вибухових сигналів, передаточної функції середовища та мікросейсмічного фону. У загальному випадку математична модель для систем сейсмоакустичного моніторингу сигналу вибухового поля можна представити у наступному вигляді [20]:

$$y(t, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N M_i(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) + n(t, \mathbf{x}) \quad (3.21)$$

де $M_i(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x})$ - математична модель роздільного сигналу вибухового поля; (2.1)

\mathbf{l} – вектор параметрів, що входить в модель лінійно;

$\boldsymbol{\eta}$ – вектор параметрів, що нелінійно входить в модель;

$n(t, \mathbf{x})$ - адитивна перешкода;

\mathbf{x} – просторова координата (у загальному випадку трьох вимірний вектор);

t – часова координата

N – кількість розділених сигналів в записі множини нероздільних сигналів.

Для вирішення моделі представим (3.21) і вигляді:

$$y(t, \mathbf{x}) = M_i(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) + m(t, \mathbf{x}) \quad (3.22)$$

$$\text{де } m(t, \mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N M_j(\mathbf{l}, \boldsymbol{\eta}, t, \mathbf{x}) + n(t, \mathbf{x}), \quad \forall j \neq i.$$

Вирішення (3.22) надається (2.3) – (2.10).

Дана методика представлена для роздільних і нероздільних сигналів вибухових полів, тобто сигналів, у яких кожний наступний сигнал починається після закінчення попереднього сигналу [60]. Закінченням сигналу вважаємо момент, коли амплітуда сигналу стає порівняною з фоном.

Оскільки роздільний сигнал є окремим випадком нероздільного (коли в запису присутній лише один сигнал), то узагальнену методику сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для нероздільних сигналів можна представити як загальний випадок узагальненої методики сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для роздільних сигналів [60].

Нижче представлена узагальнена методика для нероздільних сигналів вибухових полів, тобто сигналів, які не можуть бути однозначно визначені або виділені один від одного із загального сигналу. Нероздільні сигнали представляють собою суперпозицію роздільних сигналів. Тому оцінка параметрів роздільних сигналів, яка представлена в методі п. 2.1, є підзадачею оцінки параметрів нероздільних сигналів. При цьому, роздільні сигнали є окремим випадком нероздільних сигналів, тому узагальнена методика розробляється для нероздільних сигналів [60].

На основі проведеного дослідження п 2.2, і сформульованої вище удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для

роздільних сигналів, можна сформулювати наступні етапи удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для нероздільних сигналів:

Перший етап – Визначення характеристик передаточної функції середовища, в якому генеруються сигнали вибухових полів. Визначення характеристик передаточної функції середовища, в якому генеруються сигнали вибухових полів здійснюється за результатами геологічної розвідки [60].

Геологічна карта відображає на топографічній основі, геологічну будову певної ділянки зовнішньої поверхні земної кори. На геологічній карті зображується розподіл на земній поверхні різних геологічних утворень. Вона будується виходячи з стратиграфічного принципу [61].

В основу складання геологічних карт покладено наступний метод: на карті умовними знаками (фарбою, штрихуванням, літерними індексами та ін) показується поширення осадових порід різного віку (породи одного і того ж віку зображуються одним знаком), магматичних порід та розривних тектонічних порушень. За формою кордонів на карті судять про геологічні структури, умови залягання, співвідношення гірських порід і про поведінку пластів на глибині [62] Геологічні карти складають у ході польових зйомок та камеральними методами з широким залученням даних буріння, геофізичних матеріалів, результатів аерокосмічного зондування. Ці карти використовують, головним чином, для сейсмічного районування, прогнозу та розвідки корисних копалин, оцінки умов освоєння територій, будівництва, охорони.

Другий етап – Обґрунтування і вибір фізичних параметрів сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів. Враховуючі умови ведення моніторингу, специфіку оточуючого середовища та фізичну особливість хвильового поля, дослідник має вибрати вид параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів. Враховуючи природу сигналів вибухового поля, фізичні параметри моделі, в якості параметрів моделі

вибираються параметри осциляторів (2.14). Коректність вибору фізичних параметрів моделі представлено в п.п. 2.2 [60].

Третій етап – Побудова параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки для оцінки спектральних характеристик сигналу вибухового поля сейсмічних хвиль. Враховуючі умови ведення моніторингу, специфіку оточуючого середовища будується параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів відповідно до п.п. 2.2 [60].

Четвертий етап – Обґрунтування вибору характеристик дослідницької апаратури, за результатами 1-го та 2-го етапів. Враховуючі умови ведення моніторингу, специфіку оточуючого середовища та фізичну особливість хвильового поля, дослідник обирає апаратуру, яка відповідає умовам ведення моніторингу та специфіки оточуючого середовища. Сигнали вибухового поля мають свої специфічні спектральні характеристики, а кожне середовище має свою специфічну реакцію на сигнали вибухового поля. При цьому, вибір апаратури для ведення моніторингу вибухових полів, вибирається таким чином, що її спектральні характеристики та динамічний діапазон, відповідають спектральним характеристикам і динамічного діапазону сигналів вибухового поля і середовища, в якому генеруються ці сигнали. В даній роботі в якості фізичних параметрів математичної моделі вибрани параметри осциляторів (2.14). Характеристики апаратури мають враховувати динамічний та спектральний діапазон цих сигналів, з урахуванням 3-го етапу [60].

Динамічний діапазон - відношення найбільших значень потужностей сигналів P_{\max} або їх амплітуд A_{\max} , до їх найменших (відмінних від нуля) можливих значень потужностей P_{\min} або їх амплітуд A_{\min} [63]:

$$D_P = 10 \lg \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad D_A = 20 \lg \left(\frac{A_{\max}}{A_{\min}} \right)$$

Спектр сейсмічного сигналу зазвичай складається з двох параметрів: домінуючої частоти та спектрального діапазону. Домінуюча частота – це частота в крайній точці спектра, тоді як спектральний діапазон – це ширина між двома крайніми значеннями частот, амплітудний спектр яких дорівнює 0,707 максимального значення [64]. Інформацію щодо властивостей сейсмічних сигналів та характеристик джерела можна отримати шляхом аналізу спектра сейсмічних сигналів. Наприклад, порівняльне дослідження сейсмічних сигналів, що надходять з різних місць, може краще дозволити зрозуміти характеристики поширення сейсмічних сигналів та природу джерела [64].

Спектр Фур'є - це класичний математичний метод представлення складних функцій шляхом розкладання комплексного часу руху ґрунту $a(t)$ як комбінації N різних частот:

$$a(t) = \sum_{j=1}^N A(i\omega_j) e^{i\omega_j t}$$

де $a(t)$ – запис характеристик руху ґрунту; t – часова координата; $i = \sqrt{-1}$; ω_j – власна частота коливань j -го порядку; комплексна функція $A(i\omega_j)$ – це спектр Фур'є, а її мода $|A(i\omega_j)|$ – це амплітудний спектр, який зазвичай записується як $F(\omega)$. Спектр Фур'є $A(i\omega_j)$ у частотній області відповідає процесу $a(t)$ у часовій області. Спектр перетворення Фур'є можна отримати, використовуючи перетворення Фур'є часового перетворення, і таким чином можна отримати процес у часовій області перетворення Фур'є. У цьому випадку співвідношення можна виразити парою перетворень Фур'є:

$$A(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{i\omega t} dt$$

$$a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(i\omega)e^{i\omega t} d\omega$$

Представлення сейсмічних сигналів за допомогою спектрів Фур'є має такі важливі наслідки: по-перше, витягуються частотні компоненти даних синхронізації; другий крок полягає у перетворенні часової області, щоб спростити обчислення в часовій області [64].

П'ятий етап - Набір статистичних даних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. На передісторії спостереження п.п. 2.2 накопичуються статистичні дані різних класів сигналів вибухових полів, як еталон для кожного класу.

Кожен клас сигналу вибухового поля характеризується своїми параметрами, які визначаються при наборі статистики на передісторії. Розмірність вибірки статистичних даних [60].

Оцінка об'єму вибірки - це визначення кількості одиниць спостереження, який буде необхідний отримання репрезентативних результатів дослідження. У статистиці обсяг вибірки впливає на точність результатів,

$$n \geq \left(\frac{z_{\alpha} + \Phi^{-1}(1-\beta)}{\mu^* / \sigma} \right)^2$$

де Φ - нормальна інтегральна функція розподілу, n - кількість спостережень. z_{α} - верхня відсоткова точка стандартного нормального розподілу, $1-\beta$ - ймовірність ухилення спостережень від гіпотези, μ^* - оцінка математичного очікування, σ^2 - дисперсія [65, 54].

Шостий етап – Обґрунтування і вибір критерію порівняння параметрів сигналів вибухових полів для класифікації. Враховуючи вибрану параметричну модель сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки обрану на 4-му етапі, та специфіки зареєстрованого сигналу вибухового поля здійснюється вибір критерію визначення інформативних параметрів математичної моделі (2.17) [60].

Сьомий етап – Вибір критерію оцінки адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів та порогу максимального ухилення моделі від даних спостереження. Порівняння функції, яка описує модель сигналу вибухового поля та функції даних спостереження, можна робити в евклідових просторах, в кожному з яких відстань між функціями представлена своїм скалярним добудком (п 2.1). В дані роботі ця відстань міряється в метриці L_2 . [60].

Восьмий етап – Оцінка параметрів сигналу вибухового поля на фоні шуму.

Для роздільних сигналів: Оцінка параметрів кожного роздільного сигналу вибухового поля на фоні шуму. Для отримання інформативних параметрів роздільного сигналу, вирішується задача (2.3) п. 2.1.

Для нероздільних сигналів: Кожний сигнал вибухового поля розглядається як роздільний (3.4) на фоні шуму, де всі інші нероздільні сигнали розглядаються як завада. Для отримання інформативних параметрів кожного з нероздільних сигналів, вирішується задача (2.3) п. 2.1 [60].

Дев'ятий етап – Класифікація сигналів вибухового поля. Відповідно до набраної статистики 5-го етапу та обраного на 7-му етапі критерію (2.17) оцінки ухилення математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки від даних спостереження та порогу максимального ухилення (2.3) даних спостереження від моделі приймається

рішення щодо належності даного сигналу вибухового поля до визначеного на 5-му етапі класу [60].

Таким чином, представлено удосконалену методику сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Методика дозволяє класифікувати сигнали вибухового поля з метою визначення типу джерела вибуху. Специфіка даної методики полягає в дослідженні сейсмічного хвильового поля, генерованого вибухами на полі бою. Вперше запропоновано класифікувати сигнали вибухового поля з застосуванням сейсмоакустичного моніторингу, з метою визначення типу зброї. Дана методика в поєднанні з методикою знаходження координат джерела вибуху [66,67,68] дає можливість виявляти місце знаходження джерела генерації сейсмоакустичної хвилі.

3.4 Розробка методичних рекомендацій щодо застосування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

На основі проведеного дослідження, можна сформулювати наступні рекомендації щодо застосування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу сигналів вибухового поля на основі сейсмоакустичного аналізу для роздільних сигналів.

1. Оцінка характеристик передаточної функції середовища, в якому генеруються поля, що досліджуються, для вирішення задачі моніторингу ВПВДР.

Середовище в якому генерується вибухове поле може мати різні спектральні характеристики. Це залежить від геологічної будови місцевості, поверхневих та підземних водотоків, наявності карстових пустот, розламів тощо. Для того щоб оцінити характеристики вибухового сигналу і

класифікувати їх необхідно набрати статистику для таких передаточних середовищ, та скласти для них відповідні таблиці зразків набраних при статистичному аналізі, для кожного класу вибухових сигналів [60].

Для того щоб оцінити характеристики вибухового сигналу і класифікувати їх необхідно набрати статистику для таких передаточних середовищ, та скласти для них відповідні таблиці зразків набраних при статистичному аналізі, для кожного класу вибухових сигналів. Кожен клас сигналів, як відгук на передаточну функцію середовища матиме свою оцінку вектору вільних параметрів моделі, які залежать від кожної передаточної функції середовища. Таким чином статистика набирається як для кожного класу сигналу вибухового поля, як його реакція на кожну передаточну функцію середовища [60].

2. Обґрунтування і вибір фізичних параметрів сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів. В рамках вищезгаданих умов оцінки спектральних характеристик передаточної функції середовища в якому генеруються вибухові поля, що досліджуються для проведення моніторингу ВПВДР.

Після визначення характеристик фізичного поля моніторингу ВПВДР необхідно вибрати інформативні параметри поля дослідження, які представлено в (2.14) та (3.16). Наприклад спектральні параметри, або амплітудні характеристики, тощо, їх вибір залежить від цілей дослідження вибухового сигналу [60].

3. Побудова параметричної математичної моделі, яка дають можливість оцінити спектральні характеристики вибухових сигналів, що генерують вибухове поле сейсмічних хвиль.

Відповідно до умов попередніх пунктів будується параметрична математична модель, вектор вільних параметрів якої несе інформацію про

унікальність кожного вибухового сигналу, що генерують вибухове поле. Враховуючі умови ведення моніторингу, специфіку оточуючого середовища дослідник будує параметричну математичну модель (2.1) сейсмоакустичного моніторингу вибухових. Математична модель має описувати фізичний процес динаміки сейсмічного хвильового поля, генерованого вибуховими сигналами. Хви. Дана модель має задовольняти умовам (2.1), (2.3) та (2.4) п. 2.1 [60].

4. Вибір характеристик дослідницької апаратури, які відповідають умовам поставленої задачі.

На цьому етапі, необхідно визначитись з певними характеристиками поля дослідження, які були б максимально інформативними, з точки зору вирішення конкретної задачі моніторингу ВПВДР. При цьому, необхідно вибирати апаратуру для дослідження, яка задовольняє цим характеристикам. В даній роботі в якості фізичних параметрів математичної моделі вибрано параметри осциляторів (2.14) та (3.16). Характеристики апаратури повинні враховувати динамічний та спектральний діапазони цих сигналів, з урахуванням III-го етапу. Тобто вибір характеристик дослідницької апаратури залежить від характеристик передаточної функції середовища, в якому генерується вибухове поле [60].

5. Набір статистики параметрів, які характеризують унікальні характеристики, вибухових сигналів, що генерують вибухове поле сейсмічних хвиль на передісторії дослідження.

На передісторії спостережень набирається статистика вектору вільних параметрів моделі, яка розглядається як еталон інформативних параметрів, які характеризують унікальні характеристики вибухових сигналів, що генерують вибухове поле для передаточних функцій різних середовищ. Враховуючі умови ведення моніторингу, специфіку реакції оточуючого середовища, та унікальність кожного сигналу вибухового. проводиться класифікація сигналів

вибухового поля відповідно до критерію (2.17). Кожен клас сигналу вибухового поля характеризується своїми параметрами, які визначаються при наборі статистики на передісторії [60].

6. Вибір критерію порівняння унікальних параметрів вибухових сигналів, в рамках якої проводиться класифікація сигналів, що генерують вибухове поле сейсмічних хвиль.

Для класифікації вибухових сигналів, що генерують вибухове поле за допомогою інформативних параметрів, що характеризують їх унікальні характеристики, вибирається фізично доцільний критерій порівняння вектору вільних параметрів моделі (2.3). Критерій має вибиратись згідно умовам (2.16) та (2.17) п. 2.2.3. [60].

7. Вибір критерію оцінки адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів, та порогу максимального ухилення моделі від даних спостереження, для порівняння математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки з даними спостереження. Порівняння функції, яка описує модель сигналу вибухового поля та функції даних спостереження, можна робити в евклідових просторах, в кожному з яких відстань між функціями представлена своїм скалярним добудком. Скалярний добуток вибирається згідно умов (2.16) та (2.17) [60].

8. Оцінка параметрів кожного сигналу вибухового поля.

Кожний роздільний сигнал вибухового поля розглядається як окремий сигнал (2.14) та (3.16). Для отримання інформативних параметрів кожного з роздільних сигналів, вирішується задача (2.16).

Кожний роздільний сигнал (2.14) та (3.16), які формують нероздільний сигнал (3.19) вибухового поля розглядається окремо на фоні шуму, де всі інші роздільні сигнали, які формують нероздільний сигнал (3.19), розглядаються як

шум. В цьому випадку для отримання інформативних параметрів кожного з нероздільних сигналів, вирішується задача (2.16) [60].

9. Класифікація сигналів вибухового поля, приймається рішення про клас сигналу вибухового поля. Для прийняття рішення про клас сигналу вибухового поля, застосовується критерій прийняття рішення представлений в п. 3.2.2, який враховує умови поставленої задачі та специфіку спостережень. Тобто, належність n -вимірному вектору вільних параметрів моделі до класу, який характеризує певний сигнал вибухового поля. В такому випадку клас це n -вимірна область, характеристик певного класу вибухового сигналу, що генерують вибухове поле сейсмічних хвиль [60].

Вищенаведені рекомендації щодо застосування удосконаленої методики вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу для роздільних і нероздільних сигналів дають можливість проводити класифікацію сигналів, що генерують вибухове поле сейсмічних хвиль для велення дистанційної розвідки.

Висновки до третього розділу

1. Обґрунтовано необхідність розробки удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

2. В рамках даної методики розроблена і вирішена параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів, як удосконалення математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

3. Проведена оцінка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для

ведення дистанційної розвідки за допомогою імітаційного моделювання удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Оцінка адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки показала, що адекватність даної моделі для імітованого нероздільного сигналу не перевищує 5%.

4. Вперше представлено удосконалену методику сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки

5. Розроблені методичні рекомендації щодо застосування удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз основних підходів щодо ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу. Проаналізовані існуючі математичні моделі, методи і методики, ведення пасивної дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу. Розглянуто існуючі вітчизняні та закордонні, системи ВДПР, та математичні моделі, методи та методики, які в них використовувались. Проведено аналіз їх недоліків та переваг.

2. Існуючі моделі, методи та методики не достатньо ефективні для проведення сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР на основі аналізу потоків роздільних і не роздільних сейсмоакустичних сигналів. Вони, потребують суттєвого удосконалення для розширення можливостей таких систем. Розробка нових та удосконалення існуючих методик, методів та математичних моделей таких систем для виявлення і обробки сейсмічних та акустичних сигналів є актуальною.

2. В роботі вперше представлено метод сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Вперше представлена параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки, і надано її вирішення. Адекватність даної моделі в метриці L_2 . не перевищує 7% .

3. Розроблена і вирішена параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. Проведена оцінка її адекватності, яка показала що ухилення даної моделі для імітованого нероздільного сигналу від даних спостереження не перевищує 5%.

4. Запропоновані в роботі удосконалена методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу, метод сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки, та параметричні математичні моделі сейсмоакустичного моніторингу роздільних і нероздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки є актуальними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Д.В. Зайцев, А.П. Наконечний, С.О. Пахарев, І.О. Луценко. Військова розвідка. «КНТ» Київ, 2022. с. 332.
2. Зайцев, Я. Король Ю. Лісніченко, Актуальні проблеми ведення військової розвідки в умовах сучасного міста. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України Том 82 № 1 (2020), с. 45-57.
3. Г. Т. Продайвода, П. М. Кузьменко, А. П. Тищенко, О. А. Трипільський. Сейморозвідка. Київський університет Київ. 2014, с. 263.
4. В.С. Мостовий Моделі систем моніторингу геофізичних полів // дисертації на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук. Київ 2013. 233 с.
5. A.; Patelli, Edoardo; Siu-Kui Au, Ivan (eds.). Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer. pp. 1–31.
6. Batlló, Josep. "Historical Seismometer". In Beer, Michael; Kougoumtzoglou, Ioannis A.; Patelli, Edoardo; Siu-Kui Au, Ivan (eds.). Encyclopedia of Earthquake Engineering. 2021 Berlin, Heidelberg: Springer. pp. 1–31.
7. В. В. Кондратюк, О. В. Конопляник, С. В. Халіманенко. «Особливості застосування та шляхи розвитку засобів повітряної розвідки», «Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка», 2019 випуск № 63 с. 14–22.
8. Milne-Thomson Theoretical Hydrodynamics Dover Publications, New York 1996 P. 768.
9. О.В. Левченко, В.В. Вінник, О.В. Устименко. Розвідка та іноземні армії. Інформаційна робота. «КНТ» Київ 2022.с.124.
10. Francis S.H. 1975. Global propagation of atmospheric gravity waves. A review: Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 37, pp. 1011-1054.

11. B. G. Mikhailenko, A. A. Mikhailov & G. V. Reshetova, Numerical Simulation of Acoustic-Gravity Waves Propagation in a Heterogeneous Earth-Atmosphere Model with Wind in the Atmosphere, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 1, No. 4, 6 November 2013, pp. 12–17.
12. Artru J. Ducic V. и другие. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis. 2005. *Geophys. J. Int.*, 160, pp. 840-848.
13. B. Mikhailenko, A.A. Mikhailov & G.V. Reshetova (2015), Modeling the Wind Influence on Acoustic-Gravity Propagation Waves in a Heterogeneous Earth-Atmosphere Model, FDM 2014, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 9045, Springer International Publishing (2015) pp. 290 – 298 .
14. Konyukh G. V., Mikhailenko B. G., Mikhailov A. A. Application of the integral Laguerre transforms for forward seismic modeling // *J. Comput. Acoustics*. 2001. V. 9, N 4. P. 1523–1541.
15. Mikhailenko B. G., Mikhailov A. A., Reshetova G.V. Numerical viscoelastic modeling by the spectral Laguerre method // *Geophys. Prospecting*. 2003. N 51. P. 37-48.
16. Mikhailenko B.G. 1999. Spectral Laguerre method for the approximation solution of time-dependent problems. *Appl. Math. Lett.*, 12, pp. 105-110.
17. Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. and Reshetova G.V. 2003. Numerical Modeling of transient seismic fields in viscoelastic media based on the Laguerre spectral method. *Pure Appl. Geophys.*, 160, 1207-1224.
18. David H. von Seggern. *CRC Standard Curves and Surfaces with Mathematica*, Third Edition Publish-er: CRC Press 2016. 460 p.
19. Gossaro E.Hooken. 1975. *Waves in the Atmosphere*. Elsevier Scientific Publishing Company, P. 532.
20. Yarmolay I.O. Method of seismoacoustic monitoring of separate signals of explosive fields for remote reconnaissance. Том 2 № 30 (2025): Кібербезпека: освіта, наука, техніка. Спеціальний випуск, с. 348-359

21. A. N. Tikhonov та V. Y. Arsenin, Solutions of Ill-Posed Problems Halsted Press / Wiley, 1979, P 258.
22. Bellman, R. E. Dynamic Programming. Princeton: Princeton University Press, 1957. – P 342.
23. Plessix R.E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications / R.E. Plessix // Geophys. J. Int., 2006, 167, - 495 p.
24. Valens C.A. Really Friendly Guide to Wavelets / C.A. Valens // A Really Friendly Guide to Wavelets, 1999. - P. 35.
25. Harald Cramér & M. R. Leadbetter — Stationary and Related Stochastic Processes: Sample Function Properties and Their Applications. John Wiley & Sons, New York, 1967 P. 348.
26. Mostovoi V.S., A.E. Gay, S.V. Mostovoi, V.S. Mostovoi, A.E. Osadchuk Model and Experimental Studies of the Identification of Oil - Gas Deposits, Using Dynamic Parameters of Active Seismic Monitoring Geophys. J., Vol. 20, 2001. - P. 895-909.
27. Mostovyy V., Mostovyi S., Osadchuk A. A mathematical model of prediction of seismic events. Proceedings of the second workshop “Application of artificial intelligence techniques in seismologic and engineering seismology” Conseil de l’Europe Cahiers Europeen de Geodynamiqueet de seismologie, Luxembourg. 1996, Vol. 12, pp. 163-164.
28. Mostovyi S., Mostovyy V., Osadchuk A. Processing of seismic signals under coastal background noise. Application of artificial intelligence techniques in seismologic and engineering seismology Conseil de l’Europe Cahiers Europeen de Geodynamiqueet de seismologie, Luxembourg, 1996, Vol. 12, p. 297-299.
29. Mostovyi S., Mostovyy V. Processing of seismic signals and prediction of seismic events. Conseil de l’Europe. JourneesLuxembourgeoises de Jeodynamique. 79th and 80th session, 1996, Vol. 2, pp. 40-45.

30. Mostovyy V., Mostovyi S., Osadchuk A, Gay A.. On-line systems of monitoring of ecologically hazardous objects. Transactions of KDS-97, Yalta 1997, Vol. 1, pp. 456-465.
31. Mostovyy V., Mostovyi S., Osadchuk A, Gay A. Pattern recognition methods and the solution of detection carbohydrates deposits problem. Transactions of KDS-98, Szczecin, 1998, Vol. 2, pp. 140-147.
32. Mostovyy V., Mostovyi S., Osadchuk A, Gay A., Starostenko V. A system of active structural ecological monitoring for hazardous natural and man-made objects. Telework in Medicine, Research and Business, NTUU KPI. Kyiv. 2003, pp. 19-21.
33. Mostovyy V., Mostovyi S., Osadchuk A, Gay, Osadchuk A., Starostenko V. A passive environmental monitoring system of hazardous natural and man-made objects. Telework in Medicine, Research and Business. NTUU KPI. Kyiv 2003, pp. 21-22.
34. Mostovyy V., Mostovyi S. et al. Comprehensive aerodynamic and dynamic study of the monument Independence of Ukraine. Proceedings of National Aviation University. 2003, Vol. 2, pp. 100-104.
35. Mostovyy V., Mostovyi S. A monitoring problem in the area of dynamic object identification. Proceedings of KDS (Knowledge, Design, Solution) 2005 FOI-COMMERCE, Sofia, 2005, Vol. 1, pp. 256-262.
36. Mostovoi S., Mostovoi V. Active Monitoring and decision-making problem. IJITAVol.12, Number 4, Sofia.– 2005. – P. 127-135.
37. Mostovyy V., Mostovyy S, Yavorivskaya O., Estimation of dynamic parameters of columned type building constructions in the regime of monitoring. Collected scientific journal “Building, Science of materials, Mechanical engineering”, Dnepropetrovsk SHEE PSABA, 2013, Vol. 69, pp. 342-351.
38. Mostovyy V., Mostovyy S. Estimation of parameters of seismic waves. Transactions of NAS of Ukraine.2014, Vol. 2, pp. 118-123.

39. V. S. Mostovoy, S. V, Mostovyi Mathematical model of seismic signal, as a flow of physically non realizable single seismic waves // Geophysical journal 2016, Vol. 38, № 5, p. 166-169.
40. V. Mostovyy, S. Toliupa, A. Shevchenko Optimization of the dynamic parameters of an object in a mathematical model of seismo-acoustic monitoring of natural and engineering objects Science based technologies NAU № 2(58), 2023 pp 112-119.
41. V. Mostovyy. Mathematical model of the signal emission dynamics in seismic-acoustic monitoring systems of building structures // information systems and technologies security № 2(8), 2024 p.86-90.
42. Anton Panda, Volodymyr Nahorny, Sergey Shcherbina, Vasily Mostovyy. Management Systems in Production Engineering 2025, Volume 33, Issue 4, pp. 525-530, DOI 10.2478/mspe-2025-0053.
43. J. Hahn, Samuel S. Shapiro, Statistical models in engineering / // Inc. New York. – London – Sydney: John Willey & Sons, 1967. - 395 p.
44. Feller W. An introduction to probability theory and its applications / W. Feller // Vol. 2. - Inc. New York: John Willey & Sons, 1971. – 751 p.
45. E.F. Savarensky, T. A. Proskurjakova, E.V. Voronina. On microseisms phase velocities and the direction to the excitation source, Papers presented at the 9th Assembly of the European Seismological Commission. Akademisk Forlag. - Copenhagen, 1967. – P. 347-356.
46. Robinson E.A. Statistical communication and detection with special reference to digital data processing of radar and seismic signals, London: Charles Griffin and Co. Ltd., 1967. - 362 p
47. I. I. Gikhman, A. V. Skorokhod Introduction to the Theory of Random Processes, W. B. Saunders Company, Philadelphia 1969, P. 516.

48. Plessix R.E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications / R.E. Plessix // *Geophys. J. Int.*, 167, 2006.- P. 495-503.
49. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters / *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1963, p. 431–441.
50. Мостовий В.С. Моделі виявлення та ідентифікації сигналів у системах моніторингу геофізичних полів. Дис. кандидата фіз.-мат. наук: 01.04.12; - захищена 02.10.1996. / В.С. Мостовий // - Київ, 1996. - 116 с.; 30 іл. – Бібліогр.: с. 101-116.
51. Shevchenko A.M., Yarmolai I.O. Parametric mathematical model of seismoacoustic monitoring of a single mortar explosion. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2024. No1 (82) с.122-129.
52. Ярмолай І.О., Пампуха І.В. Математична модель для автоматизованих систем сейсмоакустичного моніторингу класифікації мінометного вибуху для ведення дистанційної розвідки. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. Том 2 № 26 (2024), с. 338-347
53. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика.— Київ ВПЦ Київський університет, 2007.— 504 с.,
54. Гихман И.И.,Скорород А.В.,Ядренко М.В. Теория вероятностей и математическая статистика. — Київ: Вища школа, 1988. — 436 с.
55. G.Korn, T.Korn: *Mathematical handbook*, McGraw Hill Book Company, New York, 1968..
56. Abramowitz M. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables* / M. Abramowitz, I. A. Stegun, // 9th printing. New York: Dover, 1972.
57. Cherevko, I., Kril, T., Mostovyy V., Shcherbyna, S., Structural health monitoring of heritage buildings under military actions. *International Journal of Conservation Science*.

58. Stein S., Wysession M. E. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. London: Wiley-Blackwell, 2002. P. 400.
59. Шевченко А., Ярмолай І. Оптимізація інформативних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу природніх та інженерних об'єктів. «Зв'язок» № 5 (2024), с. 83-89
60. Ярмолай І.О. Методика моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. Телекомунікаційні та інформаційні технології, 2025, 04(89) с. 155-160
61. Мала гірнича енциклопедія : 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. Донбас, 2004 с. 640 — ISBN 966-7804-14-3с
62. В.Г. Суярко, В.М. Величко, О.В. Гаврилюк, В.В. Сухов, О.В.Нижник, В.С. Білецький, А.В. Матвеев, О.А. Улицький, О.В. Чуєнко. Інженерна геологія (з основами геотехніки): підручник для студентів вищих навчальних закладів /Колектив авторів:. — Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2019. — 278 с
63. James Mills Peirce. The Elements of Logarithms: With an Explanation of the Three and Four Place Tables of Logarithmic and Trigonometric Functions Ginn Brothers (Boston), 1873 P. 83,
64. Liu SC, Fagel LW. Earthquake interaction by fast Fourier transform. Journal of the Engineering Mechanics Division. 1971 Aug;97(4):1223-37.
65. О. І. Огірко, Н. В. Галайко, Теорія ймовірностей та математична статистика, Львів, 2017 — с. 292.
66. Нікіфоров М.М., Пампуха І.В., Лоза В.М., Щербина С.В., Шевцов А.Г. Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів / Геофізичний журнал, № 6, том 40, 2018, С 150 – 156.
67. А.І. Фещенко, В.А. Ільєнко, Пампуха І.В, Охрамович М. М, Нікіфоров М.М, Лукіянчук А.А, Лоза В.М, Кривицький Г.В. Спосіб

використання комплексної сейсмоакустичної системи для автоматичної детекції координат небезпечних техногенних та військових об'єктів / Патент опубліковано 11.06.2018, бюл. № 11.

68. Yarmolay I.O Mathematical model of seismoacoustic monitoring of blast fields for remote reconnaissance. «Зв'язок» № 5 (2025), с. 87-94

ДОДАТКИ

Додаток А

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України

(які входять до переліку МОН України):

1. Shevchenko A.M., Yarmolai I.O. Parametric mathematical model of seismoacoustic monitoring of a single mortar explosion. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2024. No 1 (82) с.122-129. <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2520/2401>;

2. Ярмолай І.О., Пампуха І.В. Математична модель для автоматизованих систем сейсмоакустичного моніторингу класифікації мінометного вибуху для ведення дистанційної розвідки. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. Том 2 № 26 (2024), с. 338-347 <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.697>;

3. Шевченко А., Ярмолай І. Оптимізація інформативних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу природніх та інженерних об'єктів. «Зв'язок» № 5 (2024), с. 83-89, DOI:10.31673/2412-9070.2024.050912;

4. Yarmolay I.O Mathematical model of seismoacoustic monitoring of blast fields for remote reconnaissance. «Зв'язок» № 5 (2025), с. 87-94. DOI: 10.31673/2412-9070.2025.051359;

5. Yarmolay I.O. Method of seismoacoustic monitoring of separate signals of explosive fields for remote reconnaissance. Том 2 № 30 (2025): Кібербезпека: освіта, наука, техніка. Спеціальний випуск, с. 348-359, DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.981>;

6. Ярмолай І.О. Методика моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. Телекомунікаційні

та інформаційні технології, 2025, 04(89) с. 155-160. DOI: 10.31673/2412-4338.2025.048918.

Відомості про апробацію дослідження:

1. Ярмолай І.О. Структурний аналіз та ідентифікація динамічних параметрів структури систем сейсмоакустичного моніторингу // XVIII Міжнародна науково-практична конференція Військова освіта і наука: сьогоднішня та майбутня, Київ 2022. 74 с.

2. Ярмолай І.О. Оптимальні оцінки параметрів моделі сейсмічного моніторингу //XVIII Міжнародна науково-практична конференція Військова освіта і наука: сьогоднішня та майбутня, Київ 2022. 75 с.

Акти впровадження результатів роботи Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України

ЗАТВЕРДЖУЮ

ТВО начальника Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки



Анатолій БЕРЕЗНЯК

07 01 2026

А К Т

реалізації результатів дисертаційного дослідження

Ярмолая Ігоря Олександровича на тему: «Методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки» виконаної у Військовому інституті Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Комісія Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки: голови – заступника начальника Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки з наукової роботи доктор технічних наук, старший науковий співробітник полковник Кривцун В.І.; та членів - начальника науково-організаційного відділу доктора технічних наук, професора полковника Сівака В.А., начальника науково-дослідного відділу сертифікації товарів оборонного призначення кандидат військових наук, доцент полковник Руснак В.М., начальник науково-дослідної лабораторії оцінки засобів механізованого розмінування кандидат технічних наук, старший дослідник полковник Ляшенко В.А. склали дійсний акт про те, що наукові результати, які отримані та запропоновані Ярмолаєм Ігорем Олександровичем у дисертаційному дослідженні, а саме:

метод сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі аналізу потоків роздільних і не роздільних сейсмоакустичних сигналів.

параметричні математичні моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки роздільних і не роздільних сигналів.

удосконалену методику моніторингу сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу; використанні під час розробки оперативного завдання «Розробка методичного апарату визначення шуму та акустичної помітності наземних роботизованих комплексів з використанням технологічних інновацій», шифр «Шум».

Голова комісії

Заступник начальника Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, доктор технічних наук, старший науковий співробітник полковник
07 01 2026

Володимир КРИВЦУН

Члени комісії:

Начальник науково-організаційного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки доктор технічних наук, професор полковник
07 01 2026

Вадим СІВАК

Начальник науково-дослідного відділу сертифікації товарів оборонного призначення кандидат військових наук, доцент полковник
07 01 2026

Віталій РУСНАК

Начальник науково-дослідної лабораторії оцінки засобів механізованого розмінування кандидат технічних наук, старший дослідник полковник
07 01 2026

Володимир ЛЯШЕНКО

Додаток В

**Акти впровадження результатів роботи
Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник начальника Центрального
науково-дослідного інституту Збройних
Сил України з наукової роботи
Заслужений діяч науки і техніки України
доктор технічних наук, професор



Олег СЕМЕНЕНКО
2025 р.

АКТ

реалізації результатів дисертаційного дослідження
ЯРМОЛАЯ Ігоря Олександровича

на тему: "Методика сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення
дистанційної розвідки", виконаної у Військовому інституті Київського
національного університету імені Тараса Шевченка

Комісія у складі:

голови – начальника науково-дослідного центру автоматизованих та
безпілотних систем Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил
України доктора технічних наук, старшого наукового співробітника полковника
Кірсанова Сергія Олександровича;

членів комісії:

начальника науково-дослідного управління розвитку автоматизованих систем
управління Збройними Силами – заступника начальника науково-дослідного центру
розвитку автоматизованих та безпілотних систем кандидата технічних наук, старшого
наукового співробітника полковника Милашенка Ігоря Михайловича;

начальника науково-дослідного відділу планування та розвитку
автоматизації управління військами (силами) науково-дослідного управління
розвитку автоматизованих систем управління Збройними Силами доктора
філософії, старшого дослідника полковника Іщенка Олександра Миколайовича,
встановила, що наукові положення, розроблені особисто Ярмолаєм І. О. реалізовані

в ході виконання науково-дослідної роботи на тему: "Обґрунтування пріоритетних
напрямів нарощування функціональності автоматизованих систем управління на
етапах серійного виробництва, експлуатації та впровадження", шифр
"Функціонал", під час визначення пріоритетних напрямків нарощування
функціональності автоматизованих систем управління, а саме:

результати аналізу основних підходів щодо ведення пасивної дистанційної
розвідки на основі сейсмоакустичного моніторингу та систем моніторингу
сейсмоакустичних полів та результати аналізу систем моніторингу
сейсмоакустичних полів;

деякі процедури параметричної математичної моделі сейсмоакустичного
моніторингу розділених сигналів вибухових полів для ведення дистанційної
розвідки;

деякі рекомендації щодо застосування удосконаленої методики
сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної
розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу.

Голова комісії:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
полковник

Сергій КІРСАНОВ

Члени комісії:

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
полковник

Ігор МИЛАШЕНКО

доктор філософії, старший дослідник
полковник

Олександр ІЩЕНКО