

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Методи та засоби побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи СІм-61

спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Ключко Д.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Лещинин Ю.З.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Тиш Є.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«11» листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня *магістр*
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *123 «Комп'ютерна інженерія»*
(шифр і назва спеціальності)

студенту *Клочку Дмитру Геннадійову*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Методи та засоби побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори*

Керівник роботи *Лецишин Юрій Зіновійович, к.т.н.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 29 » листопада 2024 року № 4/7-1144

2. Термін подання студентом завершеної роботи *19.12.2024 р.*

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Аналіз існуючих комплексів моніторингу сейсмічної активності

2 Математичні моделі та методи відбору сейсмічних сигналів

3 Побудова та тестування комп'ютерної систем моніторингу сейсмічної активності

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

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

1. Актуальність і мета дослідження.

2. Завдання, об'єкт і предмет, наукова новизна і практична цінність дослідження.

3. Аналіз існуючих комплексів моніторингу сейсмічної активності

4. Математичні моделі та методи відбору сейсмічних сигналів

5. Побудова структури комп'ютерної систем моніторингу сейсмічної активності

6. Побудова алгоритму роботи комп'ютерної систем моніторингу сейсмічної активності

7. Тестування комп'ютерної систем моніторингу сейсмічної активності

8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Осухівська Г.М., зав.каф. КС</i>	<i>05.12.2024</i>	
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>			

7. Дата видачі завдання 11.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз існуючих методів та засобів розв'язання науково-технічних проблем, що відповідають тематиці кваліфікаційної роботи.</i>	<i>20.11.2024р. – 30.11.2024р.</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Аналіз існуючих комплексів моніторингу сейсмічної активності</i>	<i>25.11.2024р. – 30.11.2024р.</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Математичні моделі та методи відбору сейсмічних сигналів</i>	<i>1.12.24р.- 7.12.24р.</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Побудова та тестування комп'ютерної систем моніторингу сейсмічної активності</i>	<i>1.12.24р.- 11.12.24р.</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>1.12.24р.- 15.12.24р.</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>11.12.24р.- 19.12.24р.</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>19.12.24р.</i>	<i>Викон.</i>
8.	<i>Захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>26.12.24р.</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)*Клочко Д.Г.*

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)*Лецишин Ю.З.*

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Клочко Дмитро Геннадійович. Методи та засоби побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія / наук.кер. Ю. З. Лецишин. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. — 80 с.

Ключові слова: комп'ютерна система, моніторинг, геофон, мікроконтролер, сейсмічна активність.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню методів і засобів побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори. Робота ґрунтується на аналізі публікацій стосовно існуючих систем моніторингу сейсмічної активності земної кори, математичних моделей сейсмічних подій та їх частотних характеристик.

На основі аналізу побудовано комп'ютерну систему для моніторингу сейсмічної активності земної кори, яка побудована на основі геофону із визначенням його координат розташування за допомогою GPS модуля. Отримані дані форматуються у пакети із вказанням часу, координати і сигналу з геофону і надсилаються за допомогою протоколу ZigBee.

Побудована комп'ютерна система для моніторингу сейсмічної активності земної кори за рахунок такого функціоналу має гнучкі можливості по формуванню сенсорних полів різної конфігурації під різні задачі.

ANNOTATION

Klochko D.H. Methods and tools for building computer systems to monitor seismic activity in the Earth's crust. Master's Graduation Thesis: speciality 123 — Computer engineering / supervisor Yu. Z. Leshchyshyn. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2024. — 80 p.

Keywords: computer system, monitoring, geophone, microcontroller, seismic activity.

The qualification work is devoted to the study of methods and means of building computer systems for monitoring seismic activity of the earth's crust. The work is based on the analysis of publications on existing systems for monitoring seismic activity of the earth's crust, mathematical models of seismic events and their frequency characteristics.

Based on the analysis, a computer system for monitoring seismic activity of the earth's crust was built, which is built on the basis of a geophone with the determination of its location coordinates using a GPS module. The received data are formatted into packets indicating the time, coordinates and signal from the geophone and are sent using the ZigBee protocol.

The built computer system for monitoring seismic activity of the earth's crust due to such functionality has flexible capabilities for forming sensor fields of various configurations for various tasks.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ	12
1.1. Аналіз програмних комплексів моніторингу сейсмічної активності	12
1.1.1. SeisComP (Seismological Communication Processor)	13
1.1.2. Earthworm	15
1.1.3. ShakeAlert	16
1.2. Сейсмічні датчики для комп'ютерної системи	18
1.2.1. Сейсмічні датчики	18
1.2.2. Геофони	19
1.2.3. Сейсмічні акселерометри	21
1.3. Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ВІДБОРУ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ	23
2.1. Формування сейсмічних хвиль	23
2.2. Математичні моделі сейсмічних хвиль	28
2.3. Частотні характеристики сейсмічних хвиль	30
2.4. Схеми розміщення геофонів на місцевості	32
2.5. Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА ТА ТЕСТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ	37
3.1. Обґрунтування апаратної платформи для побудови мережі датчиків	37

3.1.1. Бездротовий модуль HOLYIOT-18010-nRF52840	37
3.1.2. 32-бітне процесорне ядро ARM Cortex-M4	39
3.1.3. Вибір протоколу зв'язку	40
3.2. Побудова структури комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності	42
3.3. Побудова електричної схеми комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності	43
3.4. Побудова алгоритму роботи комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності	48
3.5. Побудова програми роботи комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності	50
3.6. Тестування комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності	55
3.7. Висновки до розділу 3.....	56
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
4.1. Охорона праці.....	58
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	61
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
Додаток А. Тези конференцій	70
Додаток Б Скрипт програми.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ADC (англ. Analog-to-digital converter) Аналого цифровий перетворювач

BLE (англ. Bluetooth Low Energy) Bluetooth з низьким енергоспоживанням

CPU (англ. Central processing unit) Центральний процесор

GPS (англ. Global Positioning System) Систéма глобáльного позиціювáння

DSP (англ. Digital signal processing) Цифрова обробка сигналів

IoT (англ. Internet of Things) Інтернет речей

LNA (англ. Low Noise Amplifier) Малошумний підсилювач

ВСТУП

Актуальність роботи. Актуальність розробки комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності земної кори обумовлена потребами запобігання та мінімізація наслідків стихійних лих. Зокрема землетруси є одними з найнебезпечніших природних катастроф, здатних спричиняти значні людські жертви та економічні втрати. Створення високоточної та оперативної системи моніторингу дозволяє забезпечити раннє виявлення землетрусу та розіслати попередження для людей. Це сприяє своєчасній їх евакуації, зупинці критично важливих промислових процесів, закриттю транспортних систем або аварійному вимкненню енергетичних вузлів, мінімізуючи втрати та пошкодження.

Завдяки розвитку комп'ютерних технологій та створенню нових компонентів, сучасні системи моніторингу здатні аналізувати величезні обсяги даних у реальному часі. Це підвищує точність визначення параметрів сейсмічних подій – епіцентру, магнітуди, глибини залягання, а також дозволяє краще інтерпретувати події та структуру земної кори.

Моніторинг сейсмічної активності сприяє накопиченню високоякісних даних, які використовуються у фундаментальних дослідженнях внутрішньої структури Землі. Це допомагає вивчати геодинамічні процеси, будову літосфери та механізми зародження землетрусів, що в довгостроковій перспективі може сприяти розробці більш точних прогнозів.

Тому розробка комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності земної кори є актуальною і її завданням є реєструвати сейсмічні сигнали та передавати їх на значну відстань для подальшого оцінювання та попередження негативних наслідків сейсмічних подій, підвищуючи рівень безпеки суспільства, захищаючи економічні та інфраструктурні ресурси, а також поглиблюючи наукові знання про Землю.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення методів та засобів побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- проаналізувати відомі комп'ютерні системи моніторингу сейсмічної активності земної кори, для вибору напряму дослідження;
- проаналізувати відомі математичні моделі сейсмічної активності та сейсмічних подій, що уможливить моделювання таких систем;
- визначити основні частотні характеристики сейсмічних подій, для вибору датчиків і побудови структури системи;
- побудувати структурну та електричну схеми, та алгоритм роботи комп'ютерної системи, для створення дослідного макету комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності;
- розробити і випробувати програмне забезпечення, для створення дослідного макету комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності.

Відповідно до мети та завдань кваліфікаційної роботи визначено її об'єкт та предмет.

Об'єкт дослідження: процес моніторингу сейсмічної активності земної кори.

Предмет дослідження: методи та засоби побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори.

Методи дослідження базуються на положеннях:

- аналогового і цифрового опрацювання сигналів для побудови ефективного алгоритму роботи системи;
- криптографії для застосування методів симетричного шифрування.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше побудовано дослідний макет комп'ютерної системи для моніторингу сейсмічної активності земної кори із використанням mesh мережі на основі протоколу ZigBee, що уможливлює гнучке формування сенсорних полів різної топології.

2. Набуло подальшого розвитку застосування моделі сейсмічних сигналів, що уможливило визначити основні частотні характеристики сейсмічних сигналів.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи полягає в наступному: отримані результати, уможливлюють формування сенсорних полів

різної топології для визначення глибинної структури земної кори та процесів що у ній відбуваються.

Публікації. Результати дослідження апробовано на XII науково-технічній конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології», XIII міжнародній науково-технічній конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», у вигляді тез конференцій.

1. Клочко Д., Лецишин Ю., Жаровський Р. Методи і засоби моніторингу сейсмічної активності земної кори. Актуальні задачі сучасних технологій: Матеріали XIII міжнар. наук.техн. конф. мол. учених та студентів. Тернопіль, 2024. с. 446

2. Клочко Д., Лецишин Ю., Жаровський Р. Комп'ютерна система моніторингу сейсмічної активності земної кори. Інформаційні моделі, системи та технології: Матеріали XII наук.-техн. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2024. с. 132.

Структура роботи. Робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг роботи: пояснювальна записка – 80 арк. формату А4, графічна частина – 8 аркушів формату А1.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ

1.1. Аналіз програмних комплексів моніторингу сейсмічної активності

Комп'ютерні системи моніторингу сейсмічної активності – це сукупність апаратних та програмних засобів, призначених для виявлення, аналізу та інтерпретації коливань земної кори з метою відстеження землетрусів і пов'язаних з ними процесів. Подібні системи є ключовим елементом сейсмологічної інфраструктури, оскільки вони дозволяють оперативно збирати та обробляти дані, формувати попередження про потенційні загрози, а також підтримувати наукові дослідження у галузі геофізики [1-3].

Основними елементами таких систем є сейсмічні датчики (сейсмографи, акселерометри, геофони), встановлені в різних географічних точках. Вони реєструють механічні коливання ґрунту та перетворюють їх у електричні сигнали. Ці датчики повинні мати високу чутливість та надійність, щоб фіксувати як сильні, так і слабкі поштовхи.

Отримані сигнали з датчиків надсилаються в режимі реального часу або майже реального часу до центрів обробки даних. Для передачі можуть використовуватися кабельні мережі, супутникові канали, мобільний зв'язок чи інші бездротові протоколи, залежно від розташування та вимог до параметрів передачі даних.

Сигнали надсилаються в центри обробки, які мають високопродуктивні сервери та сховища, де дані накопичуються, каталогізуються та архівуються. Такі центри забезпечують швидкий доступ до історичних даних для порівняння, аналізу та подальших досліджень за допомогою спеціального програмного забезпечення, що аналізує сигнали, визначає амплітуду, частоту, епіцентр, глибину та магнітуду подій [4-6]. Використання штучного інтелекту та машинного навчання поліпшує точність і

швидкість розпізнавання та класифікації сейсмічних сигналів, а також дозволяє відокремити події природного походження від промислових вибухів.

Результати аналізу відображаються на географічних картах, діаграмах та графіках, які допомагають сейсмологам, геофізикам та іншим фахівцям швидко зрозуміти ситуацію. Зокрема такі програмні комплекси, як SeisComP, Earthworm та ShakeAlert дозволяють отримувати доступ до даних і результатів аналізу з будь-якої точки світу. Вони здатні інформувати про наближення сейсмічної хвилі до населених пунктів за кілька секунд чи десятків секунд до її прибуття, дозволяючи вжити екстрені заходи безпеки. Подібні системи особливо важливі в регіонах з високою сейсмічністю [1-2].

1.1.1. SeisComP (Seismological Communication Processor) – це програмний комплекс з відкритим вихідним кодом, призначений для збору, обробки, аналізу та розповсюдження сейсмічних даних. Розроблений Геологічною службою Німеччини (GFZ) спільно з іншими організаціями, SeisComP широко використовується в сейсмологічних центрах по всьому світу завдяки своїй надійності, гнучкості та високій продуктивності [1-2].

Програмний комплекс SeisComP дозволяє приймати сигнали від великої кількості сейсмічних станцій та мереж, об'єднувати їх у загальний потік і обробляти в реальному часі, рис.1.1.

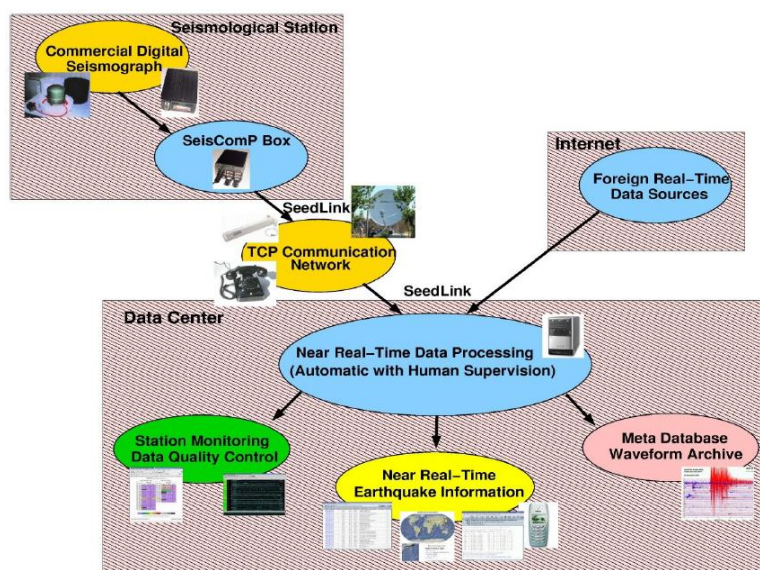


Рис. 1.1. Розгалужений потік даних програмного комплексу SeisComP

За результатами зібраних даних SeisComP виконує автоматичне визначення сейсмічних подій, їх локалізацію (обчислення координат епіцентру, глибини), оцінювання магнітуди, а також надає інструменти для ручної корекції та перегляду результатів, рис.1.2.



Рис. 1.2. Процес аналізу даних програмного комплексу SeisComP

Також перевагою SeisComP є те що вона побудована з використанням модульного підходу, що дозволяє розширювати функціональність та додавати нові типи даних або інтерфейси без переписування основного коду. SeisComP підтримує поширені формати, такі як MiniSEED, SEEDLink та інші, що полегшує інтеграцію з глобальними та національними системами спостережень. А інтегровані інструменти візуалізації дозволяють дослідникам зручно переглядати записи сейсмічних подій рис.1.3, а засоби керування системою – конфігурувати та відслідковувати роботу програмного забезпечення.

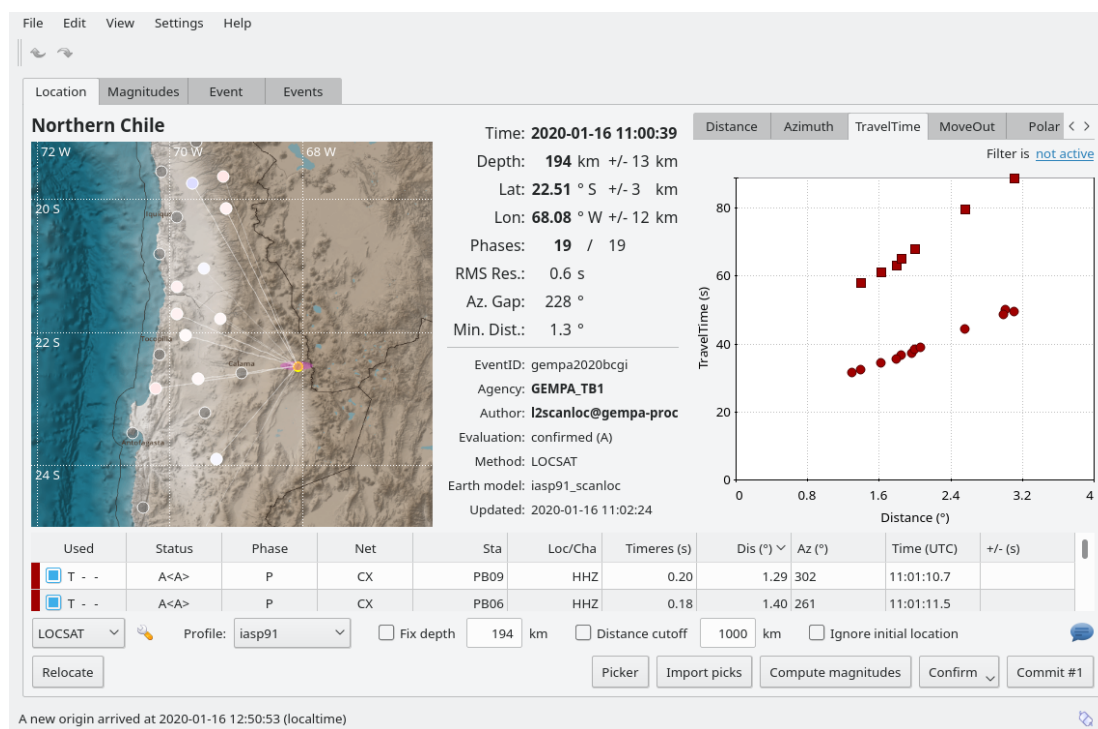


Рис. 1.3. Результати локалізації події або землетрусу програмного комплексу SeisComP

Широке поширення та велика користувачська база у міжнародній спільноті розробників, гарантує те що, SeisComP має регулярні оновлення, виправлення помилок, додаються нові функції та ведеться активна документація.

1.1.2. Earthworm – це модульна відкрита програмна платформа для збору, обробки та аналізу сейсмічних даних у реальному часі. Її розроблено Геологічною службою США (USGS) у співпраці з іншими організаціями та дослідниками. Earthworm широко застосовується у сейсмологічних центрах та обсерваторіях по всьому світу для швидкого виявлення землетрусів, визначення їх параметрів, а також розповсюдження інформації про події [1-2].

Перевагою Earthworm є те що система складається з окремих модулів, кожен з яких виконує певне завдання – збір сигналів, фільтрація, визначення піків, локалізація подій, оцінка магнітуди тощо, рис 1.4. Це дозволяє легко оновлювати чи замінювати окремі компоненти без повного перероблення системи. Також, Earthworm має конфігураційні файли, що дозволяють адаптувати систему під конкретні потреби мережі та вимоги користувача. Зокрема, можна змінювати алгоритми

детектування землетрусів, канали даних, порогові рівні чутливості та інші параметри.

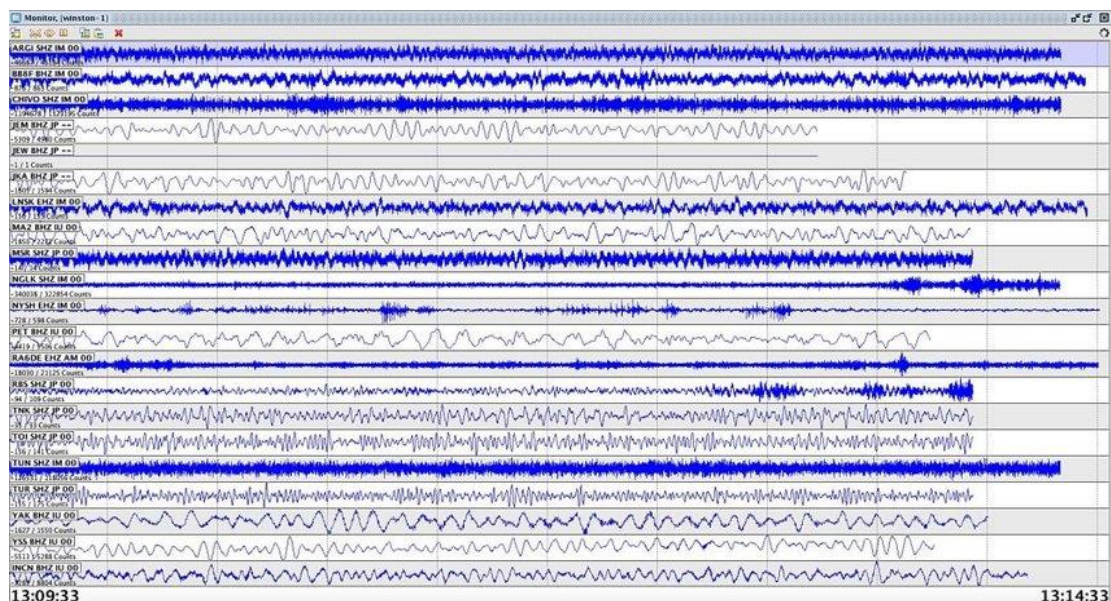


Рис. 1.4. Процес отримання і аналізу даних програмного комплексу Earthworm.

Система може працювати як на окремому комп'ютері з невеликою кількістю датчиків, так і на розподіленій мережі серверів, що обслуговують велику кількість станцій по всьому світу.

Earthworm підтримує низку стандартних форматів сейсмічних даних (такі як SEEDLink, MiniSEED) і має можливість інтегруватися із зовнішніми системами та програмними пакетами, включно з глобальними сейсмологічними мережами. Як і SeisComP, Earthworm має активну міжнародну спільноту користувачів та розробників. Це забезпечує наявність документації, форумів, ресурсів для навчання, а також постійне оновлення програмного коду.

1.1.3. ShakeAlert – це система раннього попередження про землетруси, розроблена та впроваджена Геологічною службою США (USGS) спільно з партнерськими організаціями та дослідницькими установами. Вона призначена для автоматичного виявлення сильних землетрусів практично в реальному часі та миттєвого формування попереджень рис.1.5, які можуть бути надіслані до

користувачів до того, як шкідливе сейсмічне коливання досягне їхнього місця розташування [1-2].

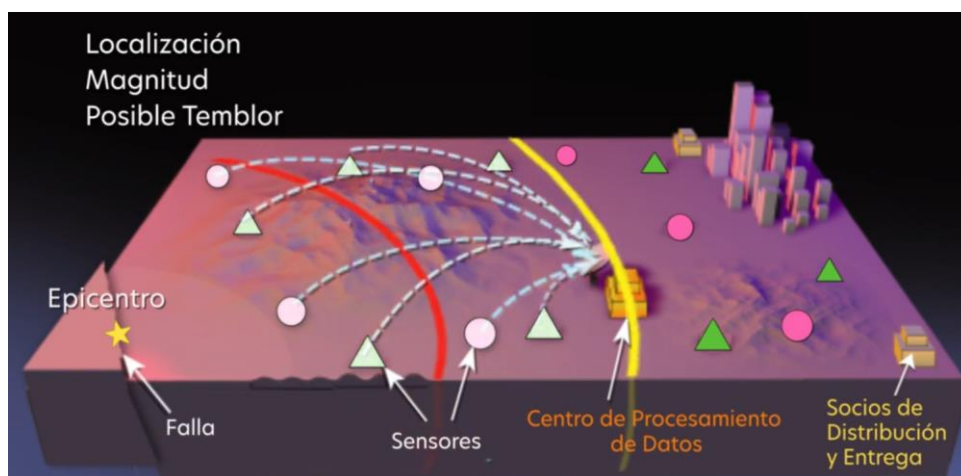


Рис. 1.5. Принцип детекції землетрусу програмного комплексу ShakeAlert.

Система раннього попередження ShakeAlert, як 2 попередні, спирається на густу мережу сейсмічних станцій, що миттєво реєструють первинні (Р-хвилі) коливання землетрусу. Оскільки Р-хвилі поширюються швидше за вторинні (S-хвилі), які спричиняють основні руйнування, система може виявляти подію та оцінювати її силу перш ніж руйнівні хвилі дійдуть до більш віддалених регіонів.

Отримавши сигнали від датчиків, система за лічені секунди визначає епіцентр, магнітуду та ймовірний ступінь пошкоджень, після чого розсилає попередження до різних каналів – мобільних пристроїв, систем керування критичною інфраструктурою (транспорт, енергетика), аварійно-рятувальних служб. Це дозволяє, автоматично зупинити поїзди, відключити газ, чи надати людям кілька додаткових секунд для пошуку безпечного місця.

Система використовує високошвидкісні канали зв'язку, щоб миттєво обробляти дані з сотень станцій. Інтеграція з різноманітними платформами (мобільні додатки, стаціонарні сигналізаційні пристрої, інтернет-інфраструктура) допомагає широко поширювати попередження. ShakeAlert не прогнозує землетруси наперед, а мінімізує негативні наслідки за рахунок надання кількох секунд до

початку сильних коливань. Навіть така невелика «фора» у часі може врятувати життя, зменшити кількість постраждалих і шкоду для інфраструктури.

Наведені програмні комплекси аналізу сейсмічної активності земної кори SeisComP, Earthworm та ShakeAlert використовують розгалужену мережу комп'ютерних систем моніторингу на базі сейсмічних давачів із подальшим опрацюванням отриманих сигналів. Основними вимогами для побудови такої мережі є її роботі в реальному масштабі часу.

1.2. Сейсмічні датчики для комп'ютерної системи

Для реєстрації сейсмічних хвиль використовують три види пристроїв: сейсмометри, геофони та сейсмічні акселерометри [7-14]. Їх конструкція і принцип роботи дещо відрізняється між собою.

1.2.1. Сейсмічні датчики, або сейсмометри, є основними пристроями для виявлення та реєстрації сейсмічних коливань земної поверхні. Їх конструкція складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у точності вимірювання та надійності роботи.

В ролі чутливого елемента виступає маятник, що складається з маси, яка підвішена так, щоб залишатися нерухомою відносно руху землі, або п'єзоелектричні елементи, які перетворюють механічні коливання на електричні сигнали. Чутливий елемент має низький коефіцієнт тертя, щоб забезпечувати високу точність реєстрації навіть незначних коливань. Також для запобігання надмірного руху маятника після початкового впливу сейсмічної хвилі використовують демпфери що зазвичай реалізуються за допомогою в'язкої рідини, магнітного або електромагнітного гасіння. Демпфування забезпечує стабільну роботу датчика та точність сигналу.

Для перетворення механічного руху маятника в електричний сигнал використовують такі типи систем перетворення:

Індуктивну, коли зміна магнітного поля, створеного рухом маятника, генерує електричний струм.

П'єзоелектричну, що генерують електричний заряд під впливом механічного тиску.

Ємнісну, коли відбувається вимірювання змін ємності між електродами у відповідь на рух елемента.

Оптичну, що використовує вимірювання змін у траєкторії світлового променя.

Отриманий, від чутливого елемента слабкий електричний сигнал, підсилюють, до рівня придатного для обробки та аналізу. Для попередньої підготовки сигналу використовують фільтри для відсіювання шумів, що дозволяє зосередитися на сейсмічних сигналах.

Сейсмометри часто розміщують у віддалених або важкодоступних місцях, тому часто використовуються автономні джерела живлення. Тобто датчики можуть працювати від батарей, електричних мереж або сонячних панелей.

Обов'язковою частиною датчика є модуль зв'язку, що забезпечує передачу сигналів від датчика до центрального сервера або станції обробки даних. Використовуються різні технології, зокрема провідні мережі (оптоволоконні або кабельні) або бездротові канали (супутниковий зв'язок, Wi-Fi, GSM). Модуль може бути інтегрований у сучасні "розумні" сейсмометри для роботи в реальному часі.

1.2.2. Геофони – це спеціалізовані сейсмічні датчики, призначені для перетворення механічних коливань ґрунту в електричний сигнал, рис.1.6. Вони широко застосовуються в геофізиці, сейморозвідці, інженерній геології, а також при проведенні промислових випробувань, моніторингу будівель та споруд, табл.1.1.



Рис. 1.6. Геофон з проводовою передачею даних

Технічні характеристики геофонів

GD-4,5 по вертикалі		GD-4,5 по горизонталі	
Тип	GD-4,5 по вертикалі	Типе	GD-4,5 по горизонталі
Власна частота (Гц)	4.5±0.5	Власна частота (Гц)	4.5±0.5
Типовий помилкова частота (Гц)	≥140	Типовий помилкова частота (Гц)	≥140
Гармонічні спотворення (%)	≤0.3%	Гармонічні спотворення (%)	≤0.3%
Демпфування розімкнутого контуру	0.6±5%	Демпфування розімкнутого контуру	0.6±10%
Опір розімкнутої ланцюга (Ом)	395±5%	Опір розімкнутої ланцюга (Ом)	395±5%
Власна чутливість напруги в обриві (в / м / с)	28.5±5%	Власна чутливість напруги в обриві (в / м / с)	28.5±10%
Допустимий нахил (°)	0	Допустимий нахил (°)	0
Рухома маса (г)	11	Рухома маса (г)	11
Макс. Відступ котушки рр (мм)	1.52	Макс. Відступ котушки рр (мм)	1.52
Довжина (мм) ›	33.3	Довжина (мм) ›	33.3
Діаметр (мм)	25.4	Діаметр (мм)	25.4
Вага (г)	87	Вага (г)	87
Тдіапазон температур (° с)	Від -40 до +80	Тдіапазон температур (° с)	Від -40 до +80
Гарантійний термін	1	Гарантійний термін	1

Геофон складається з магніту, підвішеного в котушці, яка закріплена в оболонці що жорстко з'єднана із землею. Коли земля вібрує, корпус датчика рухається разом із нею, а магніт залишається на місці через свою інерцію. Рух між магнітом і котушкою спричиняє виникнення електричного струму в обмотках котушки. Напруга, що генерується, пропорційна швидкості руху ґрунту, а тому геофон є переважно датчиком швидкості коливань.

Завдяки простоті конструкції, надійності та високій чутливості геофони є одним із найбільш поширених типів сейсмічних датчиків у промисловій і науковій практиці.

1.2.3. Сейсмічні акселерометри – це датчики, призначені для вимірювання прискорень ґрунту під час сейсмічних подій. Вони широко використовуються в сейсмології, інженерній геології, будівництві, а також для оцінки сейсмічної небезпеки й моніторингу динамічних характеристик будівель та споруд.

Акселерометр перетворює прискорення руху ґрунту або конструкції в електричний сигнал. Зазвичай він містить чутливий елемент – масу, закріплену на пружині або в підвісі, – яка зміщується під дією інерційних сил. Це зміщення перетворюється у пропорційний електричний сигнал за допомогою п'єзоелектричних, ємнісних або інших сенсорних технологій.

П'єзоелектричні акселерометри використовують кристалічні матеріали, які генерують електричний заряд під дією механічного тиску. Мають високу чутливість, стабільність, широкий діапазон частот. Однак мають меншу точність при дуже низьких частотах, оскільки вони реагують здебільшого на зміни прискорення.

Ємнісні акселерометри вимірюють зміни відстані між пластинами конденсатора при русі маси. Забезпечують високу чутливість до повільних коливань, стабільність при низьких частотах. Однак мають складнішу електроніку та можливий вплив електромагнітних завад.

Оптичні акселерометри використовують зміну інтенсивності світла або положення оптичного променя при русі маси. Забезпечують високу точність, нечутливість до електромагнітних полів. Однак мають складну конструкцію та високу вартість.

1.3. Висновки до розділу 1.

Комп'ютерні системи моніторингу сейсмічної активності є ключовим елементом сейсмологічної інфраструктури, оскільки вони дозволяють оперативно

збирати та обробляти дані, формувати попередження про потенційні загрози, а також підтримувати наукові дослідження у галузі геофізики.

Наведені програмні комплекси аналізу сейсмічної активності земної кори SeisComP, Earthworm та ShakeAlert використовують розгалужену мережу комп'ютерних систем моніторингу на базі сейсмічних давачів із подальшим опрацюванням отриманих сигналів. Основними вимогами для побудови такої мережі є її роботі в реальному масштабі часу.

Завдяки простоті конструкції, надійності та високій чутливості геофони є одним із найбільш поширених типів сейсмічних датчиків у промисловій і науковій практиці.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ВІДБОРУ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ

2.1. Формування сейсмічних хвиль

Формування сейсмічних хвиль відбувається внаслідок раптового вивільнення енергії у земній корі чи мантії, що спричиняє механічні коливання, які поширюються у вигляді хвиль. Основними джерелами сейсмічних хвиль є природні процеси, такі як землетруси, вулканічна активність, обвали або зсуви, а також антропогенні фактори, наприклад, вибухи чи будівельні роботи [3-6].

Коли виникає землетрус, напруження, яке накопичується в земній корі через тектонічні рухи, досягає критичного рівня і призводить до розриву порід у зоні розлому. Цей розрив супроводжується вивільненням великої кількості енергії, яка поширюється від джерела землетрусу у вигляді сейсмічних хвиль. Ці хвилі проходять через різні шари Землі або вздовж її поверхні, передаючи енергію і викликаючи коливання ґрунту на значних відстанях.

Сейсмічні хвилі поділяються на два основні типи: об'ємні хвилі, які поширюються через внутрішні шари Землі, та поверхневі хвилі, які поширюються вздовж її поверхні. Кожен із цих типів хвиль має свої особливості, швидкість поширення та вплив на ґрунт.

Об'ємні хвилі поширюються у трьох вимірах через земну кору та мантію. Вони поділяються на два підтипи:

Поздовжні або первинні хвилі (Р-хвилі), рис.2.1 є найшвидшими серед сейсмічних хвиль і першими досягають поверхні після землетрусу. Вони поширюються за рахунок стиснення і розтягування частинок середовища вздовж напрямку руху хвилі, подібно до звукових хвиль. Р-хвилі можуть проходити через тверді, рідкі та газоподібні середовища, що дозволяє їм проникати у ядро Землі.

Поперечні або вторинні хвилі (S-хвилі) поширюються повільніше, ніж Р-хвилі, і прибувають до спостерігачів пізніше. Вони викликають зміщення частинок перпендикулярно до напрямку поширення хвилі. На відміну від Р-хвиль, S-хвилі не

можуть проходити через рідкі середовища, що обмежує їх поширення у зовнішньому ядрі Землі.

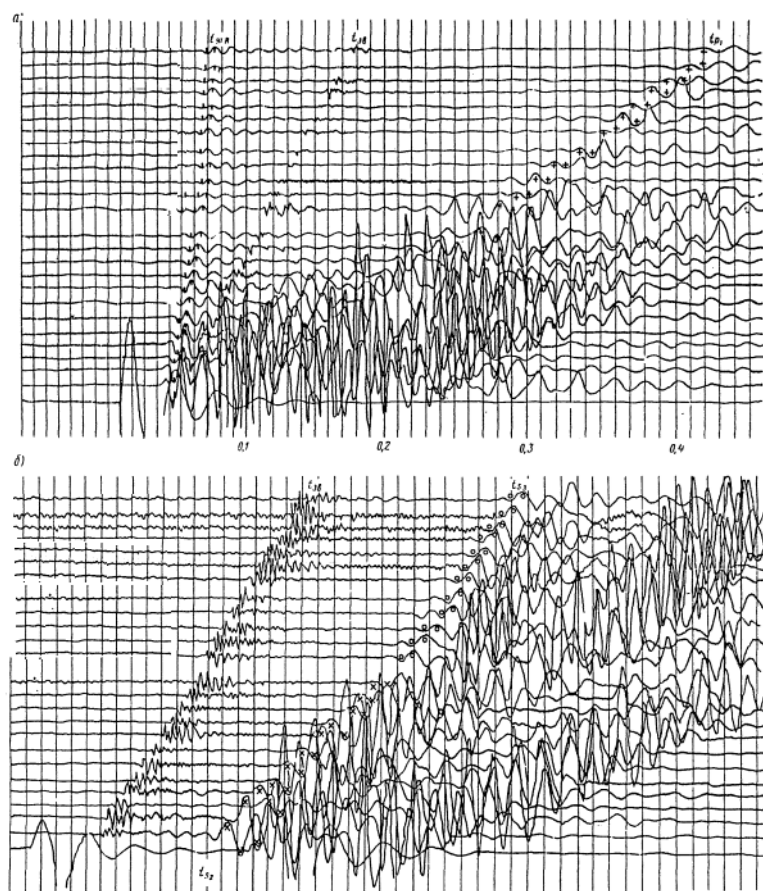


Рис. 1.1. Приклад реальних поздовжніх (а) і поперечних (б) хвиль

Поверхневі хвилі виникають, коли об'ємні хвилі досягають поверхні Землі і частково перетворюються в них. Вони рухаються повільніше за об'ємні хвилі, але викликають сильні коливання ґрунту, що призводить до найбільших руйнувань під час землетрусів [1-2]. Основними типами поверхневих хвиль є:

Хвилі Релея, рис.2.2, викликають еліптичний рух частинок у вертикальній площині. Ці хвилі схожі на хвилі на поверхні води, де частинки описують кругові траєкторії. Вони спричиняють вертикальні та горизонтальні зміщення ґрунту, які відчуються як "гойдання".

Хвилі Лява викликають горизонтальні зміщення частинок перпендикулярно до напрямку руху хвилі. Вони часто спричиняють серйозні пошкодження будівель через горизонтальні зрушення.

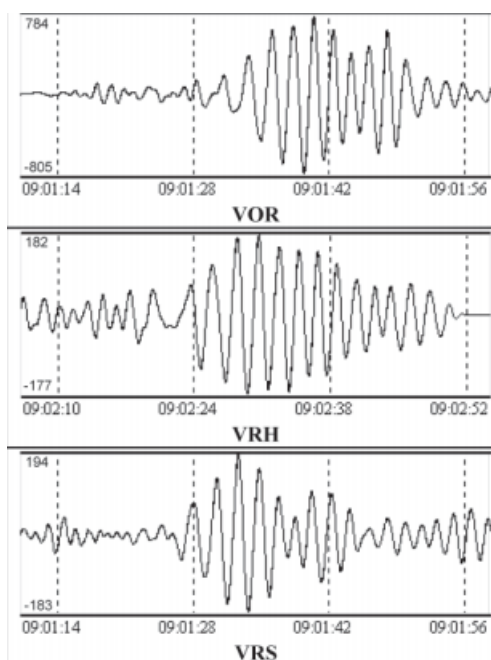


Рис. 2.2. Приклад релеєвських хвиль на сейсмограмах різних станцій, що отримуються в інженерній сейсмозв'язці при промисловому вибуху

Сейсмічні хвилі поширюються завдяки передачі механічної енергії між частинками матеріалу, через який вони проходять. У процесі поширення хвиль швидкість і амплітуда змінюються залежно від властивостей середовища:

Швидкість залежить від щільності та еластичності порід. Р-хвилі поширюються швидше в більш щільних і твердих середовищах, а S-хвилі – повільніше. У рідкому середовищі швидкість Р-хвиль значно знижується, а S-хвилі взагалі не проходять.

Амплітуда зменшується з відстанню від джерела через поглинання енергії та розсіювання хвиль.

Коли сейсмічні хвилі проходять через різні шари Землі, вони змінюють напрямок і швидкість через рефракцію та відображення, рис.2.3. Наприклад, у межах між корою, мантією та ядром хвилі можуть частково відбиватися або змінювати кут поширення. Це створює ефект затухання енергії та змінює їх вплив на поверхні.

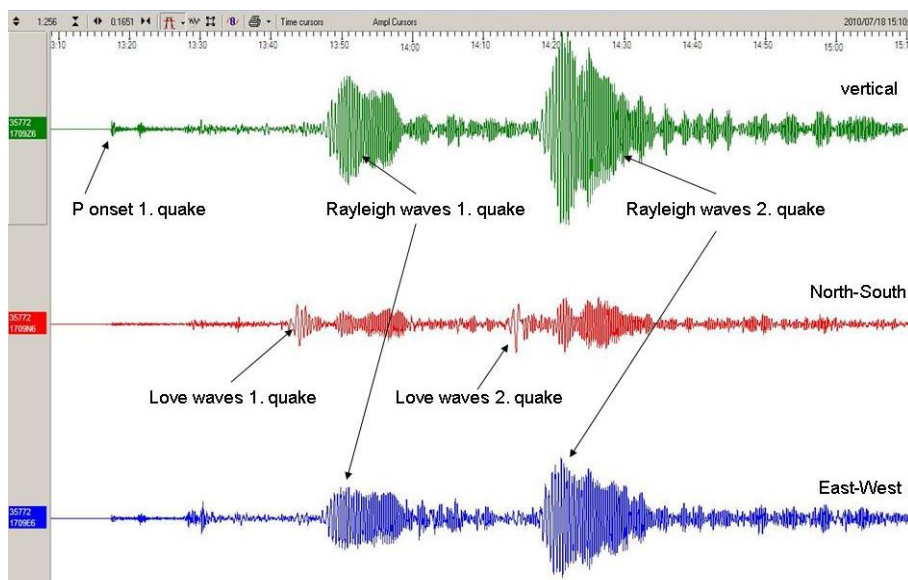


Рис. 2.3. Сейсмограма землетрусу, записана на станції Каліфорнії

Джерела виникнення завад для сейсмічних хвиль – це фактори, які спотворюють їхні характеристики (амплітуду, частоту, напрямок і швидкість поширення) та ускладнюють точну реєстрацію та аналіз сейсмічних даних. Ці завади можуть бути як природного, так і антропогенного походження, виникаючи на різних етапах поширення хвиль – від моменту їхнього формування до досягнення сейсмографів.

Основним джерелом природних завад є геологічна неоднорідність середовища, через яке поширюються сейсмічні хвилі. Земна кора і мантія складаються з різних типів порід із різною щільністю, пружністю, тріщинуватістю та вологістю. Ці неоднорідності спричиняють розсіювання, рефракцію (заломлення) і відбиття хвиль, що змінює їхню амплітуду та частоту. Наприклад, хвилі, проходячи через щільні породи, можуть прискорюватися, а в менш щільних чи насичених рідинами – сповільнюватися. Цей ефект особливо помітний у зонах розломів, де структура порід значно порушена.

Ще одним важливим джерелом природних завад є локальні геофізичні явища, такі як рухи ґрунтових вод, вулканічна активність, землетруси малої магнітуди або обвали. Ці процеси можуть генерувати фонові сейсмічні хвилі, що накладаються на основний сигнал, ускладнюючи його ідентифікацію. Вітер, опади або припливи також створюють механічні вібрації, які впливають на роботу сейсмічних датчиків.

Сейсмічні хвилі можуть зазнавати значного впливу через рельєф поверхні Землі. Гори, долини, водні об'єкти створюють умови для відбиття, дифракції або інтерференції хвиль, що може призводити до появи додаткових хвиль або спотворення їхньої початкової форми. Наприклад, у зонах із гірським рельєфом хвилі можуть затримуватися або відбиватися, створюючи багатократні сигнали.

До антропогенних джерел завад належать різні види людської діяльності, які створюють вібрації та механічні хвилі. Одним із найзначніших джерел є промислова діяльність, така як робота важкої техніки, будівельні роботи, буріння або видобуток корисних копалин. Ці процеси створюють потужні локальні коливання, які можуть маскувати слабкі природні сейсмічні сигнали. Наприклад, вибухи на кар'єрах можуть генерувати хвилі, схожі на ті, що виникають при землетрусах.

Транспортна інфраструктура також є значним джерелом антропогенних завад. Рух автомобілів, поїздів, літаків або кораблів створює вібрації, які поширюються через ґрунт і водні об'єкти. Ці хвилі мають меншу енергію порівняно із землетрусами, але можуть перекривати або змінювати характеристики слабких сейсмічних хвиль. Наприклад, у містах транспортні вібрації є постійним фоновим шумом, що ускладнює сейсмічний моніторинг.

Особливо складні завади виникають через інженерні споруди. Мости, греблі, тунелі або високі будівлі можуть впливати на поширення хвиль, викликаючи їх відбиття, розсіювання або інтерференцію. Крім того, робота електростанцій, генераторів або насосів може створювати механічні вібрації, які реєструються сейсмографами як фоновий шум.

Суттєвим джерелом завад є також електромагнітні перешкоди, які впливають на чутливі електронні компоненти сейсмічних датчиків. Робота радіопередавачів, мобільних телефонів, високовольтних ліній передачі або інших електронних пристроїв може створювати електромагнітні коливання, які спотворюють сигнал.

Для зменшення впливу завад використовуються різні методи. Сейсмографи встановлюються у спеціальних підземних або віддалених від людської діяльності станціях, де рівень фонових шумів мінімальний. Використовуються фільтри, які відсікають сигнали у певних частотних діапазонах, характерних для шумів. Також

застосовується методика аналізу спектрів сигналів, що дозволяє відрізнити природні сейсмічні хвилі від антропогенних шумів.

Отже, завади для сейсмічних хвиль можуть виникати через природні геологічні особливості, кліматичні умови, рельєф місцевості або людську діяльність. Їхня наявність суттєво ускладнює точність реєстрації та аналізу сейсмічних подій, що вимагає розробки і застосування спеціальних технологій для їхньої мінімізації.

2.2. Математичні моделі сейсмічних хвиль

Математичні моделі сейсмічних сигналів є основним інструментом для опису, аналізу та інтерпретації сейсмічних хвиль, які виникають внаслідок землетрусів, вибухів чи інших джерел енергії. Такі моделі дозволяють зрозуміти природу сейсмічних явищ, визначити властивості середовища, через яке поширюються хвилі, і спрогнозувати вплив сейсмічних подій на інженерні споруди. У їхній основі лежать фізичні закони пружності, механіки суцільного середовища та хвильової динаміки, що описують взаємодію між напруженнями, деформаціями та швидкостями у твердих тілах [3-6].

Сейсмічні сигнали є складними коливаннями, що поширюються у вигляді об'ємних хвиль (поздовжніх Р-хвиль і поперечних S-хвиль) та поверхневих хвиль (хвиль Релея і Лява). Для їх моделювання використовуються рівняння пружності, які описують поведінку середовища під дією сейсмічних хвиль. Основним рівнянням є рівняння руху, що враховує внутрішні сили, викликані напруженнями, та зовнішні сили:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + f, \quad (2.1)$$

де ρ – густина середовища, u – вектор переміщень частинок, σ – тензор напружень, а f – зовнішні сили. Взаємодія між напруженнями та деформаціями

описується рівняннями Гука для пружних матеріалів, що пов'язують напруження з градієнтами переміщень.

Сейсмічні моделі поділяються на аналітичні, чисельні та емпіричні. Аналітичні моделі базуються на точних розв'язках рівнянь хвильової динаміки для простих середовищ, таких як однорідні або ізотропні пружні матеріали. Вони дозволяють отримати фундаментальні результати щодо швидкості, амплітуди та траєкторії хвиль. Наприклад, рівняння Ламе використовується для моделювання поздовжніх і поперечних хвиль:

$$\lambda \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (2.2)$$

де λ і μ – пружні модулі Ламе, що визначають пружні властивості середовища. Ці рівняння дозволяють розрахувати, як хвилі поширюються через однорідне середовище, але для складніших структур їх потрібно адаптувати.

Чисельні моделі застосовуються для моделювання сейсмічних сигналів у реалістичних умовах, коли середовище є неоднорідним, анізотропним чи включає рідини і гази. У таких випадках використовуються методи дискретизації, наприклад, метод скінченних різниць, метод скінченних елементів або метод спектральних елементів. Ці підходи дозволяють розраховувати поширення хвиль у складних середовищах, таких як земна кора з її шарами, тріщинами, розломами та іншими неоднорідностями. Особливо важливим є врахування граничних умов, які визначають, як хвилі відбиваються чи заломлюються на межах між шарами з різними властивостями.

Емпіричні моделі базуються на даних, отриманих під час спостережень. Вони використовуються для побудови залежностей між характеристиками сейсмічних хвиль (амплітуда, частота, затухання) та параметрами джерела або середовища. Наприклад, модель затухання хвиль залежно від відстані від джерела враховує енерговтрати через розсіювання та поглинання:

$$A(r) = A_0 e^{-\alpha r}, \quad (2.3)$$

де $A(r)$ – амплітуда хвилі на відстані r , A_0 – амплітуда на початковій відстані, а α – коефіцієнт поглинання.

Для аналізу сейсмічних сигналів також широко застосовуються спектральні методи, які дозволяють розкласти сигнал на частоти та визначити його частотний склад. Це особливо важливо для ідентифікації джерел сигналів, оскільки різні джерела (землетруси, вибухи, техногенні вібрації) мають характерні частотні спектри. У таких випадках використовуються часово-частотні перетворення, наприклад, вейвлет-аналіз, який дозволяє аналізувати сигнал у різних масштабах.

Таким чином, математичні моделі сейсмічних сигналів базуються на фізичних законах хвильової динаміки, аналітичних розв'язках для простих середовищ, чисельних методах для складних структур та емпіричних залежностях, побудованих на основі спостережень. Вони забезпечують глибоке розуміння природи сейсмічних хвиль і дозволяють використовувати отримані знання для оцінки ризиків, проектування інженерних споруд і прогнозування наслідків сейсмічних подій.

2.3. Частотні характеристики сейсмічних хвиль

Частотні характеристики сейсмічних хвиль є важливим параметром, що описує їхню поведінку під час поширення в земній корі та мантиї. Вони визначають спектральний склад коливань, їхню енергію, амплітуду, швидкість загасання і здатність до проникнення в різні середовища. Частота сейсмічних хвиль є ключовим показником, що використовується для ідентифікації джерела коливань, аналізу структур земних шарів, прогнозування наслідків землетрусів і оцінки ризиків для будівель та інженерних споруд. Сейсмічні хвилі мають широкий частотний діапазон — від часток герца до десятків кілогерц, і кожен діапазон характеризується своїми властивостями та застосуванням [3-6].

Сейсмічні хвилі поділяються на дві основні групи: об'ємні хвилі (Р- і S-хвилі) і поверхневі хвилі (хвилі Релея та Лява). Об'ємні хвилі поширюються вглиб Землі і зазвичай мають вищі частоти, тоді як поверхневі хвилі, які поширюються вздовж поверхні, характеризуються нижчими частотами, але мають велику амплітуду і є основними джерелами руйнувань під час землетрусів.

Р-хвилі (поздовжні) мають діапазон частот від 0.1 Гц до 100 Гц. Вони є найшвидшими серед сейсмічних хвиль, поширюються в будь-якому середовищі, включаючи тверді породи, рідини і гази. Завдяки своїй високій частоті Р-хвилі здатні виявляти дрібні неоднорідності в середовищі та використовуються для раннього попередження про землетруси. Їхні високочастотні компоненти швидко згасають, що обмежує дистанцію ефективного поширення. Натомість низькочастотні Р-хвилі можуть проходити через ядро Землі, дозволяючи досліджувати її внутрішню будову.

S-хвилі (поперечні) мають частотний діапазон від 0.1 Гц до 50 Гц. Вони поширюються лише у твердих середовищах і не можуть проникати через рідкі або газоподібні шари. Завдяки цьому S-хвилі особливо корисні для вивчення земної кори та мантії, оскільки їхній спектральний склад відображає механічні властивості порід. Частоти цих хвиль знижуються з глибиною, що спричиняє фільтрацію високочастотних компонентів і переважання низькочастотних хвиль у віддалених зонах.

Поверхневі хвилі, такі як хвилі Релея та Лява, мають частоти в діапазоні від 0.01 Гц до 10 Гц. Вони виникають на межі між земною поверхнею та нижніми шарами і мають набагато більшу амплітуду порівняно з об'ємними хвилями. Завдяки низькій частоті та великій довжині хвилі поверхневі хвилі є основними джерелами руйнувань під час землетрусів. Хвилі Релея створюють вертикальні та горизонтальні коливання частинок по еліптичних траєкторіях, тоді як хвилі Лява спричиняють лише горизонтальні зрушення, які є особливо небезпечними для будівель.

Низькочастотні хвилі (менше 1 Гц) мають здатність проникати на великі глибини, проходячи через мантію і ядро Землі, та використовуються для глобальних

сейсмічних досліджень. Вони мало піддаються загасанню і можуть поширюватися на тисячі кілометрів, що дозволяє реєструвати землетруси на інших континентах. Водночас високочастотні хвилі (10–100 Гц) добре відображаються від границь шарів і використовуються для детального дослідження поверхневих і приповерхневих структур. Високочастотні хвилі швидко втрачають енергію через поглинання в неоднорідних породах, тому вони є ефективними для аналізу локальних зон і неглибоких шарів.

2.4. Схеми розміщення геофонів на місцевості

Розміщення геофонів визначається конкретними завданнями сейсмічних досліджень і структурою середовища, яке необхідно вивчити. Геофони – це чутливі сейсмічні датчики, які реєструють механічні коливання ґрунту та перетворюють їх у електричні сигнали. Від правильного вибору схеми їхнього розташування залежить точність даних, які можна отримати для аналізу глибинної будови земної кори, локалізації землетрусів, пошуку корисних копалин або оцінки стабільності конструкцій. Основні типи розміщення геофонів включають лінійне, решіткове, кільцеве, радіальне та тривісне розташування, кожне з яких використовується для різних завдань і досліджень [7-12].

Лінійне розміщення геофонів є найпростішим і найчастіше використовується в сейсморозвідці для вивчення горизонтальних структур і поширення сейсмічних хвиль. У такій конфігурації датчики розташовуються в одну лінію на рівних відстанях, що дозволяє ефективно аналізувати відбиття та заломлення хвиль від підземних шарів. Цей підхід використовується для виявлення глибинного залягання порід, визначення меж шарів та виявлення розломів і тріщин. Він є основою для побудови 2D-моделей геологічних структур і застосовується в геофізичних розвідках нафтогазових і мінеральних родовищ, а також для аналізу механічних властивостей ґрунту під час проектування інженерних споруд.

Решіткове розміщення, або сітчаста конфігурація, рис.2.4-2.6., передбачає встановлення геофонів у вигляді прямокутної чи квадратної сітки, що дозволяє

збирати дані в тривимірному просторі. Цей тип розміщення використовується для 3D-сейсмозвідки, що забезпечує детальне картографування складних підземних структур, таких як соляні куполи, карстові порожнини чи зони тріщинуватості. Він також застосовується для аналізу неоднорідностей у ґрунтах та оцінки стану порід у зонах високої сейсмічної активності. Завдяки можливості виявляти локальні аномалії решіткове розміщення корисне для дослідження основ під будівлями, мостами або іншими інфраструктурними об'єктами, які потребують підвищеної сейсмічної стійкості.

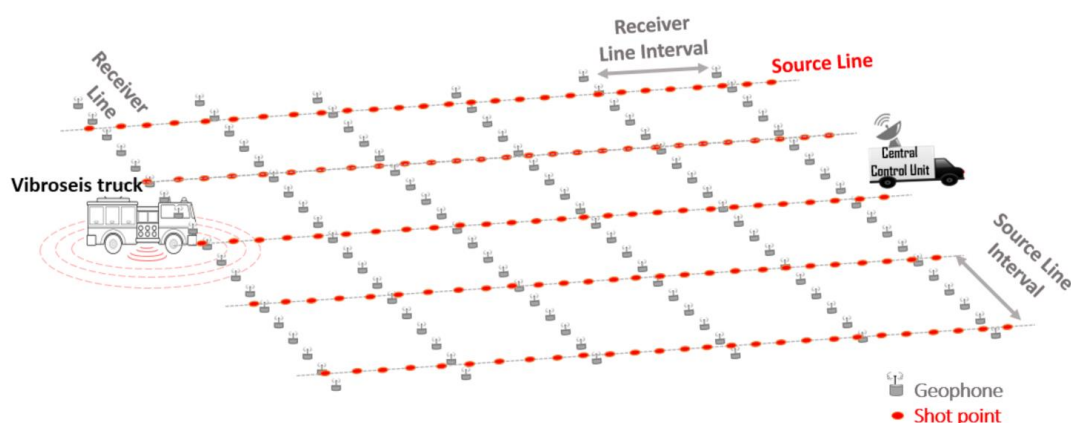


Рис.2.4. Решіткове розміщення геофонів

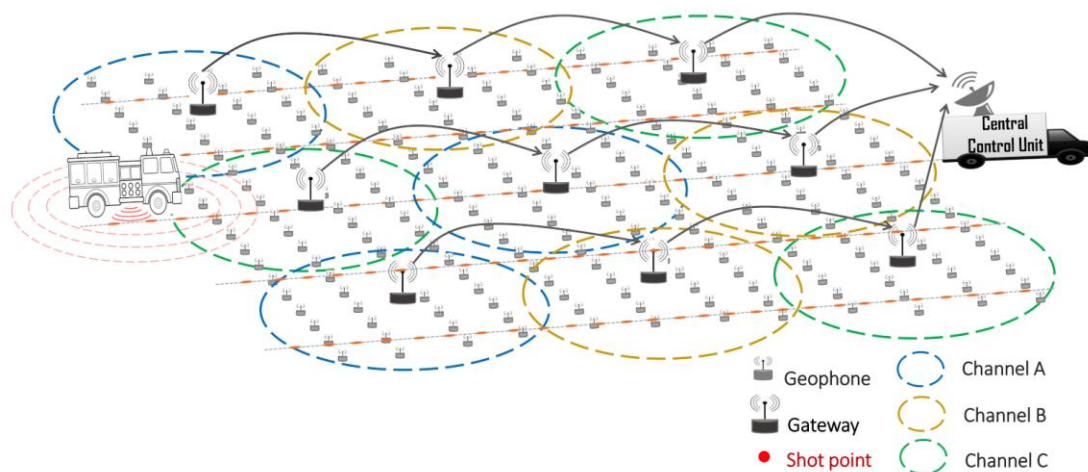


Рис.2.5 Схема побудови mesh мережі при решітковому розміщенні геофонів

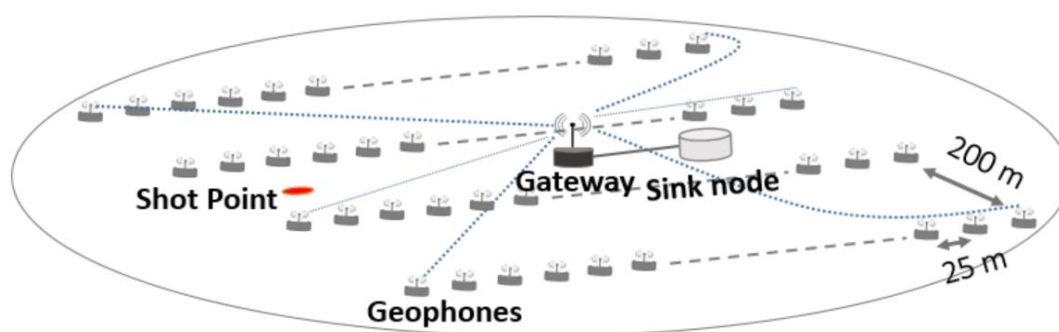


Рис.2.6 Схема побудови мережі із топологією типу зірка при решітковому розміщенні геофонів

Кільцеве розміщення геофонів використовується для реєстрації хвиль, що поширюються від конкретного джерела, наприклад, епіцентру землетрусу або контрольованого вибуху. Геофони розташовуються концентричними кільцями навколо джерела або потенційно небезпечної ділянки, дозволяючи аналізувати сейсмічні хвилі в усіх напрямках. Цей підхід часто використовується для моніторингу сейсмічної активності, оцінки геодинамічних процесів і прогнозування землетрусів. Він також ефективний у вивченні сейсмічних характеристик вулканічних регіонів і активних розломів.

Радіальне розміщення передбачає розташування геофонів уздовж декількох ліній, що розходяться променями від центра. Така конфігурація дозволяє отримувати дані про поширення хвиль у різних напрямках і створювати детальні карти підземних структур у форматі 2D та 3D. Цей підхід використовується для пошуку нафти і газу, геотехнічних досліджень і вивчення глибинних розломів. Радіальна схема забезпечує високу точність при дослідженні симетричних об'єктів, таких як вулкани або підземні резервуари.

Тривісне (3D) розміщення геофонів є найбільш складним і ефективним методом для аналізу хвильових полів. У цьому випадку датчики розташовуються в трьох напрямках – вертикальному та двох горизонтальних (X, Y, Z), що дозволяє вимірювати всі компоненти переміщень частинок ґрунту. Це важливо для аналізу динамічних процесів, таких як коливання будівель під час землетрусів, і для вивчення напрямків поширення хвиль. Тривісні геофони широко застосовуються в

інженерних дослідженнях для оцінки стійкості конструкцій, у дослідженні мікросейсмічності та в контролі стану небезпечних зон, таких як дамби чи тунелі.

Нерівномірне розміщення геофонів використовується для вивчення специфічних об'єктів і зон із складною геологічною структурою, де необхідно зосередитися на локальних особливостях. Така схема підходить для аналізу зон зсувів, карстових порожнин або ділянок із підвищеною тріщинуватістю. Вона дозволяє отримувати дані з урахуванням реальних умов рельєфу, але вимагає складної інтерпретації результатів.

Таким чином, вибір розміщення геофонів залежить від конкретних завдань. Лінійні схеми використовуються для профільних досліджень і вивчення шаруватих структур, решіткові – для побудови детальних 3D-моделей, кільцеві – для аналізу джерел сейсмічних хвиль, радіальні – для досліджень із симетричними поширеннями хвиль, а тривісні – для детальних вимірювань амплітуди та напрямку хвиль. Завдяки цим підходам можна ефективно досліджувати геологічні структури, оцінювати сейсмічні ризики та забезпечувати безпеку будівель та інфраструктури.

2.5. Висновки до розділу

Математичні моделі сейсмічних сигналів базуються на фізичних законах хвильової динаміки, аналітичних розв'язках для простих середовищ, чисельних методах для складних структур та емпіричних залежностях, побудованих на основі спостережень. Вони забезпечують глибоке розуміння природи сейсмічних хвиль і дозволяють використовувати отримані знання для оцінки ризиків, проектування інженерних споруд і прогнозування наслідків сейсмічних подій.

Низькочастотні хвилі (менше 1 Гц) мають здатність проникати на великі глибини, проходячи через мантию і ядро Землі, та використовуються для глобальних сейсмічних досліджень. Вони мало піддаються загасанню і можуть поширюватися на тисячі кілометрів, що дозволяє реєструвати землетруси на інших континентах. Водночас високочастотні хвилі (10–100 Гц) добре відображаються від границь шарів і використовуються для детального дослідження поверхневих і приповерхневих

структур. Високочастотні хвилі швидко втрачають енергію через поглинання в неоднорідних породах, тому вони є ефективними для аналізу локальних зон і неглибоких шарів.

Для зменшення впливу завад використовуються різні методи. Сейсмографи встановлюються у спеціальних підземних або віддалених від людської діяльності станціях, де рівень фонових шумів мінімальний. Використовуються фільтри, які відсікають сигнали у певних частотних діапазонах, характерних для шумів. Також застосовується методика аналізу спектрів сигналів, що дозволяє відрізнити природні сейсмічні хвилі від антропогенних шумів.

Вибір розміщення геофонів залежить від конкретних завдань. Лінійні схеми використовуються для профільних досліджень і вивчення шаруватих структур, решіткові – для побудови детальних 3D-моделей, кільцеві – для аналізу джерел сейсмічних хвиль, радіальні – для досліджень із симетричними поширеннями хвиль, а тривісні – для детальних вимірювань амплітуди та напрямку хвиль. Завдяки цим підходам можна ефективно досліджувати геологічні структури, оцінювати сейсмічні ризики та забезпечувати безпеку будівель та інфраструктури.

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА ТА ТЕСТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ

3.1. Обґрунтування апаратної платформи для побудови мережі датчиків

3.1.1. Бездротовий модуль HOLYIOT-18010-nRF52840 – створений на основі мікроконтролера nRF52840. Він призначений для розробки пристроїв з підтримкою бездротових протоколів зв'язку, зокрема Bluetooth Low Energy (BLE), Thread, Zigbee, ANT і IEEE 802.15.4, а також для використання в додатках Інтернету речей (IoT) завдяки низькому енергоспоживанню, широкому набору периферійних інтерфейсів і високій продуктивності. Основне призначення цього модуля – створення бездротових мережевих рішень для моніторингу, управління і передачі даних у різних сферах, включаючи розумні пристрої, системи автоматизації та сенсорні мережі.

Одним із основних застосувань HOLYIOT-18010-nRF52840 є побудова пристроїв для розумного дому та автоматизації. Завдяки підтримці протоколів Zigbee і Thread, модуль може використовуватися для контролю освітлення, кліматичних систем, розумних замків, датчиків руху та температури. Наприклад, він дозволяє створювати мережі датчиків, які автоматично взаємодіють один з одним, оптимізуючи енергоспоживання та забезпечуючи безпечне керування пристроями. Такі системи працюють у складі складних автоматизованих рішень для забезпечення комфорту та безпеки в житлових і комерційних приміщеннях.

Іншим важливим напрямком використання модуля є носимі пристрої та фітнес-гаджети, які потребують енергоефективного зв'язку через Bluetooth Low Energy (BLE). Завдяки низькому енергоспоживанню HOLYIOT-18010-nRF52840 підходить для створення фітнес-браслетів, пульсометри, трекерів активності та розумних годинників, які можуть передавати дані до смартфонів або інших пристроїв для моніторингу фізичної активності користувачів. Його підтримка NFC спрощує процедуру підключення та конфігурації пристроїв.

У сфері медичних пристроїв HOLYIOT-18010-nRF52840 застосовується для розробки бездротових систем моніторингу стану здоров'я, наприклад, глюкометрів, пульсоксиметрів і систем дистанційного спостереження за пацієнтами. Завдяки стабільному зв'язку та енергоефективності, модуль забезпечує безперебійну передачу даних у режимі реального часу, дозволяючи лікарям віддалено стежити за життєво важливими показниками пацієнтів.

У промисловому Інтернеті речей (IIoT) HOLYIOT-18010-nRF52840 використовується для моніторингу стану обладнання, збору даних із датчиків і автоматизації виробничих процесів. Він підтримує бездротові мережі, які можуть працювати навіть у складних умовах промислових об'єктів, передаючи інформацію про температуру, вологість, вібрації або тиск до центральних серверів. Це дозволяє підприємствам оптимізувати роботу обладнання, вчасно виявляти несправності і знижувати витрати на обслуговування.

HOLYIOT-18010-nRF52840 також активно використовується в системах трекінгу та позиціонування. Завдяки підтримці Bluetooth 5.0 і технології Bluetooth Direction Finding, модуль дозволяє створювати рішення для визначення місцеположення об'єктів усередині приміщень з високою точністю. Це робить його ідеальним для логістичних рішень, відстеження вантажів, керування інвентаризацією та моніторингу персоналу.

Ще однією сферою застосування є розумні замки та системи контролю доступу, де модуль використовується для бездротового управління через BLE та NFC. Такі системи забезпечують безконтактне відкривання дверей за допомогою смартфонів або смарт-карт, підвищуючи зручність і безпеку використання. HOLYIOT-18010-nRF52840 підтримує шифрування даних, що робить його придатним для використання в рішеннях із високими вимогами до безпеки.

У сфері спорттехнологій модуль використовується для створення датчиків швидкості, каденсу, моніторів серцевого ритму та інших пристроїв для контролю фізичних навантажень. Він підтримує протоколи ANT+, які є стандартом для спортивних гаджетів, і забезпечує точну передачу даних у реальному часі.

Таким чином, HOLYIOT-18010-nRF52840 є універсальним рішенням для створення сучасних IoT-пристроїв завдяки широкому спектру підтримуваних бездротових стандартів, низькому енергоспоживанню та високій продуктивності. Він знаходить застосування у таких сферах, як розумні будинки, промислові мережі, медичні пристрої, спортивні технології та системи контролю доступу. Завдяки компактним розмірам і гнучким можливостям інтеграції, цей модуль підходить для розробки енергоефективних рішень, які забезпечують надійний зв'язок, обробку даних і масштабованість для майбутніх застосувань.

3.1.2. 32-бітне процесорне ядро ARM Cortex-M4, призначене для використання в вбудованих системах із високими вимогами до обчислювальної продуктивності та енергоефективності. Це ядро поєднує переваги низького енергоспоживання та високої продуктивності, що робить його ідеальним вибором для застосувань в Інтернеті речей (IoT), обробці сигналів, управлінні двигунами, системах автоматизації та медичних пристроях.

Cortex-M4 використовує Harvard-архітектуру з розділними шинами для інструкцій та даних, що забезпечує паралельну обробку та підвищену продуктивність. Ядро підтримує Thumb-2 інструкції, що забезпечують компактний код і ефективне використання пам'яті. Воно працює на тактових частотах до 200 МГц, забезпечуючи продуктивність до 1.25 DMIPS/МГц або 3.40 CoreMark/МГц.

Однією з ключових особливостей є вбудований блок обчислень із плаваючою точкою (Floating Point Unit, FPU), який підтримує як операції з 32-бітними числами (одинарної точності), так і основні арифметичні операції. Це значно підвищує ефективність обчислень у завданнях, пов'язаних з обробкою сигналів, цифровою фільтрацією та обчисленням коефіцієнтів у математичних моделях.

Ядро включає розширення для цифрової обробки сигналів (DSP), що підтримує операції з множенням-накопиченням (MAC), насичені арифметичні обчислення та паралельну обробку даних. Це робить його ідеальним для застосувань у системах аудіообробки, обробки зображень і радіочастотних системах.

Cortex-M4 спроектоване з фокусом на низьке енергоспоживання, що забезпечує тривалу роботу пристроїв від батарей. Підтримка енергозберігаючих

режимів, таких як Sleep і Deep Sleep, дозволяє значно скоротити споживання енергії в періоди неактивності.

Cortex-M4 має Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC), що підтримує до 240 векторів переривань і апаратне визначення пріоритетів, дозволяючи швидко реагувати на події та знижувати затримки в реальному часі. Вбудований блок SysTick підтримує точний підрахунок часу для реалізації завдань у реальному часі.

Модуль Memory Protection Unit (MPU) дозволяє розділити пам'ять на кілька зон із різними рівнями доступу, що підвищує безпеку програмного забезпечення та запобігає несанкціонованому доступу до критично важливих областей.

Cortex-M4 сумісне з численними периферійними інтерфейсами, такими як I2C, SPI, UART, USB, CAN та Ethernet, що забезпечує легку інтеграцію в складні системи.

Cortex-M4 широко використовується в розумних датчиках і контролерах завдяки енергоефективності та підтримці бездротових технологій, таких як Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, Thread та Wi-Fi.

Cortex-M4 застосовується в системах управління двигунами, моніторингу обладнання та промислових контролерах, що працюють у реальному часі. Його високопродуктивний DSP-блок дозволяє обробляти аудіо- і відеосигнали, створювати фільтри для систем активного шумозаглушення та забезпечувати аналіз даних у системах зв'язку. Також Cortex-M4 використовується для обробки сигналів від GPS-приймачів і систем визначення положення в реальному часі, а також для керування автомобільними системами.

Простота програмування завдяки підтримці стандартних інструментів ARM, таких як Keil MDK та IAR Embedded Workbench, а широка екосистема забезпечує великий вибір бібліотек, драйверів та інтеграція з популярними платформами, такими як FreeRTOS.

3.1.3. Вибір протоколу зв'язку для побудови безпроводової мережі. HOLYIOT-18010-nRF52840 підтримує кілька протоколів бездротового зв'язку, кожен із яких має свою дальність дії залежно від умов навколишнього середовища, потужності передавача та чутливості приймача. Основні протоколи, які

використовуються в цьому модулі, включають Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0, Thread, Zigbee, ANT+ і IEEE 802.15.4.

1) Протокол Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0 забезпечує дальність до 100–400 м у відкритому просторі. Цього досягають за рахунок того що BLE 5.0 підтримує дві основні функції, що збільшують дальність, зокрема додатковий частотний діапазон Extended Range та завдяки введенню кодованих фізичних рівнів (Coded PHY), що разом дозволяє підвищити чутливість приймача. Потужність передавача може досягати +8 dBm (Higher Output Power), що також сприяє збільшенню покриття.

2) Протокол Thread (на базі IEEE 802.15.4) забезпечує дальність зв'язку до 100–300 м у відкритому просторі. Особливістю протоколу Thread є те що він працює на низьких частотах і використовує сотові мережі (mesh networks), що дозволяють підвищити ефективність зв'язку за рахунок ретрансляції сигналу між вузлами. Завдяки цьому мережа може охоплювати великі площі, особливо в приміщеннях із великою кількістю перешкод.

3) Протокол Zigbee (на базі IEEE 802.15.4) забезпечує дальність зв'язку до 10–100 м в приміщеннях та до 300 м на відкритій місцевості. Протокол Zigbee також підтримує сотові мережі (mesh network), що дозволяє збільшувати ефективний радіус зв'язку за рахунок передачі сигналу через вузли.

4) Протокол ANT+ забезпечує дальність до 30 м в прямій видимості. Протокол ANT+ орієнтований на низьке енергоспоживання і короткий радіус дії, що робить його ідеальним для носимих пристроїв і спортивних датчиків. Він працює на частоті 2,4 ГГц, подібно до Bluetooth, але оптимізований для роботи з кількома пристроями одночасно.

5) Протокол IEEE 802.15.4 (без Thread або Zigbee) забезпечує дальність до 300 м у відкритому просторі і до 50–100 м в приміщеннях. Протокол орієнтований на низьке енергоспоживання та високу надійність зв'язку для сенсорних мереж і пристроїв збору даних.

HOLYIOT-18010-nRF52840 забезпечує широкий діапазон дальності залежно від вибраного протоколу зв'язку. Для додатків із низьким енергоспоживанням і великою дальністю найкраще підходять BLE 5.0 (до 400 м) та Thread/Zigbee (до 300

м). Протоколи ANT+ оптимізовані для роботи на коротких відстанях до 30 м. Така гнучкість дозволяє модулю адаптуватися до різних завдань при побудові сенсорних мереж і пристроїв збору даних.

3.2. Побудова структури комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

Структурна схема комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності наведена рис.3.1.

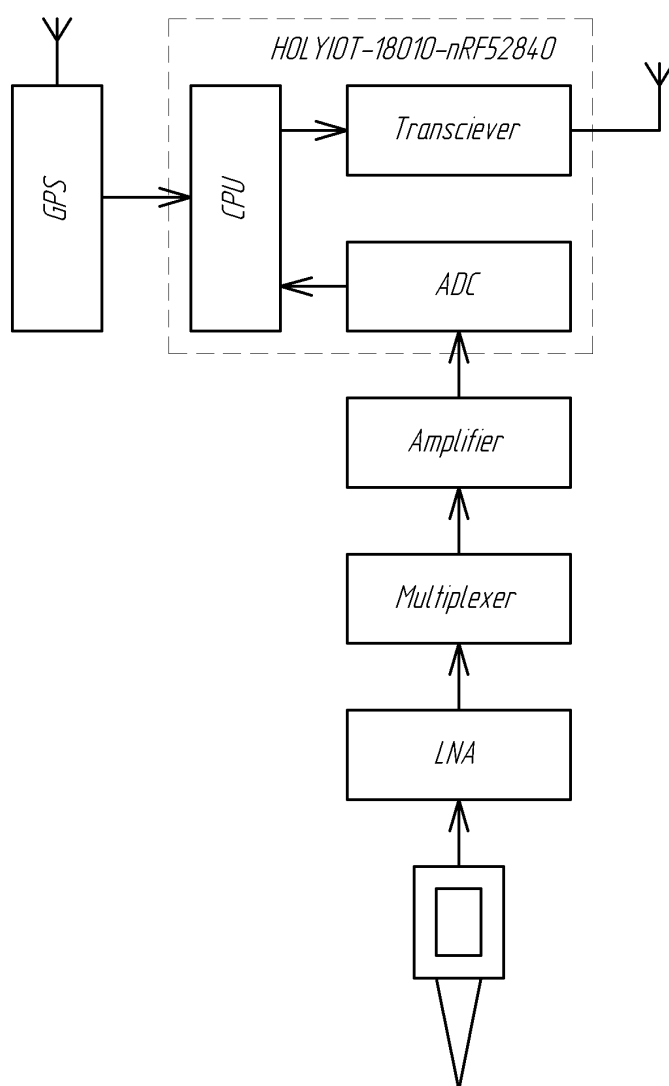


Рис.3.1. Структурна схема комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

Основою комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності є геофон GD-4,5 який є датчиком сейсмічних сигналів, тобто перетворює сейсмічні хвилі в електричні сигнали. Ці сигнали подаються на підсилювач із малим рівнем власних шумів (LNA), рівень підсилення в LNA може комутуватись мультиплексором, після чого сигнал подається на наступну ланку підсилення для отримання такого рівня сигналу, який забезпечить нормальну роботу аналого цифрового підсилювача (ADC). ADC має вибиратись таким, щоб забезпечував, в першу чергу, достатню точність перетворення сигналу, оскільки частотний діапазон сейсмічних сигналів не є а ні широким, а ні високочастотним. Тому доцільно вибрати 16 розрядний ADC.

Для коректної роботи сейсмічного поля необхідно щоб кожен датчик мав чітке місце знаходження, що можна забезпечити за допомогою модуля GPS, який вказує свої географічні координати та всесвітній час, що необхідно для синхронної роботи мережі датчиків.

Радіомодуль HOLYIOT-18010-nRF містить процесор Cortex-M4, який виконує цифрову низькочастотну фільтрацію вхідних сигналів і отримує дані від GPS модуля, формує пакети у форматі час+координата+сигнал і через радіоканал у протоколі ZigBee передає на мережевий роутер що транслює дані далі, по протоколу TCP/IP.

3.3. Побудова електричної схеми комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

На основі структурної схеми комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності, будуємо електричну принципову схему системи.

Електрична схема LNA та ланки підсилювача наведена на рис.3.2 і вона виконує попереднє і основне підсилення сигналу від геофон GD-4,5.

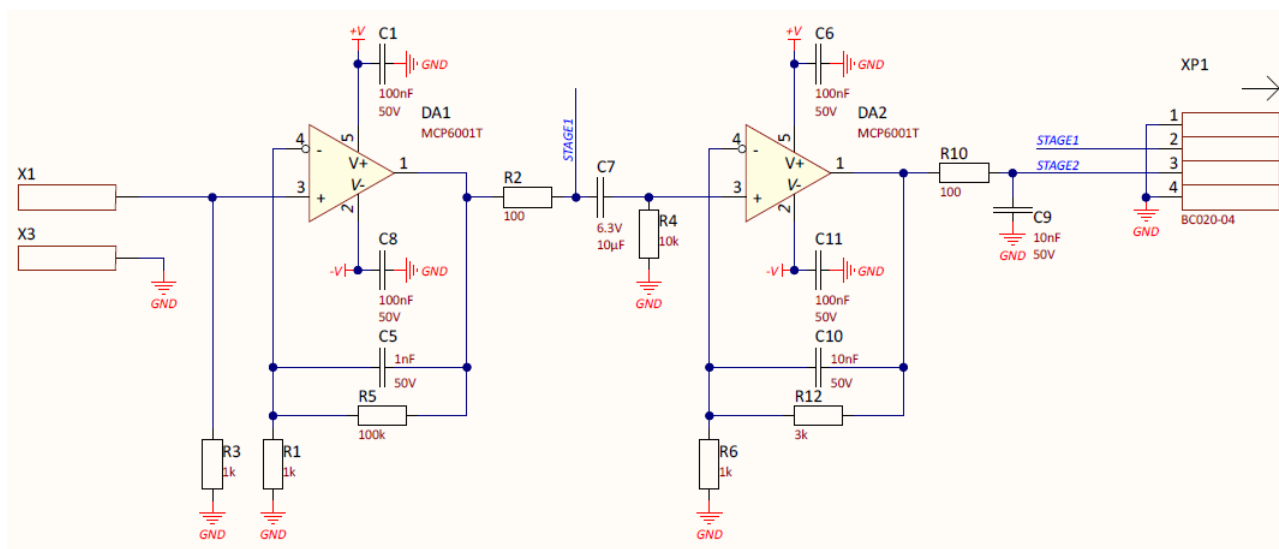


Рис.3.2. Електрична схема LNA та ланки підсилювача

Для практичного випробування розроблено електричний модуль LNA див. рис.3.3. Його форма і розміри продиктовані тим що весь датчик і більша частина корпусу буде занурюватись в землю.

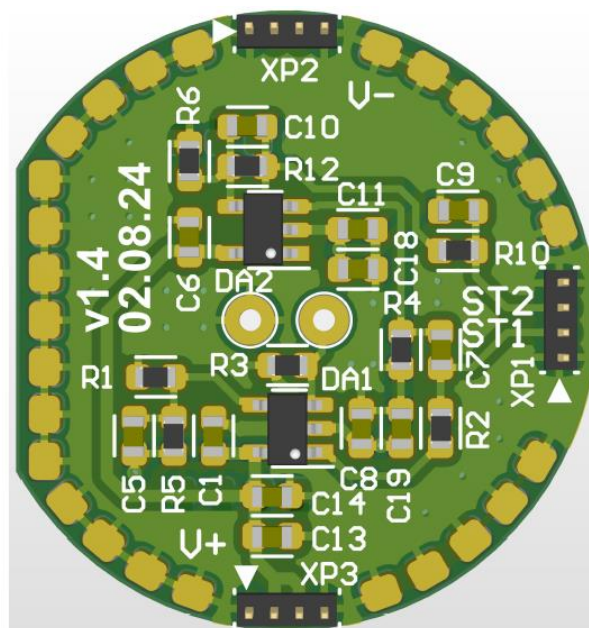


Рис.3.3. Друкований вузол LNA та ланки підсилювача

Для оцифрування сейсмічних сигналів використано 16 розрядний сігма-дельта АЦП (ADC) ADS1114BQ, результати оцифрування він передає на процесор по шині I2C. Електрична схема ADC наведена на рис.3.4.

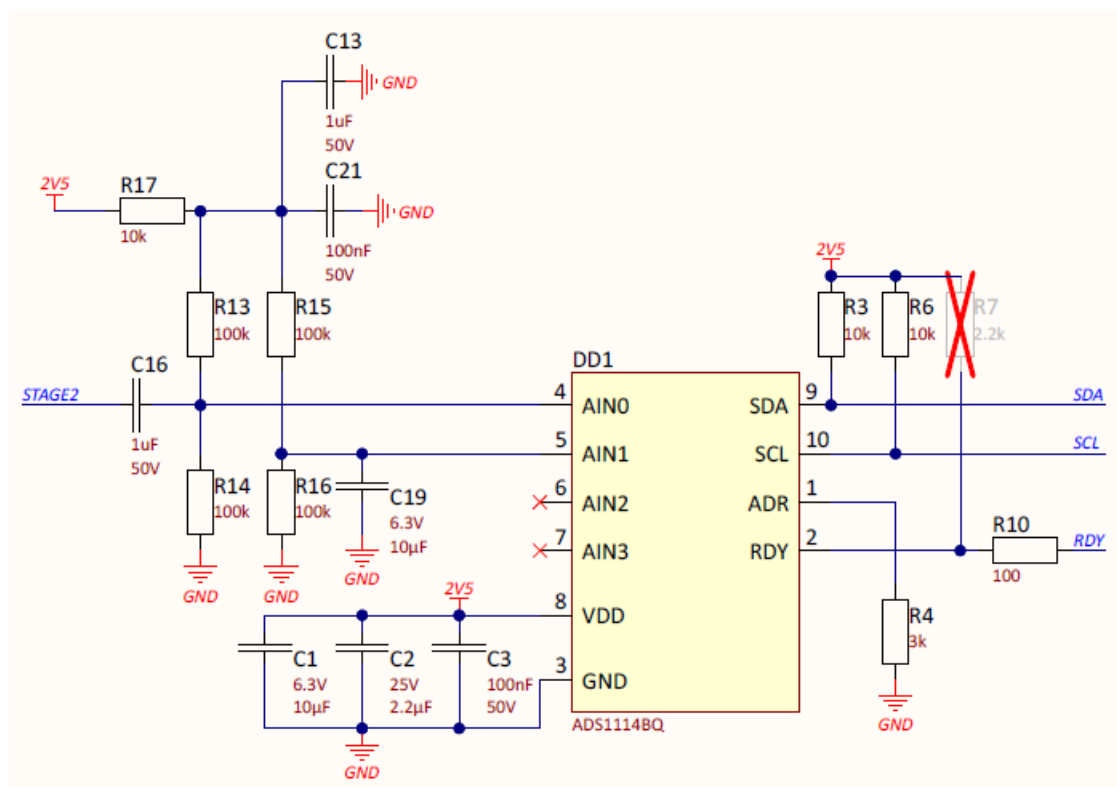


Рис.3.4. Електрична схема ADC

Радіомодуль HOLYIOT-18010-nRF схема підключення якого наведена на рис.3.5 містить кола живлення та приймає дані від ADC по шині I2C та від модуля GPS по шині UART.

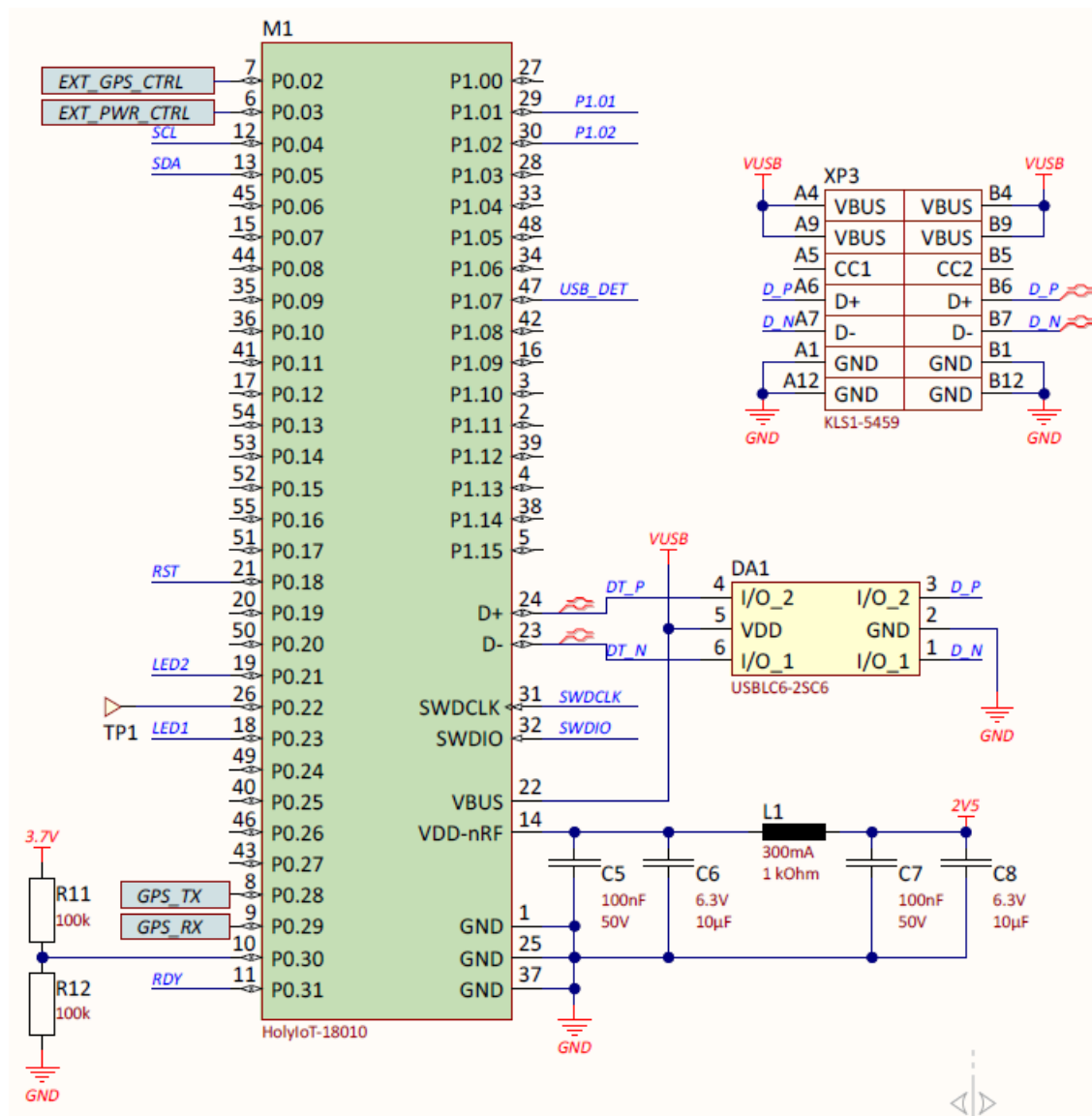


Рис.3.5. Електрична схема радіомодуля HOLYIOT-18010-nRF

Електрична схема модуля GPS наведена на рис.3.6. модуль повинен розміщатись у верхній частині комп'ютерної системи, оскільки він містить антену для прийому сигналів із супутників.

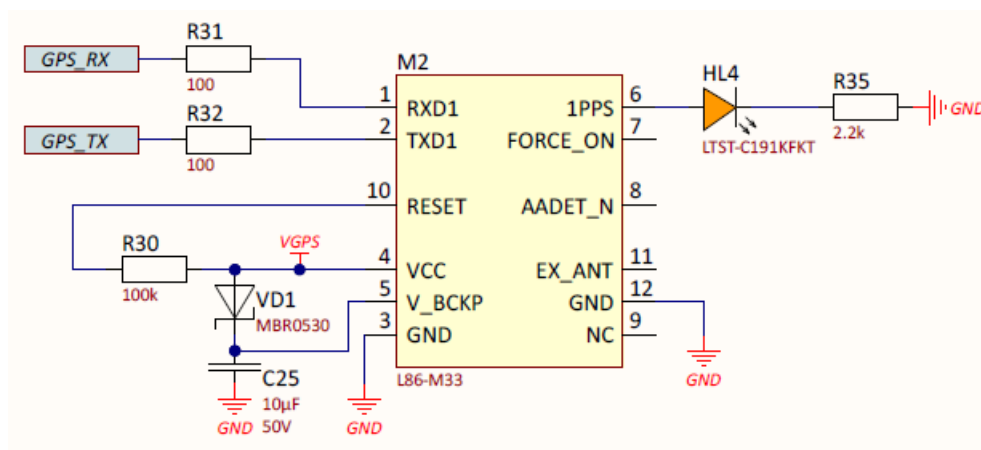


Рис.3.6. Електрична схема модуля GPS

Всі ці елементи — модуль GPS, радіомодуль HOLYIOT-18010-nRF та ADC розміщені на одній платі і встановлюються у верхній частині системи, щоб мати можливість приймати і передавати радіосигнали.

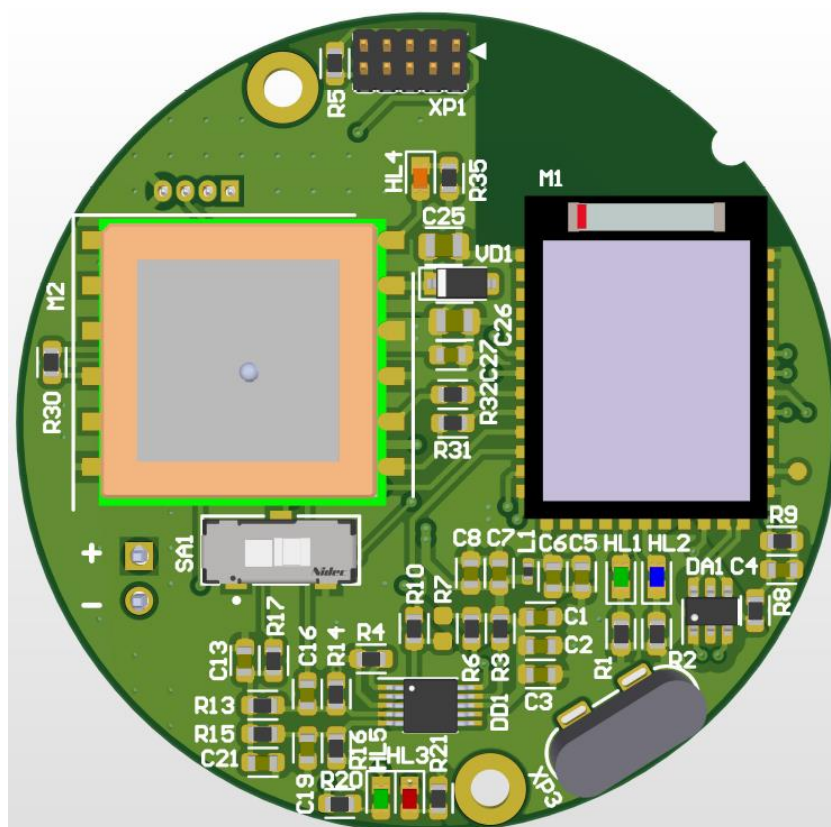


Рис.3.7. Друкований вузол модуля GPS, радіомодуля HOLYIOT-18010-nRF та ADC

Також друкований вузол модуля GPS, радіомодуля HOLYIOT-18010-nRF та ADC має службові роз'єми для від лагодження і зміни прошивки комп'ютерної системи.

3.4. Побудова алгоритму роботи комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

Блок схема алгоритму роботи комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності наведена на рис. 3.8.

Після увімкнення живлення система виконує ініціалізацію портів для обміну даними між аналого-цифровим перетворювачем ADC, модулем GPS та радіомодулем HOLYIOT-18010-nRF. Наступний крок алгоритму це отримання даних від модуля GPS по шині UART із наступним виділенням з цих даних часових параметрів і координати.

Після настає робота по отриманню і опрацюванню сейсмічних сигналів, тобто опитування шини I2C із наступною їх фільтрацією цифровим НЧ фільтром. Фільтрація підтримується вбудованим DSP модулем ядра процесора Cortex-M4, що дає мінімальне навантаження і затримки при опрацюванні сигналів.

Отримані дані від GPS модуля та сейсмічні сигнали після фільтрації формуються у пакети за шаблоном час+координата+сейсмічний сигнал, тобто готуються до відправлення по радіоканалу. Цей пакет піддається шифруванню за алгоритмом AES-128 для захисту від несанкціонованого доступу до них.

Після чого виконується ініціалізація наперед налаштованого протоколу передачі даних по радіоканалу ZigBee. Відправлення даних по протоколу ZigBee передбачає високу надійність передачі даних при значній (до 300м) дальності зв'язку і формування mesh мережі.

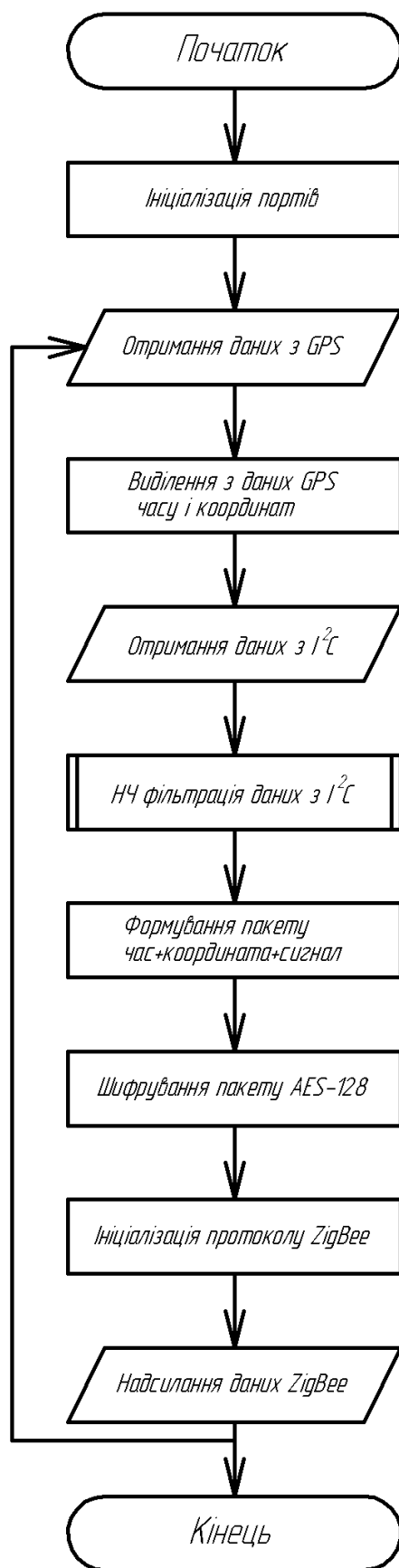


Рис.3.8. Блок схема алгоритму роботи комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

Комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності працює неперервно від моменту включення живлення до моменту його виключення.

3.5. Побудова програми роботи комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

Програма розпочинається з підключення бібліотек необхідних для виконання програми і передбачених для радіомодуля HOLYIOT-18010-nRF

```
#include <zephyr.h>
#include <device.h>
#include <drivers/uart.h>
#include <drivers/i2c.h>
#include <zigbee/zigbee_app_utils.h>
#include <zigbee/zigbee_helpers.h>
#include <zigbee/zboss_api.h>
#include <crypto/cipher.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <sys/time.h>
```

Рис.3.9. Лістинг програми підключення бібліотек

Для зручності програмування і читання коду означаємо наступні макроси. Команда `#define` є м інструментом для визначення констант, макросів і умовних інструкцій під час препроцесорної обробки. Її основне застосування — зробити код більш читабельним, гнучким і легким для модифікацій.

```
#define I2C_DEV_LABEL "I2C_1" // Мітка пристрою I2C
#define UART_DEV_LABEL "UART_0" // Мітка пристрою UART
#define ZIGBEE_ENDPOINT 10 // Точка кінцевого призначення Zigbee
#define AES_KEY_SIZE 16 // Розмір ключа AES (128 біт)
```

Рис.3.10. Лістинг програми означення макросів

Задаємо ключ шифрування, буфери для роботи портів та обчислених даних.

```

/* AES 128-bit encryption key */
static const uint8_t aes_key[AES_KEY_SIZE] = {0x00, 0x01, 0x02,
0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08, 0x09, 0x0A, 0x0B, 0x0C, 0x0D,
0x0E, 0x0F}; // Ключ шифрування

/* Buffers */
uint8_t i2c_data[64]; // Буфер для даних з I2C
uint8_t uart_data[64]; // Буфер для даних з UART
uint8_t filtered_data[64]; // Буфер для відфільтрованих даних
uint8_t encrypted_data[128]; // Буфер для зашифрованих даних

/* I2C and UART devices */
static const struct device *i2c_dev; // Пристрій I2C
static const struct device *uart_dev; // Пристрій UART

```

Рис.3.11. Лістинг програми означення ключа шифрування, буферів для роботи портів та обчислених даних

Налаштування параметрів низькочастотного фільтра, його коефіцієнта згладжування і форми.

```

// Низькочастотний фільтр для згладжування вхідних даних
void low_pass_filter(uint8_t *input, uint8_t *output, size_t
length) {
    static float prev_output[64] = {0}; // Зберігання попередніх
значень
    float alpha = 0.1; // Параметр згладжування
    for (size_t i = 0; i < length; i++) {
        prev_output[i] = alpha * input[i] + (1 - alpha) *
prev_output[i]; // Формула фільтра
        output[i] = (uint8_t)prev_output[i]; // Збереження
результату в вихідному буфері
    }
}

```

Рис.3.12. Лістинг програми для низькочастотного фільтра

Задаємо основні параметри для шифрування AES-128, буфери та їх розміри для проміжних розрахунків.

```

/* AES context */
static struct cipher_ctx ctx; // Контекст шифрування AES

// Ініціалізація AES контексту для ШИФРУВАННЯ
void init_aes_context() {
    struct cipher_pkt encrypt_pkt;
    struct cipher_ctx ctx;

    ctx.keylen = AES_KEY_SIZE; // Встановлення довжини ключа
    ctx.key.bit_stream = (uint8_t *)aes_key; // Призначення ключа
шифрування
    ctx.flags = CAP_RAW_KEY; // Встановлення флагів шифрування

    encrypt_pkt.in_buf = i2c_data; // Вхідний буфер даних
    encrypt_pkt.in_len = sizeof(i2c_data); // Довжина вхідного
буфера
    encrypt_pkt.out_buf = encrypted_data; // Вихідний буфер для
шифрування
    encrypt_pkt.out_buf_max = sizeof(encrypted_data); //
Максимальний розмір вихідного буфера
}

// Шифрування вхідних даних з використанням AES
void encrypt_data(uint8_t *input, size_t input_len, uint8_t
*output) {
    struct cipher_pkt encrypt_pkt = {
        .in_buf = input, // Вхідний буфер
        .in_len = input_len, // Довжина вхідних даних
        .out_buf = output, // Вихідний буфер
        .out_buf_max = sizeof(encrypted_data), // Максимальний
розмір вихідних даних
    };

    cipher_block_op(&ctx, true, &encrypt_pkt); // Застосування
блочного шифрування
}

```

Рис.3.13. Лістинг програми шифрування AES-128, буфери та їх розміри для проміжних розрахунків.

Зчитування даних з портів I2C та UART

```

// Читання даних з I2C та застосування фільтра
void i2c_read_data() {
    i2c_burst_read(i2c_dev, 0x50, 0x00, i2c_data,
sizeof(i2c_data)); // Читання даних з пристрою I2C
    low_pass_filter(i2c_data, filtered_data, sizeof(i2c_data)); //
Застосування фільтра до даних
}

// Читання даних з UART
void uart_read_data() {
    uart_poll_in(uart_dev, uart_data); // Читання символів з UART
}

```

Рис.3.14. Лістинг програми читання даних з портів I2C та UART

Формування пакетів для передачі по каналу зв'язку за шаблоном
 час+координата+сейсмічний сигнал

```
// Формування пакету з GPS, часом і сигналом I2C
void prepare_packet(uint8_t *output, size_t *length) {
    struct timeval time_now;
    gettimeofday(&time_now, NULL); // Отримання поточного часу
    uint32_t timestamp = time_now.tv_sec; // Конвертація в секунди

    snprintf((char *)output, 128, "GPS: %s, Time: %u, Signal:
    %02X%02X",
             uart_data, timestamp, filtered_data[0],
    filtered_data[1]); // Формування пакету
    *length = strlen((char *)output); // Встановлення довжини
    пакету
}
```

Рис.3.15. Лістинг програми формування пакетів

Передача даних по радіоканалу за протоколом ZigBee

```
// Передача даних через Zigbee
void zigbee_send_data(uint8_t *data, size_t length) {
    zb_uint8_t buf_id = zb_buf_get_out(); // Отримання буфера
    Zigbee
    zb_uint8_t *ptr = zb_buf_begin(buf_id); // Вказівник на
    початок буфера

    memcpy(ptr, data, length); // Копіювання даних в буфер
    zb_buf_set_len(buf_id, length); // Встановлення довжини буфера

    zb_af_data_request(ZIGBEE_ENDPOINT, ZIGBEE_ENDPOINT,
    ZB_APS_ADDR_MODE_16_ENDP_PRESENT, ptr); // Відправка пакета через
    Zigbee
}
```

Рис.3.16. Лістинг програми передачі даних

Ініціалізація портів, пристроїв та функцій шифрування і передачі даних

```

void main(void) {
    /* Initialize I2C */
    i2c_dev = device_get_binding(I2C_DEV_LABEL); // Підключення
I2C пристрою
    if (!i2c_dev) {
        printk("Failed to initialize I2C\n"); // Перевірка на
помилку
        return;
    }

    /* Initialize UART */
    uart_dev = device_get_binding(UART_DEV_LABEL); // Підключення
UART пристрою
    if (!uart_dev) {
        printk("Failed to initialize UART\n"); // Перевірка на
помилку
        return;
    }

    /* Initialize Zigbee */
    zb_enable_auto_pan_id(); // Автоматична настройка PAN ID
    zb_set_network_router_role(IEEE_CHANNEL_MASK); // Встановлення
ролі маршрутизатора
    zb_start(); // Запуск Zigbee

    /* Initialize AES context */
    init_aes_context(); // Ініціалізація шифрування AES

    while (1) {
        /* Read data from I2C */
        i2c_read_data(); // Читання даних з I2C

        /* Read GPS data from UART */
        uart_read_data(); // Читання GPS з UART

        /* Prepare packet */
        uint8_t packet[128];
        size_t packet_length;
        prepare_packet(packet, &packet_length); // Формування
пакету

        /* Encrypt the data */
        encrypt_data(packet, packet_length, encrypted_data); //
Шифрування даних

        /* Transmit encrypted data via Zigbee */
        zigbee_send_data(encrypted_data, packet_length); //
Відправка через Zigbee

        k_sleep(K_SECONDS(1)); // Затримка між циклами
    }
}

```

Рис.3.17. Лістинг програми ініціалізації портів і передачі даних

Розроблена програма використовує модуль HOLYIOT-18010-nRF52840 для створення безпроводного пристрою, що підтримує зчитування сейсмічних даних, їх фільтрацію, шифрування і передачу даних через Zigbee. Вона забезпечує захист інформації, високу енергоефективність і гнучкість у застосуванні для моніторингу середовища.

3.6. Тестування комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності

Перевірка працездатності комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності, оцінка точності збору та обробки даних, ефективності алгоритмів аналізу сигналів і стійкості до зовнішніх факторів. Тестування проводиться для виявлення можливих дефектів, покращення продуктивності та оптимізації роботи системи в реальних умовах експлуатації.

Перевірка працездатності розпочинається з функціональних тестів, окрема з тестування роботи сенсорів (геофонів) на чутливість і точність вимірювань, також виконується перевірка прийому та обробки даних у режимі реального часу, та імітація сейсмічних подій для тестування реакції системи на різні рівні інтенсивності хвиль.

Вже наступним етапом є тестування програмного забезпечення, що розпочинається з перевірки роботи алгоритмів фільтрації та обробки сигналів. З наступною оцінкою точності визначення місця виникнення сейсмічної події та тестуванням інтерфейсу користувача для відображення даних і результатів аналізу.

На першому етапі після виготовлення дослідного зразка комп'ютерної системи було проведено перевірку роботи геофонів з імітацією сейсмічної події — удару 10 кілограмового молота об бетонну плиту. Отриманий сигнал наведено на рис.3.18.

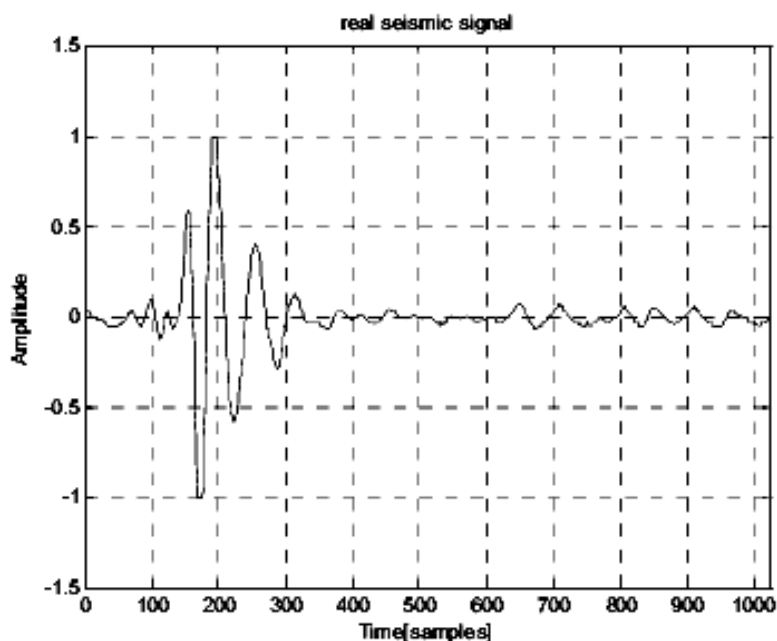


Рис.3.18. Отриманий запис імітації сейсмічної події

Випробування з імітацією сейсмічної події показали працездатність розробленої системи. Отриманий сигнал передавався в ZigBee мережі із мінімальними затримками, для більш детальних випробувань необхідно побудувати мережу датчиків розміром 4*4 елементи, тобто із 16 датчиків.

3.7. Висновки до розділу 3.

Радіомодуль HOLYIOT-18010-nRF52840 забезпечує широкий діапазон дальності залежно від вибраного протоколу зв'язку. Для пристроїв із низьким енергоспоживанням і великою дальністю найкраще підходять BLE 5.0 (до 400 м) та Thread/Zigbee (до 300 м). Крім того цей радіо модуль побудований на базі мікроконтролера з ядром Cortex-M4, який має вбудований блок цифрового опрацювання і фільтрації сигналів.

Радіомодуль HOLYIOT-18010-nRF містить процесор Cortex-M4, який виконує цифрову низькочастотну фільтрацію вхідних сигналів і отримує дані від GPS модуля, формує пакети у форматі час+координата+сигнал і через радіоканал у

протоколі ZigBee передає на мережевий роутер що транслює дані далі, по протоколу TCP/IP.

Розроблена програма використовує модуль HOLYIOT-18010-nRF52840 для створення безпроводного пристрою, що підтримує зчитування сейсмічних даних, їх фільтрацію, шифрування і передачу даних через Zigbee. Вона забезпечує захист інформації, високу енергоефективність і гнучкість у застосуванні для моніторингу середовища.

Випробування з імітацією сейсмічної події показали працездатність розробленої системи. Отриманий сигнал передавався в ZigBee мережі із мінімальними затримками, для більш детальних випробувань необхідно побудувати мережу датчиків розміром 4*4 елементи, тобто із 16 датчиків.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Кваліфікаційна робота магістра пов'язана із дослідженням методів та засобів побудови комп'ютерної системи для моніторингу сейсмічної активності земної кори, причому побудова системи та аналіз її роботи виконується на ПК, тому важливо дотримуватись вимог охорони праці при експлуатації ПК.

При розробці інструкції з охорони праці необхідно виконувати санітарні правила і норми ДСанПІН 3.3.2.007-98 “Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин”.

Заходи з безпеки працівників мають відповідати вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 “Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями”.

Директива Ради Європейських Співтовариств 89/391/ЕЕС «Про впровадження заходів, що сприяють поліпшенню безпеки й гігієни праці працівників»

Для приладів, які працюють у складі складних вимірювальних комплексів, функціональних кабінетів, обчислювальних центрів, обладнаних різноманітною електронною технікою.

Розроблювана комп'ютерна система повинна бути безпечною при всіх передбачених функціональними можливостями і вказаних у правилах користування умовах її експлуатації. Захист досягається дотриманням таких основних вимог:

- 1) правильною конструкцією апарата, яка гарантує безумовну безпеку;
- 2) використанням спеціальних засобів зовнішнього захисту, які забезпечують умовну безпеку;
- 3) вказівкою умов, за яких робота з обладнанням є безпечною (описова безпека).

За способом захисту персоналу і пацієнта від електроудару і електротравми все устаткування, яке використовує зовнішнє живлення, ділиться на п'ять класів

(окремо виділяється устаткування з внутрішніми джерелами живлення, наприклад, батареями).

Роботодавець повинен створити для кожного працівника безпечні і нешкідливі умови праці шляхом належного облаштування робочих місць відповідно до Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом Міністерства надзвичайних ситуацій України від 25 січня 2012 року № 67, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 14 лютого 2012 року за № 226/20539 (НПАОП 0.00-7.11-12).

Параметри мікроклімату в межах робочої зони повинні відповідати вимогам Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. Рівень шуму на робочих місцях повинен відповідати нормам, встановленим Санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99.

Загальні вимоги безпеки до захисту від шуму на робочих місцях, шумові характеристики машин та механізмів повинні відповідати вимогам. А роботодавець повинен здійснювати контроль рівня шуму відповідно до вимог ДСТУ 2867-94 «Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги».

Рівень вібрації на робочих місцях не повинен перевищувати норм, встановлених Державними санітарними нормами виробничої загальної та локальної вібрації ДСН 3.3.6.039-99.

Параметри електромагнітних полів на робочих місцях повинні відповідати вимогам Державних санітарних норм і правил при роботі з джерелами електромагнітних полів, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 18 грудня 2002 року № 476, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 13 березня 2003 року за № 203/7524 (ДСН 3.3.6.096-2002).

У робочій зоні виробничих приміщень вміст шкідливих речовин не повинен перевищувати граничнодопустимих концентрацій, встановлених ГОСТ 12.1.005-88 Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони.

Забороняється захаращувати робочі місця готовою продукцією, матеріалами, деталями і предметами, які не використовуються у процесі виробництва.

Площа робочої поверхні столу повинна забезпечувати зручне розміщення технологічного устаткування, приладів та інструментів з урахуванням зони досяжності працівника в горизонтальній і вертикальній площинах.

Контрольно-вимірювальні прилади повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 55011:2017 «Обладнання промислове, наукове та медичне. Характеристики радіочастотних завад. Норми та методи вимірювання».

Температура нагрітих поверхонь устаткування та огорожень не повинна перевищувати +43 °C згідно з вимогами ДСТУ EN 563-2001 «Безпечність машин. Температури поверхонь, доступних для дотику. Ергономічні дані для встановлення граничних значень температури гарячих поверхонь».

Не дозволяється виконання робіт з використанням легкозаймистих і горючих рідин у приміщеннях, які не обладнані припливно-витяжною вентиляцією.

Вимоги безпеки оточуючого середовища при експлуатації комп'ютера грають ключову роль у забезпеченні ефективності та безпеки робочого простору. Ось деякі основні вимоги які необхідно врахувати: вентиляція, температурний режим, контроль вологості, захист від статичної електрики, захист від води, стабільність живлення, безпека кабелів, електробезпека, освітлення, акустичний комфорт, система пожежогасіння.

Забезпечте ефективну систему вентиляції для уникнення перегріву комп'ютерної техніки. Займайтеся регулярним обслуговуванням та очищенням систем охолодження.

Утримуйте стабільний температурний режим в приміщенні, де знаходиться комп'ютерна техніка, для попередження перегріву чи надмірного охолодження.

Уникайте екстремально високого або низького рівня вологості, оскільки це може спричинити корозію та інші пошкодження електронних компонентів.

Встановіть антистатичні килими або мати для захисту комп'ютерної техніки від пошкоджень, спричинених статичним електричним розрядом.

Уникайте розливання напоїв чи інших рідин на комп'ютер та його аксесуари. Застосовуйте захисні кришки на клавіатурі та миші.

Забезпечте стабільність напруги та струму в електромережі, використовуйте стабілізатори напруги, якщо потрібно.

Організуйте кабелі таким чином, щоб уникнути їхнього плутання та розтягування. Зафіксуйте їх так, щоб вони не становили небезпеку для персоналу.

Використовуйте електротехнічне обладнання, яке відповідає стандартам електробезпеки. Заземлення та ізоляція є ключовими аспектами.

Встановіть вогнегасники або систему пожежогасіння в приміщенні, де розташований комп'ютерний обладнання.

Забезпечте оптимальний акустичний комфорт у робочому просторі, особливо якщо використовуються обладнання з великим рівнем шуму.

Забезпечте належне освітлення, щоб уникнути напруження очей під час роботи на комп'ютері.

Загальна мета вимог безпеки оточуючого середовища полягає в забезпеченні довговічності та ефективності роботи комп'ютера.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення стійкості роботи комп'ютерних систем до дії землетрусу вимагає інтегрованого підходу, що включає технічні, інфраструктурні та організаційні заходи. Метою є мінімізація ризику пошкодження обладнання, втрати даних та збоїв у роботі систем, а також забезпечення їх максимально швидкого відновлення.

Інфраструктурні заходи передбачають антисейсмічне проєктування приміщень. Тобто використання сейсмостійких будівель з конструкціями, здатними витримувати значні коливання та розташування серверних кімнат у центральних або підземних частинах будівель, де вібрація менша. А також встановлення сейсмічних демпферів у будівельних конструкціях для зменшення впливу поштовхів.

Крім того фізичне прикріплення обладнання, зокрема серверні шафи, стелажі та інше обладнання повинні бути жорстко закріплені до підлоги або стін, із

використанням антивібраційних платформ і кріплень, які зменшують передачу вібрацій до чутливого обладнання.

Додатково обладнання повинне бути розташоване в захищених корпусах, стійких до падіння та пошкоджень. А резервні сервери можуть бути розташовані у віддалених регіонах із низькою сейсмічною активністю.

Ще одним підходом до захисту даних при землетрусах є резервування та відновлення, шляхом виконання регулярного резервного копіювання даних у хмарні сховища або фізичні сховища в регіонах із низькою сейсмічністю. А також використання технології реплікації даних між дата-центрами для забезпечення актуальності резервних копій.

Також необхідно створювати резервні системи живлення починаючи від встановлення джерел безперебійного живлення (UPS) для захисту від раптових відключень електрики. І як більш дорогий варіант використання дизельних або газових генераторів для тривалого енергоживлення у разі збою в центральній мережі.

Для відновлення необхідно розробити план відновлення після аварій (Disaster Recovery Plan), яка містить процедури відновлення роботи систем після землетрусу. Та включення чітких інструкцій для персоналу, систем резервного зберігання, а також часових рамок відновлення.

Серед технічних заходів необхідно встановлювати сейсмічні датчики та системи моніторингу зокрема встановлення датчиків, які виявляють ранні фази землетрусу (наприклад, Р-хвилі), що дозволяє вчасно ініціювати аварійне вимкнення систем або їх переведення в безпечний режим. А також автоматизовані системи захисту, яке автоматично зупиняє критично важливі процеси або перемикає систему на резервне обладнання. І ще використання альтернативних каналів передачі даних (оптоволоконні кабелі в інших напрямках, супутникові канали) для зменшення ризику ізоляції.

Щоб всі ці заходи ефективно працювали необхідно провести навчання персоналу, шляхом проведення регулярних тренувань для співробітників із дій під час землетрусів. Виконання інструктажів щодо евакуації, запуску резервних систем

та аварійного відновлення. Періодичні перевірки сейсмостійкості будівель та технічного стану обладнання з оцінкою потенційних ризиків і розробка рекомендацій щодо їх мінімізації.

Стійкість комп'ютерних систем до дії землетрусу забезпечується завдяки інтеграції технічних рішень (резервування, антисейсмічне обладнання), організаційних заходів (плани відновлення, навчання персоналу) та інфраструктурних вдосконалень (антисейсмічні будівлі, резервні живлення). Комплексний підхід допоможе мінімізувати вплив стихійних лих на критичні ІТ-системи.

Захист працівників до дії землетрусу вимагає ретельної підготовки, організації робочого простору, навчання персоналу і створення чітких інструкцій для дій під час і після землетрусу. Важливим першим кроком є розробка плану реагування на надзвичайні ситуації, який повинен включати схеми евакуації, визначення зон безпеки в приміщенні та відкритих територіях, а також інструкції для різних сценаріїв. Цей план має враховувати специфіку будівлі, кількість працівників і можливі ризики. У рамках підготовки слід проводити регулярні навчання персоналу з правил поведінки під час землетрусу, включаючи тренування з евакуації, щоб працівники знали безпечні маршрути та місця збору. Навчання також має охоплювати основи надання першої допомоги, щоб працівники могли ефективно реагувати у разі травм.

На робочому місці необхідно забезпечити безпеку розташування обладнання. Меблі, техніка та інші важкі предмети повинні бути надійно закріплені, щоб уникнути їхнього падіння під час поштовхів. Важливо, щоб важкі предмети зберігалися на нижніх полицях, а небезпечні матеріали, такі як хімічні речовини або скло, були у спеціальних контейнерах. Евакуаційні маршрути мають бути вільними від перешкод, а двері аварійних виходів – легко доступними та чітко позначеними. Для забезпечення готовності до надзвичайних ситуацій у приміщеннях слід мати аварійні набори, які включають аптечки, ліхтарики, свистки, запаси води та портативні засоби зв'язку. У критично важливих об'єктах, таких як серверні

приміщення, необхідно встановити резервні джерела енергії, такі як генератори чи батареї, щоб забезпечити безперервну роботу систем.

Під час землетрусу працівникам важливо зберігати спокій і уникати паніки. Якщо вони перебувають у приміщенні, необхідно швидко перейти до зон безпеки, наприклад, під міцні столи, біля несучих стін або у кути кімнат, подалі від вікон, дзеркал, шаф та світильників, які можуть впасти. Рекомендується прикривати голову руками або використовувати предмети, які можуть слугувати захистом. Не слід використовувати ліфти, а переміщення сходами можливе тільки після припинення поштовхів. Якщо працівники перебувають на відкритому просторі, вони мають уникати близькості до будівель, дерев, ліній електропередачі або інших конструкцій, які можуть обвалитися, і перейти до відкритої ділянки.

Після завершення землетрусу необхідно оцінити ситуацію, перевірити стан здоров'я працівників і, за потреби, надати першу допомогу. Евакуація з приміщень повинна проводитися організовано, відповідно до заздалегідь визначених маршрутів. Якщо виявлено пошкодження будівлі, наприклад тріщини або витіки газу, слід негайно повідомити відповідні служби, такі як рятувальники або комунальні компанії. У жодному разі не можна використовувати відкритий вогонь до перевірки газових систем. Після евакуації працівники повинні залишатися у безпечному місці, уникаючи входу до будівлі до завершення її інспекції фахівцями.

У період після землетрусу необхідно також враховувати можливість повторних поштовхів (афтершоків), тому слід залишатися готовими до їхньої дії. У разі значних пошкоджень або стресових ситуацій варто організувати психологічну підтримку для працівників. Крім того, важливо провести аналіз ефективності дій під час землетрусу, визначити недоліки та оновити план реагування, щоб підвищити рівень готовності до майбутніх надзвичайних ситуацій.

Таким чином, захист працівників до дії землетрусу базується на комплексному підході, який включає підготовку робочого середовища, навчання персоналу, створення чітких планів і забезпечення необхідних ресурсів. Це дозволяє мінімізувати ризики, зберегти життя та здоров'я людей, а також забезпечити швидке відновлення роботи після стихійного лиха.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра розроблено методи та засоби побудови комп'ютерних систем для моніторингу сейсмічної активності земної кори. Побудовано комп'ютерну систему для моніторингу сейсмічної активності земної кори, яка побудована на основі геофону із визначенням його координат розташування за допомогою GPS модуля.

1. Наведені програмні комплекси аналізу сейсмічної активності земної кори SeisComP, Earthworm та ShakeAlert використовують розгалужену мережу комп'ютерних систем моніторингу на базі сейсмічних давачів із подальшим опрацюванням отриманих сигналів. Основними вимогами для побудови такої мережі є її роботи в реальному масштабі часу.

2. Вибір розміщення геофонів залежить від конкретних завдань. Лінійні схеми використовуються для профільних досліджень і вивчення шаруватих структур, решіткові – для побудови детальних 3D-моделей, кільцеві – для аналізу джерел сейсмічних хвиль, радіальні – для досліджень із симетричними поширеннями хвиль, а тривісні – для детальних вимірювань амплітуди та напрямку хвиль. Завдяки цим підходам можна ефективно досліджувати геологічні структури, оцінювати сейсмічні ризики та забезпечувати безпеку будівель та інфраструктури.

3. Розроблена програма використовує модуль HOLYIOT-18010-nRF52840 для створення безпроводного пристрою, що підтримує зчитування сейсмічних даних, їх фільтрацію, шифрування і передачу даних через Zigbee. Вона забезпечує захист інформації, високу енергоефективність і гнучкість у застосуванні для моніторингу середовища.

4. Випробування з імітацією сейсмічної події показали працездатність розробленої системи. Отриманий сигнал передавався в ZigBee мережі із мінімальними затримками, для більш детальних випробувань необхідно побудувати мережу датчиків розміром 4*4 елементи, тобто із 16 датчиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bruno, P.P.G. Seismic Exploration Methods for Structural Studies and for Active Fault Characterization: A Review. *Appl. Sci.* 2023, 13, 9473. <https://doi.org/10.3390/app13169473>
2. Sedat H (2024). Seismic Faults: Mechanisms, Impacts, and Monitoring Techniques. *J Geol Geophys.* 13:1185.
3. Жаровський Р.О., Щербак Л. М. Моделі геофізичних сигналів на основі лінійних випадкових процесів. *Вісник ТДТУ.* 2009. №1. С. 138–144.
4. Жаровський Р., Щербак Л. Задачі обробки геофізичних сигналів при дії завад дискретною кореляційною системою з вхідними ортогональними фільтрами. *Вісник ТДТУ.* 2010. Том 15. № 2. С. 172–181.
5. Жаровський Р.О. Кореляційні ортогональні системи у задачах оброблення геофізичних сигналів. *Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць.* Львів: РВВ НЛТУ України. 2010. № 20.7. С. 283–292.
6. Kozlovskiy V., Scherbak L., Martyniuk H., Zharovskyi R., Balanyuk Y., Boiko Y. Applying an adaptive method of the orthogonal laguerre filtration of noise interference to increase the signal/noise ratio. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. №2/9(104). Pp. 14-21.
7. Bruno, P.P.G. Seismic Exploration Methods for Structural Studies and for Active Fault Characterization: A Review. *Appl. Sci.* 2023, 13, 9473. <https://doi.org/10.3390/app13169473>
8. Ibrahim Alhukail, Saudi Aramco, Abdullatif Al-Shuhail. (2008). The correlation distance of incoherent seismic noise in geophone arrays. *Seg Technical Program Expanded Abstracts.* 27. 10.1190/1.3054857.
9. Makama, A.; Kuladinithi, K.; Timm-Giel, A. Wireless Geophone Networks for Land Seismic Data Acquisition: A Survey, Tutorial and Performance Evaluation. *Sensors* 2021, 21, 5171. <https://doi.org/10.3390/s21155171>

10.Hiroo, K. Earthquake Early Warning Systems. In Earthquake Early Warning Systems; Gasparini, P., Manfredi, G., Zschau, J., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2007; pp. 1–7.

11.Fleming, K.; Picozzi, M.; Milkereit, C.; Kühnlenz, F.; Lichtblau, B.; Fischer, J.; Zulfikar, C.; Özel, O.; The SAFER and EDIM working groups. The Self-organizing Seismic Early Warning Information Network (SOSEWIN). *Seismol. Res. Lett.* 2009, 80, 755–771.

12.Farquharson, C.; Lelievre, P.; Hurich, C. Joint Inversion of Seismic Traveltimes and Gravity Data on 3D Unstructured Grids for Mineral Exploration. In Proceedings of the American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 13–17 December 2010. NS43A-05.

13.Anandakrishnan, S.; Bilen, S.; Urbina, J.; Burkett, P. GeoPebbles: A Network of Wireless Seismic and GPS Nodes Designed for Polar Deployment. Presented at the 2013 SEG Annual Meeting, Houston, TX, USA, 22 September 2013; Society of Exploration Geophysicists: Tulsa, OK, USA, 2013; pp. 4547–4549

14.Ключко Д., Лецишин Ю., Жаровський Р. Методи і засоби моніторингу сейсмічної активності земної кори. Актуальні задачі сучасних технологій: Матеріали XIII міжнар. наук.техн. конф. мол. учених та студентів. Тернопіль, 2024. с. 446

15.Ключко Д., Лецишин Ю., Жаровський Р. Комп'ютерна система моніторингу сейсмічної активності земної кори. Інформаційні моделі, системи та технології: Матеріали XII наук.-техн. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2024. с. 132.

16.Voigt, D.E.; Peters, L.E.; Anandakrishnan, S. ‘Georods’: The development of a four-element geophone for improved seismic imaging of glaciers and ice sheets. *Ann. Glaciol.* 2013, 54, 142–148.

17.Kooper, S.; Elder, K. Wireless Data Acquisition System and Method Using Self-Initializing Wireless Modules. U.S. Patent 9,140,811, 22 September 2015.

18.Zhong, W.; Dong, E.; Cao, X.; Zhang, D.; Huang, Z.; Xu, J.; Li, G.; Xu, C. Research on the development of heterogeneous network transmission system for seismic exploration wireless data acquisition. In Proceedings of the 2017 International Conference

on Information Networking (ICOIN), Da Nang, Vietnam, 11–13 January 2017; pp. 532–536.

19.Savazzi, S.; Spagnolini, U.; Goratti, L.; Molteni, D.; Latva-aho, M.; Nicoli, M. Ultra-wide band sensor networks in oil and gas explorations. *IEEE Commun. Mag.* 2013, 51, 150–160.

20.Savazzi, S.; Spagnolini, U. Wireless geophone networks for high-density land acquisition: Technologies and future potential. *Lead. Edge* 2008, 27, 882–886.

21.Kirsch, R. (Ed.) *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009

22.Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. *CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024)*, Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

23. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ. 2024. 45 с.

24. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль. 2024. 44 с.

25. Варавін А.В., Лещишин Ю.З., Чайковський А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 32 с.

26.Leschyshyn Y., Scherbak L., Nazarevych O., Gotovych V., Tymkiv P., Shymchuk G. Multicomponent Model of the Heart Rate Variability Change-point // *IEEE*

XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2019. P. 110–113.

27. Tymkiv P., Leshchyshyn Y. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low-Intensity Electroretinosignal // IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. P.1-5.18. Геврик Є.О. Охорона праці. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

28. Стадник І.Я., Зварич Н.М. “Оцінка хімічної обстановки при аваріях на хімічно небезпечних об’єктах з викидом (виливом) небезпечних хімічних речовин та застосуванні хімічної зброї ” ТНТУ, 2020. 36С.

29. Leschyshyn Y., Semchyshyn O. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion // 9th International Conference - The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. 2007. P. 139–140.

Додаток А
Тези конференцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)
Університет імені П'єра і Марії Кюрі (Франція)
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Наукове товариство ім. Т.Шевченка

**АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ
СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Збірник
тез доповідей

**XIII Міжнародної науково-практичної
конференції молодих учених та студентів**
11-12 грудня 2024 року



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2024**

Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів
 «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року

28. В.З. Шеремета, Р.О. Жаровський	435
МЕТОДИ І ІНСТРУМЕНТИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВЕБ-ДОДАТКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ SPRING BOOT	
29. В.І. Кравчук; М.С. Хаюк; А.Г.Микитишин	436
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАВАД НА ПЕРЕДАВАННЯ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ	
30. В.О. Бонар	438
ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ OBD2 ДАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ МЕТОДОМ НАЙБЛИЖЧИХ СУСІДІВ	
31. В.Р. Кошулинський	440
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СЕНСОРНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ НА ОСНОВІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IoT)	
32. Галина Шевчук, Ростислав Трембач	442
ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»	
33. Гарасівка А. В., Лупенко А. М	444
ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЗЕРВНОГО КОПІЮВАННЯ ДАНИХ	
34. Д. Ключко, Ю. Лещинин, Р.Жаровський	446
МЕТОДИ І ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ЗЕМНОЇ КОРИ	
35. Д.С. Матюк, М.В. Деркач	448
КЛАСИФІКАЦІЯ ЕМГ-СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ADAM	
36. Д.О. Бугай, С.Є. Тужанський	450
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЛІМАТ-КОНТРОЛЮ	
37. Жаровський Р.О, Цірка І.П.	453
АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ЗБОРУ, ПЕРЕДАЧІ ТА ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ ВОДОСПОЖИВАННЯ У БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКАХ	
38. Зеньо Д	454
МАБУТНЄ КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ: ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ	
39. І.І. Бородій, К.І. Поліщук	456
ВИБІР ДЖЕРЕЛ ДАНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ	
40. І.М. Клишко	458
ОПТИМІЗАЦІЯ НАВЧАННЯ LSTM-МОДЕЛІ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕКСТУ НА РІВНІ СИМВОЛІВ	
41. І.О. Мартинюк	460
Електронні системи на основі штучного інтелекту	
42. І.Р. Ралік	462
ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ CRM-СИСТЕМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТОРГІВЛІ ПІДПРИЄМСТВА	
43. Л.П. Дмитроца, О.Т. Старицький	463
ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА SEO ПРИ МАСШТАБУВАННІ ПРОЄКТІВ НА ОСНОВІ REACT І NEXT.JS	
44. М. Є. Олійник; І. В. Мудрий; Н. С. Луцик, Ph.D	465
АНАЛІЗ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ БЕЗПЛОТНОЇ ДОСТАВКИ	

УДК 004.9:550.34

Д. Ключко, Ю. Лещишин, к.т.н., Р. Жаровський, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОДИ І ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ЗЕМНОЇ КОРИ

D. Klochko, Yu. Leshchysyn, Ph.D., R. Zharovskyi, Ph.D.

METHODS AND MEANS OF MONITORING SEISMIC ACTIVITY OF THE EARTH'S CRUST

Моніторинг сейсмічної активності земної кори є надзвичайно актуальним оскільки є джерелом інформації для прогнозування природних катастроф, для розробки систем раннього попередження про землетруси, для наукового вивчення процесів у земній корі, для підвищення безпеки інфраструктури тобто будівництва стійких до землетрусів будівель і споруд, а також допомагає оцінити ризики для існуючих конструкцій. Також, що важливо сейсмічна активність часто пов'язана з іншими природними явищами, такими як цунамі, зсуви, та вулканічні виверження. Загалом покращення механізмів моніторингу сприяє зменшенню економічних збитків від землетрусів, які можуть спричинити руйнування інфраструктури, збої у виробництві та переселенню населення.

Моніторинг сейсмічної активності земної кори здійснюється за допомогою різних методів і технологій. Ці методи поділяються на кілька груп залежно від підходу [1-2].

1. Сейсмометри є основними приладами для моніторингу. Вони реєструють коливання земної поверхні, викликані тектонічною активністю. Дані сейсмометрів дозволяють визначати параметри землетрусів та будувати сейсмічні карти небезпеки.

2. ГНСС -приймачі (глобальні навігаційні супутникові системи) використовуються для моніторингу зсувів земної кори з точністю до міліметрів відслідковуючи рухи тектонічних плит.

3. Радіолокаційна інтерферометрія (InSAR) базується на аналізі даних, отриманих із супутників. Її використовують для вимірювання вертикальних і горизонтальних зсувів земної поверхні.

4. Геофізичні спостереження за допомогою магнітометрів та гравіметрів, які реєструють зміни у магнітному полі Землі та гравітаційних аномаліях. Що можуть свідчити про зміни напруженості земної кори, тобто є передвісниками землетрусів.

5. Хімічний аналіз газів у ґрунті чи водах дозволяє виявляти аномалії, які можуть бути ознаками сейсмічної активності.

6. Акустичні спостереження за допомогою гідрофонів та акустичних сенсорів використовуються для виявлення низькочастотних звуків, які виникають через тектонічні рухи.

7. Сейсмічні мережі, що формують системи з великою кількістю сейсмічних станцій (локальні, регіональні, глобальні), які забезпечують постійний моніторинг в режимі реального часу.

8. Моніторинг за допомогою датчиків у свердловинах, що дозволяє збирати інформацію з глибоких шарів земної кори.

9. Використання штучного інтелекту для аналізу великих обсягів даних від сейсмометрів, супутників і інших сенсорів, щоб прогнозувати можливі землетруси.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ІВАНА ПУЛЮЯ
НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ім. ШЕВЧЕНКА**

МАТЕРІАЛИ

ХІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



18–19 грудня 2024 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2024**

Р. О. Жаровський, В. А. Іваницький ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИСТУ СТАЦІОНАРНОГО ОБ'ЄКТУ НЕРУХОМОСТІ НА ОСНОВІ GSM-СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА МІКРОКОНТРОЛЕРА RASPBERRY PI R. O. Zharovskyi, V. A. Ivanytskyi ORGANIZATION OF SAFETY OF A STATIONARY PROPERTY OBJECT BASED ON GSM-SIGNALIZATION AND RASPBERRY PI	129
Р. О. Жаровський, І. П. Цірка ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ ЗБОРУ, ПЕРЕДАЧІ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ ВОДОСПОЖИВАННЯ R. O. Zharovskyi, I. P. Tsirka DATA TRANSMISSION TECHNOLOGIES IN THE IMPLEMENTATION OF A NETWORK FOR COLLECTION, TRANSMISSION AND ANALYSIS OF WATER CONSUMPTION DATA	130
Р. О. Жаровський, І. В. Марценюк, А. М. Паламар СТРУКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІОТ-СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ В ШАХТАХ R. O. Zharovskyi, I. V. Martseniuk, A. M. Palamar STRUCTURE OF AN AUTOMATED IOT SYSTEM FOR MONITORING METHANE CONCENTRATION IN MINES	131
Д. Клочко, Ю. Лещишин, Р. Жаровський КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ЗЕМНОЇ КОРИ D. Klochko, Y. Leshchyshyn, R. Zharovskyi COMPUTER SYSTEM FOR MONITORING SEISMIC ACTIVITY OF THE EARTH'S CRUST	132
Д. М. Козак, Н. Б. Стадник ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНДАРТІВ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ WI-FI D. M. Kozak, N. B. Stadnyk RESEARCH OF WI-FI PHYSICAL LAYER STANDARDS	133
Д. М. Козак, Н. Б. Стадник МЕТОДИ МАНІПУЛЯЦІЇ СИГНАЛОМ У БЕЗДРОТОВОМУ ЗВ'ЯЗКУ D. M. Kozak, N. B. Stadnyk KEYING METHODS OF SIGNAL IN WIRELESS COMMUNICATION	134
М. В. Козачок, С. В. Марценко ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНКЛЮЗИВНОЇ ОСВІТИ M. V. Kozachok, S. V. Martsenko RESEARCH OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES FOR INCLUSIVE EDUCATION	135
О. В. Крайник ВИМОГИ ДО БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ O. V. Krainyk REQUIREMENTS FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS	136
О. В. Крайник ZIGBEE GREEN POWER O. V. Krainyk ZIGBEE GREEN POWER	137
І. О. Кухар ІНТЕГРАЦІЯ СОЛЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ У SMART GRID: СУЧАСНІ РІШЕННЯ ТА ГЛОБАЛЬНІ ТРЕНДИ I. O. Kukhar INTEGRATION OF SOLAR POWER PLANTS INTO SMART GRIDS: MODERN SOLUTIONS AND GLOBAL TRENDS	138

УДК 004.9:550.34

Д. Ключко; Ю. Лещинин, к.т.н.; Р. Жаровський, к.т.н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ЗЕМНОЇ КОРИ

UDC 004.9:550.34

D. Klochko; Y. Leshchynshyn, Ph.D.; R. Zharovskyi, Ph.D.

COMPUTER SYSTEM FOR MONITORING SEISMIC ACTIVITY OF THE EARTH'S CRUST

Моніторинг сейсмічної активності земної кори є надзвичайно актуальним оскільки є джерелом інформації для прогнозування природних катастроф, для розробки систем раннього попередження про землетруси, для наукового вивчення процесів у земній корі, для підвищення безпеки інфраструктури тобто будівництва стійких до землетрусів будівель і споруд, а також допомагає оцінити ризики для існуючих конструкцій. Також, що важливо сейсмічна активність часто пов'язана з іншими природними явищами, такими як цунамі, зсуви, та вулканічні виверження. Загалом покращення механізмів моніторингу сприяє зменшенню економічних збитків від землетрусів, які можуть спричинити руйнування інфраструктури, збої у виробництві та переселенню населення.

Оскільки землетруси трапляються раптово, тому комплексні системи моніторингу сейсмічної активності, повинні бути здатні надати попередження навіть за кілька секунд до події, що може зберегти життя та мінімізувати матеріальні збитки. Тому комп'ютеризовані системи моніторингу повинні забезпечувати отримання, передавання та автоматичну обробку сейсмічних сигналів у реальному часі. З наступним опрацюванням великих обсягів даних від сотень або тисяч сейсмічних станцій та використовувати алгоритми машинного навчання для прогнозування подій та ідентифікації аномалій. І як результатом роботи має бути миттєве оповіщення громадян через мобільні та інтернет-платформи.

Тому завданням комп'ютерної системи моніторингу сейсмічної активності земної кори, як частини комплексної системи, повинно бути відбір і передавання сейсмічних сигналів отриманих на значних відстанях і територіях у реальному масштабі часу із вказанням геолокації розміщення сенсора на сервери комплексної системи моніторингу. Також робота такої системи повинна забезпечувати тривалу автономну роботу без втручання людини на самодіагностику роботи.

Література

1. Жаровський Р.О., Щербак Л. М. Моделі геофізичних сигналів на основі лінійних випадкових процесів. Вісник ТДТУ. 2009. №1. С. 138–144.
2. Жаровський Р., Щербак Л. Задачі обробки геофізичних сигналів при дії завад дискретною кореляційною системою з входними ортогональними фільтрами. Вісник ТДТУ. 2010. Том 15. № 2. С. 172–181.
3. Жаровський Р.О. Кореляційні ортогональні системи у задачах оброблення геофізичних сигналів. Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. Львів: РВВ НЛТУ України. 2010. № 20.7. С. 283–292.
4. Kozlovskyi V., Scherbak L., Martyniuk H., Zharovskyi R., Balanyuk Y., Boiko Y. Applying an adaptive method of the orthogonal laguerre filtration of noise interference to increase the signal/noise ratio. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №2/9(104). Pp. 14–21.

Додаток Б

Скрипт програми

```
#include <zephyr.h>
#include <device.h>
#include <drivers/uart.h>
#include <drivers/i2c.h>
#include <zigbee/zigbee_app_utils.h>
#include <zigbee/zigbee_helpers.h>
#include <zigbee/zboss_api.h>
#include <crypto/cipher.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <sys/time.h>

#define I2C_DEV_LABEL "I2C_1"
#define UART_DEV_LABEL "UART_0"
#define ZIGBEE_ENDPOINT 10
#define AES_KEY_SIZE 16

/* AES 128-bit encryption key */
static const uint8_t aes_key[AES_KEY_SIZE] = {0x00, 0x01, 0x02,
        0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08, 0x09, 0x0A, 0x0B, 0x0C,
        0x0D, 0x0E, 0x0F};

/* Buffers */
uint8_t i2c_data[64];
uint8_t uart_data[64];
uint8_t filtered_data[64];
uint8_t encrypted_data[128];

/* I2C and UART devices */
static const struct device *i2c_dev;
static const struct device *uart_dev;

/* AES context */
static struct cipher_ctx ctx;
```

```

void init_aes_context() {
    struct cipher_pkt encrypt_pkt;
    struct cipher_ctx ctx;

    ctx.keylen = AES_KEY_SIZE;
    ctx.key.bit_stream = (uint8_t *)aes_key;
    ctx.flags = CAP_RAW_KEY;

    encrypt_pkt.in_buf = i2c_data;
    encrypt_pkt.in_len = sizeof(i2c_data);
    encrypt_pkt.out_buf = encrypted_data;
    encrypt_pkt.out_buf_max = sizeof(encrypted_data);
}

void encrypt_data(uint8_t *input, size_t input_len, uint8_t *output)
{
    struct cipher_pkt encrypt_pkt = {
        .in_buf = input,
        .in_len = input_len,
        .out_buf = output,
        .out_buf_max = sizeof(encrypted_data),
    };

    cipher_block_op(&ctx, true, &encrypt_pkt);
}

void low_pass_filter(uint8_t *input, uint8_t *output, size_t length)
{
    static float prev_output[64] = {0};
    float alpha = 0.1;
    for (size_t i = 0; i < length; i++) {
        prev_output[i] = alpha * input[i] + (1 - alpha) *
prev_output[i];
        output[i] = (uint8_t)prev_output[i];
    }
}

```

```

}

void i2c_read_data() {
    i2c_burst_read(i2c_dev, 0x50, 0x00, i2c_data, sizeof(i2c_data));
    low_pass_filter(i2c_data, filtered_data, sizeof(i2c_data));
}

void uart_read_data() {
    uart_poll_in(uart_dev, uart_data);
}

void zigbee_send_data(uint8_t *data, size_t length) {
    zb_uint8_t buf_id = zb_buf_get_out();
    zb_uint8_t *ptr = zb_buf_begin(buf_id);

    memcpy(ptr, data, length);
    zb_buf_set_len(buf_id, length);

    zb_af_data_request(ZIGBEE_ENDPOINT, ZIGBEE_ENDPOINT,
        ZB_APS_ADDR_MODE_16_ENDP_PRESENT, ptr);
}

void prepare_packet(uint8_t *output, size_t *length) {
    struct timeval time_now;
    gettimeofday(&time_now, NULL);
    uint32_t timestamp = time_now.tv_sec;

    snprintf((char *)output, 128, "GPS: %s, Time: %u, Signal:
    %02X%02X",
        uart_data, timestamp, filtered_data[0],
        filtered_data[1]);
    *length = strlen((char *)output);
}

void main(void) {
    /* Initialize I2C */

```

```

i2c_dev = device_get_binding(I2C_DEV_LABEL);
if (!i2c_dev) {
    printk("Failed to initialize I2C\n");
    return;
}

/* Initialize UART */
uart_dev = device_get_binding(UART_DEV_LABEL);
if (!uart_dev) {
    printk("Failed to initialize UART\n");
    return;
}

/* Initialize Zigbee */
zb_enable_auto_pan_id();
zb_set_network_router_role(IEEE_CHANNEL_MASK);
zb_start();

/* Initialize AES context */
init_aes_context();

while (1) {
    /* Read data from I2C */
    i2c_read_data();

    /* Read GPS data from UART */
    uart_read_data();

    /* Prepare packet */
    uint8_t packet[128];
    size_t packet_length;
    prepare_packet(packet, &packet_length);

    /* Encrypt the data */
    encrypt_data(packet, packet_length, encrypted_data);
}

```

```
/* Transmit encrypted data via Zigbee */  
zigbee_send_data(encrypted_data, packet_length);  
  
k_sleep(K_SECONDS(1));  
}  
}
```