

УДК 622.831.5.001.57

№ держреєстрації 0107U000382

Інв. №

**Міністерство освіти і науки України  
Національний гірничий університет  
(НГУ)**

49000, м. Дніпропетровськ, пр. К.Маркса, 19;  
тел./факс (0562) 47-32-09; телекс 143457 «AGAT SU»  
E-mail: HomenkoO@ntu.org.ua

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи,  
д-р техн. наук, проф.  
\_\_\_\_\_ О.С. Бешта

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 р.

**З В І Т**  
**ПО НАУКОВО-ДОСЛІДНІЙ РОБОТІ**  
**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ**  
**ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА В СИСТЕМІ ГЕОМОНІТОРИНГУ**

по темі ГП-405

(заключний)

Начальник НДЧ,  
канд. техн. наук, доц.

О.Є. Хоменко

Науковий керівник,  
зав. кафедрою БГМ,  
д-р техн. наук, проф.

О.М.Шашенко

2008

Рукопис завершена 14 грудня 2008 р.  
Результати роботи розглянуті Вченою Радою НГУ,  
протокол № 8 від 16.12.2008 р.

**СПИСОК АВТОРІВ**

|  |  |
|--|--|
| Науковий керівник,<br>д-р техн.наук, проф. | О.М.Шашенко<br>(розділ 4, передмова,<br>загальні висновки) |
| Пр. наук. спів.<br>д-р техн. наук, проф.   | О.О.Сдвижкова<br>(розділ 1, 4)                             |
| Пр. наук. спів.<br>канд. техн. наук,       | Є.В. Масленніков<br>(розділ 5, 6, 7)                       |
| Ст. наук. спів.<br>канд. техн. наук,       | Д.В. Бабець<br>(розділ 1, 2, 3)                            |
| Ст. наук. спів.<br>канд. техн. наук,       | С.М. Гапеев<br>(розділ 4)                                  |
| Ст. наук. спів.<br>канд.техн.наук          | Н.В. Хозяйкіна<br>(розділ 2, 3)                            |
| Наук. спів.                                | Ю.Д. Шмаков<br>(розділ 6, 7, 8)                            |
| Мол.наук.спів.                             | І.Ю. Старотігоров<br>(розділ 2,3)                          |
| Мол.наук.спів.                             | О.А. Шарапов<br>(розділ 4)                                 |
| Мол.наук.спів.                             | В.Є. Кириченко<br>(розділ 1)                               |
| Лаборант                                   | Є.В. Арєф'єв<br>(розділ 8)                                 |
| Лаборант                                   | І.В. Кондратюк<br>(розділ 5, 8)                            |
| Лаборант                                   | Л.Т. Беляєва<br>(оформлення)                               |
| Нормоконтроль                              | Л.О. Савостенко  |

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 192 с., 68 рис., 13 табл., 70 джерел, 6 додатків

Метою роботи є розробка математичних моделей для створення інформаційного середовища в системі геомоніторингу. Ідея роботи полягає в комплексному підході до розробки адаптивної моделі породного масиву зі структурними та силовими неоднорідностями, шляхом застосування сполучених методів аналізу складних геомеханічних систем.

Предмет роботи - методи аналізу структури та напружено-деформованого стану тріщинуватого неоднорідного породного середовища навколо гірничої виробки.

Розроблена імовірнісна модель міцності та деформування тріщинуватого породного середовища з урахуванням мінливості його фізичних властивостей і наявності регулярної тріщинуватості, для використання в геомеханічних розрахунках. Сполучення методу скінчених елементів і прийомів імітаційного моделювання дозволяє відбити в геомеханічних розрахунках неоднорідність породного масиву у вигляді мінливості фізико-механічних характеристик у різних точках середовища.

Розроблена модель формування інформаційного сигналу при акустичному зондуванні стану породного середовища та показано, що фрагменти вихідного сигналу, які відповідають різним технологічним процесам, мають різну інформативність для задач діагностики стану масиву і повинні оброблятися поетапно, різними методами для визначення потрібних інформаційних ознак.

В умовах шахти «Краснолиманська» виконані інструментальні спостереження з використанням апаратури акустичного контролю АК-1, за результатами яких підтвержена висока чутливість апаратури по прогностичному показнику  $K$  та ефективність методики прогнозу НДС породного масиву на основі спектральних методів аналізу акустичного сигналу.

Розроблений алгоритм програмного забезпечення щодо застосування прогностичного коефіцієнту  $K$  для системи моніторингу НДС породного масиву. Розроблена та обґрунтована структура програмного забезпечення, що виконує захват та ефективну обробку акустичного сигналу, відображення поточних його значень на екрані монітору ПК, включає систему архівації, збереження та отримання доступу до архіву інформації про НДС породного масиву на жорсткому диску ПК.

**СКЛАДНО-СТРУКТУРНЕ ПОРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, ЙМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ, ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ, СТАТИСТИЧНІ РОЗПОДІЛИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРІД, АКУСТИЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ, МЕТОДИ АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ**

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Вступ.....  | 7  |
| 1 Аналіз статистичної інформації про закони розподілу основних міцнісних і деформаційних характеристик вуглевміщуючих осадових порід. Мета, ідея, основні задачі та методи досліджень ..... | 11 |
| 1.1 Дослідження мінливості властивостей гірських порід та їх статистичних розподілів .....  | 11 |
| 1.1.1 Міцність гірських порід.....  | 13 |
| 1.1.2 Міцність при одноосьовому стиску .....  | 15 |
| 1.1.3 Межа міцності при розтяганні.....   | 23 |
| 1.1.4 Модуль пружності першого роду .....   | 26 |
| 1.1.5 Коефіцієнт Пуассона .....   | 29 |
| 1.2 Мета, ідея, основні задачі та методи досліджень.....  | 32 |
| 1.3 Висновки .....  | 34 |
| 2 Розробка способу обліку макродефектів породного середовища при визначенні моментів емпіричних розподілів основних міцнісних і деформаційних властивостей гірських порід .....             | 36 |
| 2.1 Вплив наявності макродефектів на характеристики вибірки .....   | 36 |
| 2.2 Вплив макродефектів на моменти розподілу.....   | 38 |
| 2.3 Висновки.....   | 43 |
| 3 Дослідження впливу тріщинуватості породного масиву на імовірнісний розподіл основних міцнісних і деформаційних характеристик гірських порід .....   | 44 |
| 3.1 Вплив наявності макродефектів на імовірнісний розподіл властивостей порід .....   | 44 |
| 3.2 Висновки .....  | 51 |
| 4 Розробка імовірнісної моделі структурно-неоднорідного породного масиву .....  | 52 |
| 4.1 Обґрунтування можливості моделювання статистичного розподілу властивостей гірських порід .....  | 52 |
| 4.2 Основні положення методу скінчених елементів .....  | 52 |
| 4.3. Моделювання статистичного розподілу властивостей. Метод інверсії .....   | 56 |
| 4.4 Дослідження впливу варіації вихідних даних на величину переміщень контуру вироблення на основі лінійної деформаційної моделі середовища .....   | 61 |
| 4.4.1 Дослідження впливу варіації модуля пружності на розподіл переміщень.....  | 63 |
| 4.4.2 Дослідження впливу варіації коефіцієнта Пуассона і модуля пружності на розподіл переміщень.....   | 66 |
| 4.5 Вплив форми вироблення на картину розподілу переміщень з обліком стохастичного розподілу властивостей.....  | 68 |
| 4.6 Висновки .....  | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| 5. Обґрунтування та вибір методу аналізу акустичної інформації на основі вейвлет-перетворення в системі оперативного сканування породного масиву .....  | 73  |
| 5.1 Основи системного підходу до аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву.....  | 73  |
| 5.2 Обґрунтування методу виділення структурних особливостей акустичного сигналу.....  | 80  |
| 5.3 Обґрунтування методу прогнозу раптових викидів вугілля і газу на основі аналізу акустичного сигналу при оперативному скануванні породного масиву .....  | 87  |
| 5.4 Висновки .....  | 101 |
| 6 Розширення можливості шахтних систем зв'язку з метою забезпечення високошвидкісної передачі даних для інформаційного забезпечення методів аналізу.....  | 103 |
| 6.1 Принципи перетворення акустичної інформації в системах геомоніторингу. ....   | 103 |
| 6.2. Вимоги, що пред'являються до апаратури акустичного контролю...   | 104 |
| 6.3. Висновки.....  | 115 |
| 7 Здійснення запису та аналізу акустичної інформації в шахтних умовах при перетині реальних зон зі структурними та силовими неоднорідностями .....  | 117 |
| 7.1 Установка апаратури на вибраних об'єктах досліджень.....  | 117 |
| 7.1.1 Вимоги до місця установки приймальних датчиків .....  | 118 |
| 7.1.2 Установка періодичності перенесення підземної частини вимірювальної апаратури .....   | 120 |
| 7.2 Методика проведення акустичних спостережень .....   | 121 |
| 7.2.1 Інструкція для співробітників служби сейсмопрогнозу шахти по веденню акустичних спостережень із застосуванням комплексу апаратури АК-1 .....  | 122 |
| 7.3 Порядок первинного накопичення і зберігання інформації .....  | 122 |
| 7.4 Обробка і аналіз інформації, зібраної в ході оперативного контролю стану вуглепородного масиву акустичним методом на прикладі шахти «Краснолиманська» ДП «Вугільна компанія «Краснолиманська» ..... | 123 |
| 7.5 Висновки .....  | 130 |
| 8 Створення програмного забезпечення для аналізу акустичної інформації в системі оперативного сканування породного масиву .....   | 132 |
| 8.1 Програмне забезпечення реєстрації прогностичного коефіцієнту для системи моніторингу напружно-деформованого стану породного масиву методами акустичного контролю .....                              | 132 |
| 8.2 Розробка структури програмного забезпечення для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву .....   | 134 |
| 8.2.1 Принципи розробки архітектури програмного забезпечення для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву .....                                      | 134 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.2.2 Укрупнений алгоритм програмної реалізації методу визначення прогностичної ознаки викиднебезпечності, реалізованого в апаратурі АК-1. .... | 136 |
| 8.2.3 Структурна схема ПЗ для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву .....                 | 138 |
| 8.2.4. Розробка класів, які забезпечують визначення пристроїв захоплення і задання налаштувань лінійного входу.....                             | 141 |
| 8.2.4.1. Розробка класу, який забезпечує визначення пристроїв захоплення.....   | 141 |
| 8.2.4.2 Розробка класу, що забезпечує установку настройок лінійного входу.....  | 142 |
| 8.2.4.3 Розробка класу, що забезпечує захоплення звукового сигналу із заданого пристрою захоплення.....   | 146 |
| 8.2.4.4 Розробка класу, що забезпечує отримання коефіцієнтів $K$ і АЧХ вхідного сигналу.....  | 149 |
| 8.2.4.5 Розробка класу, що забезпечує зберігання і доступ до інформації про стан породного масиву.....  | 152 |
| 8.2.4.6 Експериментальна перевірка ПО для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву.....      | 159 |
| 8.3 Висновки.....   | 164 |
| Загальні висновки .....   | 165 |
| Перелік посилань .....  | 168 |
| Додатки .....   | 175 |
| Додаток А Значення прогностического признака $K$ .....  | 176 |
| Додаток Б Витяг з протоколу № 5 засідання кафедри будівництва і геомеханіки.....  | 183 |
| Додаток В Витяг з протоколу засідання секції ради НГУ за науковим напрямом "Прогресивні технології видобутку і переробки корисних копалин"..... | 186 |
| Додаток Г Акт впровадження.....   | 189 |
| Додаток Д Рекомендації з обробки акустичного сигналу .....  | 190 |
| Додаток Е Рецензія на НДР.....  | 191 |

## ВСТУП

З підвищенням глибини розробки родовищ та з тривалою експлуатацією підземних об'єктів, надійна робота яких суттєво залежить від напружено-деформованого стану породного масиву, першочерговою є задача контролю геомеханічних процесів і попередження катастрофічних ситуацій, які виникають внаслідок природних факторів або техногенної діяльності людини. Рішення цієї проблеми можливе з використанням системи геомеханічного моніторингу, яка представляє собою автоматизовану інформаційно-вимірну систему безперервного контролю, діагностики та прогнозу напружено-деформованого стану породного масиву, що застосовується з метою підвищення рівня безпеки під час будівництва, експлуатації та закриття розміщених в його межах штучних об'єктів.

У ряді закордонних країн вже є позитивний досвід розробки й експлуатації подібних управляючих роботою підземного підприємства геомоніторингових систем (СГМ). Такі системи створюються на основі використання теоретичних і експериментальних результатів в області геомеханіки й аналізу гірничо-геологічних даних, новітніх досягнень в області експертних систем і організації виробництва з широким застосуванням сучасних ЕОМ та програмного забезпечення.

Першим етапом рішення цієї важливої науково-теоретичної проблеми є наукове обґрунтування відповідного методологічного, технологічного і системного наповнення, які відповідають складності управляючого об'єкта; обґрунтування стратегії впровадження і наступного розвитку системи, що забезпечить підвищення ступеня адекватності математичної моделі складно структурного породного масиву реальним умовам та надасть необхідну якість інформації.

Головними складовими елементами таких систем є глобальна математична модель, глобальна статистична матриця та система аналізу поточної інформації про реальний стан складноструктурного породного

середовища. Забезпечення сумісної роботи цих складових системи геомоніторингу для отримання багатосторонньої і взаємодоповнюючої інформації про стан геомеханічної системи для адекватного відображення реального об'єкту та її вдосконалення в процесі моніторингу є важливою науково-технічною задачею, що вирішується в роботі.

Метою роботи є розробка математичних моделей для створення інформаційного середовища в системі геомоніторингу.

Ідея роботи полягає в комплексному підході до розробки адаптивної моделі породного середовища зі структурними та силовими неоднорідностями, шляхом застосування сполучених методів аналізу складних геомеханічних систем.

Така адаптивна модель породного масиву лежить в основі системи геомоніторингу. Стратегія розробки СГМ повинна передбачати використання фактичних даних про об'єкт, враховувати його стохастичний характер і фактор невизначеності в пізнанні особливостей конкретної геомеханічної ситуації, будуватися на базі сучасних інформаційних технологій і передбачати можливість інтелектуальної еволюції системи та адаптивність до реальних умов у міру накопичення фактичних даних. Основний ефект у системі геомеханічного моніторингу досягається за рахунок застосування в режимі реального часу фундаментальних результатів та досягнень в області геомеханики і безупинного надходження різнобічної інформації про фізичні параметри об'єкта, що спостерігається.

Визначальною є концепція сполучення спостережень і аналізу одночасно кількох фізичних параметрів, які безпосередньо, або непрямо характеризують НДС породного масиву. Безперервне надходження інформації від розгалуженої мережі датчиків припускає наявність блоків її статистичної обробки, аналізу і прогнозу розвитку НДС породного масиву.



Система геомеханічного моніторингу складається з трьох базових блоків: глобальна математична модель, глобальна статистична матриця, система аналізу поточної інформації.

В основі глобальної математичної моделі застосовані методи чисельного аналізу, що дозволяють одержати об'ємну картину напружено-деформованого стану геомеханічної системи «об'єкт-породний масив» і оцінити рівень його небезпеки з погляду руйнування конструктивних елементів і порід. Ступінь адекватності математичної моделі реальному об'єкту залежить від кількості параметрів, які вона враховує, зокрема – параметри неоднорідності та тріщинуватості породного середовища.

В основі глобальної стохастичної моделі лежить багатомірний статистичний аналіз вихідних даних геологічної розвідки і ряду поточних даних, що надходять від різних джерел інформації, у тому числі акустичного сканування гірського масиву. Це повинно максимально наблизити математичну модель до реального об'єкта.

В основі третього напрямку досліджень використана ідея, заснована на факті взаємодії акустичних коливань, що поширюються в породному масиві з енергією, що утримується в ньому у вигляді механічних напружень. Використовуються гіпотези: по-перше, про однозначність кореляції структурних складових акустичного сигналу, що розповсюджується в породному масиві зі структурними та силовими неоднорідностями; по-друге, про взаємозв'язок коефіцієнтів вейвлет-розкладення акустичного сигналу з властивостями середовища, в якому він розповсюджується.

Робота виконується в рамках комплексної галузевої програми РН.Ц.001 “Удосконалення технічної бази паливно-енергетичного комплексу та підвищення ефективності використання енергоресурсів” та пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України № 4 “Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології” відповідно плану найважливіших держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України за програмою № 20

“Розробити і впровадити ресурсозберігаючі та екологічно чисті технології видобутку та переробки вугілля”.

Робота виконується згідно наказу по Міністерству освіти і науки України від “ 22 ” грудня 2006 р. № 960 та наказу по Національному гірничому університету від “ 27 ” грудня 2006 р. № 374 в термін з 02.01.2007 до 31.12.2008 р.

# 1 АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ОСНОВНИХ МІЦНІСНИХ І ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУГЛЕВМІЩУЮЧИХ ОСАДОВИХ ПОРІД

1.1 Дослідження мінливості властивостей гірських порід та їх статистичних розподілів

Для основних фізико-механічних характеристик породного середовища накопичений до дійсного моменту великий обсяг статистичної інформації [1-8], обробка якої дає можливість побудувати емпіричні закони розподілу для цих величин і висунути гіпотезу про можливий теоретичний розподіл імовірностей досліджуваної кількісної ознаки.

Підбор теоретичного розподілу повинний здійснюватися, насамперед, виходячи з фізичної суті випадкової величини. Наприклад, у відношенні фізичних характеристик часто висувається гіпотеза про нормальний закон розподілу. При цьому керуються центральною граничною теоремою, розглядаючи дану якісну ознаку як результат впливу великої кількості незалежних випадкових факторів. Однак у [9] відзначається, що добре обґрунтований нормальний закон розподілу – скоріше виключення, чим правило, якому відповідають фізичні явища.

Теорія імовірностей вивчає закономірності масових випадкових явищ, тому висновки про теоретичний закон розподілу тієї або іншої величини вимагають вивчення представницьких статистичних сукупностей, що для реальних фізичних величин важко одержати.

Кількісна ознака, досліджувана за мало представницькою вибіркою може бути однаково добре (або однаково погано) описана декількома законами розподілу, у тому числі і нормальним. Останній часто вибирається в якості кращої статистичної моделі, оскільки його параметри мають ясний фізичний зміст, форма кривої розподілу не залежить від сполучення цих параметрів, процентилі легко визначаються за допомогою нормованої нормальної функції розподілу.

Однак, що впливає з гіпотези про нормальний закон припущення про симетричність розподілу, а також про існування негативних значень випадкової величини можуть внести істотні помилки в рішення задач, заснованих на використанні імовірно-статистичних методів. Реальні величини можуть мати більшу мінливість, чим це властиво нормальній величині, і це теж вносить помилку в рішення.

У [10] підбір емпіричних розподілів рекомендується здійснювати за оцінкою показників асиметрії й ексцесу емпіричного розподілу за допомогою діаграми Пірсона.

Для статистичних сукупностей визначаються емпіричні початкові і центральні моменти розподілу  $k$ -го порядку

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k, \quad (1.1)$$

$$\mu_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^k, \quad (1.2)$$

а також, зв'язані з ними нормовані показники асиметрії  $\beta_1$  й ексцесу  $\beta_2$ :

$$\beta_1^2 = \frac{\mu_3^2}{\mu_2^3}; \quad \beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}. \quad (1.3)$$

Тут  $x_i$  - значення досліджуваної кількісної, що спостерігається, ознаки,  $n$ -обсяг вибірки.

Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$  наносяться на діаграму, на якій відомі розподіли представлені як графіки функції  $\beta_2 = f(\beta_1^2)$ . Якщо емпірична точка  $(\beta_1^2, \beta_2)$  знаходиться поблизу лінії або точки, що представляє який-небудь розподіл, то саме воно може бути прийнято як статистичну модель досліджуваної ознаки. Остаточним етапом підбора розподілу є порівняння емпіричних частот і теоретичних значень імовірностей з використанням відомих критеріїв згоди [11, 12].

Відповідно до викладених принципів досліджувалися статистичні сукупності ряду кількісних ознак, що характеризують властивості гірських порід.

### 1.1.1 Міцність гірських порід

Міцність гірських порід при будь-якому виді навантаження, оцінюється величиною коефіцієнта міцності за шкалою проф. М.М. Протодияконова.

На рис. 1.1 наведені гістограми значень коефіцієнта міцності  $f$  для деяких осадових порід. [1, 2, 13]

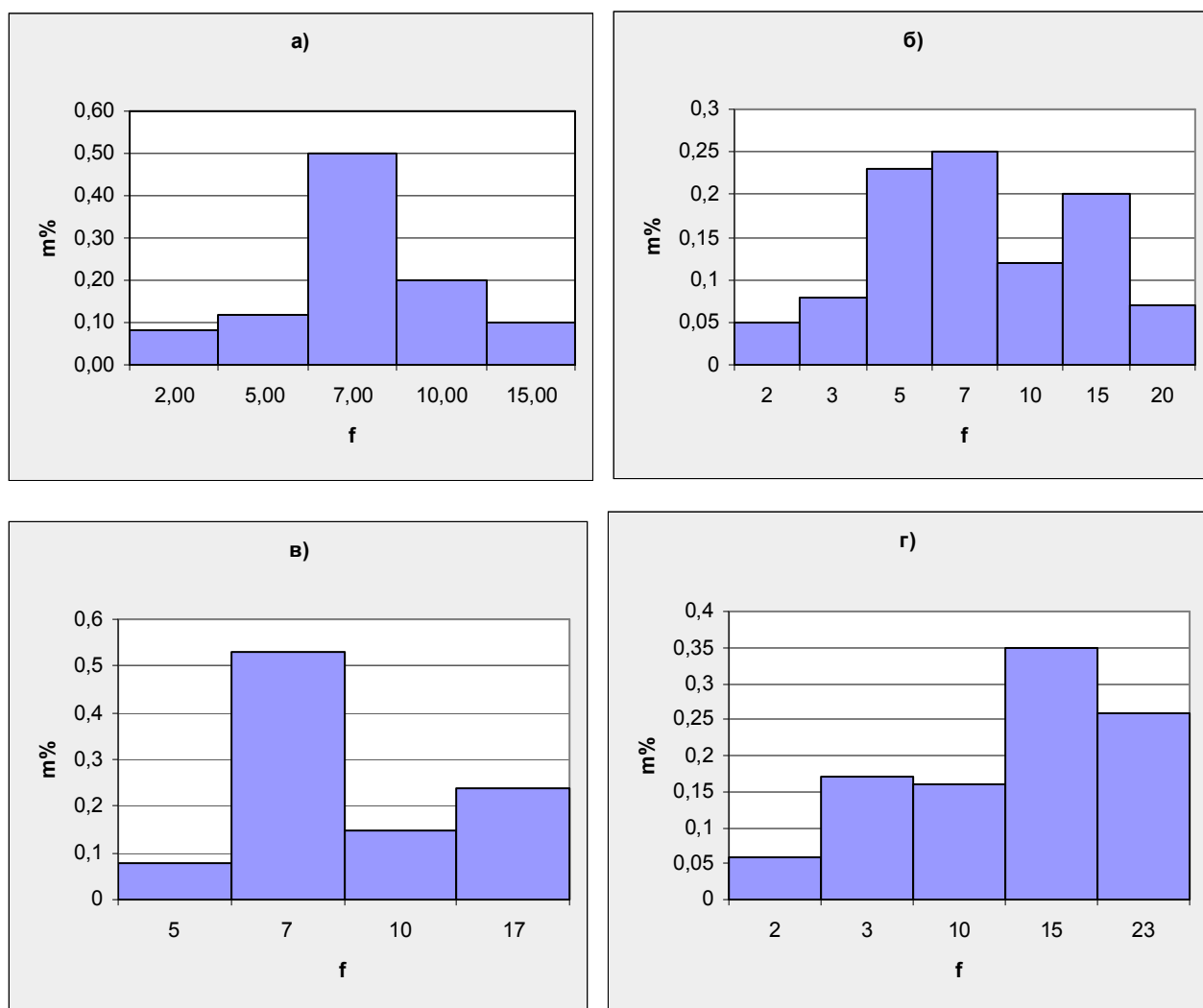


Рисунок 1.1 - Гістограми значень коефіцієнта міцності за шкалою М.М. Протодияконову:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники; г) сланці піщанисті

Результат статистичної обробки представлених сукупностей (середня вибірка  $\bar{x}$ , вибірка дисперсія  $D^*$ , відносні варіації  $\eta^*$ , коефіцієнти асиметрії  $\beta_1^2$  й ексцесу  $\beta_2$ ) наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 - Статистичні характеристики коефіцієнта міцності

| Статистичні характеристики       | Алевроліти | Аргіліти | Піщаники | Сланці піщанисті |
|----------------------------------|------------|----------|----------|------------------|
| Математичне чекання              | 6.4        | 7.3      | 7.8      | 6.3              |
| Дисперсія                        | 6.67       | 32.8     | 9.9      | 15.09            |
| Коефіцієнт варіації %            | 48         | 68       | 40       | 48               |
| Коефіцієнт асиметрії $\beta_1^2$ | 1.25       | 2.21     | 0.23     | 0.17             |
| Коефіцієнт ексцесу $\beta_2$     | 4.27       | 4.7      | 2.15     | 2.30             |

Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$  отримані, для статистичних розподілів коефіцієнта міцності порід за шкалою проф. М.М. Протодияконова нанесені на графік Пірсона [10], на якому представлені різні теоретичні розподіли (рис. 1.2).

Статистичний розподіл коефіцієнта міцності по-різному для різних типів порід. Для піщаників і піщаних сланців характерні невеликі значення асиметрії. Емпіричні точки, що відповідають цим розподілам групуються поблизу точки, що відповідає нормальному закону. Перевірка за критерієм “ $\chi^2$ -квадрат” [12] з 5% рівнем значимості показала, що для зазначених порід коефіцієнт міцності підкоряється нормальному закону розподілу, хоча слід зазначити, що значення коефіцієнта варіації (40-48%) не задовольняють правилу “трьох сигм” і гіпотезу про нормальний розподілу можна прийняти тільки в грубому наближенні. Для алевролітів і аргілітів розподілу носять явно несиметричний характер, відносна варіація досягає 68%. Гіпотезу про нормальний розподіл варто відкинути.

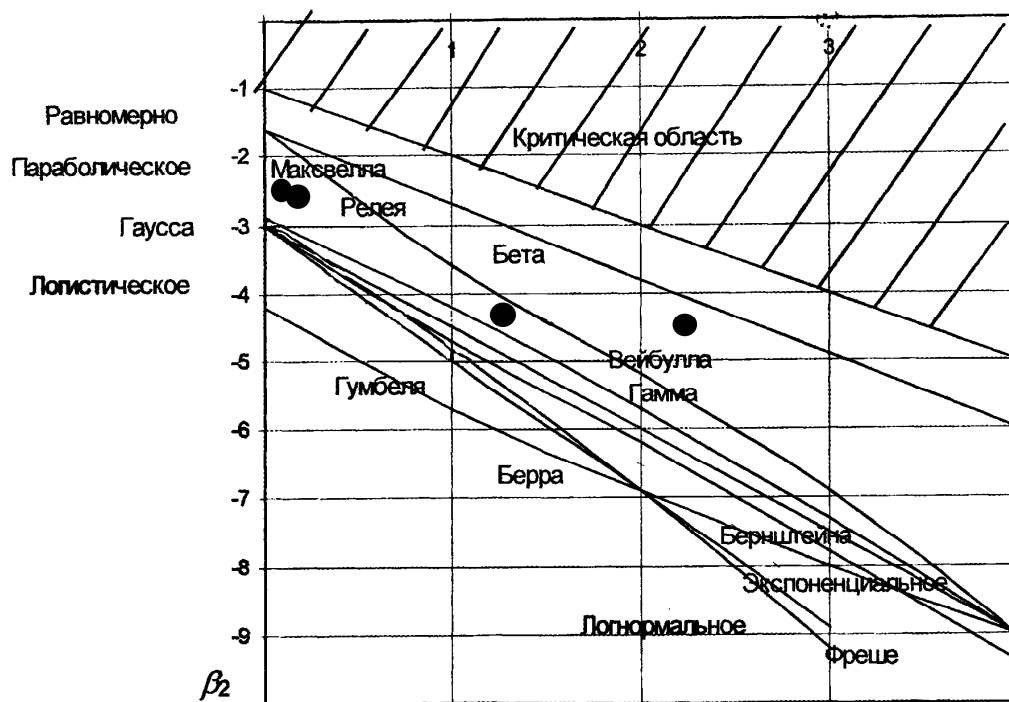


Рисунок 1.2 - Графік Пірсона для різних розподілів випадкових величин:

- - точки, що відповідають статистичній сукупності коефіцієнта міцності за проф. М.М. Протодияконовим

Аналізуючи положення точок, що відповідають цим розподілам на графіку Пірсона, можна висунути гіпотезу про  $\gamma$  - розподіл або розподілі Вейбулла. З 5% рівнем значимості приведені дані не суперечать обом цим гіпотезам.

### 1.1.2 Міцність при одноосьовому стиску

Одним з широко розповсюджених показників міцності гірських порід є межа міцності на одноосьовий стиск, під яким мається на увазі максимальна сила, при якій руйнується випробовуваний зразок при одноосьовому стиску, віднесений до площі його поперечного перерізу. На рис. 1.3 наведені

гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск для основних осадових порід і вугілля [14].

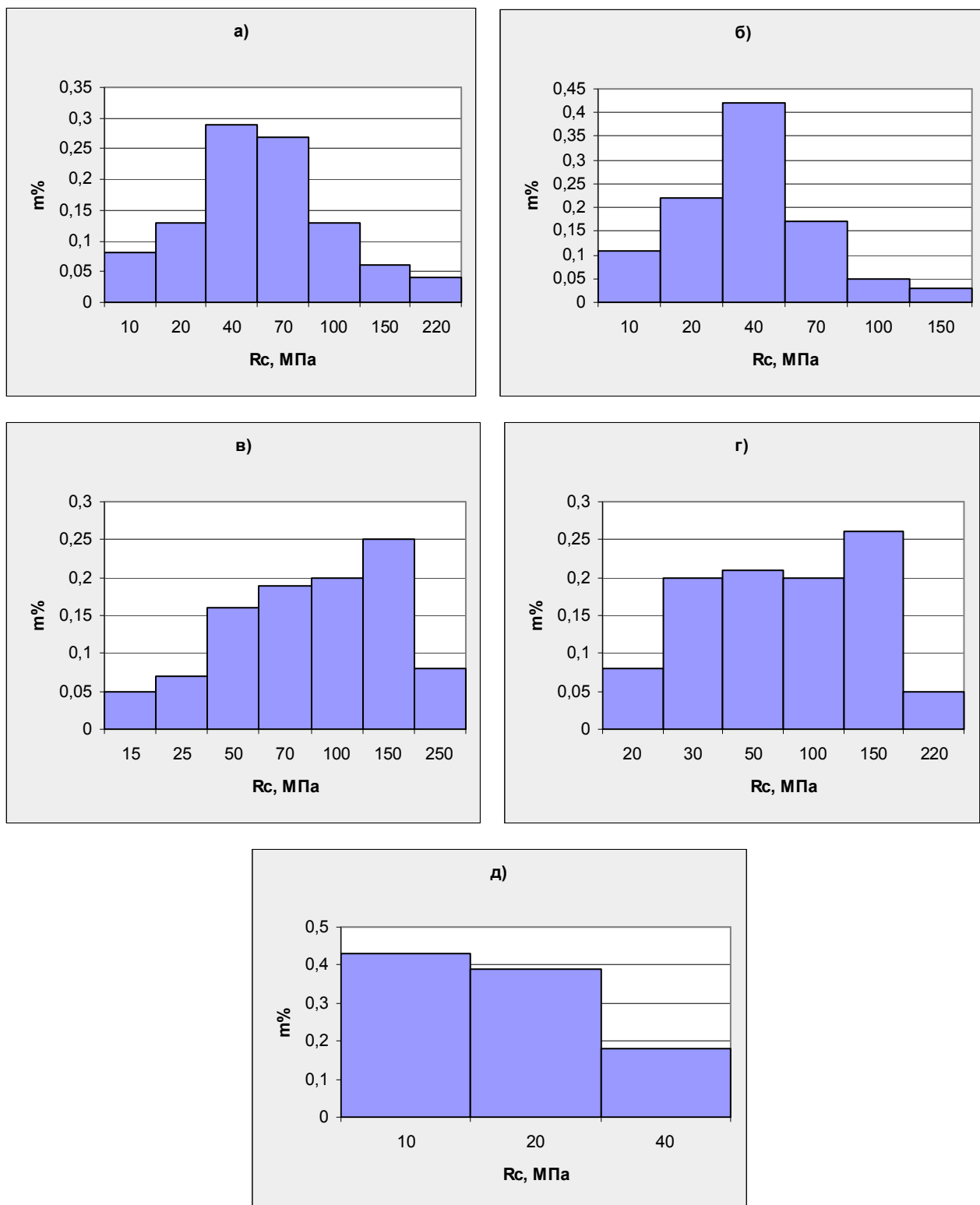


Рисунок 1.3 - Гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники; г) сланці піщанисті; д) вугілля



Результат статистичної обробки представлених сукупностей (середня вибірка  $\bar{x}$ , вибіркві дисперсія  $D^*$ , відносні варіації  $\eta^*$ , коефіцієнти асиметрії  $\beta_1$  й ексцесу  $\beta_2$ ) наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 - Статистичні характеристики межі міцності  
на одноосьовий стиск

| Статистичні характеристики       | Алевроліти | Аргіліти | Піщаники | Сланці піщанисті | Вугілля |
|----------------------------------|------------|----------|----------|------------------|---------|
| Математичне чекання, МПа         | 53         | 39       | 100      | 91               | 15      |
| Дисперсія                        | 2228.36    | 739.73   | 4218.93  | 3296.62          | 77.7    |
| Коефіцієнт варіації %            | 75         | 68       | 64       | 60               | 39      |
| Коефіцієнт асиметрії $\beta_1^2$ | 1.53       | 1.71     | 0.90     | 0.60             | 3.18    |
| Коефіцієнт ексцесу $\beta_2$     | 5.5        | 5.7      | 3.05     | 2.97             | 4.58    |

Дослідження міцнісних властивостей вуглевміщуючих порід Донбасу тривалий час виконувався в лабораторіях фізико-механічних властивостей ВО «Донбасгеологія», ВО «Укргеологія» і НГУ з дотриманням прийнятих ДСТ на іспити.

Межа міцності на одноосьовий стиск для піщаників отриманий на циліндричних зразках зі співвідношенням  $h/d = 1$ . Для аргілітів і алевролітів ця характеристика отримана методом співвісних пуансонів. Досліджувалися міцнісні властивості порід у залежності від марки вугілля, що у свою чергу вказує на ступінь його метаморфізму.

Гістограми частот для значень межі міцності на одноосьовий стиск для вуглевміщуючих порід, вугілля марок Д-ДГ, приведені на рис. 1.4.

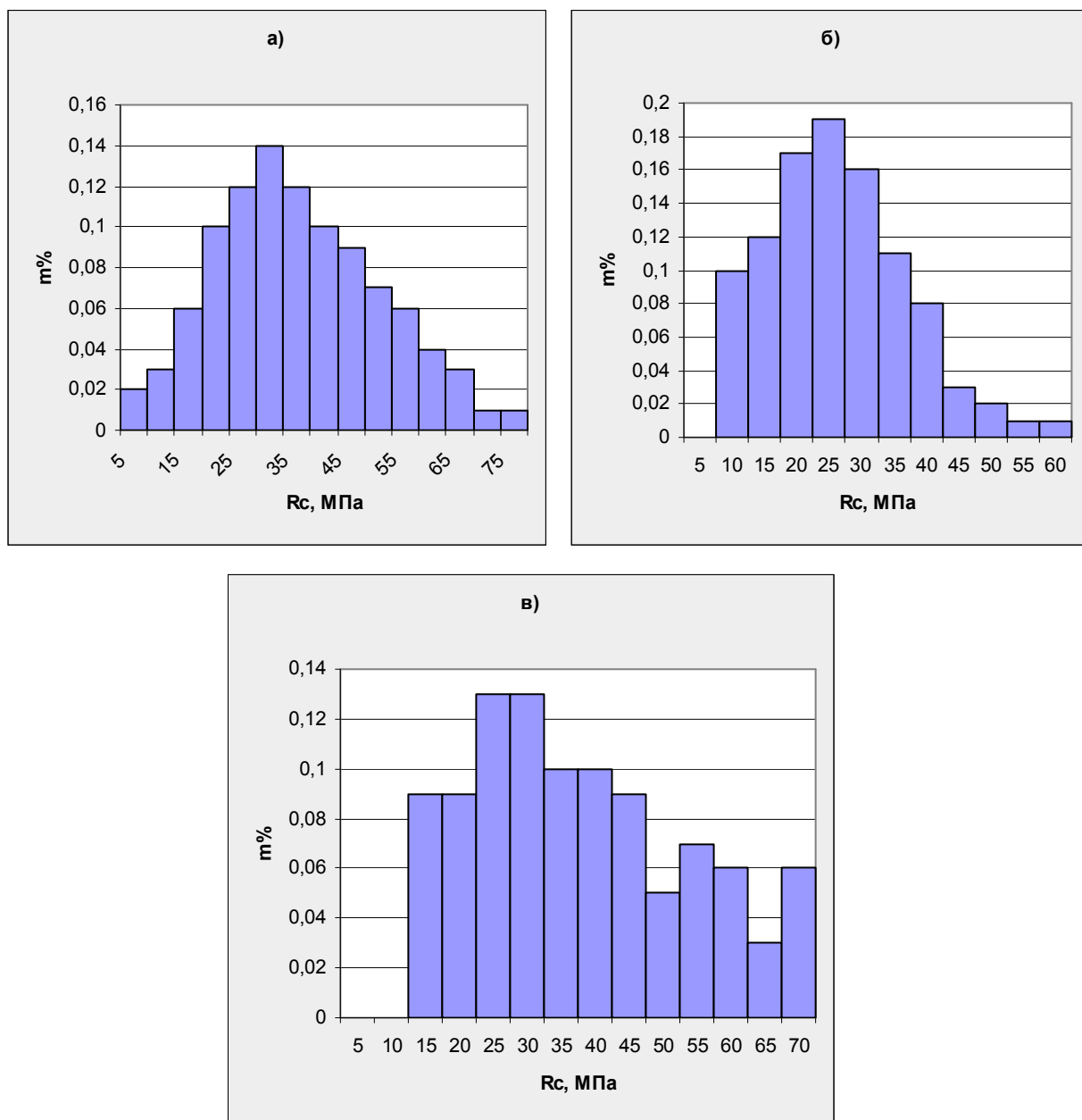


Рисунок 1.4 - Гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск вуглевміщуючих порід, вугілля марок Д-ДГ:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники

Гістограми частот для значень межі міцності на одноосьовий стиск для вуглевміщуючих порід, вугілля марок Г-ГЖ, приведені на рис. 1.5.

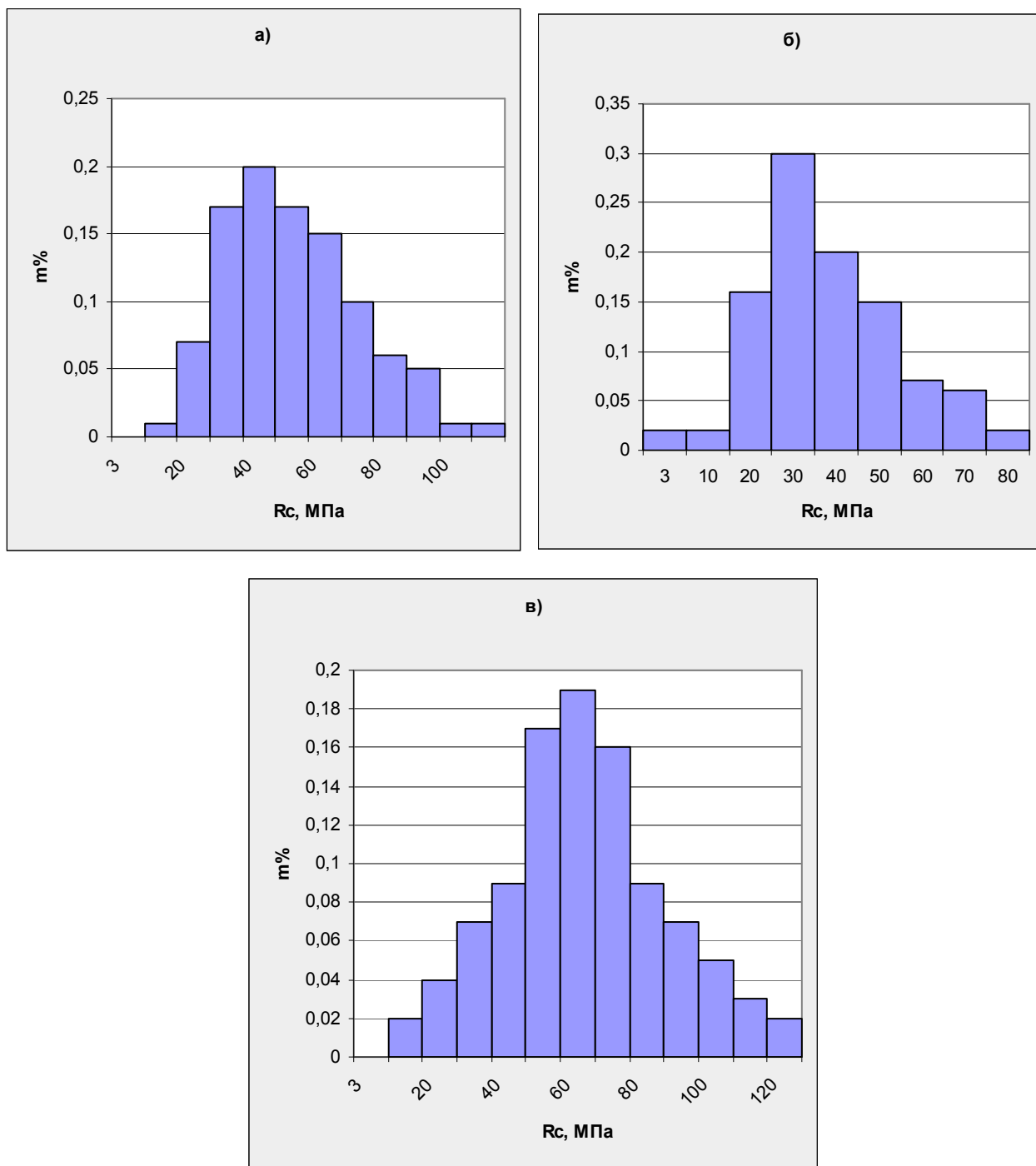


Рисунок 1.5 - Гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск вуглевміщуючих порід, вугілля марок Г-ГЖ:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники

Гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск для вуглевміщуючих порід, вугілля марок Ж, КЖ, ОС, приведені на рис. 1.6.

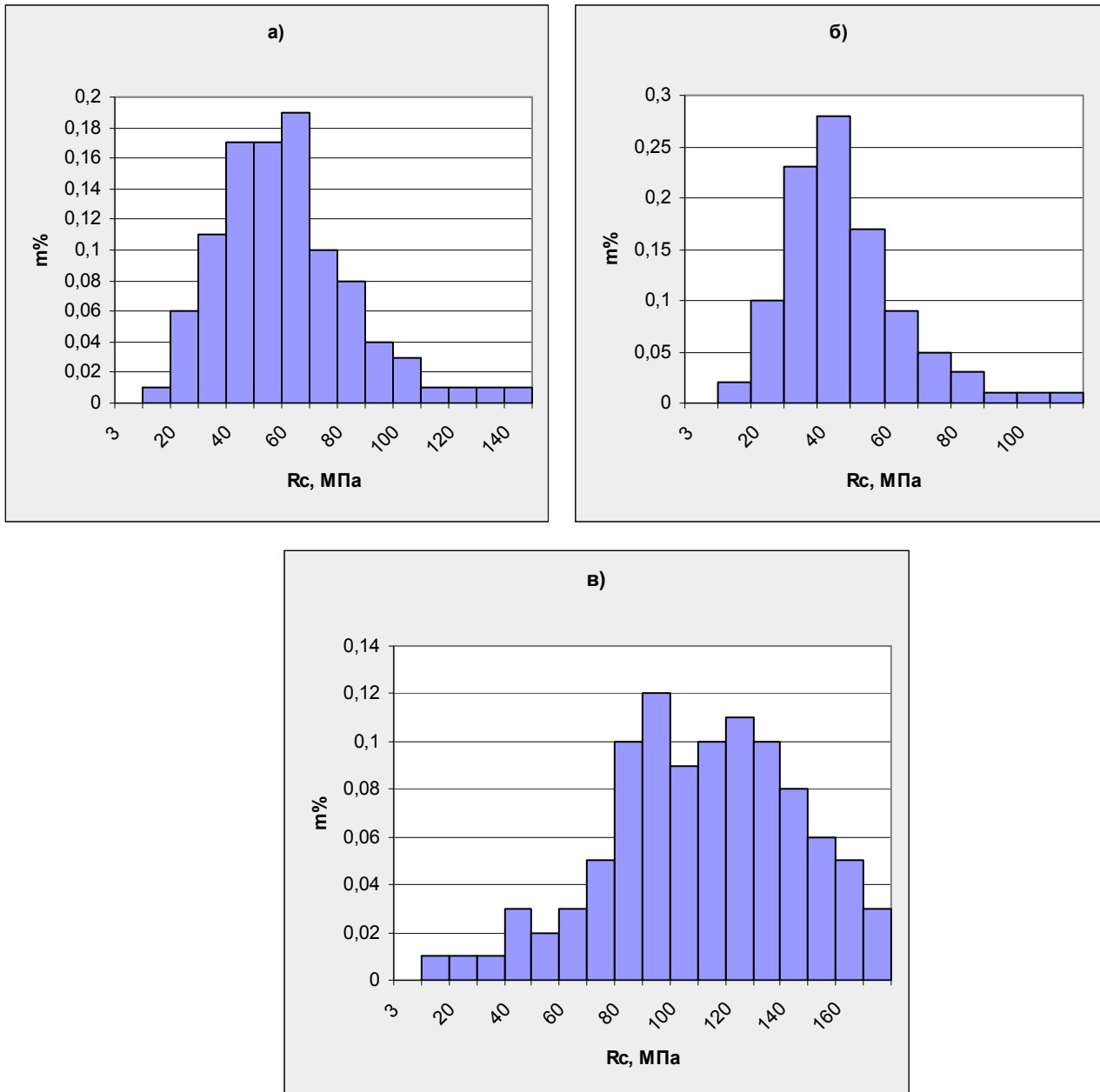


Рисунок 1.6 - Гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск вуглевміщуючих порід, вугілля марок Ж, КЖ, ОС:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники.

Результати обробки статистичних даних, представлених вище, зведені в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 - Параметри статистичного розподілу

| Вугілля Донецького басейну | Породи, що вміщують | Параметри розподілу |           |
|----------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
|                            |                     | $\beta_1^2$         | $\beta_2$ |
| Д-ДГ                       | Алевроліт           | 0.336               | 2.970     |
|                            | Аргіліт             | 0.261               | 3.099     |
|                            | Піщаник             | 0.213               | 2.421     |
| Г-ГЖ                       | Алевроліт           | 0.545               | 2.875     |
|                            | Аргіліт             | 0.637               | 2.623     |
|                            | Піщаник             | 0.470               | 3.123     |
| Ж, КЖ, ОС                  | Алевроліт           | 0.336               | 2.970     |
|                            | Аргіліт             | 1.043               | 5.029     |
|                            | Піщаник             | 0.514               | 3.003     |

Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$  отримані, для статистичних розподілів меж міцності на одноосьовий стиск нанесені на графік Пірсона (рис. 1.7).

У грубому наближенні можна констатувати, що більшість емпіричних точок, що відповідають розглянутим статистичним сукупностям меж міцності на стиск групуються в навколо точки, що відповідає нормальному розподілові. У більшій мірі це відноситься до вміщуючих порід, вугілля марки Д-ДГ. Алевроліти, аргіліти і піщаники, вміщуючих вугілля з більшим ступенем метаморфізму, мають більш несиметричні розподіли.

Нижче буде показано, що відхилення розподілів від нормального зв'язане з неоднорідністю порід, наявністю в них макродефектів, наприклад, систем тріщин.

Розподіл міцності аргілітів, вміщуючих вугілля марки Ж, КЖ, ОС має істотну асиметрію й гостровершинність ( $\beta_1^2 = 1,04$ ,  $\beta_2 = 5,0$ ). Для цього типу порід гіпотеза про нормальний розподіл неприйнятна. Відповідно до класифікації, приведеної в [14], розподілу міцності порід, вміщуючих вугілля Д-ДТ і Г-ГЖ, варто віднести до помірковано асиметричних, для яких

підходящими статистичними розподілами є розподіли Вейбулла, гама, Релея, Максвелла і логарифмічно нормальне. Для неоднорідних аргілітів, що уміщає вугілля марки Ж, КЖ, ОС логарифмічно нормальний розподіл є найбільш адекватною моделлю.

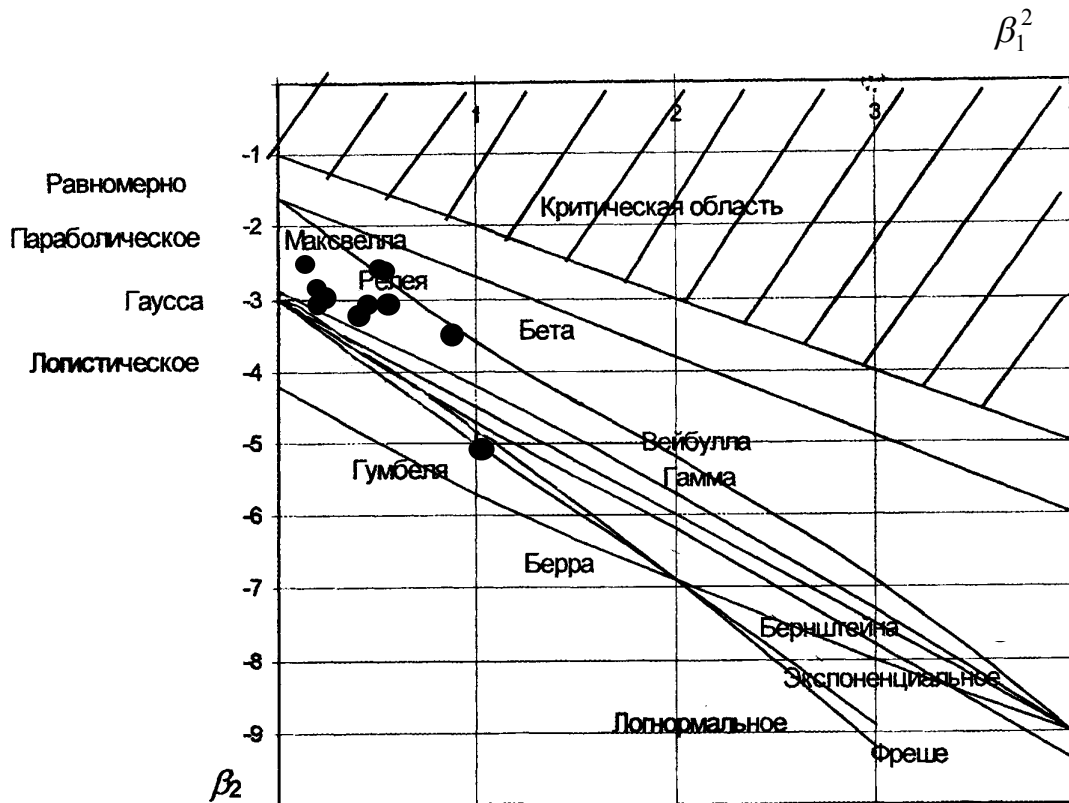


Рисунок 1.7 - До підбора емпіричних розподілів для межі міцності на стиск:

● - крапки, що відповідають статистичній сукупності межі міцності на одноосьовий стиск

Для вугілля вид гістограми частот, а також значення асиметрії й ексцесу вказують на показовий закон розподілу міцності. Відзначимо, що показовий закон є часним випадком гама розподілу. Виродження гама розподілу в показове в даному випадку говорить про наявність великої кількості елементів з низькою міцністю, що, мабуть, зв'язано з тріщинуватістю вугільного пласта, з якого відбиралася проба.

### 1.1.3. Межа міцності при розтяганні

Важливим міцнісним показником є межа міцності при розтяганні  $R_p$ , тому що руйнування гірських порід найчастіше походить від дії нормальних напружень, що розтягують. Визначається цей показник величиною відносини максимального зусилля, що розтягує, до площі поперечного переріза випробовуваного на розрив зразка. На рис. 1.8 представлені гістограми значень межі міцності при розтяганні для основних осадових порід і вугілля [13].

Результат статистичної обробки представлених сукупностей (середня вибіркова  $\bar{x}$ , вибіркові дисперсія  $D^*$ , відносні варіації  $\eta^*$ , коефіцієнти асиметрії  $\beta_1^2$  й ексцесу  $\beta_2$ ) приведені в таблиці 1.4

Таблиця 1.4 - Статистичні характеристики межі міцності при розтяганні

| Статистичні характеристики     | Алевроліти | Аргіліти | Піщаники | Сланці піщанисті | Вугілля |
|--------------------------------|------------|----------|----------|------------------|---------|
| Математичне чекання, МПа       | 6          | 4.5      | 9        | 13               | 2       |
| Дисперсія                      | 25.61      | 22.89    | 42.95    | 58.56            | 0.48    |
| Коефіцієнт варіації %          | 81         | 80       | 77       | 51               | 46      |
| Коефіцієнт асиметрії $\beta_1$ | 0.94       | 2.44     | 0.45     | 0.17             | 2.17    |
| Коефіцієнт ексцесу $\beta_2$   | 4.27       | 7.10     | 2.98     | 1.93             | 7.67    |

Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$  отримані, для статистичних розподілів межі міцності при розтяганні показані на графіку Пірсона (рис 1.9).

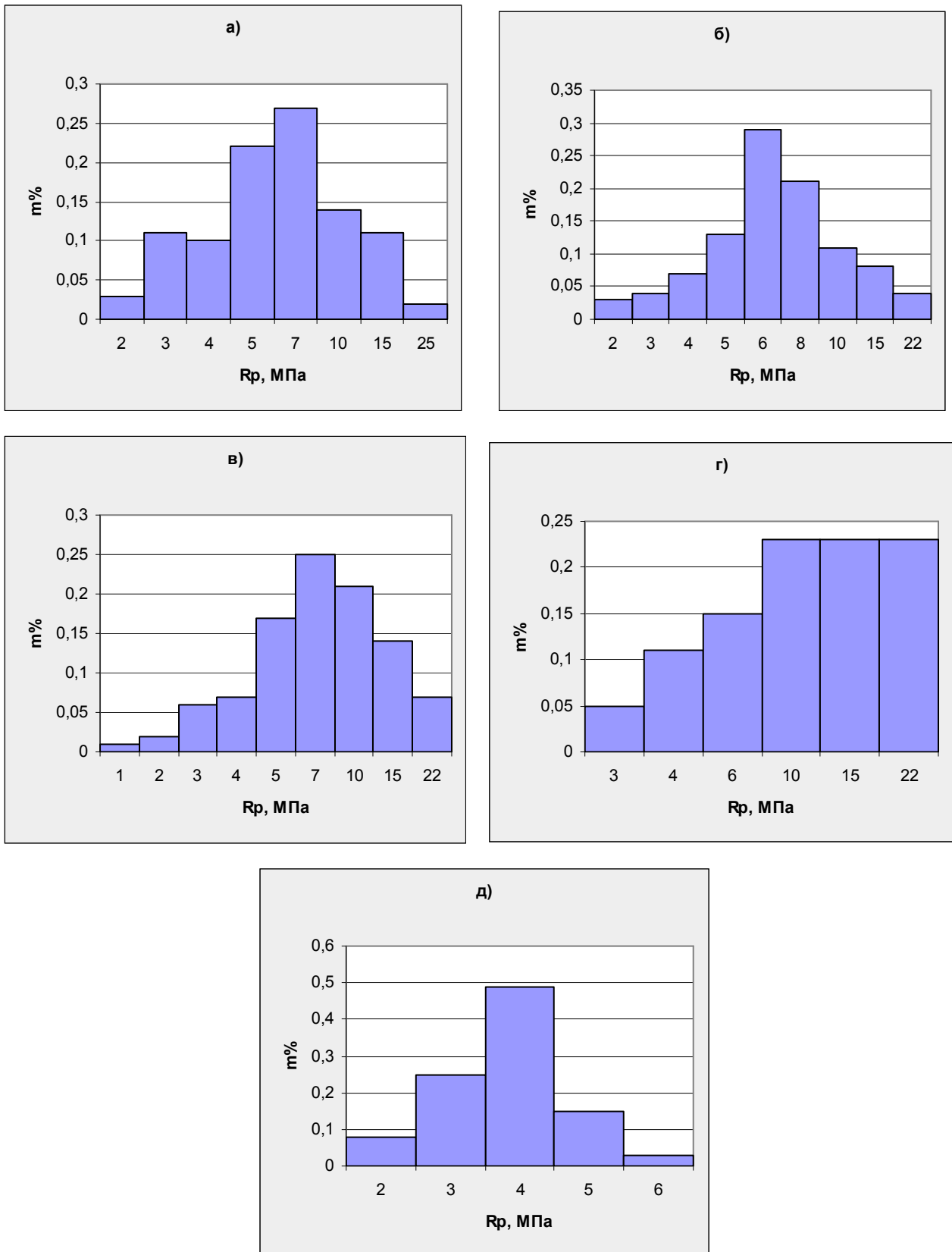


Рисунок 1.8 - Гістограми значень межі міцності при розтяганні:  
 а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники; г) сланці піщанисті; д) вугілля



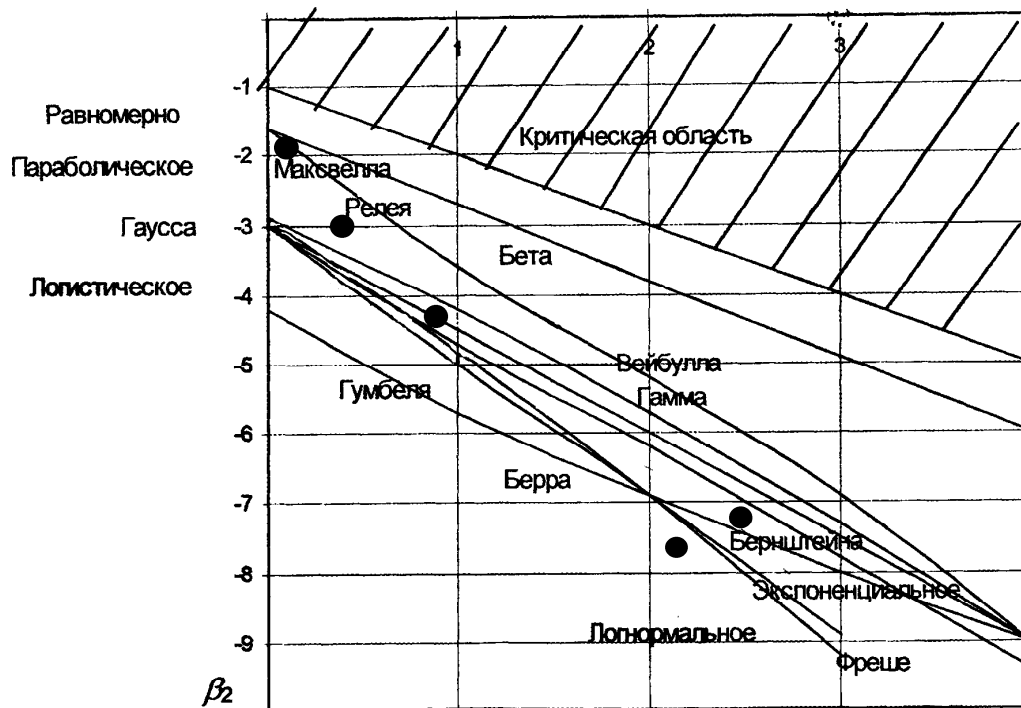


Рисунок 1.9 - Графік Пірсона для різних розподілів випадкових величин:

- - крапки, що відповідають статистичній сукупності межі міцності при розтяганні

Аналіз приведених даних показує, що межа міцності на розтягання володіє ще більш асиметричним розподілом. Емпіричні крапки на діаграмі Пірсона для всіх представлених гістологічних різностей розташовані поблизу лінії, що відповідає логарифмічно нормальному закону розподілу. У [15] показано, що логнормальний розподіл відповідає фізичній суті міцнісних характеристик породного середовища. Як доказ приводиться модель Кептейна, що описує процес руйнування зразка як послідовне нагромадження ушкоджень і зв'язаний з ним ріст тріщини, для якої збільшення розміру на кожному кроці навантаження пропорційно розмірові на попередньому кроці. Саме логнормальний розподіл описує випадкові величини [16], для яких кожне наступне значення складає випадкову частку попередніх.

#### 1.1.4 Модуль пружності першого роду

Деформаційні властивості зв'язані зі здатністю твердих тіл змінювати свої розміри під впливом механічних навантажень. Властивість твердих тіл деформуватися під навантаженням, а потім цілком або частково відновлювати первісну форму і розміри після її зняття називається пружністю.

Пружні властивості прийнята оцінювати коефіцієнтами пропорційності між напругами і деформаціями, основним з яких є модуль пружності. На рис. 1.10 наведені гістограми значень модуля пружності для основних осадових порід і вугілля [1, 2, 13].

Результат статистичної обробки представлених сукупностей (середня вибірка  $\bar{x}$ , вибіркві дисперсія  $D^*$ , відносні варіації  $\eta^*$ , коефіцієнти асиметрії  $\beta_1$  й ексцесу  $\beta_2$ ) приведені в таблиці 1.5.

Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$  отримані, для статистичних розподілів модуля пружності першого роду показані на графіку Пірсона (рис 1.11).

Для модуля пружності, як і для розглянутих вище міцнісних показників характерним є значний розкид даних щодо середнього, оцінюваним коефіцієнтом варіації  $\eta$ . Гістограммы частот істотно несиметричні.

По вигляду гістограм у грубому наближенні можна висунути гіпотезу про показовий закон розподілу модуля пружності для алевролітів і аргілітів, і логарифмічно нормальному – для піщаників. Оцінки асиметрії й ексцесу показують, що розглянуті розподіли досить адекватно будуть описуватися і гамма-розподілом, для якого показовий розподіл є частим випадком, а також бета-розподілом, що вироджується в рівномірний розподіл.

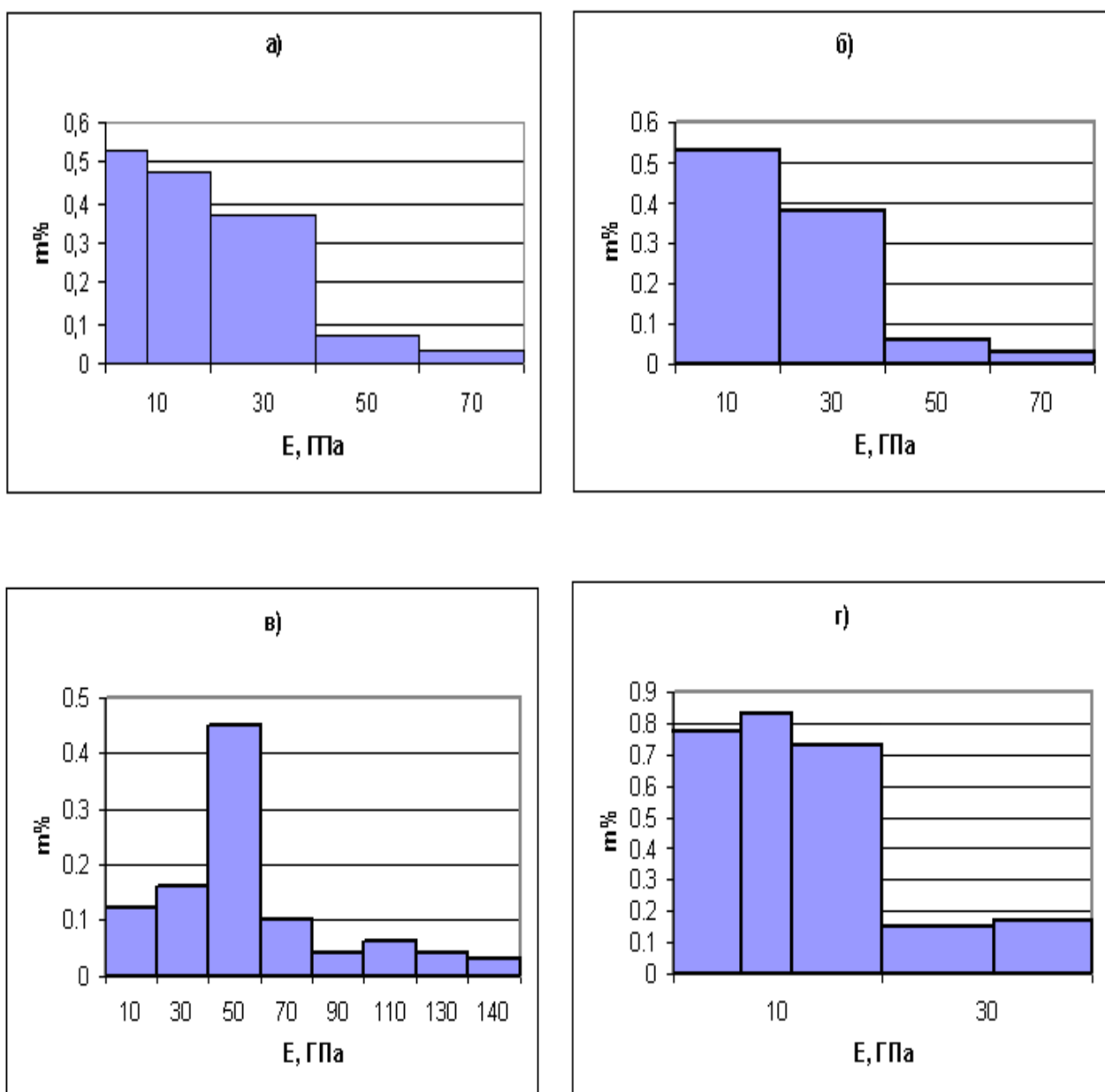


Рисунок 1.10 - Гістограми значень модуля пружності першого роду:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) піщаники; г) вугілля

Таблиця 1.5 - Статистичні характеристики модуля пружності

| Статистичні характеристики       | Алевроліти | Аргіліти | Піщаники | Вугілля |
|----------------------------------|------------|----------|----------|---------|
| Математичне чекання, ГПа         | 26         | 20       | 48       | 20      |
| Дисперсія, ГПа <sup>2</sup>      | 341.54     | 279.36   | 852.40   | 136.00  |
| Коефіцієнт варіації %            | 60         | 62       | 57       | 62      |
| Коефіцієнт асиметрії $\beta_1^2$ | 2.67       | 3.52     | 0.73     | 1.32    |
| Коефіцієнт ексцесу $\beta_2$     | 5.09       | 5.42     | 3.91     | 3.31    |

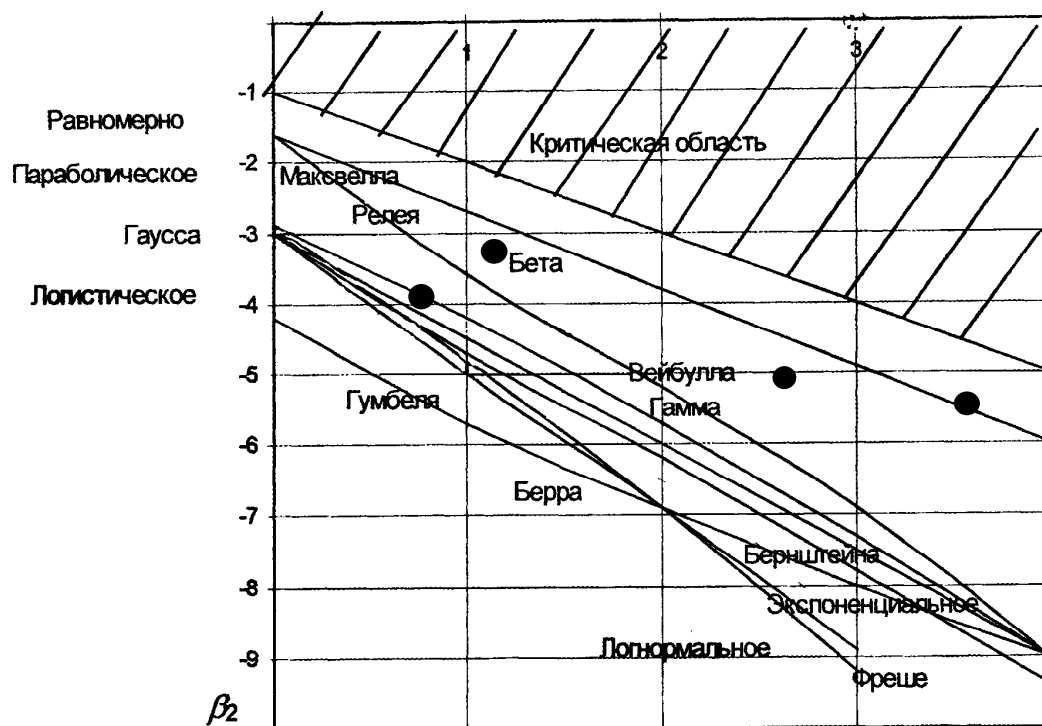


Рисунок 1.11 - Графік Пірсона для різних розподілів випадкових величин:

● - точки, що відповідають статистичній сукупності модуля пружності першого роду

### 1.1.5 Коефіцієнт Пуассона

Відношення поперечних деформацій до подовжніх оцінюється коефіцієнтом Пуассона. Для основних осадових порід і вугілля на рис. 1.12 приведені гістограми, що характеризують розподіл коефіцієнтів Пуассона.

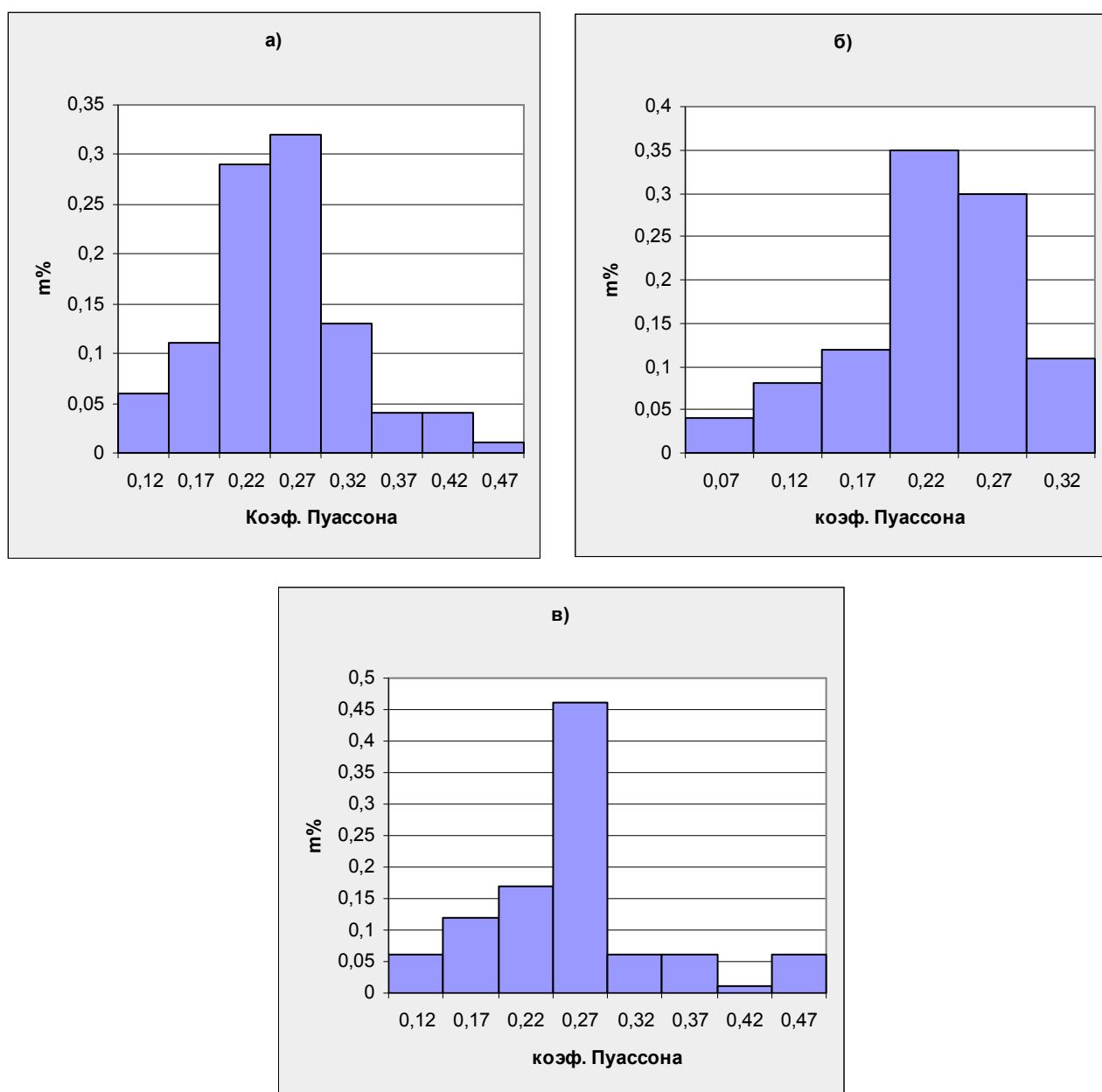


Рисунок 1.12 - Гістограми значень коефіцієнта Пуассона:

а) алевроліти; б) аргіліти; в) вугілля

Результат статистичної обробки представлених сукупностей (середня вибіркова  $\bar{x}$ , вибіркова дисперсія  $D^*$ , відносна варіація  $\eta^*$ , коефіцієнти асиметрії  $\beta_1$  й ексцесу  $\beta_2$ ) наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Статистичні характеристики коефіцієнта Пуассона

| Статистичні характеристики       | Алевроліти | Аргіліти | Вугілля |
|----------------------------------|------------|----------|---------|
| Математичне чекання              | 0.26       | 0.24     | 0.26    |
| Дисперсія                        | 0.008      | 0.005    | 0.006   |
| Коефіцієнт варіації %            | 37         | 38       | 44      |
| Коефіцієнт асиметрії $\beta_1^2$ | 0.12       | 0.11     | 0.88    |
| Коефіцієнт ексцесу $\beta_2$     | 2.49       | 2.45     | 3.85    |

Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$  отримані, для статистичних розподілів коефіцієнта Пуассона наведені на рис 1.13.

Для представлених статистичних сукупностей коефіцієнта Пуассона характерні невеликі значення показників асиметрії й гостровершинності. З 5% рівнем значимості дані не суперечать нормальному закономірному розподілу. На користь цієї статистичної моделі говорять і вид гістограм частот і невеликі (до 45%) значення варіації досліджуваної величини щодо середнього.

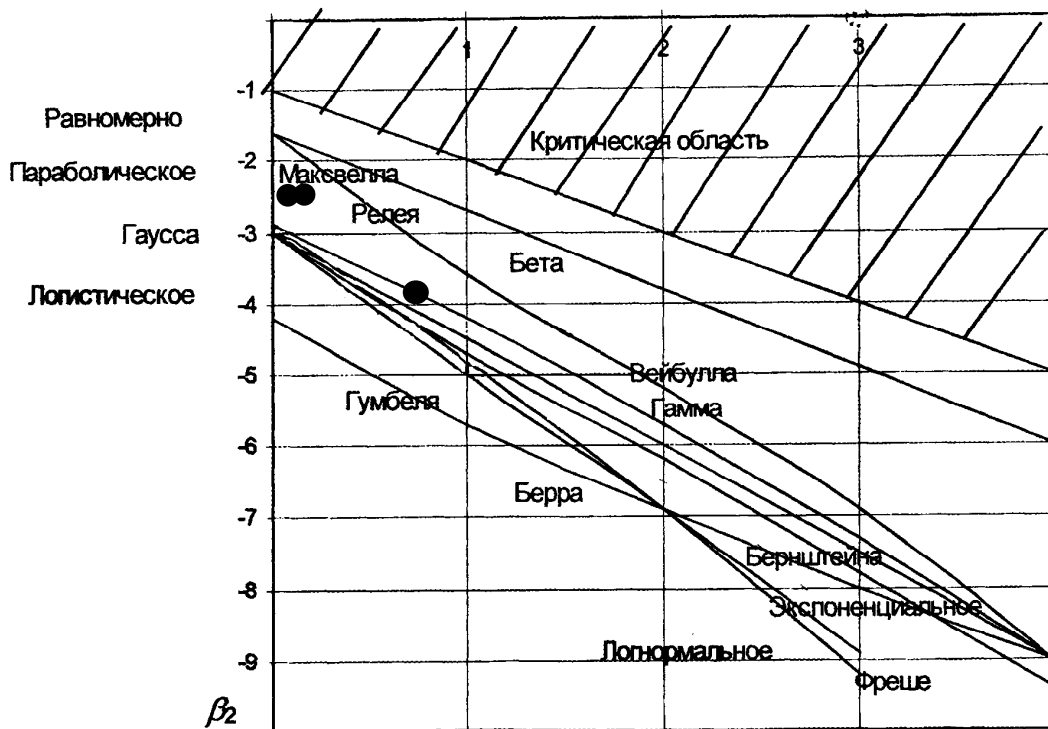


Рисунок 1.13 - Графік Пірсона для різних розподілів випадкових величин:

- - точки, що відповідають статистичній сукупності коефіцієнта Пуассона

Приведений вище аналіз показав, що характеристики міцнісних і пружних властивостей гірських порід за винятком коефіцієнта Пуассона, мають несиметричні розподіли і великі значення відносної варіації. Ступінь асиметрії різний для фізичних характеристик різних типів порід. Для однієї і тієї ж статистичної сукупності, внаслідок обмеженості її розмірів, можуть бути одночасно прийняті гіпотези про деякі різні розподіли. У тому числі для помірковано асиметричних розподілів не відкидається і гіпотеза про закон Гаусса.

Проти цієї гіпотези можна висунути ряд аргументів, наприклад той, що дана величина не може приймати по своїй суті негативних значень. Але більш вагомий, на наш погляд, аргумент полягає в наступному. Чи дійсно вибірка, отримана як результат випробування зразків гірської породи, відбиває природу генеральної сукупності? Чи виконується основна вимога, пропонована до

вибірки – рівність шансів для всіх елементів генеральної сукупності потрапити у вибірку? Відомо, що гірській породі властива природна тріщинуватість. При виготовленні зразків ті з них, що пересічені тріщиною, руйнуються до початку іспитів.

Таким чином, структурні елементи, що містять макродефекти, у звичайних іспитах не беруть участь

Виходить, що в лабораторних умовах випробуються досить однорідні зразки, що у силу обмеженості своїх розмірів не відтворюють усіх структурних особливостей породного масиву. Це означає, що статистичний розподіл, побудований за результатами лабораторного випробування, характеризує деякий ідеалізований об'єкт, набагато більш однорідний, чим реальний породний масив.

У роботах [17, 18] показаний спосіб визначення статистичних характеристик для так названого “виправленого” варіаційного ряду, у який умовно додані елементи з макродефектами. Механічна характеристика для такого елемента повинна відрізнятися від характеристики непорушеного елемента. Наявність у вибірці таких елементів вплине на характер статистичного розподілу. Досліджуємо тенденцію цього впливу.

## 1.2 Мета, ідея, основні задачі та методи досліджень

Виконаний аналіз статистичних даних щодо міцнісних та деформаційних властивостей вуглевміщуючих осадових гірських порід доводить те, що використання в геомеханічних розрахунках лише середніх значень фізико-механічних властивостей без урахування природного або техногенного розкиду цих значень не відображує реальної геомеханічної картини в породному середовищу, що призводить до грубих помилок при проектуванні виробок та інших підземних об'єктів.

Таким чином, однією з головних задач науково-дослідної роботи є необхідність розробки методики врахування наявності макродефектів при визначенні параметрів, що є вихідними даними для дослідження тривалої



стійкості гірничих виробок та підземних споруд різного призначення, розташованих в складноструктурному породному масиві.

Максимально наблизити математичну модель до реального об'єкта повинно використання в режимі реального часу поточних даних, що надходять від різних джерел інформації, у тому числі акустичного сканування гірського масиву.

Метою роботи є розробка математичних моделей для створення інформаційного середовища в системі геомоніторингу.

Ідея роботи полягає в комплексному підході до розробки адаптивної моделі породного масиву зі структурними та силовими неоднорідностями, шляхом застосування сполучених методів аналізу геомеханічних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Виконати аналіз статистичної інформації про розподіл основних міцнісних і деформаційних властивостей вуглевміщуючих осадових порід.
2. Розробити спосіб обліку макродефектів породного середовища при визначенні моментів емпіричних розподілів основних міцнісних та деформаційних властивостей гірських порід.
3. Дослідити вплив тріщинуватості породного масиву на імовірнісний розподіл основних міцнісних і деформаційних характеристик гірських порід.
4. Розробити математичні та імовірнісні моделі структурно-неоднорідного породного масиву.
5. Обґрунтувати та вибрати метод аналізу акустичної інформації на основі вейвлет-перетворення в системі оперативного сканування породного масиву.
6. Розширити можливості шахтних систем зв'язку з метою забезпечення високошвидкісної передачі даних для інформаційного забезпечення методів аналізу.

7. Здійснити запис та аналіз акустичної інформації в шахтних умовах при перетині реальних зон зі структурними та силовими неоднорідностями.
8. Створити програмне забезпечення для аналізу акустичної інформації в системі оперативного сканування породного масиву.

Рішення поставлених задач та отримання запланованих результатів орієнтовані на використання ЕОМ нового покоління (за швидкістю обчислень, обсягом пам'яті та точністю подання числової інформації) та оригінальні розробки в області акустичного зондування недоторканої частини породного масиву. Методичну основу досліджень складає комплексний підхід, що включає аналіз і узагальнення літературних джерел за темою роботи, методи математичного моделювання, в тому числі, методів механіки твердого тіла; імовірісно-статистичні методи моделювання властивостей породного масиву як об'єкта стохастичної природи; засоби накопичення статистичної інформації, її опрацювання та використання як вхідних даних системи моніторингу, методи аналізу акустичної інформації на основі вейвлет-перетворення.

### 1.3 Висновки

1. Отримані моменти статистичних розподілів таких величин як границя міцності на стиснення та розтяг, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона для порід, що вміщують вугілля різних марок. Проаналізовано вибірккові дані для алевроліту, аргіліту, вапняку. Породи класифіковано за ступенем метаморфізму. Встановлено, що значення зазначених вище фізико-механічних властивостей змінюються суттєво навколо середніх вибіркових. Коефіцієнт варіації сягає 50-60%.

2. Для більшості проаналізованих вибірок гіпотеза про нормальний закон розподілу не підтверджується (за винятком розподілу коефіцієнта Пуассона). Більш придатними є логарифмічно нормальний закон розподілу та гамма-розподіл. Значна варіація даних відносно середнього свідчить про суттєву неоднорідність досліджених порід, зокрема, про наявність таких макродефектів як природна та техногенна тріщинуватість.

3. Встановлено, що використання в геомеханічних розрахунках лише середніх значень фізико-механічних властивостей без урахування природного або техногенного розкиду цих значень не відображує реальної геомеханічної картини в породному середовищі, що призводить до грубих помилок при проектуванні виробок та інших підземних об'єктів.

4. Визначені мета та ідея роботи, основні задачі та методи досліджень.

## 2 РОЗРОБКА СПОСОБУ ОБЛІКУ МАКРОДЕФЕКТІВ ПОРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ВИЗНАЧЕННІ МОМЕНТІВ ЕМПІРИЧНИХ РОЗПОДІЛІВ ОСНОВНИХ МІЦНІСНИХ І ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД

### 2.1 Вплив наявності макродефектів на характеристики вибірки

Нехай вивчається деяка характеристика властивостей гірської породи  $\theta$ . Для лабораторного випробування відібраний породний блок з розмірами  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ . При ідеальній обробці з нього може бути виготовлено  $n$  породних зразків.

Простежимо тенденцію зміни розподілу кількісно ознаки  $\theta$ , використовуючи наближений уможлядний прийом.

Розглянемо гістограму значень межі міцності на одноосьовий стиск для алевролітів, складений за результатами лабораторного випробування.

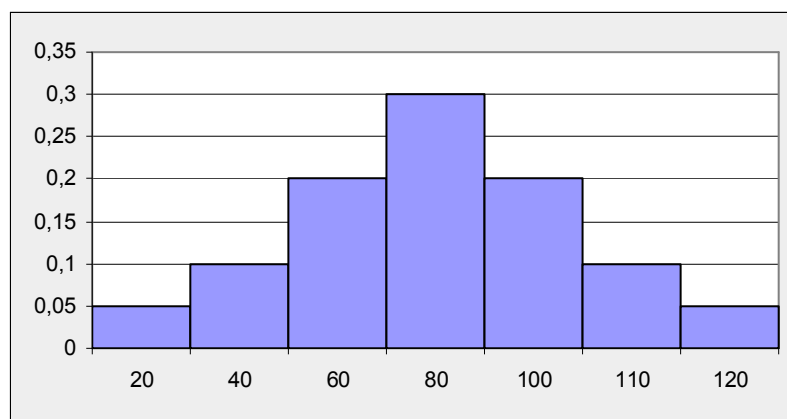


Рисунок 2.1 - Гістограма значень межі міцності на одноосьовий стиск для алевролітів

Введемо у вибірку послідовно 20% і 30% елементів з нульовою міцністю. Отримані гістограми представлені на рис. 2.2.

Результат статистичної обробки представлених сукупностей (середня вибіркова  $\bar{x}$ , вибіркові дисперсія  $D^*$ , відносні варіації  $\eta^*$ , коефіцієнти асиметрії  $\beta_1$  й ексцесу  $\beta_2$ ) представлені в таблиці 2.1.

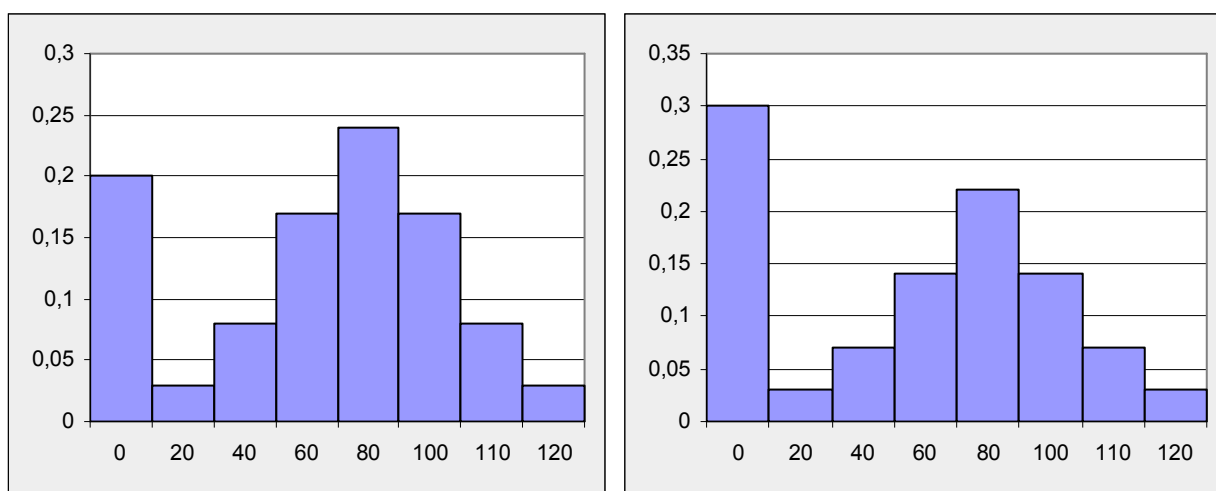


Рисунок 2.2 - Гістограми значень межі міцності на одноосьовий стиск

а) 20% елементів з нульовою міцністю;

б) 30% елементів з нульовою міцністю

Таблиця 2.1 - Статистичні характеристики межі міцності  
на одноосьовий стиск

| Статистичні характеристики       | Без нульових елементів | 20% нульових елементів | 30% нульових елементів |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Математичне чекання              | 78.00                  | 62.00                  | 54.70                  |
| Дисперсія                        | 666.00                 | 1469.24                | 1722.90                |
| Коефіцієнт варіації %            | 33                     | 61                     | 76                     |
| Коефіцієнт асиметрії $\beta_1^2$ | 0.18                   | 0.24                   | 0.33                   |
| Показник ексцесу $\beta_2$       | 2.79                   | 1.98                   | 1.55                   |

Таким чином, збільшення у вибірці числа елементів з нульовим значенням параметра  $\theta$  змінює асиметрію й гостровершинність розподілу в залежності від процентного вмісту таких елементів. Наприклад, 20%-й вміст

зруйнованих елементів у вибірці робить емпіричний розподіл майже рівномірним (для рівномірного розподілу  $\beta_1 = 0; \beta_2 = 2$ ).

Збільшення вмісту нульових елементів до 30% збільшує гостровершинність розподілу і ще більш збільшує відносну варіацію величини  $\theta$ . Оскільки кількість нульових елементів у вибірці залежить від інтенсивності тріщин, вигляд розподілу буде залежати від відстані між тріщинами.

## 2.2 Вплив макродефектів на моменти розподілу

Іспитам піддаються не всі зразки, а лише та частина, кількістю  $n_g$ , що не містить макродефекти і реально може бути виготовлена. Таким чином, буде отримана сукупність значень  $\theta_i$  ( $i = 1 \dots n_g$ ), для яких середнє значення дорівнює:

$$m_1 = \frac{1}{n_g} \sum_{i=1}^{n_g} \theta_i. \quad (2.1)$$

Однак, у генеральній сукупності відповідно до прийнятої гіпотези, утримуються структурні елементи, властивості яких відрізняються від властивостей непорушених зразків, що й оцінюється деякою функцією  $f(\theta)$ . Їхня присутність повинна бути відбита й у вибірці з генеральної сукупності. Таким чином, до вихідної сукупності з  $n_g$  зразків повинні бути додані  $n_m$  порушених зразків, механічна характеристика яких дорівнює:

$$\theta_{i_m} = f(\theta)\theta_i \quad (i = 1 \dots n_m). \quad (2.2)$$

Статистична обробка повинна виконуватися для нового, «виправленого», варіаційного ряду з  $n = n_m + n_g$  даних.

Середнє значення кількісної ознаки (початковий момент першого порядку) дорівнює:

$$m_1' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_g} \theta_i + \sum_{i=1}^{n_m} \theta_{i_m}}{n_g + n_m}. \quad (2.3)$$

Позначимо

$$n_g / n_m = \nu, \quad (2.4)$$

тоді  $\frac{1}{n_g + n_m} = \frac{\nu}{n_g(\nu + 1)}$ , а вираження (2.6) з обліком (2.7) прийме вид

$$m_1' = \frac{\nu}{1 + \nu} \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_g} \theta_i}{n_g} + \frac{\sum_{i=1}^{n_m} \theta_{i,m}}{n_g} \right) = \frac{\nu}{1 + \nu} \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_g} \theta_i}{n_g} + \frac{\sum_{i=1}^{n_m} \theta_i f(\alpha)}{n_g} \right) = \frac{\nu}{1 + \nu} \left( m_1 + \frac{1}{\nu} f(\theta) m_1 \right) = m_1 \frac{\nu + f(\theta)}{\nu + 1}.$$

Величина  $\nu$  може бути представлена у виді:

$$\nu = l_m / l_0, \quad (2.5)$$

де  $l_m$  і  $l_0$  - середня відстань між тріщинами і характерний розмір зразка відповідно. Тоді вона може бути легко визначена експериментально.

Таким чином, початкові моменти першого порядку для вихідного і «виправленого» (доповненого порушеними елементами) статистичного ряду зв'язані співвідношенням:

$$m_1' = K_1 m_1, \quad (2.6)$$

де

$$K_1 = \frac{\nu + f(\theta)}{\nu + 1} = \frac{\frac{l_m}{l_0} + f(\theta)}{\frac{l_m}{l_0} + 1}. \quad (2.7)$$

Найважливішим параметром статистичного розподілу є дисперсія, що характеризує розкид даних щодо середнього. Дисперсія являє собою центральний момент другого порядку, що, як відомо, зв'язаний з початковими моментами першого і другого порядків:

$$D' = \mu_2' = m_2' - (m_1')^2. \quad (2.8)$$

Момент першого порядку визначається формулою (2.6). Знайдемо момент другого порядку для «виправленого» ряду:

$$m_2' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_g} \theta_i^2 + \sum_{i=1}^{n_m} (\theta_i f(\theta))^2}{n_g + n_m} = , \quad (2.9)$$

$$= \frac{\nu}{1 + \nu} \left( m_2 + \frac{1}{\nu} f^2(\theta) m_2 \right) = K_2 m_2$$

де

$$K_2 = \frac{\nu + f^2(\theta)}{\nu + 1} = \frac{\frac{l_m}{l_0} + f^2(\theta)}{\frac{l_m}{l_0} + 1} .$$

Можна показати, що всі початкові моменти  $k$ -го порядку «виправленого» і вихідного ряду зв'язані співвідношенням:

$$m_k' = K_k m_k , \quad (2.10)$$

де

$$K_k = \frac{\nu + f^k(\theta)}{\nu + 1} = \frac{\frac{l_m}{l_0} + f^k(\theta)}{\frac{l_m}{l_0} + 1} . \quad (2.11)$$

В окремому випадку, якщо припустити значення механічної характеристики  $\theta$  порушених елементів рівної нулеві, коефіцієнт впливу тріщин однаковий для всіх початкових моментів:

$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots K_k = K = \frac{\frac{l_m}{l_0}}{\frac{l_m}{l_0} + 1} = \frac{l_m}{l_m + l_0} . \quad (2.12)$$

Величина  $K$  змінюється в межах від 0,5 ( $l_m = l_0$  - сильно тріщинувате середовище) до 1,0 ( $l_m \rightarrow \infty$  - нетріщинувате середовище)



Таким чином, дисперсія «виправленого» варіаційного ряду дорівнює:

$$D' = \mu'_2 = K_2 m_2 - K_1^2 m_1^2. \quad (2.13)$$

Розглянемо це питання для випадку, коли  $f(\theta) = 0$ , тобто в припущенні, що механічна характеристика дефектних елементів близька нулеві. Коефіцієнт варіації звичайного випробування (без обліку порушених зразків) визначається формулою:

$$\eta = \frac{\sqrt{D}}{m_1}.$$

Уведемо позначення

$$A_k = m_k / m_1^k, \quad (2.14)$$

тоді

$$\eta^2 = \frac{m_2 - m_1^2}{m_1^2} = A_2 - 1,$$

відкіля

$$A_2 = \eta^2 + 1.$$

З (2.13), з обліком (2.14), одержимо вираз для відносної варіації «виправленого» варіаційного ряду, тобто для варіації міцності структурно неоднорідного масиву. У припущенні, що механічна характеристика дефектних елементів дорівнює нулеві ( $f(\theta) = 0$ ) вираз для відносної варіації механічної характеристики  $\theta$  буде мати вигляд:

$$\eta' = \frac{\sqrt{D'}}{m_1'} = \sqrt{\frac{\nu+1}{\nu} A_2 - 1} = \sqrt{\frac{l_m + l_0}{l_m} (\eta^2 + 1) - 1}. \quad (2.15)$$

На рис. 2.3 показані графіки значення коефіцієнта варіації  $\eta'$  в залежності від щільності тріщин  $\nu$  і ступеня внутрішньої неоднорідності породного середовища  $A_2 = f(\eta)$ .

Якщо думати, що дефектні елементи все-таки зберігають деякі властивості ( $f(\theta) \neq 0$ ) відносна варіація «виправленого» ряду буде визначатися виразом:

$$\eta' = \frac{\sqrt{D'}}{m_1'} = \sqrt{\frac{K_2 m_2 - K_1^2 m_1^2}{K_1^2 m_1^2}} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1^2} A_2 - 1} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1^2} (\eta^2 + 1) - 1} \quad (2.16)$$

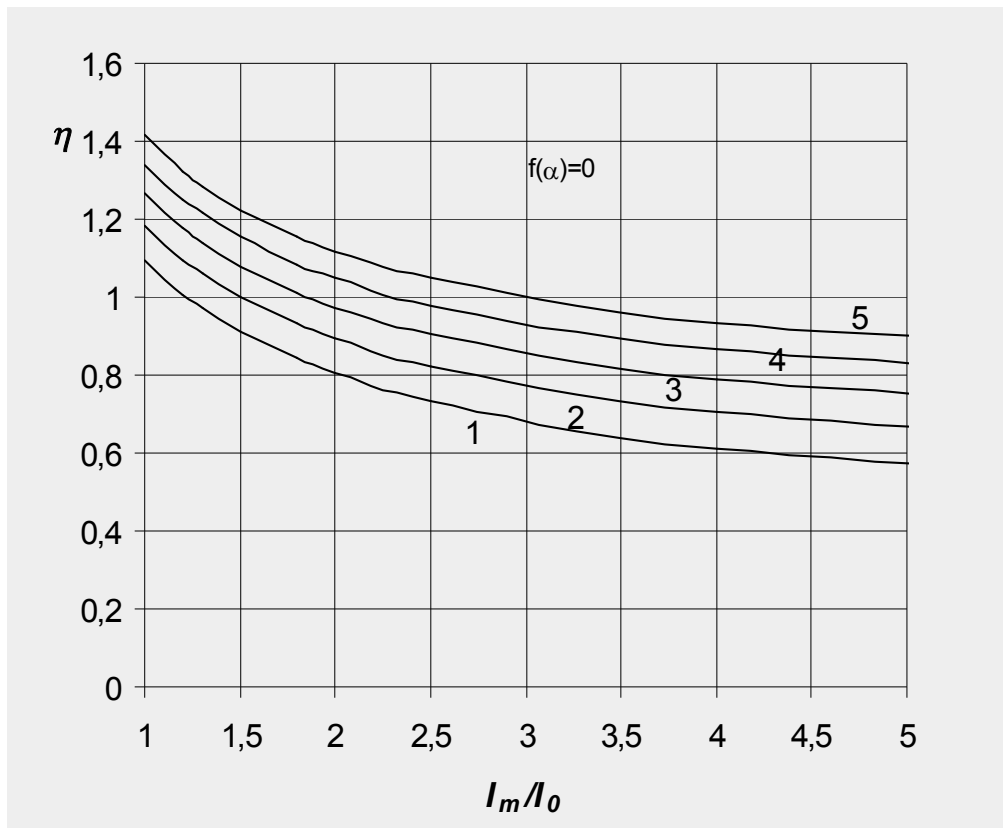


Рисунок 2.3 - Залежність коефіцієнта варіації тріщинуватого масиву від відстані між тріщинами і ступенем неоднорідності середовища в припущенні, що механічна характеристика дефектних елементів дорівнює нулеві:

1, 2, 3, 4, 5 – при  $A_2 = 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$  відповідно

Наступним етапом досліджень є установлення впливу макродефектів на вигляд імовірнісного розподілу механічної характеристики структурних елементів.

### 2.3 Висновки

Наявність макродефектів (систем тріщин) у породному середовищі збільшує розкид значень характеристик властивостей порід у залежності від щільності тріщин.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРІЩИНУВАТОСТІ ПОРОДНОГО МАСИВУ НА ІМОВІРНІСНИЙ РОЗПОДІЛ ОСНОВНИХ МІЦНІСНИХ І ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІРСЬКИХ ПОРІД

3.1 Вплив наявності макродефектів на імовірнісний розподіл властивостей порід

Вище вказувалося, що підбор розподілу для емпіричних даних може бути здійснений за допомогою діаграми Пирсона, на якій представлені теоретичні розподіли в залежності від характерних для них значень асиметрії й ексцесу. Останні визначаються центральними моментами третього і четвертого порядків. У свою чергу центральні моменти можуть бути виражені через початкові :

$$\begin{aligned}\mu_2 &= m_2 - m_1^2 \\ \mu_3 &= m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3 \\ \mu_4 &= m_4 - 4m_3m_1 + 6m_2m_1^2 - 3m_1^4\end{aligned}\tag{3.1}$$

Для нормального розподілу всі початкові моменти непарних порядків дорівнюють нулеві. Звідси виходять відомі співвідношення:

$$\beta_1^2 = \frac{\mu_3^2}{\mu_2^3} = 0;\tag{3.2}$$

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = 3.\tag{3.3}$$

Визначимо з цих умов, як повинні співвідноситися між собою моменти симетричного (нормального) розподілу. З другого рівняння (3.1) і умови (3.2) одержимо, що

$$\mu_3 = m_3 - 3m_2m_1 + 2m_1^3 = 0$$

або 
$$\frac{m_3}{m_1^3} = 3 \frac{m_2}{m_1^2} - 2. \quad (3.4)$$

Для випадку, коли  $m_1 \neq 0$  можна використовувати позначення (2.14) і перетворити (3.4) до виду:

$$A_3 = 3A_2 - 2. \quad (3.5)$$

З третього рівняння (3.1) і умови (3.3) одержимо:

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = \frac{m_4 - 4m_3m_1 + 6m_2m_1^2 - 3m_1^4}{m_2 - m_1^2} = 3. \quad (3.6)$$

При  $m_1 \neq 0$  виносячи загальний множник  $m_1^4$  у чисельнику і знаменнику дробу і використовуючи (2.14) перетворимо останнє рівняння до виду:

$$\frac{A_4 - 4A_3 + 6A_2 - 3}{(A_2 - 1)^2} = 3,$$

відкіля при  $A_2 \neq 1$ , одержимо:

$$A_4 = 3A_2 - 2. \quad (3.7)$$

Рівняння (3.4), (3.6), або отримані з них (3.5) і (3.7) утворять систему, який повинні задовольняти моменти розподілу, для того щоб воно було нормальним.

Наприклад, якщо математичне чекання нормального розподілу дорівнює нулеві ( $m_1 = 0$ ), те при будь-якому значенні  $m_2$  одержимо, що  $m_3 = 0$ , а  $m_4 = 3m_2^2$ .

Нехай математичне чекання відмінне від нуля, наприклад,  $m_1 = 1$ , і відомо, що  $A_2 = 2$ . Тоді з (3.5) випливає, що  $A_3 = 4$ , а з (3.4)  $A_2 = 10$ . Відповідно для початкових моментів одержимо:  $m_2 = 2$ ;  $m_3 = 4$ ;  $m_4 = 10$ .

При таких значеннях моментів розподіл має асиметрію й ексцесом, що задовольняють рівнянням (3.2), (3.3), тобто є нормальним. Проаналізуємо, як

зміниться цей розподіл, якщо буде враховано, що в статистичну сукупність, для якої воно побудовано, додадуться елементи зі значно меншою міцністю.

Як було показано вище, початкові моменти звичайного варіаційного ряду  $(m_k)$  і «виправленого»  $(m'_k)$  зв'язані співвідношенням (2.10).

Тоді вираження (2.20) для центральних моментів приймуть вид:

$$\begin{aligned}\mu'_2 &= K_2 m_2 - K_1^2 m_1^2; \\ \mu'_3 &= K_3 m_3 - 3K_1 K_2 m_2 m_1 + 2K_1^3 m_1^3; \\ \mu'_4 &= K_4 m_4 - 4K_3 K_1 m_3 m_1 + 6K_2 K_1^2 m_2 m_1^2 - 3K_1^4 m_1^4.\end{aligned}\quad (3.8)$$

Як бачимо присутність елементів, порушених макродефектами, змінює всі моменти розподілу, у тому числі і ті, котрі визначають собою асиметрію й ексцес. З урахуванням співвідношень (3.1) і (2.11) показник асиметрії можна виразити через відносні величини:

$$\beta_1^2 = \frac{(A_3 - 3A_2 + 2)^2}{(A_2 - 1)^3}.$$

Для «виправленого» ряду, у який внесені елементи з макродефектами, одержимо

$$A'_2 = \frac{K_2 m_2}{K_1^2 m_1^2} = \frac{K_2}{K_1^2} A_2; \quad A'_3 = \frac{K_3 m_3}{K_1^3 m_1^3} = \frac{K_3}{K_1^3} A_3; \quad A'_4 = \frac{K_4 m_4}{K_1^4 m_1^4} = \frac{K_4}{K_1^4} A_4.$$

Тоді

$$\beta_1^{2'} = \frac{\left( \frac{K_3}{K_1^3} A_3 - 3 \frac{K_2}{K_1^2} A_2 + 2 \right)^2}{\left( \frac{K_2}{K_1^2} A_2 - 1 \right)^3}.\quad (3.9)$$

Аналогічно одержимо вираження для показника ексцесу

$$\beta_2' = \frac{\frac{K_4}{K_1^4} A_4 - 4 \frac{K_3}{K_1^3} A_3 + 6 \frac{K_2}{K_1^2} A_2 - 3}{\left( \frac{K_2}{K_1^2} A_2 - 1 \right)^2}.\quad (3.10)$$

Якщо думати, що механічна характеристика порушеного структурного елемента дорівнює нулеві (тобто  $K_1 = K_2 = \dots = K$ ) одержимо формули (3.9) і (3.10) у більш простому виді:

$$\beta_1^{2'} = \frac{\left(\frac{1}{K^2} A_3 - 3\frac{1}{K} A_2 + 2\right)^2}{\left(\frac{1}{K} A_2 - 1\right)^3} \quad (3.11)$$

$$\beta_2^{'} = \frac{\frac{1}{K^3} A_4 - 4\frac{1}{K^2} A_3 + 6\frac{1}{K} A_2 - 3}{\left(\frac{1}{K} A_2 - 1\right)^2} \quad (3.12)$$

Якщо вихідний розподіл симетрично, то з обліком (3.5) і (3.7) одержимо, що показники асиметрії й ексцесу «виправленого» ряду залежать тільки від відносної величини  $A_2$ , що зв'язана з варіацією значень випадкової величини ( $A_2 = \eta^2 + 1$ ).

Досліджуємо, як впливає наявність макродефектів на закон розподілу міцності структурних елементів масиву. Як і в попередній задачі для простоти викладу будемо думати, що міцність дефектних елементів близька нулеві. У цьому випадку коефіцієнт впливу тріщин визначається формулою (2.12).

Визначимо для розглянутого вище приклада моменти «виправленого ряду» по формулах (3.8) для різних значень відстані між тріщинами, і підрахуємо відповідні коефіцієнти асиметрії й ексцесу (табл. 3.1).

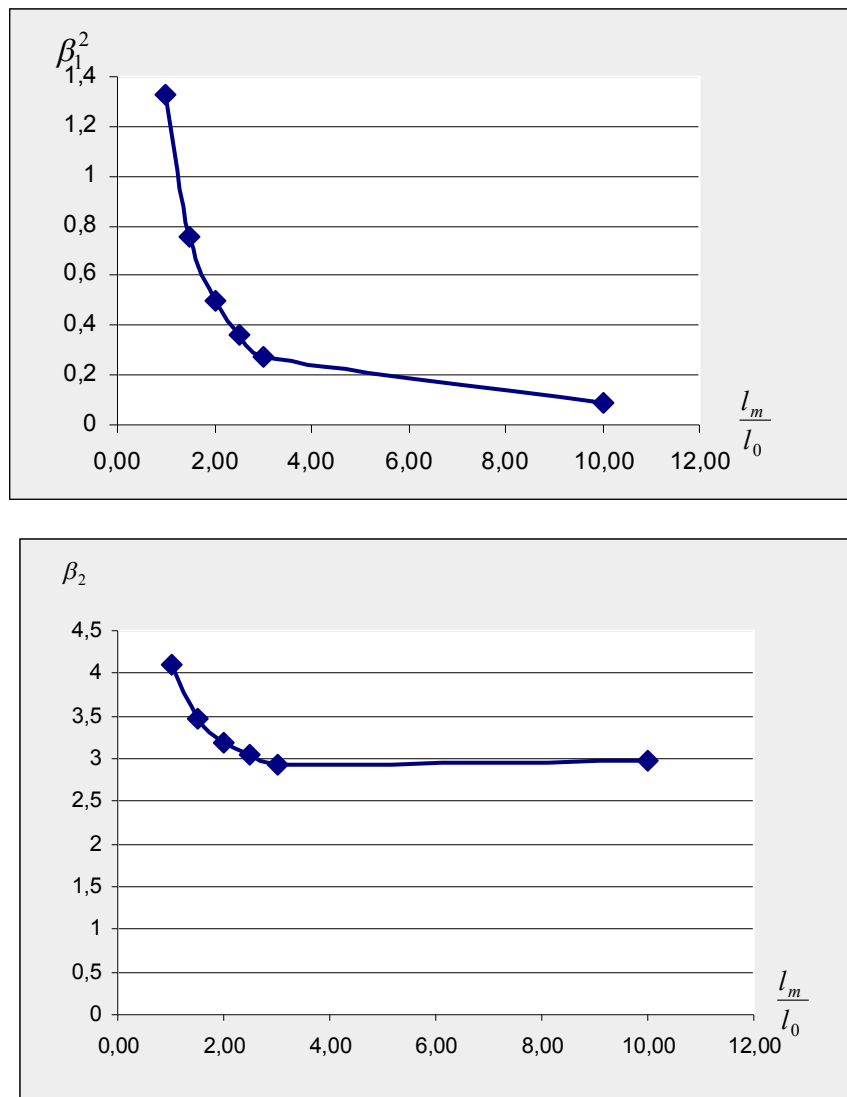


Рисунок 3.1 - Залежність моментів «виправленого ряду» від відстані між тріщинами

Таблиця 3.1 - Значення «виправлених» показників асиметрії й ексцесу для вихідного розподілу з параметром  $A_2=2$

| $\frac{l_m}{l_0}$ | $\nu$ | $\beta_1^2$ | $\beta_2$ |
|-------------------|-------|-------------|-----------|
| 1,0               | 0,5   | 1,33        | 4,11      |
| 1,5               | 0,6   | 0,76        | 3,46      |
| 2                 | 0,66  | 0,5         | 3,19      |
| 2,5               | 0,71  | 0,36        | 3,05      |
| 3                 | 0,75  | 0,27        | 2,92      |
| 10                | 0,9   | 0,09        | 2,97      |



З графіків видно, що зі зменшенням відстані між тріщинами  $l_m$ , тобто з ростом інтенсивності тріщин, значення асиметрії й ексцесу збільшуються. Точки з координатами  $(\beta_1^2, \beta_2)$ , нанесені на графік Пирсона, зі збільшенням щільності тріщин усе більш віддаляються від крапки, що відповідає нормальному закону (рис. 3.2). Траєкторія руху крапки для заданого значення  $A_2$  проходить поблизу ліній, що відповідають гамма-розподілові і розподілові Вейбулла. При інших сполученнях моментів симетричного розподілу (наприклад, при  $A_2 = 3$ ) значення асиметрії й ексцесу такі, що рух точки здійснюється поблизу лінії логарифмічно нормального розподілу (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Значення «виправлених» показників асиметрії й ексцесу для вихідного розподілу з параметром  $A_2=3$

| $\frac{l_m}{l_0}$ | $\nu$ | $\beta_1^2$ | $\beta_2$ |
|-------------------|-------|-------------|-----------|
| 1,0               | 0,5   | 1,15        | 4,83      |
| 1,5               | 0,6   | 0,65        | 4,05      |
| 2                 | 0,66  | 0,42        | 3,69      |
| 2,5               | 0,71  | 0,30        | 3,50      |
| 3                 | 0,75  | 0,22        | 3,38      |
| 10                | 0,9   | 0,03        | 3,05      |

Штучне внесення елементів з нульовою міцністю в статистичний ряд змінює значення асиметрії й ексцесу, а отже і вид розподілу. З рисунка 3.2 видно, що зі зменшенням відстані між тріщинами відхилення від симетричного розподілу стає усе більш значним.

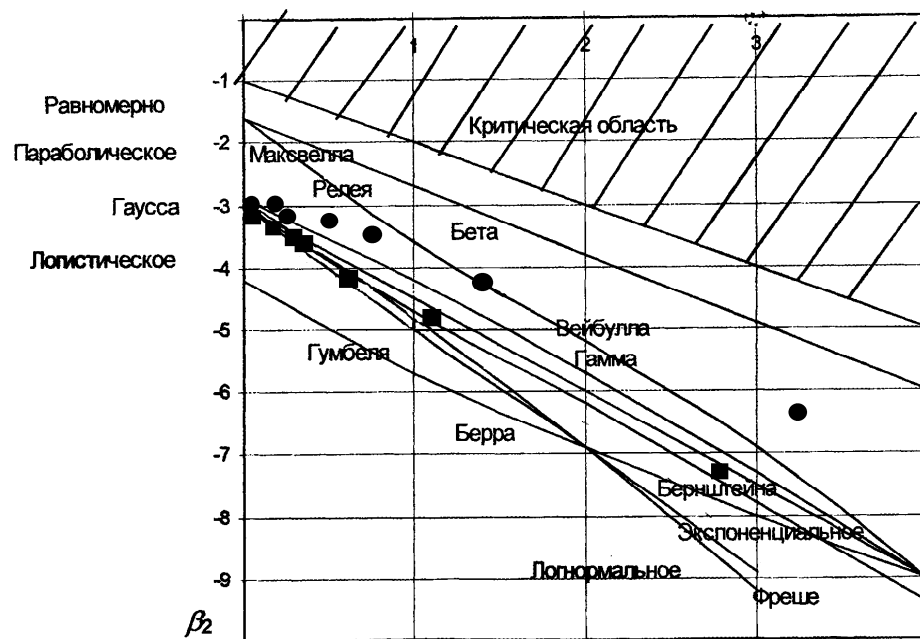


Рисунок 3.2 - Диаграмма Пирсона с точками для статистических распределений, у які умовно внесені елементи з макродефектами:

- - точки, що відповідають вихідному рядові зі співвідношенням початкових моментів  $A_2=2$ ;
- - точки, що відповідають вихідному рядові зі співвідношенням початкових моментів  $A_2=3$

Таким чином, наявність тріщин у реальному породному масиві не тільки впливає на статистичні оцінки досліджуваної кількісної ознаки, але і змінює закон розподілу імовірностей усіх його механічних параметрів. Вид «виправленого» розподілу залежить від співвідношень початкових моментів вихідного статистичного розподілу, отриманого як результат випробування непорушених структурних елементів. Ступінь відхилення міцності елементів від симетричного розподілу визначається відстанню між тріщинами.

### 3.2 Висновки

1. Наявність макродефектів змінює розподіл імовірностей кількісної ознаки, що характеризує властивості породного масиву. Значення асиметрії й ексцесу розподілів нелінійно залежать від відстані між тріщинами в породному середовищі і ступені внутрішньої неоднорідності структурних елементів масиву.
2. Моделювання мінливості фізичних властивостей породного середовища в геомеханічних розрахунках вимагає обґрунтованого вибору відповідної ймовірносно-статистичної моделі з урахуванням наявності в реальному неоднорідному масиві макродефектів з регулярною щільністю.

## 4 РОЗРОБКА ЙМОВІРНІСНОЇ МОДЕЛІ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНОГО ПОРОДНОГО МАСИВУ

### 4.1 Обґрунтування можливості моделювання статистичного розподілу властивостей гірських порід

Природною властивістю гірських порід є їх неоднорідність, що виявляється на різних рівнях.

Дослідження, виконані в попередньому розділі, показують, що для гірських порід навіть у межах однієї літологічної різниці характерний значний розкид фізико-механічних властивостей, що спостерігається при іспиті породних зразків. Так виявляється неоднорідність мікрорівнів (дефекти кристалічних решіток), а також мезорівня (мікротріщини, пори) [19-27]. Неоднорідність макрорівня – тріщини, розміри яких порівнянні з розмірами оголення, тобто істотно порушують структуру породного масиву, і як було показано в розділі 2, впливають на статистичні оцінки властивостей порід, збільшуючи величину їх варіації щодо середнього.

Поставимо мету розробити алгоритм обліку неоднорідностей розглянутих рівнів при визначенні напружено-деформованого стану породного масиву, що вміщає виробку. Основною спрямованістю такого алгоритму є можливість безпосереднього моделювання неоднорідності породного середовища, що виявляється як стохастичний розкид значень деформаційних і міцнісних характеристик у кожній точці розглянутої області. Можливість такого моделювання забезпечує використання чисельних методів механіки твердого тіла, найбільш апробованим з яких у задачах геомеханіки є метод скінчених елементів [28-38].

### 4.2 Основні положення методу скінчених елементів

Метод скінчених елементів є одним з досить простих і універсальних методів рішення задач механіки, у тому числі і механіки гірських порід. До

переваг даного методу можна віднести можливість використовувати різні типи і розміри елементів, вузлові точки можуть розташовуватися довільно, а число їх може регулюватися [39-41]. Мається можливість для кожного скінченного елемента задавати практично не обмежене число параметрів для найбільш точного опису його поведінки, що відповідає властивостям гірських порід. Відповідно до інтегральної форми висновку жорсткісних характеристик елемента можна домогтися кращих наближень до заданих граничних умов. Стосовно до задач механіки гірських порід метод скінчених елементів дає можливість більш природно врахувати структурні особливості гірського масиву, такі як неоднорідність, тріщинуватість, шаруватість і інші. Так само до переваг МСЕ можна віднести і те, що після постановки конкретної задачі й апроксимації досліджуваної області скінченими елементами процес наступного розрахунку будується за стандартним зразком.

Досліджувана система складається із сукупності частин, названих скінченими елементами. Ці елементи з'єднані один з одним у дискретну модель, в окремих точках, названих вузлами.

Скінчені елементи структури мають досить просту форму, для якої напружено-деформований стан є вивченим і може бути виражено алгебраїчними співвідношеннями між компонентами сил і компонентами переміщень через жорсткісні коефіцієнти. Ці співвідношення названі співвідношеннями твердості.

Оскільки кожен скінчений елемент має кілька вузлів, зазначені співвідношення твердості є фактично сукупністю співвідношень, тобто системою рівнянь. Обмежуючи системами з малими деформаціями з матеріалів, що підкоряються закону Гука, одержимо лінійну систему рівнянь, що може бути записана в матричній формі:

$$[K_e]\{q_e\} = \{F_e\}, \quad (4.1)$$

де  $[K_e]$  - матриця твердості з постійними коефіцієнтами, що залежать від матеріалу і від форми елемента;

$\{q_e\}$  - вектор, що складають який є вузловими переміщеннями елемента;

$\{F_e\}$  - вектор, що складають який є вузловими силами.

Рішення задач механіки методом скінчених елементів (МСЕ) засновано на застосуванні наближених методів обчислень, методів матричної і лінійної алгебри.

При рішенні задач по МСЕ можна виділити такі основні етапи:

- побудова функціонала;
- розчленовування системи на скінчені елементи, для кожного з яких ставиться у відповідність їхні фізико-механічні характеристики;
- вибір координатних функцій;
- побудова матриць твердості;
- приведення місцевого навантаження для кожного скінченого елемента;
- побудова канонічних рівнянь і їх рішення;
- визначення напружено-деформованого стану.

Стосовно до рішення задачі про протяжну гірничу виробку, досліджувана область являє собою перетин виробки, перпендикулярне її подовжньої осі і розбивається на плоскі трикутні або чотирикутні елементи одиничної товщини  $h$ , взаємодіючі між собою через дотичні точки – вузли. У межах кожного скінченого елемента масив передбачається однорідним і пружним.

Усі види навантажень, що діють на досліджувану область і формують у ній визначений напружено-деформований стан, приводяться до статично еквівалентних сил, прикладеним у вузлових крапках. На зовнішньому контурі розглянутої області масиву і на контурі виробки задаються поверхневі сили  $F_n$ , що у випадку відсутності поверхневих навантажень дорівнюють нулеві, а переміщення вузлових точок контуру невідомі.

Метод скінчених елементів дозволяє розглядати напруження і переміщення в неоднорідних середовищах, досліджувати, наприклад,

взаємодію кріплення з гірським масивом, з урахуванням реальної форми досліджуваної області і деформаційних показників кріплення і масиву. Породний масив, що вміщає закріплену або незакріплену виробку, у свою чергу може мати ділянки з різною твердістю, зв'язані з особливостями його структури і неоднорідності складу гірських порід. Для того щоб повною мірою врахувати неоднорідність породного масиву параметрам кожного елемента або групи елементів можна привласнювати різні значення, у тому числі випадкові, котрі можуть бути генеровані відповідно до визначеного закону розподілу.

Блок-схема програми, що реалізує метод скінчених елементів (рис. 4.1), має вигляд:

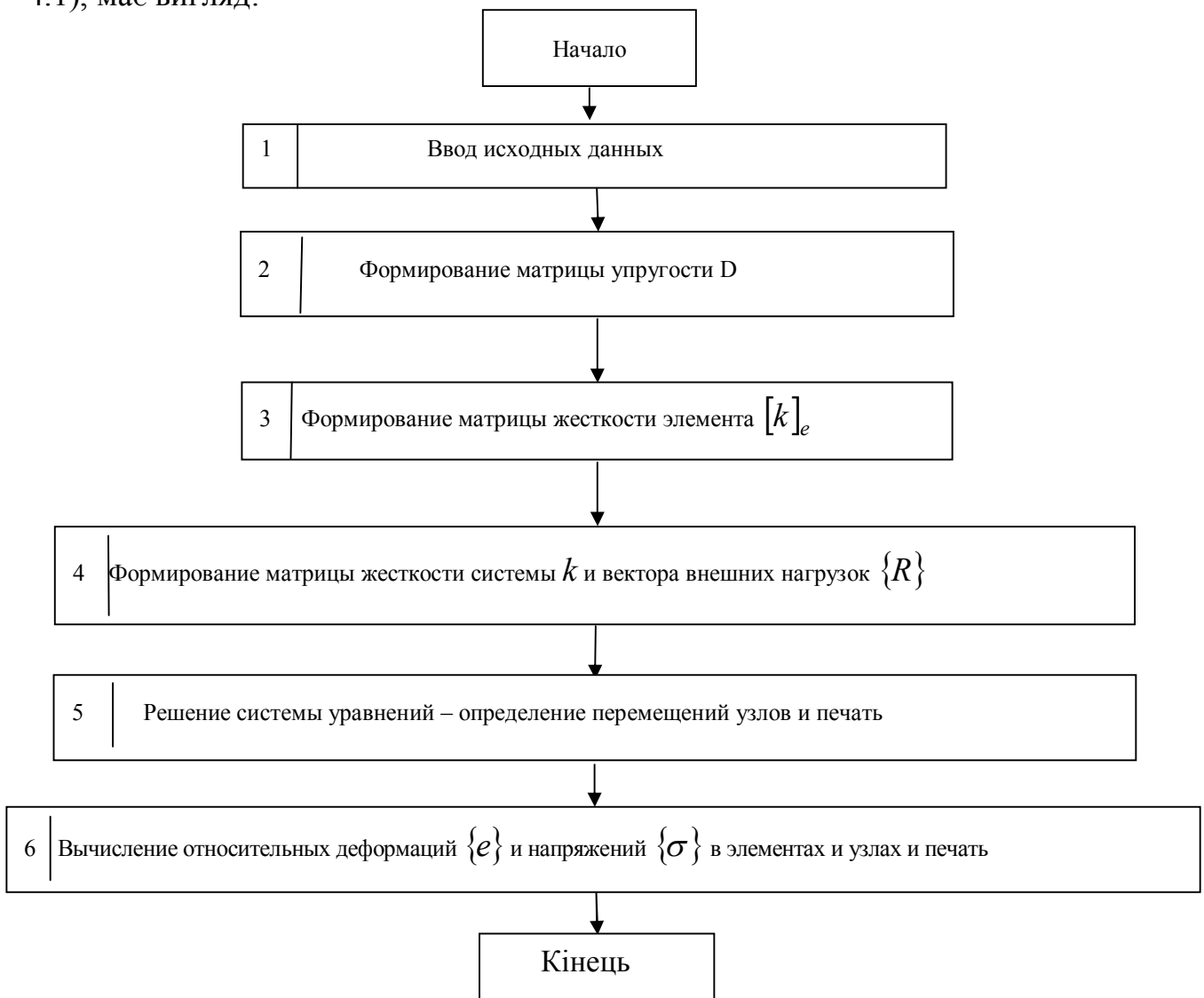


Рисунок 4.1 - Блок схема програми розрахунку МСЕ

Вихідна інформація, що вводиться в розрахункову схему, складається з наступних параметрів: число скінчених елементів, на які розбивається досліджувана область; загальне число вузлів і координати цих вузлів, що утворюються при цьому, розбивці; число типів елементів з різними фізико-механічними властивостями; значення фізико-механічних властивостей для кожної групи елементів, значення напружень і переміщень, що характеризують граничні умови.

Кожній групі елементів варто привласнити різні значення фізико-механічних властивостей, для того щоб відбити в такий спосіб неоднорідність породного середовища навколо виробки.

Ці різні значення повинні відбивати випадковий розподіл властивостей, характерне для даної породи. У рамках методу скінчених елементів цю процедуру можна здійснити за допомогою датчиків випадкових чисел, що для кожної групи елементів будуть генерувати випадкові значення фізико-механічних констант відповідно до того або іншого закону розподілу.

Таким чином, для відображення реальних властивостей середовища буде притягнуте так назване імітаційне моделювання.

#### 4.3 Моделювання статистичного розподілу властивостей. Метод інверсії

Сутність імітаційного моделювання складається в проведенні на обчислювальній машині статистичного експерименту з моделлю досліджуваної системи. Одержувані в результаті експерименту числові характеристики процесу функціонування системи піддаються статистичній обробці, підсумкові дані якої і є шукані оцінки рішення задачі. Модель системи являє собою програмну реалізацію алгоритму функціонування елементів системи з урахуванням їх взаємодії між собою і з зовнішнім середовищем. Таким чином, імітаційне моделювання дозволяє зробити висновки про досліджувані процеси, аналогічні висновкам, отриманим на основі натурного експерименту, оскільки в числовій формі імітує його проведення.



Реалізація моделювання зводиться до імітації за допомогою числової моделі на ЕОМ випадкових моментів часу здійснення деяких подій і випадкових значень параметрів процесів, що повинні задовольняти встановленим для них законам розподілу.

Для моделювання випадкових процесів на ЕОМ необхідно одержувати послідовності випадкових чисел, підлеглих заданим законам розподілу. Для одержання випадкових чисел застосовують три способи: фізичний, табличний і програмний.

Найбільше поширення в моделюванні знайшов програмний спосіб, при якому випадкові числа генеруються за допомогою спеціальних підпрограм, що одержали назву датчиків випадкових чисел. Датчик реалізує рекурсивну процедуру одержання випадкового числа за вхідним випадковим числом: задається перше (вхідне) випадкове число, за допомогою якого датчик генерує друге; при повторному звертанні до датчика друге число є вхідним, і з нього за тім же алгоритмом формується третє і т.д. Особливість програмного способу в тому, що послідовність випадкових чисел може бути відтворена багаторазово, якщо генерація починається з того самого вхідного числа. Тому випадкові числа, одержувані програмним способом, називають псевдоімовірним.

Для одержання випадкових чисел, підлеглих будь-якому закону розподілу, використовують послідовності некорельованих між собою випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі  $(0, 1)$ . Розглянемо основні властивості рівномірного розподілу. Безперервна випадкова величина  $y$  має рівномірний розподіл в інтервалі  $(a, b)$ , якщо її функція щільності дорівнює

$$f(y) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a < y < b \\ 0 & \text{за цим інтервалом} \end{cases} \quad (4.2)$$

Функція розподілу випадкової величини  $y$  має вигляд:

$$F(y) = \begin{cases} 0, & y \leq a, \\ \frac{y-a}{b-a}, & a < y < b \\ 1, & y \geq b. \end{cases} \quad (4.3)$$

Математичне чекання  $M[y]$  і середнє квадратичне відхилення  $\sigma_y$  відповідно рівні:

$$M[y] = \frac{a+b}{2}, \quad \sigma_y = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}. \quad (4.4)$$

У практиці імітаційного моделювання для одержання рівномірно розподілених випадкових чисел знайшов застосування програмний датчик Девіса [42, 43].

Для одержання випадкових чисел  $x$ , підлеглих різним законам розподілу  $F(x)$ , застосовують метод інверсії. Підставою для застосування цього методу служить той факт, що функція розподілу  $F(x)$  – однозначна функція  $x$  і рівномірно розподілена в інтервалі  $(0, 1)$ . Дорівняємо значення  $F(x)$ , що відповідає величині  $x$ , що імітується, до випадкового числа  $R$ , що генерується датчиком Девіса:

$$R = F(x). \quad (4.5)$$

Вирішуючи це рівняння відносно  $x$ , одержуємо:

$$x = F^{-1}(R) \quad (4.6)$$

Оскільки  $R$  – випадкове число, то  $x$  також буде випадковим числом, причому з послідовності рівномірно розподілених чисел  $R_1, R_2, \dots$  за формулою (4.6) буде отримана послідовність випадкових чисел  $x_1, x_2, \dots$ , що задовольняє функції розподілу  $F(x)$ .

Зупинимось більш докладно на алгоритмі одержання випадкових чисел, підлеглих нормальному закону розподілу з математичним чеканням  $a$  і середнім квадратичним відхиленням  $\sigma$ .

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4.7)$$

При багаторазовому звертанні до датчика Девіса буде отримана послідовність випадкових чисел  $R_1, R_2, \dots$ , рівномірно розподілених в інтервалі  $(0, 1)$  з математичним чеканням  $M[R] = 0,5$  і дисперсією  $D[R] = 1/12$ . Для одержання послідовності нормально розподілених випадкових чисел скористаємося центральною граничною теоремою теорії імовірностей, відповідно до якої сума  $m$  випадкових чисел є випадкова величина, асимптотично підпорядковується нормальному закону розподілу. Практично досить прийняти  $m=10\dots15$ . Таким чином,  $Z = \sum_{i=1}^m R_i$  -нормально розподілена випадкова величина з  $M[Z] = m/2$  і  $D[Z] = m/12$ . Для одержання нормально розподілених випадкових чисел  $x$  з математичним чеканням  $M[x] = 0$  і дисперсією  $D[x]=1$  приймемо  $m=12$  і скористаємося формулою

$$x = \sum_{i=1}^m R_i - 6.$$

Для одержання випадкових величин з різними законами розподілу використовуються нормовані випадкові величини, що мають рівномірний розподіл ( $R_U$ ) в інтервалі  $(0, 1)$  і нормальний розподіл ( $R_N$ ) з параметрами  $M = 0$  і  $D = 1$ . Випадкову величину  $y$  з довільною щільністю розподілу  $f(y)$  можна одержати шляхом рішення рівняння  $R_U = \int_{-\infty}^y f(x)dx$  відносно  $y$ . Цей метод прийнятний у випадку коли інтегрування можна виконати в явному виді й одержуване рівняння легко розв'язне.

Другий підхід складається у використанні відомих співвідношень між розподілом випадкової величини, що повинна бути отримана, і випадковими величинами, що мають нормальне і рівномірне розподіли. Наприклад, випадкову величину, розподілену по логарифмічно нормальному закону можна одержати в такий спосіб:

$$y = e^{\sigma R_N + \mu},$$

а для одержання випадкової величини имеющей гамма-розподіл скористаємося

наступним співвідношенням:  $y = -\frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{\eta} \ln(1 - R_{U_i})$ .

Цей алгоритм використовувався в методі кінцевих елементів з метою завдання для різних груп елементів різних значень фізико-механічних характеристик.

Блок-схема розрахункового алгоритму приведена на мал. 4.2

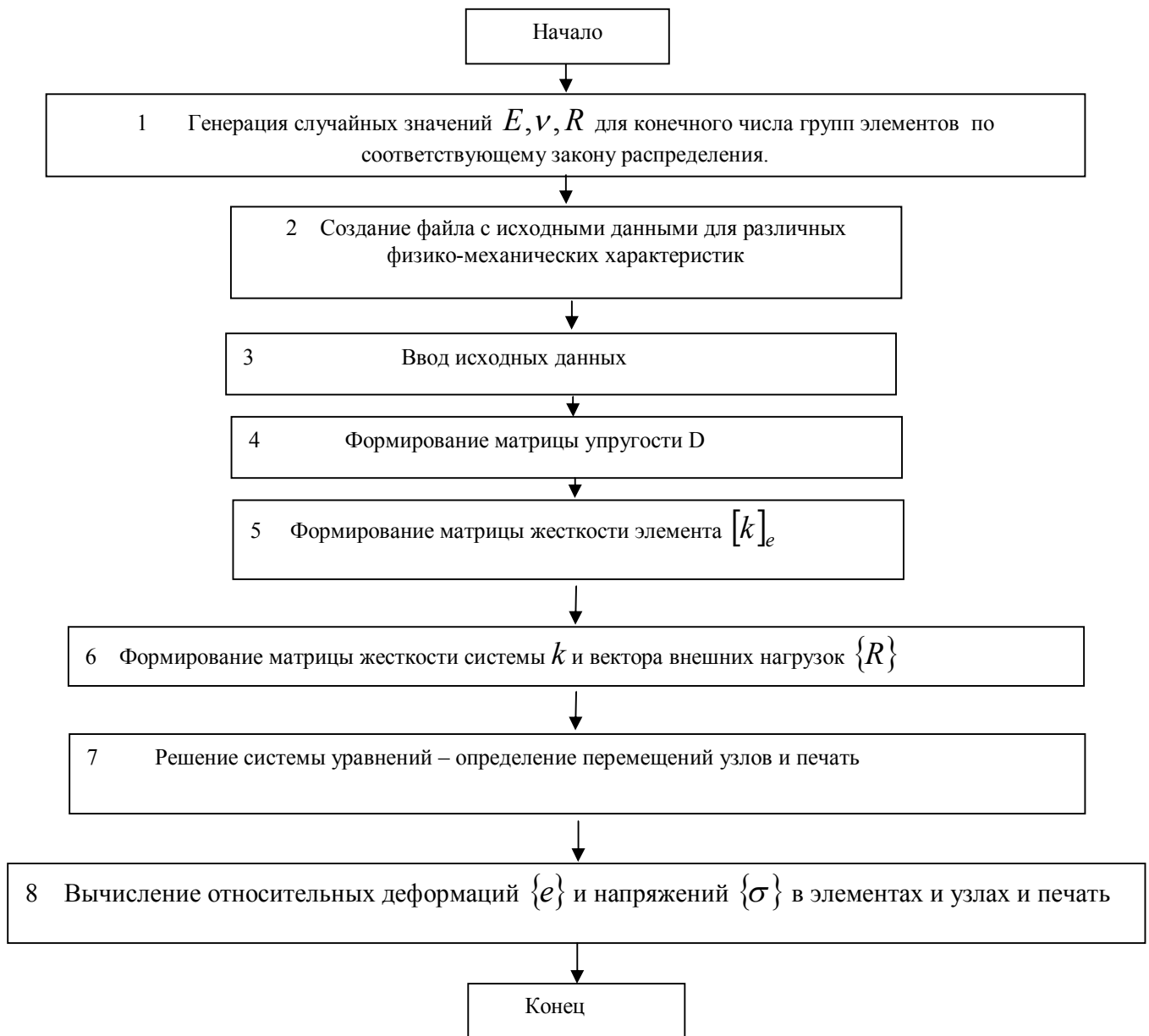


Рисунок 4.2 - Блок-схема розрахункового алгоритму, для рішення задачі з випадковими вихідними даними

Для відображення варіації властивостей породного масиву в алгоритм МСЕ включений модуль, що реалізує в кожному скінченному елементі генерацію випадкових значень модуля пружності, коефіцієнта Пуассона і межі міцності на одноосьовий стиск відповідно до визначеного закону розподілу. Після цього обчислення проводяться за стандартним алгоритмом.

#### 4.4 Дослідження впливу варіації вихідних даних на величину переміщень контуру виробки на основі лінійної деформаційної моделі середовища

На першому етапі розрахунків вплив природного розкиду вихідних даних досліджувалося на моделі пружного середовища. Лінійне деформування відповідно до закону Гука визначають такі константи як модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона. Щоб простежити вплив варіації цих факторів на результати розрахунків, тобто переміщення контуру виробки, була обрана найбільш проста розрахункова схема, а саме – плоский перетин одиночної виробки круглої форми, що деформується під дією вище лежачих шарів.

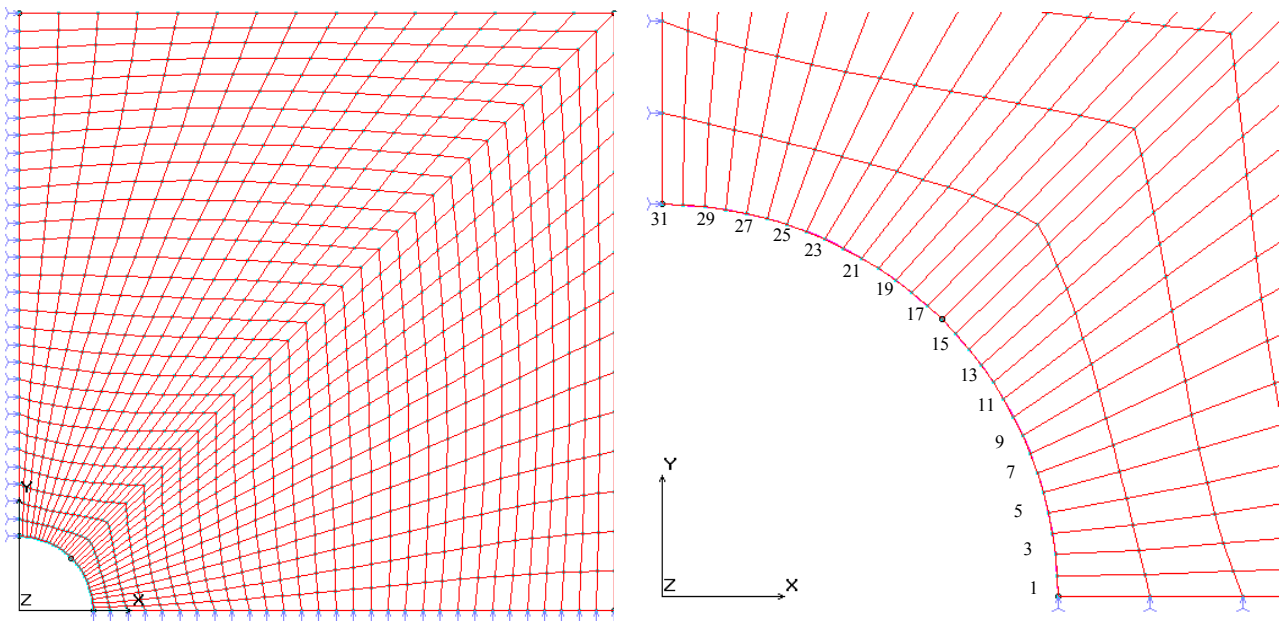


Рисунок 4.3 - Скінчено-елементна апроксимація досліджуваної області

Використовуючи властивість симетричності досліджуваної області, і забороняючи переміщення моделі уздовж осей  $OX$  і  $OY$ , як показано на рис. 4.3, на прикладі розгляду чверті області можна бачити картину розподілу напружень і переміщень у цілому. Представлена область описується скінчено-елементною сіткою, що складається з 900 елементів чотирикутної форми. Для кожного вузла обчислюються переміщення  $U_x$ ,  $U_y$  по осях  $OX$ ,  $OY$  і результуючі переміщення  $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ , величина напружень і деформацій в центрі ваги кожного елемента.

По верхній горизонтальній границі області задавалося рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю  $q = 500 \text{ т/м}^2$ , що відповідає ваги вщележачих шарів ( $\gamma H = 500 \text{ т/м}^2$ ). Повні напруження на контурі виробки дорівнюють нулеві.

Тестовий розрахунок виконувався для однорідного середовища. Картина розподілу переміщень точок однорідного масиву, що характеризується усередненими значеннями модуля пружності і коефіцієнта Пуассона, представлена на рис. 4.4.

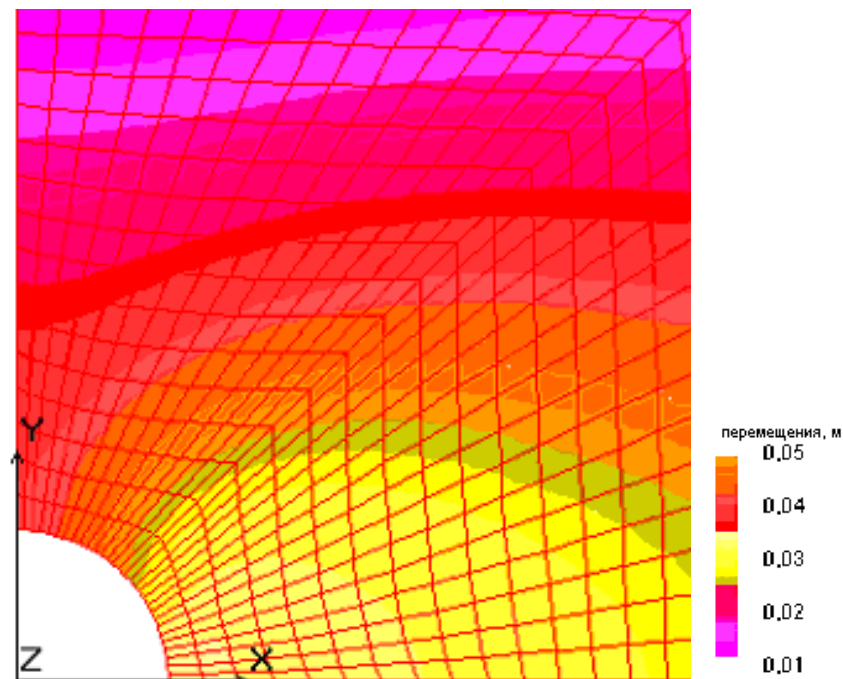


Рисунок 4.4 - Розподіл переміщень у випадку однорідного масиву ( $E=7000 \text{ МПа}$ ,  $\nu=0,25$ )

Максимальне результуюче переміщення контуру виробки має місце у вузлах № 29, 30. Його величина складає 0,05 м.

Перейдемо тепер до моделювання неоднорідного середовища.

4.4.1 Дослідження впливу варіації модуля пружності на розподіл переміщень

Вище вказувалося, що основною деформаційною характеристикою гірських порід є модуль пружності. У розділі 2 показано, що варіація цієї величини значна і може досягати 70% для деяких типів гірських порід (аргіліти, алевроліти) і вугілля.

Виникає питання, чи впливає такий розкид значень деформаційних властивостей на переміщення контуру виробки. Досліджуємо цей вплив, додаючи різним точкам середовища різні значення модуля пружності з заданим розкидом. В обчислювальній процедурі це означає, що для кожної групи елементів датчик випадкових чисел буде генерувати випадкові значення модуля пружності в заданих межах, причому генерувати них за тим законом розподілу імовірностей, що описує емпіричні дані. Логічним представляється в ході обчислювального експерименту використовувати з метою порівняння прості статистичні моделі. Зокрема, використовуючи нормальний розподіл, припускаємо, що деформаційні властивості середовища з більшою імовірністю описуються середнім значенням, варіюючи щодо цього середнього в межах 30-40%. Однак, таке припущення не відповідає дійсності.

Аналіз емпіричних розподілів цієї величини, виконаний у розділі 2 показав, що коефіцієнт асиметрії вивчених розподілів приймає досить великі значення, з чого випливає, що використання нормального закону розподілу для опису модуля пружності приведе до великих погрешностей обчислень. Виходячи з даних приведених на мал. 2.8, для модуля пружності першого роду найбільш підходящою моделлю був би  $\beta$  – розподіл. Цей розподіл має три параметри, тому воно може охоплювати значну область емпіричних розподілів. При визначених сполученнях параметрів форми і масштабу воно вироджується

в рівномірний розподіл. Рівномірний закон розподілу імовірностей можна розглядати, умовно говорячи, як «гірший випадок». Рівномірна щільність (4.2) означає, що випадкова величина  $Y$  з однаковою імовірністю прийме будь-як значення з інтервалу  $[a, b]$ . У такий спосіб воно характеризує найбільш непередбачену появу значень кількісної ознаки з деякого діапазону.

Випадкові значення модуля пружності  $E$  привласнювалися групам елементів, на які була розбита вся досліджувана область (всього 90 груп).

За допомогою програмного датчика генерувалися рівномірно розподілені випадкові числа, з варіацією 33%, 50% і 75 %. При варіації  $\eta_E = 0,33$  отримана картина розподілу переміщень, що якісно не відрізняється від переміщень в однорідному масиві, але максимальні результуючі переміщення на контурі внаслідок статистичного розкиду значень модуля пружності збільшилися на 4 %.

При варіації модуля пружності в межах 50% ( $\eta_E = 0,5$ ) по рівномірному законі відбувається збільшення максимального переміщення на контурі виробки на 7%.

При варіації  $\eta_E = 0,75$ , картина переміщень у найбільшій мері відрізняється від результатів, отриманих при рішенні задачі з постійним значенням модуля пружності і коефіцієнта Пуассона (рис. 4.5).

Однак, максимальне результуюче переміщення на контурі виробки також має місце у вузлах № 29, 30. Його величина склала 0,056 м. Таким чином, варіація модуля пружності в межах 75% по рівномірному законі приводить до збільшення максимального переміщення на контурі виробки на 9 %.

Рисунок 4.6 ілюструє узагальнення розрахунків даного напрямку і відбиває вплив мінливості модуля пружності на величину переміщень контуру виробки.



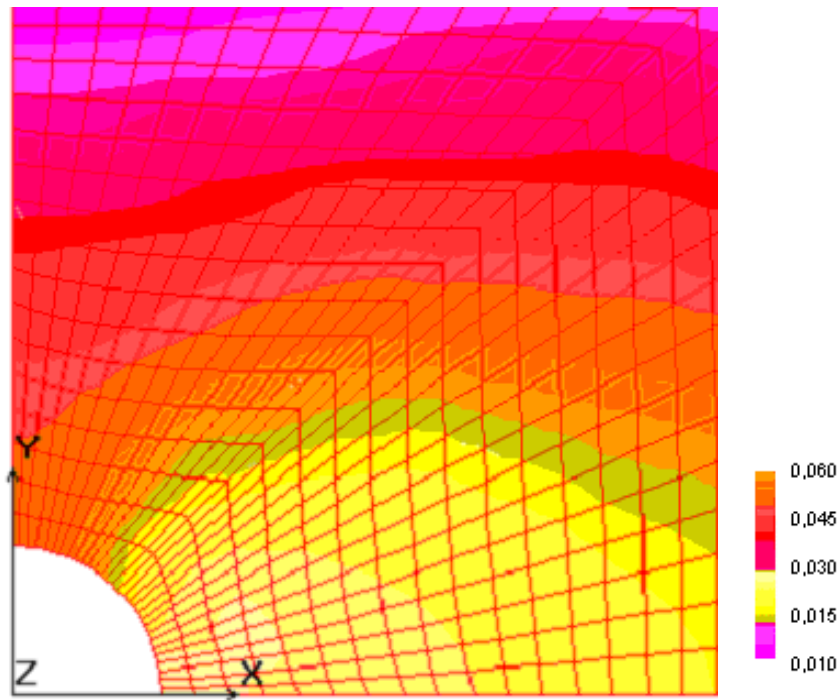


Рисунок 4.5 - Розподіл переміщень у випадку неоднорідного масиву  
( $\eta_E = 75\%$ , коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,25$ )

По осі X відкладені значення відносної варіації модуля пружності, а по осі Y – збільшення результуючих переміщень на контурі виробки, що обчислюється за формулою  $\eta_{\Delta U} = \frac{\Delta U}{U_{\max}^{\text{одн}}} \cdot 100\%$ . Остання величина характеризує зміну переміщень неоднорідного масиву в порівнянні з однорідним. Тут  $\Delta U = U_{\max}^{\text{неодн}} - U_{\max}^{\text{одн}}$  - різниця між максимальним переміщенням контуру виробки в неоднорідному масиві і його ж максимальним переміщенням в однорідному середовищі.

Приведена залежність апроксимується виразом  $Y = 8,366 \ln(X) + 13,15$  з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,99$ .

Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок: величина збільшення результуючих переміщень контуру виробки в неоднорідному середовищі нелінійно зв'язане з відносною варіацією модуля пружності, що описується залежністю логарифмічного виду.

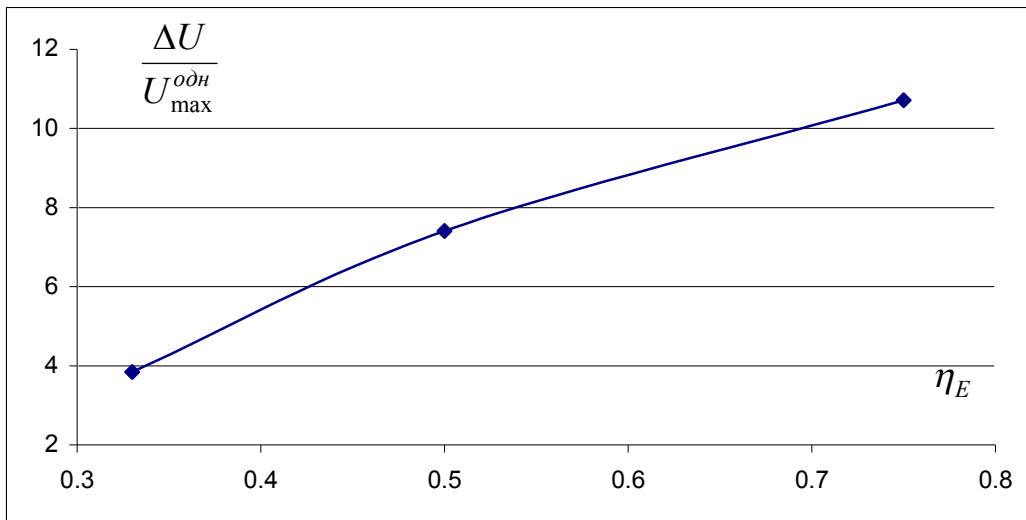


Рисунок 4.6 - Вплив варіації модуля пружності на збільшення результуючих переміщень контуру вироблення круглої форми

4.4.2 Дослідження впливу варіації коефіцієнта Пуассона і модуля пружності на розподіл переміщень

Напружено-деформований стан приконтурного масиву при негідростатичному полі напружень визначається значенням коефіцієнта Пуассону. Як показали дослідження, наведені в розділі 2, цей параметр також варіюється в широких межах. Однак відносна варіація коефіцієнта Пуассону не перевищує 40 % і коефіцієнт асиметрії приймає досить малі значення, що дозволяє зробити висновок про гіпотетичний розподіл даної величини за нормальним законом.

При генерації значень коефіцієнта Пуассона  $\nu$  з варіацією 33% за нормальним законом з математичним чеканням  $M(\nu) = 0,25$  була отримана картина переміщень, що мало відрізняється від варіанта, отриманого при постійному значенні коефіцієнта Пуассона і модуля пружності. Максимальне результуюче переміщення на контурі виробки також як і в попередніх розрахунках, має місце у вузлах № 29, 30. Воно склало 0,0515 м. Тобто, мінливість коефіцієнта Пуассона в межах 33% викликає незначне (до 3-4%) збільшення максимального переміщення на контурі виробки.

Найбільш адекватної реальності є моделювання мінливості обох механічних характеристик.

Одночасне моделювання мінливості модуля пружності і коефіцієнта Пуассона при варіації коефіцієнта Пуассона  $\eta_v = 0,33$  і модуля пружності  $\eta_E = 0,33$  приводить до збільшення максимального результуючого переміщення на контурі виробки на 0,0036 м, що не перевищує 6%.

При моделюванні мінливості коефіцієнта Пуассона з коефіцієнтом варіації  $\eta_v = 0,33$  і модуля пружності з варіацією  $\eta_E = 0,5$  і  $\eta_E = 0,75$  збільшення максимального переміщення склало 8% і 10% відповідно.

Таким чином, мінливість обох характеристик призводить до збільшення максимальних переміщень контуру виробки в межах, характерних для реальних статистичних сукупностей, на 10% у порівнянні з однорідним лінійно-пружним масивом з усередненими фізико-механічними характеристиками.

На рис 4.7 представлена залежність збільшення максимального переміщення на контурі вироблення від варіації модуля пружності за умови, що у всіх випадках мінливість коефіцієнта Пуассона складала 33%.

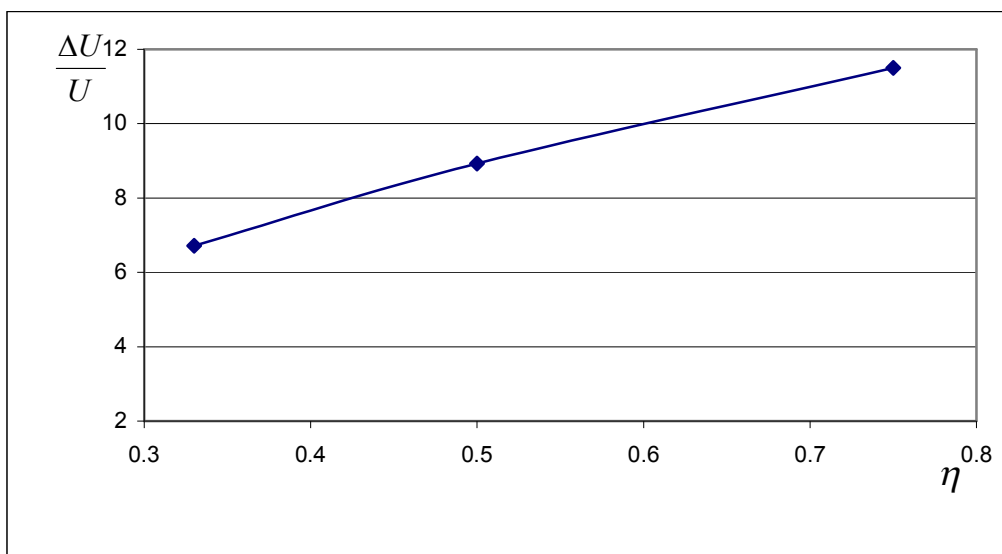


Рисунок 4.7 - Вплив варіації модуля пружності і коефіцієнта Пуассона на збільшення результуючих переміщень контуру виробки круглої форми

Дана залежність також апроксимується логарифмічною функцією  $Y = 5,829\ln(x)+13,109$ , з величиною вірогідності апроксимації  $R^2 = 0,98$ .

4.5 Вплив форми виробки на картину розподілу переміщень з обліком стохастичного розподілу властивостей

Попередні розрахунки були виконані для найбільш простої розрахункової схеми – плоского перетину виробки круглої форми. Для підготовчих виробок вугільних шахт характерна аркова форма поперечного переріза. Відомо, що форма виробки впливає на напружено-деформований стан порід навколо неї. Досліджуємо, як кількісно відбиває мінливість механічних характеристик на поведження порід навколо виробки аркової форми.

Розрахункова схема в цьому випадку має тільки одну вісь симетрії, тому розглядається половина досліджуваної області (рис. 4.8). Граничні умови і деформаційні властивості середовища прийняті такими ж як і в попередніх розрахунках.

Використовуючи властивість симетричності досліджуваної області, і забороняючи переміщення моделі уздовж осі ОХ, при розгляді половини області одержимо картину розподілу напружень і переміщень у цілому. Представлена область апроксимується скінчено-елементною сіткою, що складається з 1800 елементів чотирикутної форми.

Для дослідження впливу аркової форми виробки на величину його переміщень аналогічно попереднім розрахункам використаний метод імітаційного моделювання. Для основних фізико-механічних констант значення генерувалися датчиком випадкових чисел за рівномірним і нормальним законам розподілу з різними коефіцієнтами варіації.

Картина розподілу переміщень у випадку однорідного масиву, що характеризується одним середнім значенням модуля пружності й одним значенням коефіцієнта Пуассона, представлена на рис. 4.9.

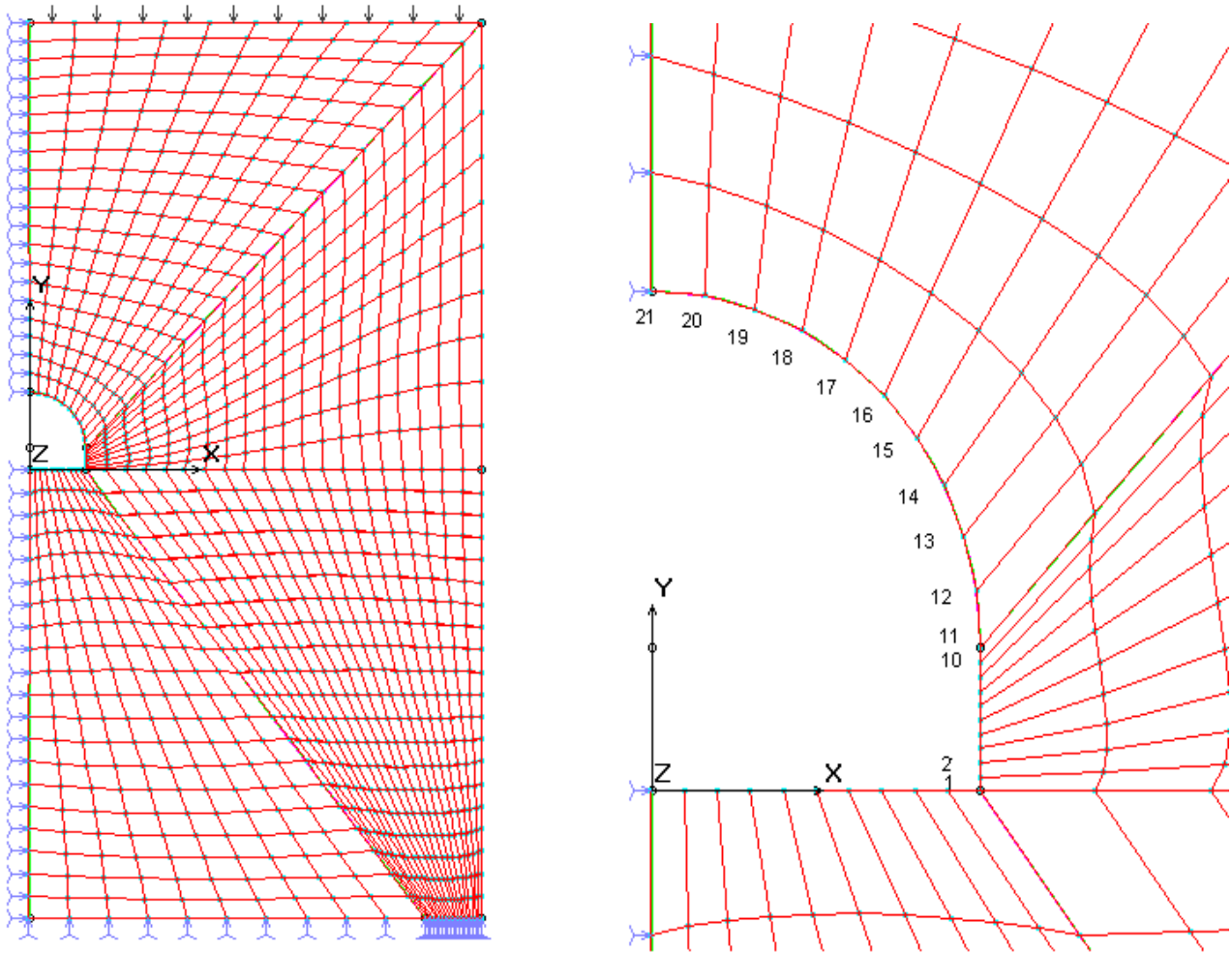


Рисунок 4.8 - Скінчено-елементна сітка моделі аркової виробки

Максимальне результуюче переміщення на контурі виробки було отримане в замку склепівня, тобто у вузлах № 20, 21. Воно склало 0,07 м. Таким чином, на прикладі однорідного масиву помітно значне збільшення переміщень на контурі аркової виробки в порівнянні з виробками круглої форми.

За аналогією з попередніми дослідженнями для оцінки впливу варіації фізико-механічних характеристик породного масиву на величину переміщень за розробленим алгоритмом генерувалися послідовності псевдоімовірних чисел відповідно до рівномірного і нормального законів розподілу. При варіації  $E$  й  $\nu$  у межах 30% максимальне результуюче переміщення на контурі виробки у вузлах № 20, 21 склало 0,078 м. Збільшення максимального переміщення на

контурі виробки в порівнянні з однорідною моделлю середовища в даному випадку склало 11 %.

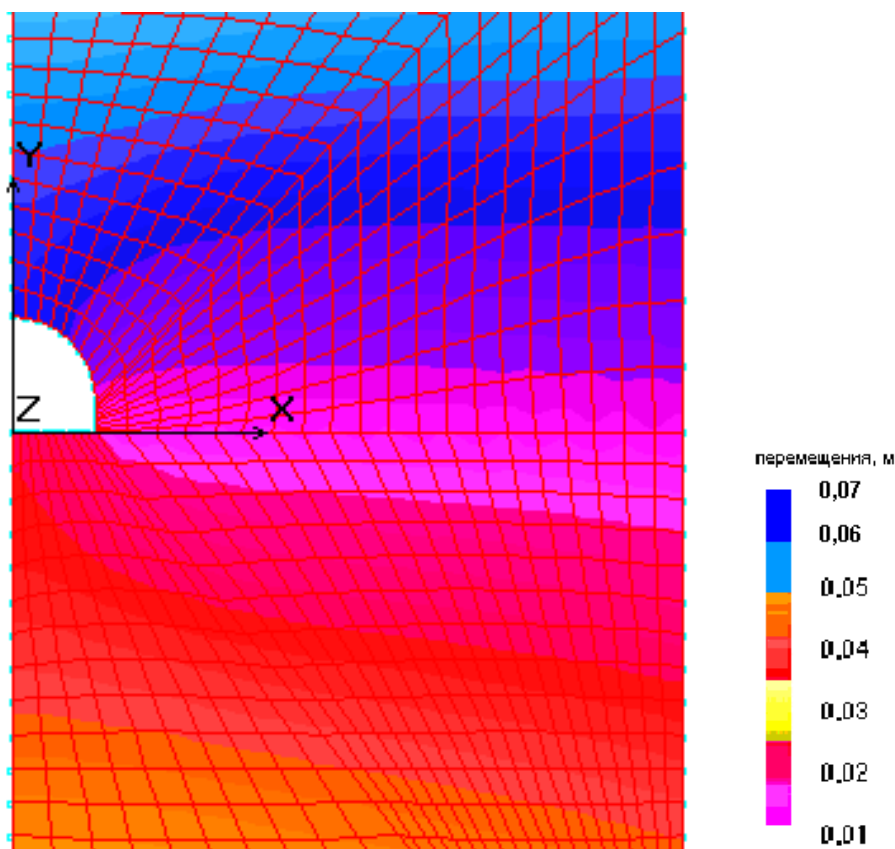


Рисунок 4.9 - Розподіл переміщень у випадку однорідного масиву  
( $E=7000\text{МПа}$ ,  $\nu=0,25$ )

При збільшенні варіації модуля пружності до 50% максимальне результуюче переміщення збільшилося до 0,081 м. Такі переміщення були отримані у вузлах № 20, 21. Отже, зміна модуля пружності в межах 50% за рівномірним законом розподілу приводить до збільшення максимального переміщення на контурі виробки на 15%. При відносній варіації модуля пружності  $\eta_E = 0,75$  максимальне збільшення переміщень контуру в порівнянні з детермінованою моделлю збільшилося до 0,015 м, що складає 21%.

Таким чином, переміщення на контурі виробки аркової форми перевищують переміщення, отримані на контурі круглої виробки, а варіація основних фізико-механічних констант у межах 75% викликає додаткове

збільшення максимального зсуву на 21%, при цьому, не змінюючи в цілому характеру переміщень точок контуру.

Залежність варіації модуля пружності в межах від 33% до 75% від варіації збільшення результуючих переміщень контуру виробки має вигляд представлений на рис. 4.10.

Дана залежність апроксимується виразом  $Y = 8,998Ln(X) + 20,095$ , з величиною вірогідності апроксимації  $R^2=0,9958$ .

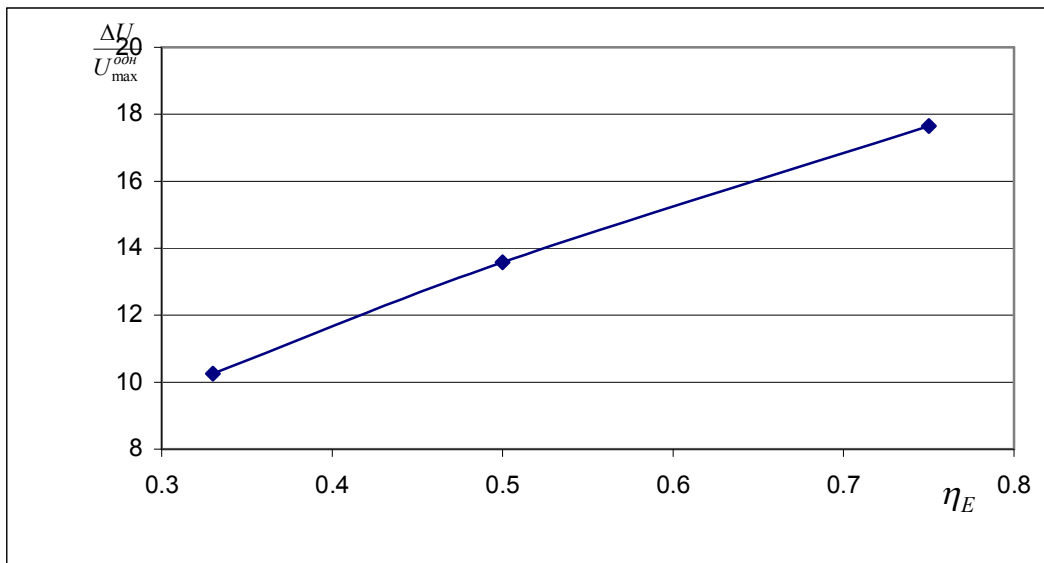


Рисунок 4.10 - Вплив варіації модуля пружності і коефіцієнта Пуассона на збільшення результуючих переміщень контуру виробки аркової форми

#### 4.6 Висновки

1. Сполучення МСЕ – ефективного чисельного методу механіки суцільних середовищ – і прийомів імітаційного моделювання дозволяє відбити в геомеханічних розрахунках неоднорідність породного масиву у вигляді мінливості фізико-механічних характеристик у різних точках середовища.
2. При використанні моделі середовища, що лінійно деформується, мінливість основних констант – модуля пружності і коефіцієнта Пуассона – не змінює якісної картини переміщень точок приконтурного масиву, але

викликає збільшення значень переміщень, зокрема, максимального переміщення в замку склепіння.

3. Збільшення зсувів, обумовлене, стохастичним розподілом властивостей порід, залежить від величини варіації цих властивостей. Установлена залежність має вигляд монотонно зростаючої функції логарифмічного виду.
4. Максимальне збільшення зсувів контуру вироблення, обумовлене мінливістю властивостей середовища, що лінійно деформується має місце в замку склепіння виробки аркової форми і складає 21% від величини зсувів цієї точки в однорідному масиві. На переміщення контуру виробки круглої форми мінливість механічних характеристик позначається незначно.



## 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР МЕТОДУ АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ ОПЕРАТИВНОГО СКАНУВАННЯ ПОРОДНОГО МАСИВУ

### 5.1 Основи системного підходу до аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву

Одному з найважливіших завдань, що вирішуються в рамках забезпечення безпечної роботи в підземних умовах, є здійснення оперативної діагностики напружено-деформованого стану тієї частини породного масиву, яка недоступна для візуальних спостережень [44].

При використанні методів акустичного контролю стану пласта зазвичай застосовуються коливальні методи діагностики, суть яких полягає в посиленні в пласт зондуючих акустичних сигналів і прийомі сигналів (прозвучування породного масиву), що повернулися з породного масиву, з подальшим їх аналізом, на основі якого робиться висновок про стан масиву. Оскільки при використанні цих методів вільні або вимушені коливання збуджуються тільки в частині породного масиву, то ці методи діагностики також класифікуються як локальні, такі, що забезпечують оперативну діагностику тільки певної частини масиву. Сигнали, прийняті з породного масиву, і, що підлягають подальшій обробці (аналізу) надалі називатимемо інформаційними сигналами.

Вільні коливання порушують шляхом короткочасної зовнішньої дії на породний масив, наприклад шляхом удару або застосуванням імпульсного акустичного генератора, після чого він коливається вільно. Вимушені коливання припускають постійний зв'язок (через перетворювач) породного масиву, що коливається, із генератором збудження, частоту якого змінюють. Вимірюваними величинами служать частоти вільних коливань або резонансів вимушених коливань, які дещо відрізняються від вільних під впливом зв'язку із генератором збудження. Ці частоти пов'язані з геометрією породного масиву і

швидкістю розповсюдження звуку в його матеріалі. Іноді вимірюють зміну амплітуди коливань при варіації частоти в широкому діапазоні частот - амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) або величини, пов'язані із загасанням коливань: амплітуди вільних або резонансних коливань, добротність коливань, ширину резонансного піку. Методи вимушених коливань, засновані на аналізі коливань системи “породний масив - перетворювач” при резонансних частотах або поблизу них, називають резонансними.

Методи акустичного контролю породного масиву, що базуються на вільних коливаннях, не набули широкого поширення, оскільки вони вимагають постійного виконання додаткових робіт, не пов'язаних безпосередньо з видобутком корисних копалин, і додаткового устаткування (генератори і т. п.). Найбільш прийнятними для завдань оперативної діагностики напружено-деформованого стану породного масиву виявилися методи, що використовують вимушені коливання, що виникають в пласті при взаємодії з ним шахтних механізмів (комбайн, бурове устаткування, відбійний молоток і т.п.) в процесі їх роботи. Вони не потребують додаткового устаткування і не вимагають виконання додаткових робіт, не пов'язаних безпосередньо з технологічним процесом. Тому вони здатні забезпечити практично безперервний контроль стану породного масиву поблизу області виконання робіт. Недоліком же цих методів є недетермінованість зондуючих акустичних сигналів, обумовлених роботою шахтного устаткування, оскільки вони істотно залежать від режиму роботи устаткування, механічних характеристик руйнованої породи і тому подібне. Це ускладнює подальший аналіз інформаційних сигналів.

Як показано в [45], джерелом коливань, що посиляються в породний масив (зондуючий сигнал) є не самі ці інструменти, а результат їх взаємодії з масивом, тобто процес руйнування (тріщиноутворення) вугілля. На рис. 5.1 наведена схема формування інформаційного акустичного сигналу в системі оперативної діагностики породного масиву.

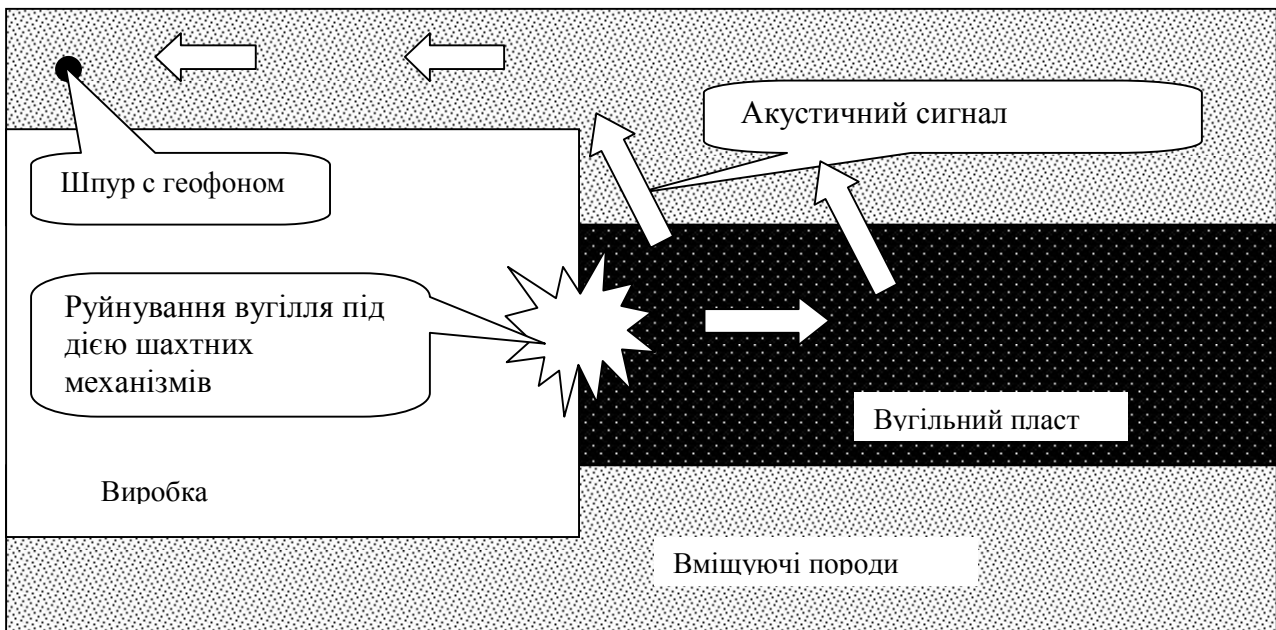


Рисунок 5.1 – Схема формування інформаційного акустичного сигналу в системі оперативної діагностики породного масиву

В результаті руйнування вугільного пласта під дією шахтних механізмів, в породному масиві виникають пружні коливання, які, по суті, і є зондуючим сигналом. Вважатимемо, що зондуючий сигнал має спектр  $S_z(j\omega)$ , де  $\omega$  – циклічна (кругова) частота ( $\omega = 2\pi f$ ), а  $j$  – уявна одиниця.

Зондуючі сигнали, проходять через призабійну область породного масиву, яка щодо зондуючого сигналу може розглядатися як акустичний фільтр з передавальною функцією  $K_m(j\omega)$ . Вид передавальної функції  $K_m(j\omega)$  визначається її коефіцієнтами. Оскільки акустичні властивості породного масиву залежать від його стану, то можна вважати, що коефіцієнти функції  $K_m(j\omega)$  також характеризують стан масиву і можуть бути використані для оцінки його стану.

Пройшовши через вугільний пласт пружні коливання, потрапляють у вміщуючі породи, які достатньо “прозорі” для цих коливань. Тому загасанням цих коливань у вміщуючих породах зазвичай нехтують. У цих породах зазвичай пробурюють шпур, в який встановлюється геофон, що перетворює ці коливання в електричний сигнал, який і є вхідним (інформаційним) сигналом для електронної оброблювальної апаратури. Якщо АЧХ геофону описується

передавальною функцією  $K_2(j\omega)$ , то спектральний склад сигналу на виході геофону  $S_2(j\omega)$ , може бути визначений за формулою:

$$S_2(j\omega) = S_3(j\omega) K_M(j\omega) K_2(j\omega). \quad (5.1)$$

На рис. 5.2 представлена структурна схема формування інформаційного акустичного сигналу.

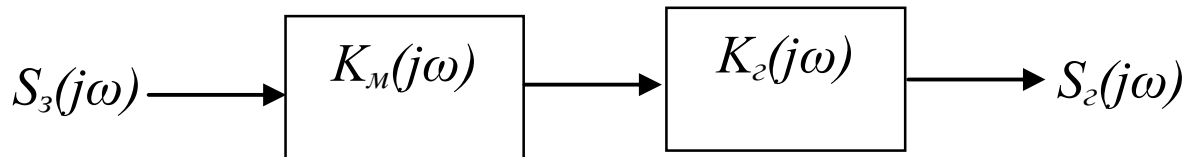


Рисунок 5.2 – Структурна схема формування інформаційного акустичного сигналу в системі оперативної діагностики породного масиву

Оскільки безпосередня реєстрація зондуючого сигналу являє значні труднощі, у багатьох випадках апіорі передбачається, що цей сигнал має шумовий характер, тобто має рівномірно розподілені спектральні компоненти  $f$  в певній смузі частот. Оскільки характеристики сигналу на виході геофону можуть бути заміряні безпосередньо, а характеристики самого геофону відомі, то при апіорі відомих характеристиках зондуючого сигналу за цими даними можна отримати акустичну передавальну функцію породного масиву:

$$K_M(j\omega) = S_2(j\omega) / [S_3(j\omega) \cdot K_2(j\omega)]. \quad (5.2)$$

Слід зазначити, що хоча можливий і безпосередній розрахунок за формулою (5.2), на практиці зазвичай переходять від спектральних уявлень до амплітудно-частотних і фазово-частотних характеристик (АЧХ і ФЧХ відповідно), які можуть бути легко отримані при обробці акустичних сигналів аналоговими методами.

Саме цей принцип і був покладений в основу апаратури акустичного контролю АК-1 [45-48]. При визначенні прогностичної ознаки викиднебезпечності за допомогою активних аналогових фільтрів виділяються амплітуди складових спектру акустичних коливань у високочастотній  $A_v$  і низькочастотній  $A_n$  областях спектрального діапазону сейсмоакустичного

сигналу. За співвідношенням цих величин і судять про рівень викиднебезпечності.

Разом з тим, попередній аналіз тимчасової структури акустичного сигналу, що формується в процесі роботи шахтних механізмів, свідчить про те, що він має на тимчасовому рівні достатньо складну структуру, яка разом з шумовою (випадковою) має і детерміновану складову [49]. У загальному випадку його можна розглядати як нестационарний багатокomпонентний сигнал з частотно-тимчасовими характеристиками, що змінюються. Тому ухвалення допущення про те, що сигнал має чисто шумовий характер, накладає певні обмеження на можливість методів оперативної діагностики напружено-деформованого стану породного масиву.

Досягнення сучасної мікроелектроніки дозволяють створювати достатньо потужні компактні пристрої для обробки цифрової інформації. Перехід до цифрових методів подання інформації дозволяє істотно ускладнити алгоритми аналізу отриманої інформації, істотно розширює можливості збереження інформації (на магнітних або оптичних носіях), підвищує перешкодостійкість систем збору і передачі інформації.

Сьогодні широке застосування отримали адаптивні методи ідентифікації систем, що дозволяють отримувати інформацію про параметри системи в умовах, коли неможливо отримати повну інформацію про пристрій системи шляхом прямого доступу до неї. Згідно [50] адаптація визначається як «процес зміни параметрів і структури системи, а можливо – і дій, що управляють, на основі поточної інформації з метою досягнення певного, зазвичай оптимального стану системи при початковій невизначеності і умовах роботи, що змінюються». Під це визначення потрапляє достатньо широкий клас систем найрізноманітнішого призначення – самонавчальні, самоналагоджувальні, екстремальні і тому подібне. Застосування сучасних мікропроцесорів і однокристальних МІКРО-ЕВМ в контурі управління такими системами дозволяє істотно розширити можливості адаптації систем в порівнянні з аналоговими адаптивними системами.

Розглянемо можливість використання таких систем для ідентифікації параметрів вуглепородного масиву.

Оскільки наявна інформація про процес (процес утворення коливань в породному масиві і формування акустичного сигналу), що ідентифікується, неповна і не дуже достовірна, ідентифікація, тобто отримання бракуючої апіорної інформації, повинна ґрунтуватися на самоналагоджувальній моделі [50] (рис. 5.3). Розглядатимемо породний масив як якийсь об'єкт (або процес), що ідентифікується, володіє деякою передавальною функцією, коефіцієнти якої відомі не повністю або недостовірні. Допустимо, що на основі деякої апіорної інформації, нами розроблена деяка математична модель, яка з певною мірою достовірності відображає структуру породного масиву. Якщо на вхід об'єкту, що ідентифікується, подати інформаційний сигнал і його ж подати на вхід моделі, то на виході об'єкту (процесу) з'явиться вихідний сигнал  $x_{aP}$  а на виході моделі – сигнал  $x_{aM}$ . Якщо порівняти ці два сигнали, то сигнал розузгодження  $\varepsilon = x_{aP} - x_{aM}$  характеризуватиме ступінь невідповідності моделі об'єкту (процесу), що ідентифікується. Самонастройка моделі полягає в модифікуванні її параметрів  $\hat{\alpha}_i$  яке здійснюється, наприклад, по мінімуму критерію якості  $I[\varepsilon(t)]$ .

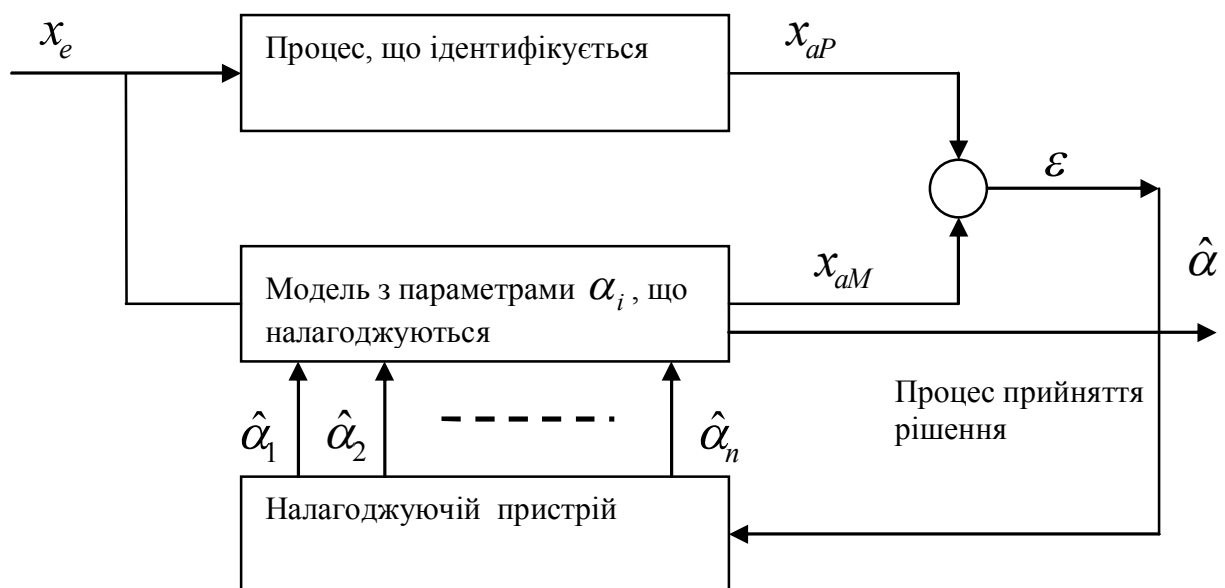


Рисунок 5.3 – Структурна схема ідентифікації з використанням самоналагоджувальної моделі

В той же час, безпосереднє використання моделі, наведеної на рис. 5.3, для ідентифікації процесу утворення інформаційного акустичного сигналу неможливо, оскільки в реальних умовах не можна отримати інформацію про вхідний сигнал  $x_e$ . Тому єдиним спостережуваним параметром процесу, що ідентифікується, є вихідний сигнал  $x_{aP}$  що знімається з геофону. Для вирішення проблеми на вхід моделі подається тестовий сигнал  $x_{eM}$  з параметрами, максимально наближеними до параметрів вхідного (що зондує) сигналу. Для цього необхідно уточнити модель формування цього сигналу. Структурна схема ідентифікації в цьому випадку прийме вигляд, наведений на рис. 5.4.

Описаний спосіб ідентифікації дозволяє моделювати процес формування сейсмоакустичного сигналу шляхом підбору параметрів моделі  $\hat{\alpha}_i$ , а також тестового вхідного сигналу  $x_{eM}$ .

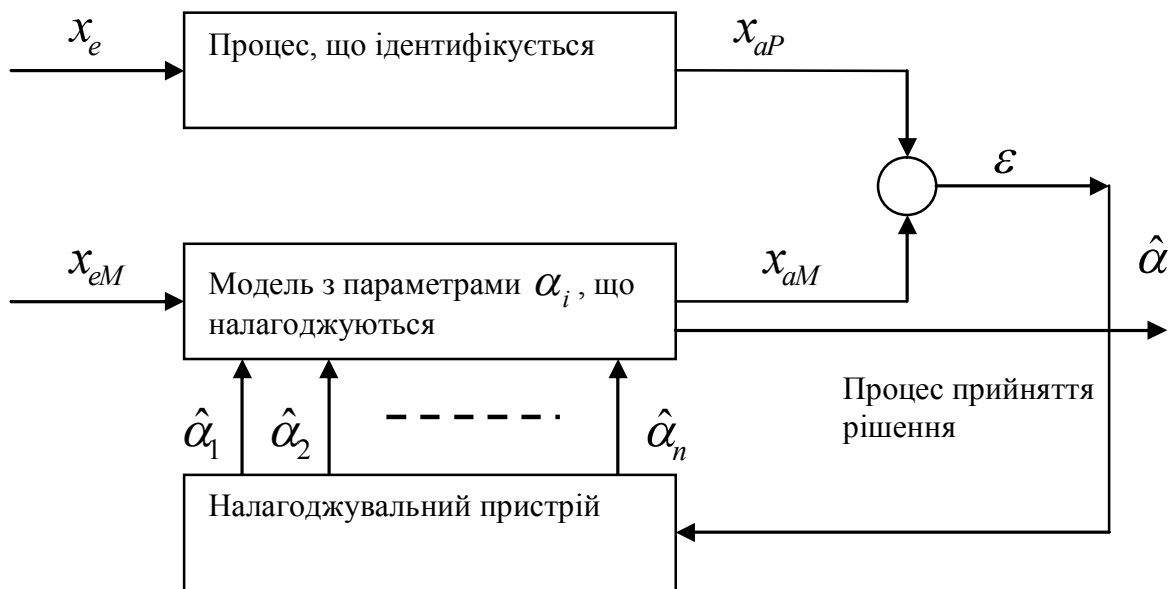


Рисунок 5.4 – Структурна схема ідентифікації процесу утворення акустичного сигналу

## 5.2 Обґрунтування методу виділення структурних особливостей акустичного сигналу

Розглянемо особливості формування інформаційного сигналу при акустичному контролі стану породного масиву.

Схема формування інформаційного сигналу у системі оперативної діагностики породного масиву, у якій враховуються тільки сигнали, що пройшли крізь породний масив, є спрощеною, оскільки не враховує інших шляхів (крізь повітряне середовище, породи, що вміщують пласт і т.п.) надходження пружних коливань на вхід геофону. Розглянемо процес формування інформаційного сигналу  $A_{inf}$  при акустичному контролі стану породного масиву більш детально.

Як зазначено вище, на вхід геофона надходять пружні коливання, що пройшли крізь досліджуваній породний масив. Оскільки саме вони несуть інформацію про стан породного масиву, електричні сигнали на виході геофону, обумовлені цими коливаннями, у подальшому називатимемо **інформативними сигналами**. Введемо для них визначення –  $A_i$ . Як показали дослідження, основна енергія акустичних сигналів, що виникають у вугіллі та породах, які вміщують пласт, (піщаниках, вапняках) у процесі ведення гірничих робіт лежить у діапазоні від 100 до 2000 Гц, а для пород типу гранітів або кварцитів розширюється у бік більш високих частот до 5-10 кГц [51].

Розглянемо пружні коливання, які розповсюджуються іншими шляхами.

По перше, це пружні коливання, обумовлені вібрацією шахтних механізмів  $A_v$ , які розповсюджуються крізь породи, що вміщують пласт, у подальшому називатимемо їх **вібраційними сигналами**. Частоти цих сигналів можуть знаходитись у межах від одиниць до кількох сотень Гц. Оскільки збудження коливань у породах, що уміщують пласт, у даному випадку здійснюється за безпосереднього контакту агрегата, що вібрає, з породою, яка у більшості випадків є досить хорошим провідником акустичних коливань і має мале затухання, ці сигнали можна використати для вирішення задач локації



(місця знаходження) шахтного механізму, наприклад, комбайну. Ця інформація може бути використана, наприклад, для уточнення місця знаходження джерела зондуючих імпульсів. Слід зазначити що, оскільки частотний діапазон цих сигналів суттєво відрізняється від частотного діапазону інформативних сигналів, апаратура, яка використовувалася для реєстрації сигналів у системі оперативної діагностики породного масиву, як правило, не реєструвала сигнали даного типу або ж реєструвала їх з суттєвими частотними спотвореннями.

Слід зазначити що в разі відповідного вибору датчиків та їх розміщення ці сигнали також можуть бути використані і для прозвучування масиву з метою діагностики його стану. За допомогою розробленої програми моделювання акустичних полів у масиві було виконане моделювання цього варіанту застосування таких сигналів.

На рис. 5.5, а показана можлива ситуація – джерело коливань розташовується на дні виробки, а геофони (кола з внутрішнім хрестом) встановлені у горішній покрівлі виробки. Нумерація датчиків – зліва направо. Датчик 1 розташований у зоні неоднородності вугільного пласта, а датчик 2 – в області однородного вугільного пласта.

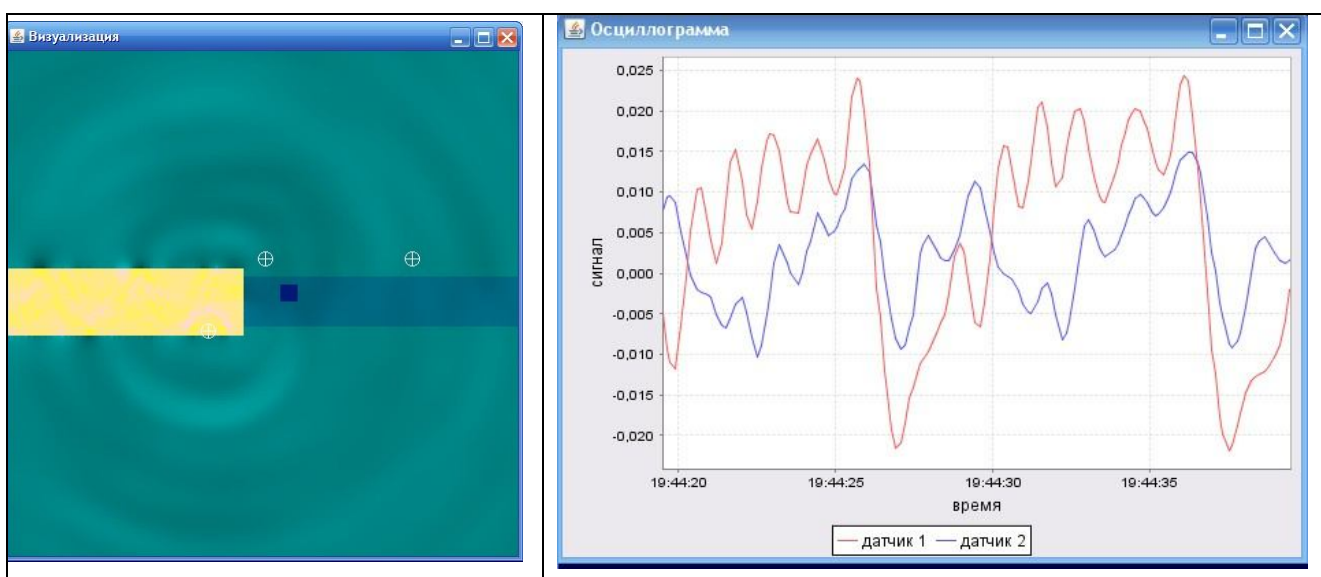


Рисунок 5.5 - Прозвучування породного масиву вібраційними сигналами  
а) – модель б) - осцилограми сигналів датчиків

На рис. 5.5, б показані осцилограми сигналів датчиків. Як видно з осцилограм, форми сигналів, що знімаються з датчиків, суттєво різні, що дозволяє використовувати такий підхід для діагностики стану масиву. Але оскільки питання використання цих сигналів для задач оперативної діагностики раніше не розглядалися, необхідне проведення подальших досліджень у цьому напрямі.

По друге, це пружні коливання, що розповсюджуються крізь повітряне середовище. Оскільки вони є акустичними звуковими коливаннями, у подальшому називатимемо їх **акустичними сигналами** і позначати -  $A_a$ . Ці сигнали також значною мірою обумовлені роботою шахтних механізмів, але, крім того, вони також обумовлюються голосами людей, подачею різних звукових сигналів, діями персоналу і т.п. Частоти цих сигналів знаходяться у межах звукового діапазону частот – від 20 до 12000 Гц. Разом з тим слід врахувати що хвильові спротиви суміжних середовищ «повітря – породи» суттєво відрізняються. Крім того, оскільки ступінь їх неспівпадіння обумовлена різницею як швидкості так і щільності середовищ, така границя розділу середовищ має яскраво виражені властивості відбивання хвиль [52]. У зв'язку з цим ступінь затухання цих сигналів на границі середовищ досить велика. Тому такі коливання зазвичай реєструються, якщо їхні джерела розташовані у найближчих зонах на невеликих відстанях від геофону. Оскільки моменти появи звукових сигналів, обумовлених діями персоналу, досить випадкові, то у більшості випадків ці сигнали можна розглядати як фонові або як перешкоди, що не несуть корисної інформації. Виключення становлять знов таки акустичні сигнали, обумовлені роботою потужних шахтних агрегатів, розташованих біля місця встановлення геофону.

Відтак, у загальному випадку, вихідний інформаційний сигнал  $A_{инф}$ , що знімається з геофону, може бути представлений як сума трьох типів сигналів: інформативного  $A_i$ , вібраційного  $A_e$  та акустичного  $A_a$ :

$$A_{инф} = A_i + A_e + A_a. \quad (5.3)$$

Кожний з цих типів сигналів у свою чергу являє собою композицію сигналів, які мають різні джерела. Деякі з цих сигналів не несуть корисної інформації і можуть розглядатися як перешкоди. Інші сигнали можуть нести корисну інформацію, яка дозволяє оцінити стан породного масиву. Низка сигналів може бути використана для отримання інформації, яка безпосередньо не стосується оцінки стану масиву, але дозволяє вирішувати задачі локації неоднородностей у масиві гірничих пород.

Слід також зазначити що при передачі інформаційного сигналу шахтними лініями зв'язку у аналоговому вигляді додатково можливе накладення перешкод з частотою, кратною частоті мережі змінного струму (50 Гц) та високочастотних перешкод від шахтного устаткування.

З вище сказаного слідує що вихідний сигнал системи оперативної діагностики напружно-деформованого стану породного масиву має досить складну часову структуру. Мультиплікативний характер цього сигналу призводить до того, що фрагменти вихідного сигналу, що відповідають різним технологічним процесам, мають різну інформативність для задач діагностики стану масиву і мусять оброблятися різними методами для визначення потрібних інформаційних ознак. Тому у загальному випадку оброблення інформаційного сигналу виконується у два етапи:

- **На першому етапі** виконується операція сегментації – первинного оброблення інформації, яка забезпечує виокремлення потрібних фрагментів інформаційного сигналу; в разі необхідності забезпечується розділення сигналу на мультиплікативні компоненти;
- **На другому етапі** для кожного з виділених фрагментів вибирається відповідний алгоритм обробки, який дозволяє отримувати параметри, що характеризують стан породного масиву.

Таким чином, загалом, мусить здійснюватися комплексний підхід до обробки інформаційного сигналу.

За своєю суттю задача сегментації інформаційного сигналу зводиться до задачі розпізнавання образів (наприклад, визначення режиму роботи

устаткування, наприклад – «комбайн – холостий хід» та визначення моменту закінчення фрагменту (наприклад, зміна режиму роботи – «холостий хід – робочий режим») Слід зазначити що, на відміну від класичної постановки задачі розпізнавання образів, у даному випадку кількість можливих образів (еталонів) обмежене, що у багатьох випадках полегшує розв’язання поставленої задачі. Сьогодні для первинної обробки сигналів зазвичай застосовують методи розвідочного аналізу і методи морфологічного аналізу сигналів.

Розвідочний аналіз сигналів – це первинна обробка результатів спостережень і експериментальних даних з ціллю подання і графічного зображення структури динаміки процесів, що спостерігаються. Динамічні системи характеризуються вихідними сигналами. Найчастіше ці сигнали є динамічними часовими рядами, які залежать від багатьох факторів і зовні не мають ознак періодичності чи іншого різновиду упорядкованості (закономірності). Такі часові ряди часто зустрічаються у задачах прогнозу різноманітних показників. У залежності від внутрішніх властивостей динамічної системи – джерела сигналів, що спостерігаються, їх можна класифікувати як детерміновані, випадкові або хаотичні. При тому у кожному окремому випадку у залежності від класу сигналу для його аналізу буде необхідно відповідні теоретичний опис, моделі і методи обробки.

Альтернативна цифрова обробка сигналів (ЦОС) у системах реального часу ґрунтується на алгоритмах, у яких використовується теорія особливостей диференційованих відображень. При цьому вихідний сигнал представляється як геометричний об’єкт (різноманітність корозмірності), що використовує теорію особливостей відображень, що диференціюються. При цьому вихідний сигнал подається як геометричний об’єкт (різноманітність корозмірності 1), а основний метод обробки полягає у порівнянні фрагменту заданої кривої з іншою кривою, будова якої локально відома.

Етимологічно морфологія сигналів є вченням про форму, структуру сигналів, які є записами фізичних процесів. Вважається що особливості форми (контур, вигляду, образу сигналу) знаходяться у прямій залежності від явища,

що спостерігається. Будова сигналу і особливості його форми не постулюються апіорі, а виявляються за допомогою відповідних алгоритмів цифрової обробки. Перша задача полягає у тому щоб, використовуючи висхідні дані, сконструювати багатократно протяжний математичний об'єкт – **різноманітність**. Сигнал – це геометричний об'єкт, тобто крива або на площині, або у просторі, або на деякій поверхні. Криві, що використовуються, можуть бути як гладкими так і фрактальними [53].

Категорії «будова сигналу» і «особливості» його форми означають що на поверхні-прообразі і на площині-образі можна вибрати локальні координати так, що у цих координатах відображення поверхні на площину запишеться у вигляді нормальних форм [54]. Відтак запис фізичного процесу (вихідний сигнал) складатиметься зі «стандартних кусків» і місць їх «склеювання». Класи (стандартні образи кусків сигналу) утворюють сукупність відносин між елементами або частинами сигналу, тобто, його структуру.

Епістеміологічно (або з теоретико-пізнавальної точки зору), морфологія сигналів використовує такі фундаментальні категорії як положення, простір, час, рух. Ці категорії створюють каркас, за допомогою якого вивчаються процеси формоутворення і закономірності побудови сигналів.

Практична реалізація морфологічного аналізу – це обробка цифрових даних, що надходять, підчас якої відбувається класифікація точок (відліків сигналу) у відомій геометричній фігурі та особливостей будови як локально навколо кожної точки, так і глобально у запису сигналу на обмеженому інтервалі.

Для успішного проектування і реалізації алгоритмів цифрової обробки сигналів (ЦОС) необхідним є математичний опис (модель) процесу, який спостерігається. У системах реального часу потрібні динамічні моделі, які визначаються в результаті прямого спостереження.

У сучасній математиці відомі два альтернативні способи визначення математичних об'єктів, які описують ті самі висхідні дані [55]. Нехай запис

процесу (сигнал) задається на площині (чи на екрані комп'ютера) у опуклій області за допомогою множини упорядкованих пар  $\langle x, y \rangle$ .

**Теоретико-множинне визначення** ототожнює сигнал із функцією, оскільки за визначенням множина упорядкованих пар  $\langle x, y \rangle$  - функція. Наносячи на площину точки з координатами  $\langle x, y \rangle$ , отримуємо криву, що має назву графіку функції  $f(x)$ . Так у теорії сигналів формальна інтерпретація стає справжнім визначенням, яке породжує представлення сигналів як елементів множини. Ця постійна (статистична) множина, з відповідним чином заданою відстанню, являє собою простір сигналів. Таке представлення і розроблені алгоритми ЦОС залишаються важливим інструментом коли розглядається добре обумовлена сукупність сигналів. Наприклад, для таких сигналів апріорі відома смуга частот і є запис сигналу заданої протяжності.

**Теоретико-категорійне визначення** полягає в указанні зовнішнього зв'язку запису сигналу з іншим об'єктом, тобто один математичний об'єкт визначається за допомогою іншого математичного об'єкту. Сукупність об'єктів і відображень – категорія. Поняття категорії і морфізму (відображення) вводиться для того щоб виділити деякі загальні властивості сигналів і їхніх відображень. Запис сигналу (вихідний об'єкт) – це крива, яка знаходиться на площині в опуклій області. Крива є однопараметричною множиною точок (різноманітність корозмірності 1). Головне тут те, що точка на лінії описується не заданнями її положення, а заданням відображення (морфізмом). Взаємне положення точок на кривій визначає окреслення або форму сигналу. Для однозначного виділення стійких особливостей форми вихідний об'єкт відображається на поверхню-прообраз. Існування універсальних відображень [54, 55] дозволяє «розвертати» вихідну криву і встановлювати локальну будову сигналу за допомогою стандартних нормальних форм (структурних шаблонів) у реальному часі.

Теоретичним обґрунтуванням алгоритмів ЦОС слугують теорія особливостей диференційованих відображень [54], теорія біфуркацій і теорія катастроф [55]. При розробці алгоритмів використовуються методи

диференціальної геометрії. Ідея, яка лежить у основі аналізу і синтезу сигналів, досить проста. Вихідний сигнал з невідомою будовою відображається на криву з заданою будовою. У цьому випадку відповідність між двома еквівалентними геометричними фігурами є взаємно однозначною і у обидва боки нерозривною. У теорії особливостей основним є поняття диференційованої еквівалентності [55]. При використанні локальних координат відповідь на запитання про диференційовану еквівалентність і дає результат роботи алгоритму ЦОС, за допомогою якого розв'язується задача перетворення одного відображення в інше шляхом гладкої заміни незалежних і залежних змінних. Таким чином сигнал склеюється з локальних кусків. Раціональний критерій для такого склеювання і відповідний алгоритм ЦОС віднаходиться для кожного сигналу. При цьому використовуються методи диференціальної топології [56].

Однією з принципових відмінностей синтезуючих алгоритмів ЦОС, які реалізують відповідність між кривими, є той факт, що форма і властивості кривої, що синтезується, відповідної заданій, визначається двома факторами: формою кривої, яка перетворюється, і властивостями самого перетворення. Іншими словами, само перетворення (відображення) наслідує особливості форми, а алгоритм ЦОС є носієм цих особливостей. Комбінація з кінцевої кількості кривих (стандартних шаблонів) і алгоритмів дозволяє аналізувати різноманітні сигнали.

### 5.3 Обґрунтування методу прогнозу раптових викидів вугілля і газу на основі аналізу акустичного сигналу при оперативному скануванні породного масиву

Як видно з виконаного вище аналізу, сейсмоакустичний сигнал, що формується при методах акустичного контролю породного масиву, має на тимчасовому рівні достатньо складну структуру. У загальному випадку його можна розглядати як нестационарний багатокomпонентний сигнал з частотно-тимчасовими характеристиками, що змінюються. І якщо для виділення прогностичної ознаки викидонебезпечності достатньо було використання

спектральних характеристик цього сигналу (при цьому передбачалося, що сигнал є квазістаціонарним), то для завдання локації структурних і силових неоднородностей породного масиву, результатом вирішення якої повинна бути побудова карти меж відзеркалювальних поверхонь на значному видаленні від оголення, цього вже явно недостатньо. Рішення задачі локації вимагає оперативної фіксації моменту зміни тимчасових характеристик сейсмоакустичного сигналу. Проте спектральні методи аналізу дають інтегральну оцінку параметрів сигналу, усереднену в часі, що не дозволяє оперативно реєструвати момент зміни характеристик сигналу. До того ж зміни параметрів сейсмоакустичних сигналів зазвичай не дуже великі, і, часто сорозмірні з рівнем перешкод, що у свою чергу ускладнює фіксацію моменту зміни характеристик сигналу. Тому для вивчення нестационарних сигналів апарат Фур'є-аналізу малопристосований, оскільки він не чутливий до тимчасового розподілу частот, а саме це і є однією з найважливіших характеристик нестационарного сигналу.

В даний час для аналізу нестационарних сигналів набули поширення два підходи: локальне (віконне) перетворення Фур'є [57, 58], і вейвлет-перетворення [58, 59].

Поняття «вейвлет» був введено в науковий обіг А. Гроссманом і Дж. Морле в середині 80-х рр. минулого сторіччя у зв'язку з необхідністю аналізу властивостей сейсмічних і акустичних сигналів, що є за своєю природою нестационарними. Наприкінці 70-х р.р. інженер-геофізик Дж. Морле зіткнувся з проблемою аналізу сигналів, які характеризувалися високочастотною компонентою протягом короткого проміжку часу і низькочастотними коливаннями при розгляді великих тимчасових масштабів. Віконні перетворення дозволяли проаналізувати або високі частоти в короткому вікні часу, або низькочастотну компоненту, але не обидва коливання одночасні. В результаті подальших досліджень був запропонований підхід, в якому для різних діапазонів частот використовувалися тимчасові вікна різної тривалості. Віконні функції виходили в результаті розтягування-стиснення і



зсуву за часом гаусиана. Морле назвав ці базисні функції *вейвлетами* (wavelets) – компактними хвилями. Надалі завдяки роботам Мейєра, І. Добечи (Добеші), Р. Койфмана, С. Малли і інших теорія вейвлетів придбала свій сучасний стан.

Вейвлет-преобразование має багато загального з перетворенням Фур'є. І в той же час є ряд істотних відмінностей. Багато труднощів, що виникають при аналізі процесів за допомогою перетворення Фур'є, пов'язано з тим, що «архітектура» реальних сигналів не може бути адекватним чином описана за допомогою нескінченних гармонік. Цю обставину робить перетворення Фур'є поганим методом для дослідження іррегулярних функцій, тобто функцій, частотні і масштабні характеристики яких еволюціонують в часі, причому дуже важливо локалізувати моменти, відповідні зміні цих характеристик (моменти розладнань). Наприклад, перетворення Фур'є не відрізняє сигнал, що є сумою двох синусоїд, від сигналу, що складається з тих же синусоїд, але що включаються послідовно [58, 59].

Вейвлет-аналіз може бути охарактеризований як альтернатива класичному зваженому аналізу Фур'є. Будівельними блоками зваженого аналізу Фур'є є синуси і косинуси (хвилі), помножені на ковзаюче вікно. Вони зазвичай називаються частотно-тимчасовими атомами. У вейвлет-аналізі вікно спочатку є таким, що осцилює і називається «материнським вейвлетом». Замість множення на синуси і косинуси цей вейвлет довільно зрушується і розтягується по тимчасовій осі. Таким чином, генеруючий (або материнський) вейвлет утворює інші вейвлети, які є будівельними блоками вейвлет-аналіза. Ці розтягування відповідають різним ступеням збільшення, а вейвлети виконують роль масштабно-тимчасових атомів вейвлет-аналіза [58, 59].

**Одновимірне безперервне вейвлет-перетворення функції  $f(t)$** , яка належить простору  $L_2(R)$  (тобто визначена на всій дійсній осі і має кінцеву норму), має наступний вигляд [58]:

$$Wf(b, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{b-t}{a}\right) dt. \quad (5.4)$$

Параметри  $a$  і  $b$  забезпечують, відповідно, розтягування/стиснення і зрушення базисного вейвлета  $\Psi(t)$ , дозволяючи повністю сконструювати простір  $L_2(R)$ . Як випливає з (5.4), вейлет-перетворення функції  $f(t)$  по суті, аналогічно перетворенню Фур'є, за винятком того, що замість гармонік  $\{e^{jm}\}$  використовується система функцій занумерованих не цілими числами, а двома безперервними параметрами  $a$  і  $b$ :

$$\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{b-t}{a}\right). \quad (5.5)$$

Функція  $\Psi(t)$  називається вейлетом (wavelet) якщо [58, 59]:

- 1)  $\Psi(t)$  безперервна;
- 2)  $\Psi(t)$  інтегрована на всій прямій;
- 3)  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ .

Вейлети характеризуються своїми тимчасовими і частотними образами. На рис. 5.6 наведений приклад цих образів для однієї з вейлет-функцій (частотний В-сплайновий вейвлет) і показано, як залежать ці характеристики від масштабуючого параметра  $a$ .

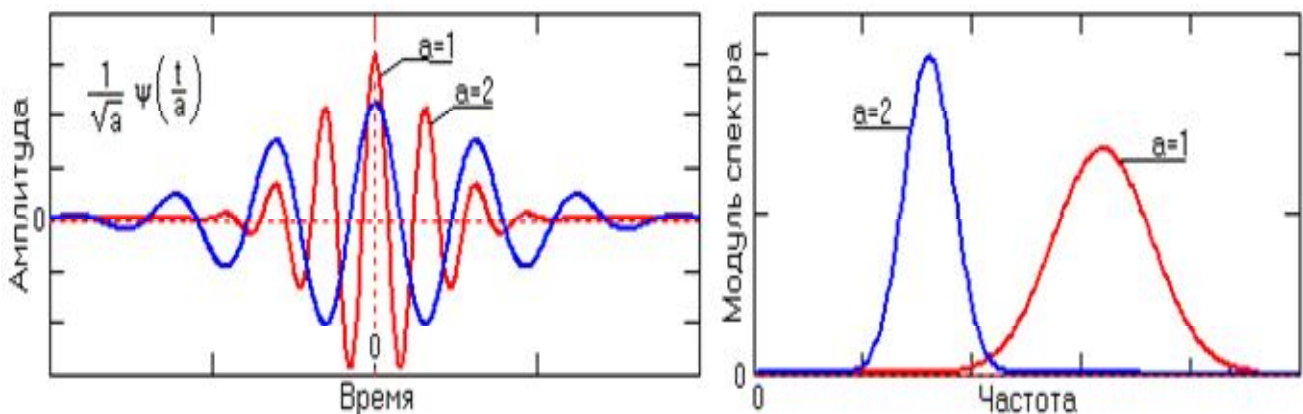


Рисунок 5.6 – Часовий і частотний образи вейлет-функції

Часовий образ задається функцією  $\Psi(t)$ , а частотний задається її Фур'є-образом, що являє собою огинаючу спектру вейвлета. Якщо вейвлет в просторі звужується, то його «середня частота» підвищується, і спектр вейвлета

переміщається в область вищих частот і розширюється. Цей процес практично лінійний – якщо вейвлет звужується удвічі, то його середня частота і ширина спектру також зростають в два рази [59].

**Дискретне вейвлет-перетворення.** Безперервне вейвлет-перетворення вимагає великих обчислювальних витрат при його проведенні. Тому для практичного його застосування необхідна дискретизація значень параметрів  $a$  і  $b$ . Це стає особливо актуальним в тих випадках, коли інформація обробляється в реальному масштабі часу і з використанням однокристальних мікроконтролерів, що мають обмежену розрядність і обмежену швидкодію. У цих випадках зазвичай використовують дискретне вейвлет-перетворення.

При дискретному вейвлет-перетворенні оперують з дискретними значеннями параметрів  $a$  і  $b$ , які задаються, як правило, у вигляді статечних функцій [58, 59]:

$$a = a_0^{-m}, \quad b = k \cdot a_0^{-m}, \quad m, k \in I$$

де  $I$  – простір цілих чисел  $\{-\infty, \infty\}$ ;  $m$  – параметр масштабу;  $k = b \cdot a_0^m$  – параметр зрушення.

Значення  $a_0$  зазвичай приймається рівним 2. Базис простору  $L_2(\mathbb{R})$  в дискретному уявленні:

$$\Psi_{mk}(t) = |a_0|^{m/2} \Psi(a_0^m t - k), \quad m, k \in I, \quad \Psi(t) \in L_2(\mathbb{R}).$$

Вейвлет-коефіцієнти прямого перетворення:

$$c_{mk} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \Psi_{mk}(t) dt.$$

Зворотн' дискретне перетворення для безперервних сигналів:

$$s(t) = C_{\Psi}^{-1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{mk} \Psi_{mk}(t).$$

Число практично використаних вейвлетів за масштабним коефіцієнтом  $m$  задає рівень декомпозиції сигналу, при цьому за нульовий рівень ( $m=0$ ) зазвичай береться рівень максимального тимчасового дозволу сигналу, тобто сам сигнал, а подальші рівні ( $m < 0$ ) утворюють спадаюче вейвлет-дерево.

Ще одним способом прискорення обчислень при вейвлет-перетворенні є швидке вейвлет-перетворення (БВП), що базується частотним поданням ортогональних вейвлетів. Для таких вейвлетів Малла запропонував пірамідальний алгоритм, що істотно скорочує кількість обчислювальних операцій і прискорює отримання вейвлет-спектрограмм [59].

Як наголошувалося вище, сейсмоакустичні сигнали в системі оперативного сканування породного масиву мають достатньо складну просторово-часову структуру, характерними особливостями якої є многокомпонентність і нестационарність. Розглянемо основні можливості, що забезпечуються вейвлет-аналізом цих сигналів для завдань оперативного сканування породного масиву.

Однією з особливостей сейсмоакустичного сигналу, є достатньо повільна незначна зміна параметрів інформаційного сигналу впродовж достатнього тривалого часу. При цьому, на корисний інформаційний сигнал можуть накладатися короткочасні перешкоди, обумовлені нестационарною роботою шахтних механізмів, локальними неоднорідностями породного масиву і тому подібне. Виникає завдання локалізації моменту начала (закінчення) зміни параметрів корисного інформаційного сигналу в часі.

На рис 5.7 представлені вейвлет-спектрограми синусоїди  $S$  (у центрі) і синусоїди з накладеним на неї трикутним імпульсом з малою амплітудою (внизу). Трикутний імпульс імітує повільну зміну параметрів інформаційного сигналу в часі, характерне для системи оперативної діагностики породного масиву. Для наочності, на графіку показана амплітуда трикутного імпульсу  $A=0,5$ , але в моделі реально були використані значення  $A=0,01$  і  $A=0,0001$ , що відповідає амплітуді зміни інформаційного сигналу, що становить 1,0 і 0,01% від амплітуди сигналу  $S$  відповідно. Для вейвлет-аналізу використовувався вейвлет Симлета 4-го порядку. Як видно з наведених вейвлет-спектрограм, вейвлет-аналіз цілком виразно дозволяє визначити моменти зміни властивостей сигналу, складові лише 0,01 % від загальної амплітуди сигналу!

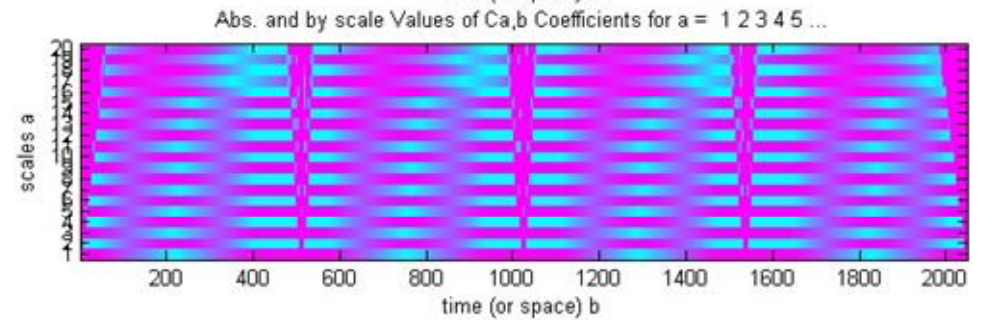
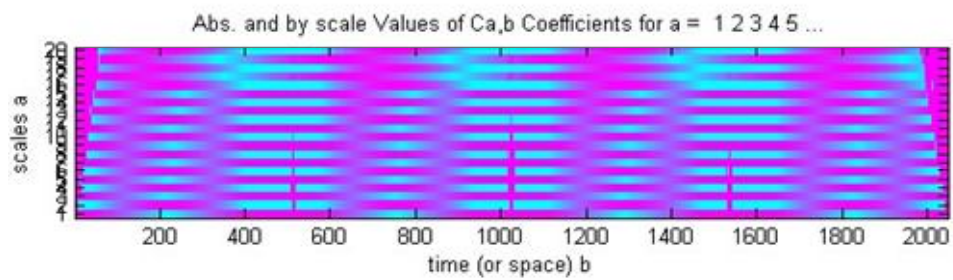
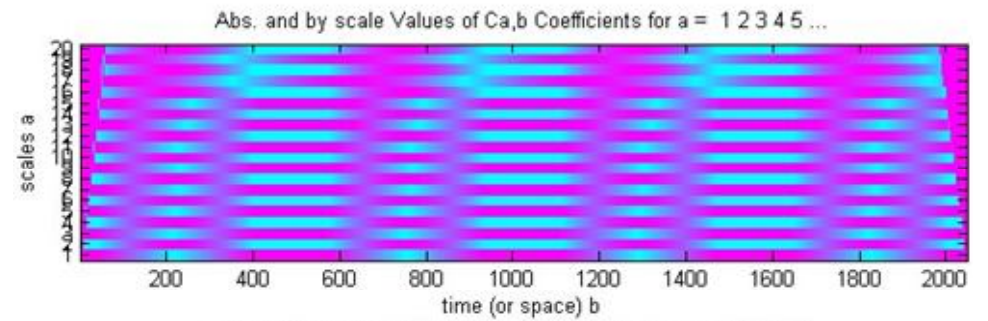
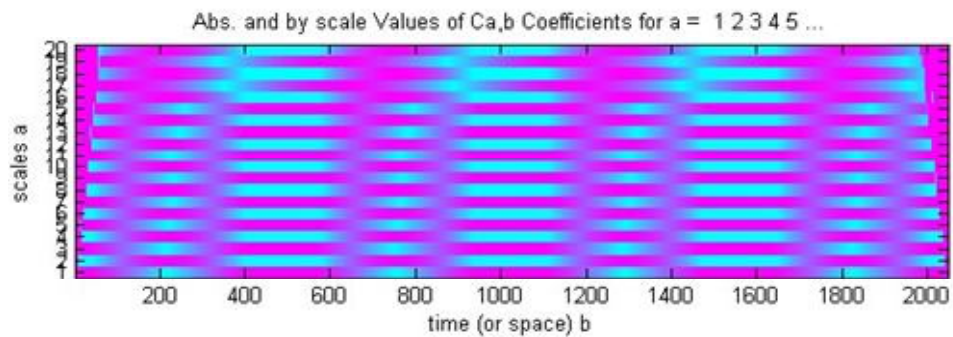
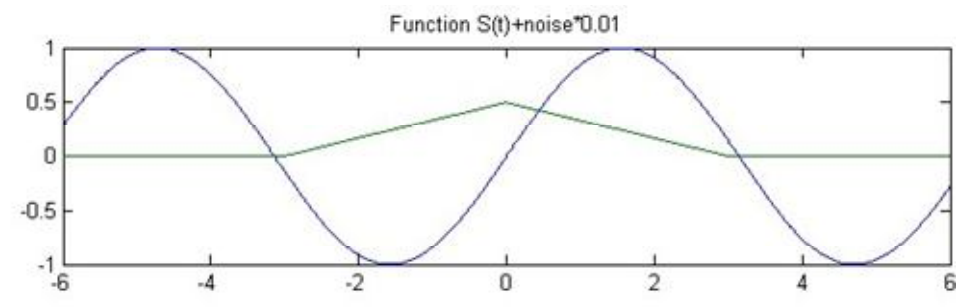
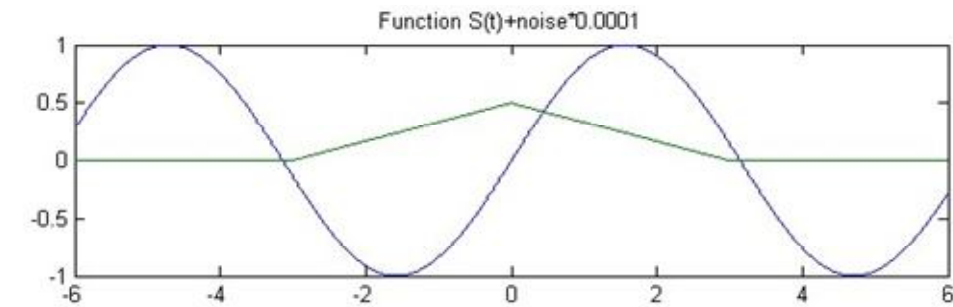
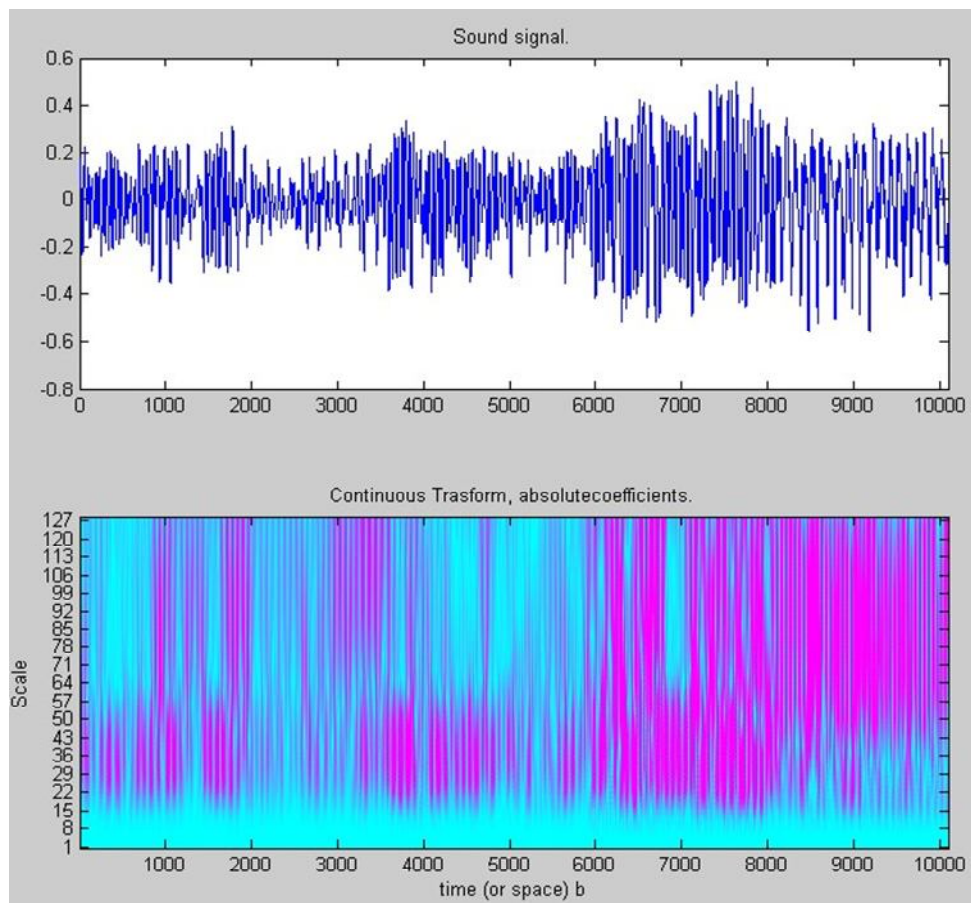


Рисунок 5.7 – Вейвлет-спектрограми синусоїди (у центрі) і синусоїди з накладеним на неї трикутним імпульсом з малою амплітудою (внизу)

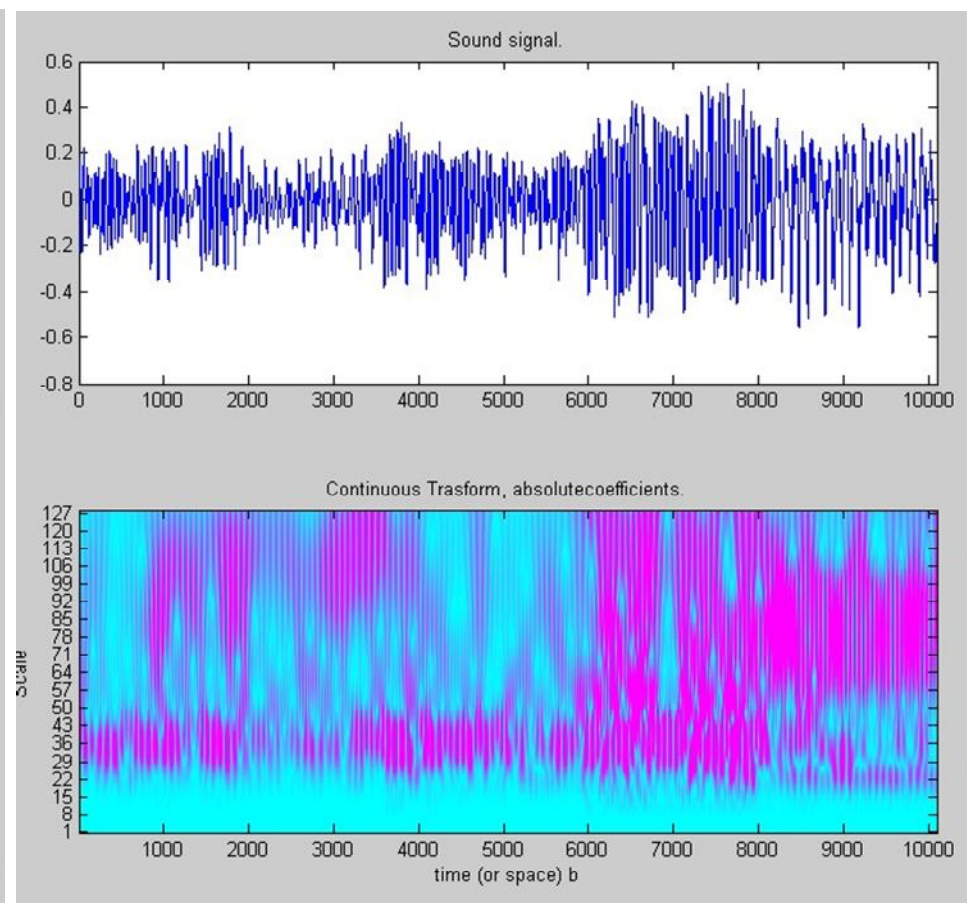
Слід зазначити, що при моделюванні що виконувався на ПЕВМ, не враховувалася розрядність модельних сигналів, що дискретизували, – вона визначалася можливістю відповідного програмного забезпечення і складала 64 двійкових розрядів. У реальних системах доводиться мати справу з цифровими сигналами, що мають обмежену розрядність, зазвичай лежачу в межах від 8 до 16 двійкових розрядів (рідше – до 24 розрядів). Враховуючи, що амплітуда величиною 1,0 % відповідає «сходінці» в сигналі, що дискретизує, при 7-розрядній дискретизації ( $1/2^7 = 0,0078125$ , що приблизно відповідає 0,78 %), слід при інтерпретації результатів вейвлет-аналізу враховувати складові, що вносяться до сигналу в результаті його дискретизації. Аналогічно, амплітуда величиною 0,0 1% приблизно відповідає «сходінці» в сигналі, що дискретизує, при 14-розрядній дискретизації ( $1/2^{14} = 0,00006103515625$ ).

На рис. 5.8 представлені вейвлет-спектрограми реального сигналу – «сплеску» акустичного сигналу. Внизу показані вейвлет-спектрограми, отримані за допомогою різних вейвлет-перетворень: перетворення Симлета 4-го порядку (що використався у вищенаведених прикладах) і перетворення Морлета. Порівняльний аналіз цих спектрограм дозволяє побачити проблеми, що виникають при виборі базових вейвлетів. Як видно з наведених вейвлет-спектрограм, вейвлет Симлета 4-го порядку [59], що раніше прекрасно справлявся із завданням локалізації зміни параметрів сигналу, дає у разі комбінації гармонійних коливань достатньо розмиту картину. В той же час, вейвлет Морлета, більш пристосований для виділення локальних екстремумів сигналу [59], забезпечує чіткішу вейвлет-спектрограму, зручнішу для подальшого аналізу.

**Програма моделювання акустичних полів в породному масиві.** Відповідно до описаних вище математичних моделей (пп. 5.1-5.3) було розроблено додаток, що дозволяє виконувати моделювання розповсюдження акустичних коливань в породному масиві.



а)



б)

Рисунок 5.8 – Вейвлет-спектрограми «сплеску» акустичного сигналу, отримані за допомогою різних вейвлет-перетворення: а) перетворення Симлета 4-го порядку; б) перетворення Морлета

Розроблене застосування дозволяє імітувати властивості середовища з дисперсією і вплив загасання на форму сейсмоакустичного сигналу. Це реалізовано таким чином, що кожному пікселю зображення задається ціле число, що характеризує загасання. Чим більше число, тим більше загасання. Також існує можливість імітувати різні неоднорідності у вигляді геометричних фігур різних розмірів, а також відзеркалювальні поверхні і межі розділу середовищ з різними хвильовими опорами. Це дає можливість моделювати такі хвильові явища як інтерференція, дифракція і дисперсія.

Для спостереження за модельованими сигналами додаток містить два програмні датчики, які дають можливість спостерігати форму сигналу в будь-якій точці модельованого простору. Для того, щоб встановити датчик в потрібне місце моделі його потрібно просто перетягнути мишею. Таким самим чином можна переміщати і джерело коливань.

Реалізована можливість вибирати тип джерела (точковий, дипольний і ін.), а також вид коливань, що генеруються ним (синусоїдальні, послідовності імпульсів).

Візуалізація може бути реалізована як в двовимірному, так і в тривимірному вигляді. У останньому випадку досліджувана модель відображається як площина в просторі, що дає можливість детальніше спостерігати за зміною форми сигналу, що розповсюджується в дисперсному середовищі.

Розглянемо роботу програми на конкретних моделях. На рис. 5.9 і рис. 5.10 моделюється розповсюдження хвиль в породному масиві. Тут на осцилограмі червоним кольором зображений сигнал, що знімається з датчика, розташованого зліва вгорі, а синій – з датчика, розташованого справа.



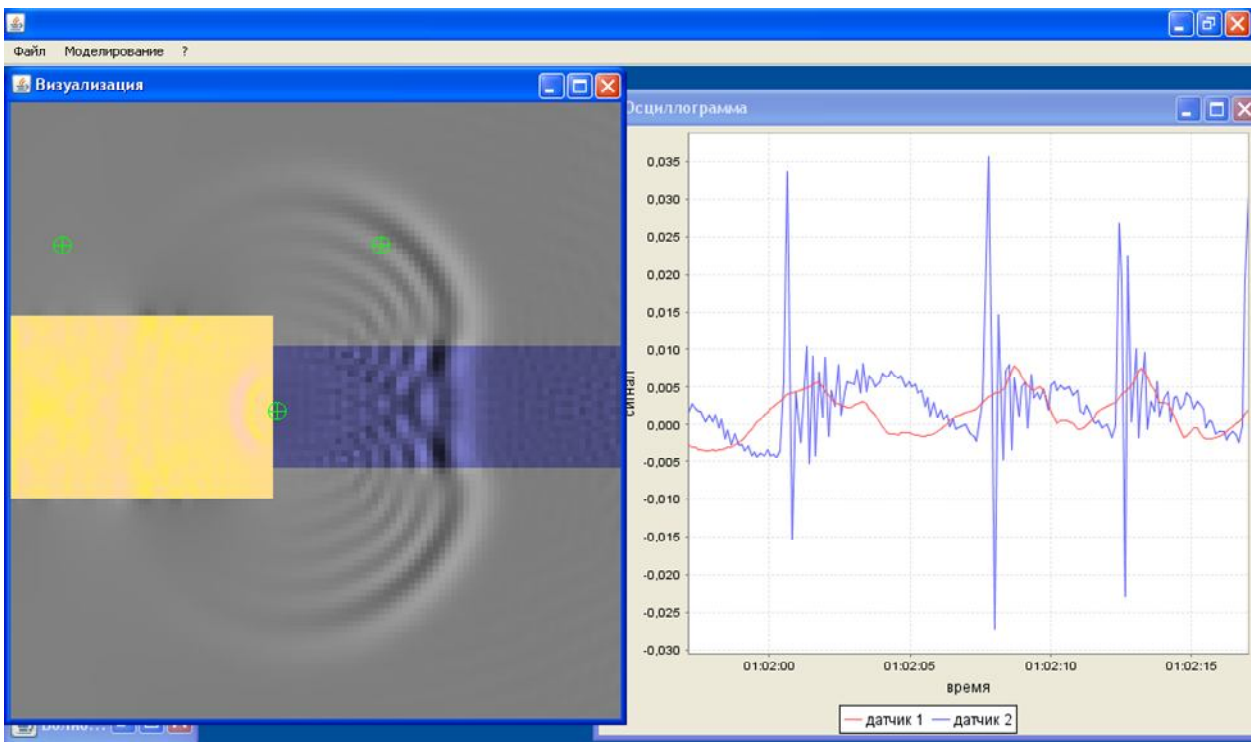


Рисунок 5.9 – Розповсюдження хвиль в породному масиві

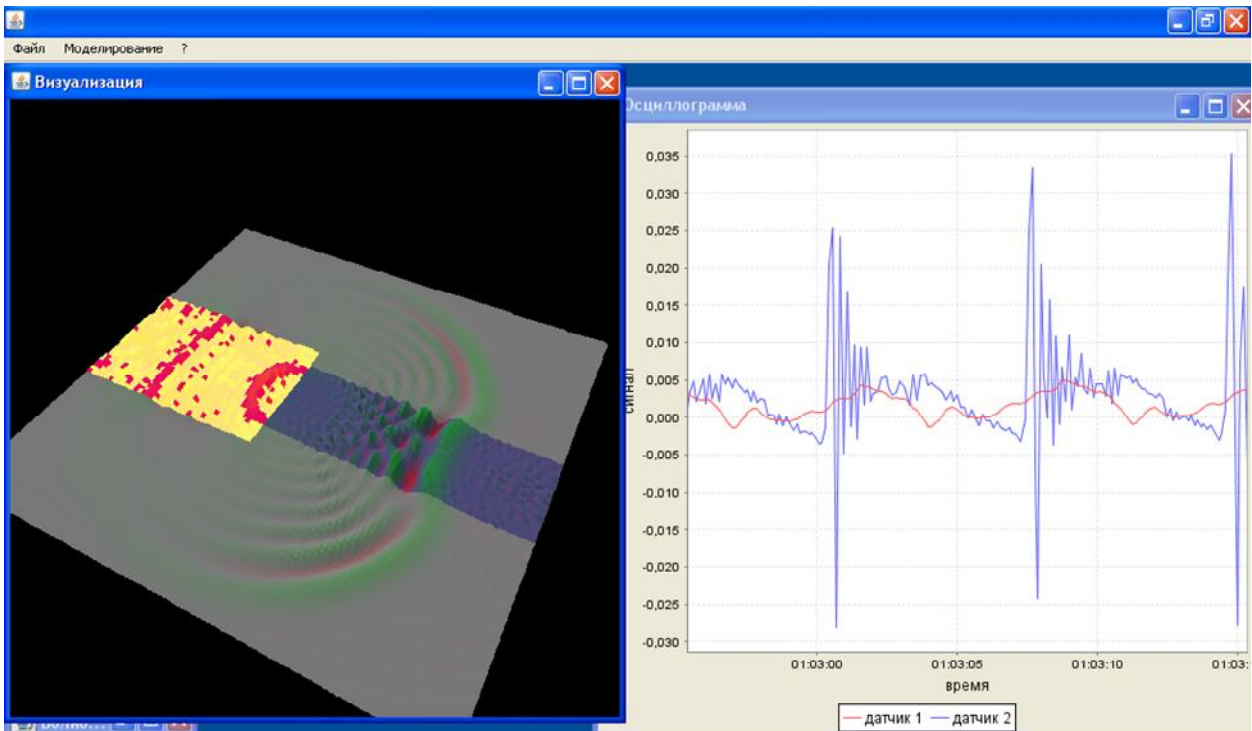


Рисунок 5.10 – Розповсюдження хвиль в породному масиві (3D)

На рис. 5.11 і рис. 5.12 моделюється вплив неоднорідності, зображеної прямокутником. Слід звернути увагу на те, як змінилися осцилограми, в порівнянні з попереднім випадком.

На рис. 5.13 і рис. 5.14 моделюються процеси, що відбуваються на межі розділу двох середовищ з різними хвильовими опорами. На цих моделях на осцилограмі синім кольором зображені свідчення датчика, розташованого зліва внизу, – в середовищі з великою дисперсією, а червоним – свідчення датчика, розташованого зліва вгорі. У центрі – джерело коливачь.

На рис. 5.15 і рис. 5.16 моделюються акустичні процеси, що відбуваються при двух- і трьохпачкових схемах розробки відповідно. На цих моделях на осцилограмі синім кольором зображені свідчення датчика, розташованого на моделі вгорі і що знаходиться на максимальному видаленні від джерела звукового сигналу, а червоним – свідчення датчика, розташованого поблизу джерела звукового сигналу. В обох випадках передбачається, що джерело коливачь знаходиться біля нижньої (на моделі) пачки. Як видно з результатів моделювання, збільшення кількості пачок призводить до різкого збільшення загального загасання сигналу.

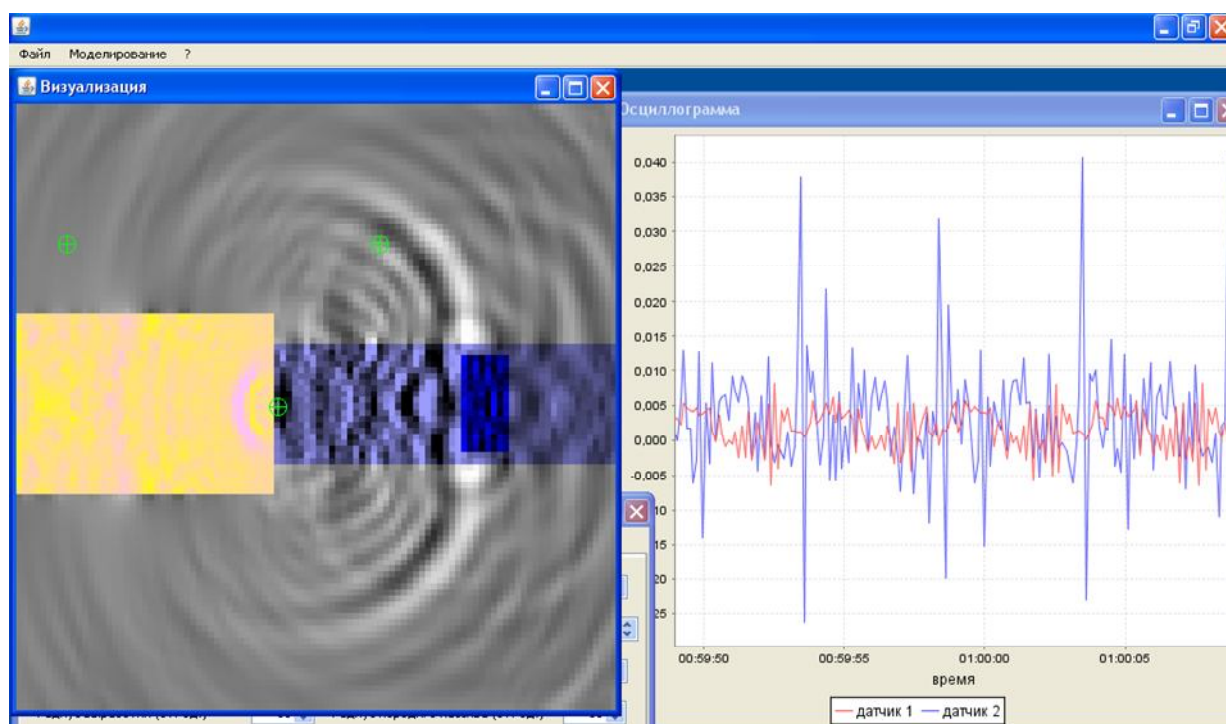


Рисунок 5.11 – Вплив неоднорідності на форму сигнала

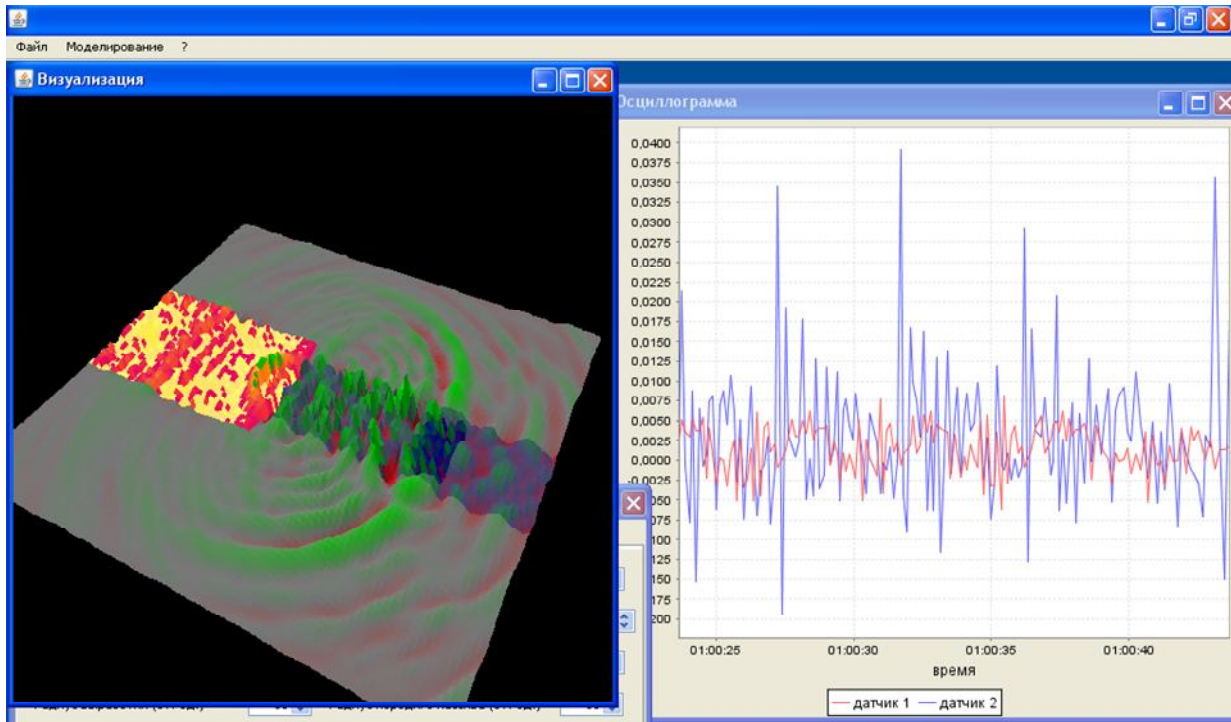


Рисунок 5.12 – Вплив неоднорідності на форму сигнала (3D)

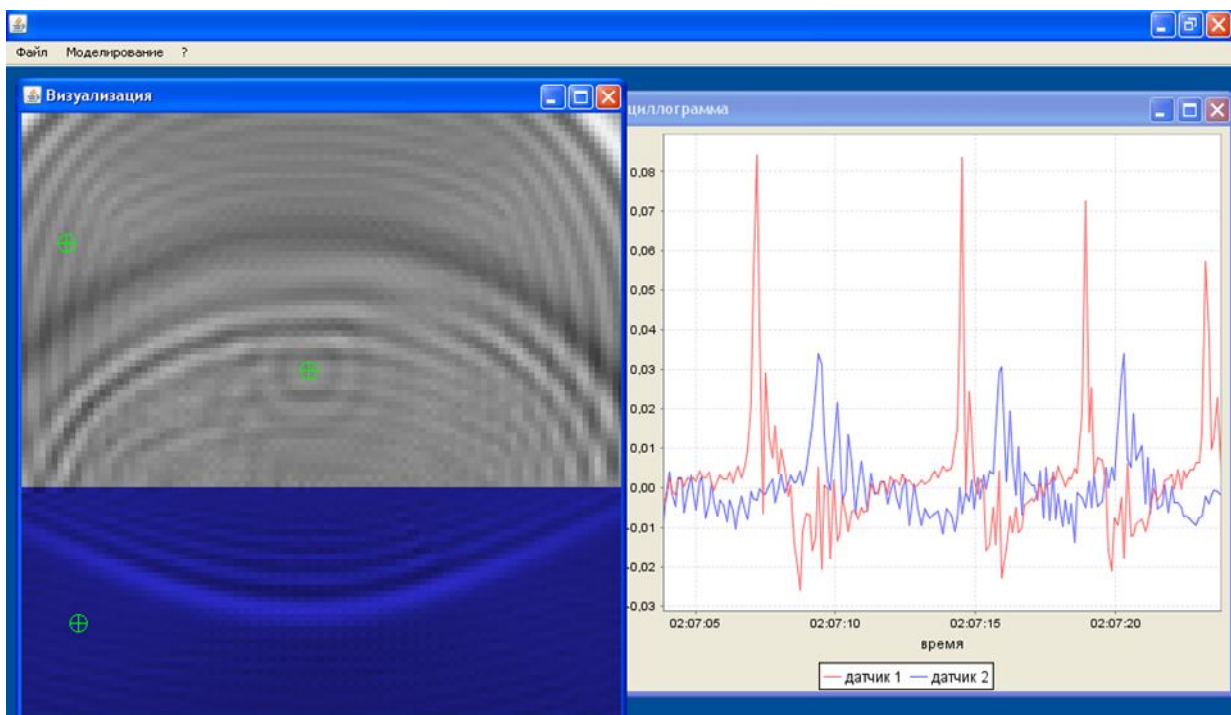


Рисунок 5.13 – Модель хвильових процесів, що виникають на границі розділу двох середовищ з різними хвильовими опірами

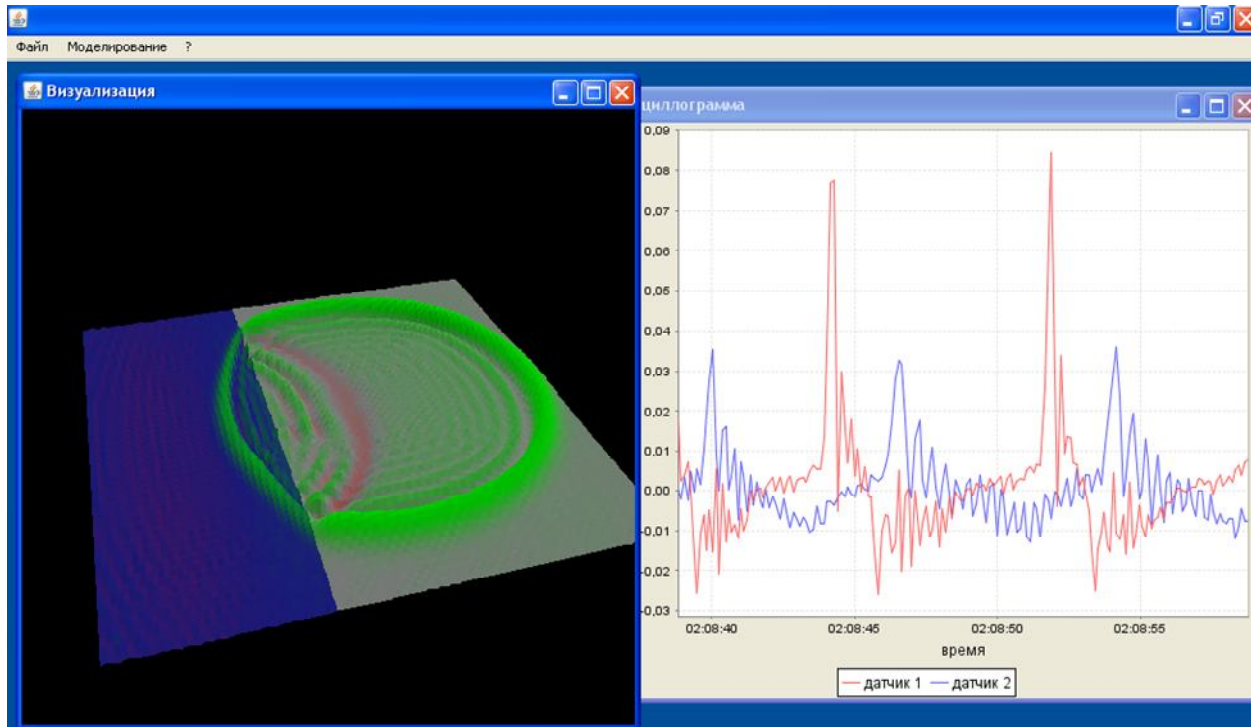


Рисунок 5.14 – Модель хвильових процесів, що виникають на границі розділу двох середовищ з різними хвильовими опірими (3D)

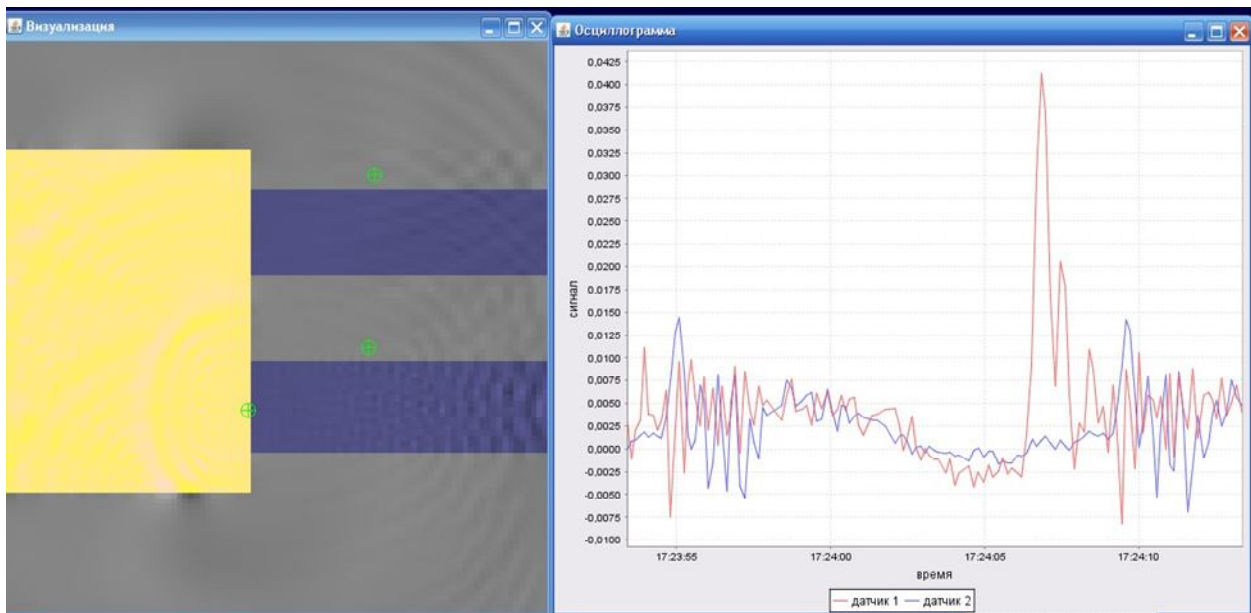


Рисунок 5.15 – Моделювання акустичного поля при двошаровій будові пласта

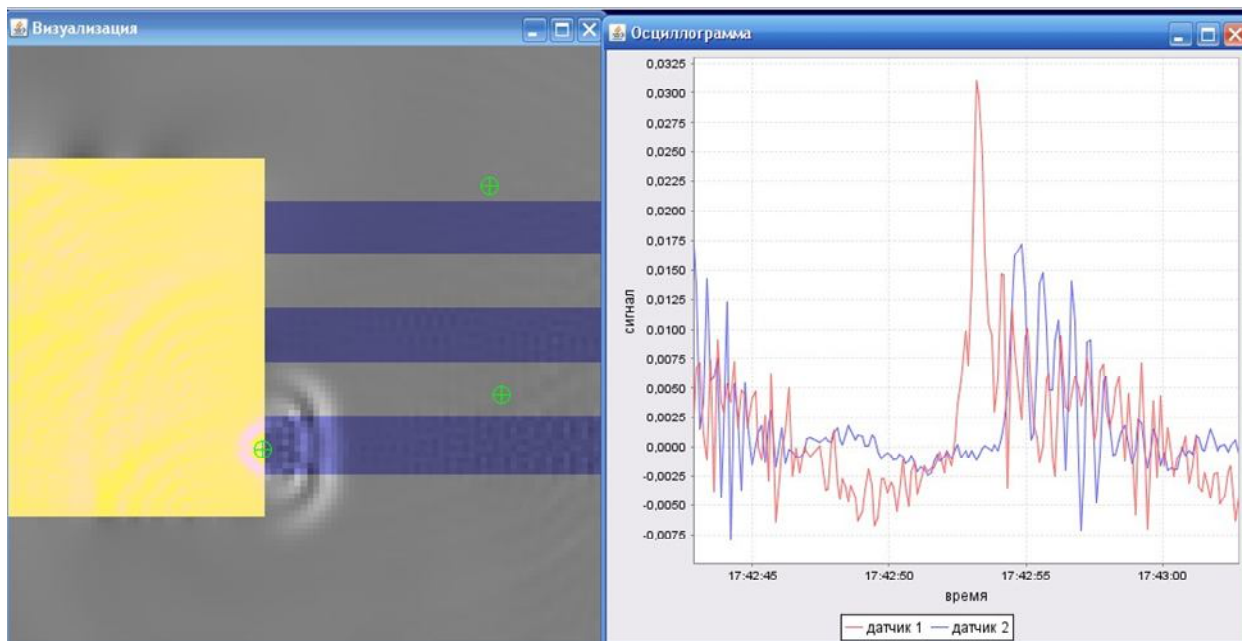


Рисунок 5.16 – Моделювання акустичного поля при тришаровій будові пласта

#### 5.4 Висновки

1. Розроблена модель формування інформаційного сигналу при акустичному контролі стану породного масиву. Показано, що цей сигнал має достатньо складну тимчасову структуру і може розглядатися як нестационарний багатокomпонентний сигнал зі змінними частотно-часовими характеристиками.

2. Показано, що фрагменти вихідного сигналу, відповідні різним технологічним процесам, мають різну інформативність для завдань діагностики стану масиву, і повинні оброблятися різними методами для визначення необхідних інформаційних ознак. Тому в загальному випадку обробка інформаційного сигналу виконується в два етапи. На першому етапі виконується операція сегментації – первинної обробки інформації, що забезпечує виділення необхідних фрагментів інформаційного сигналу. На другому етапі для кожного з виділених фрагментів вибирається відповідний

алгоритм обробки, що дозволяє, отримати параметри, що характеризують стан породного масиву.

3. Показана принципова можливість застосування вейвлет-аналізу для акустичних сигналів, що виникають в масиві гірських порід при взаємодії з ним шахтних механізмів.

4. Показано, що основні переваги вейвлет-аналізу при обробці нестационарних багатокомпонентних сигналів: висока чутливість, частотно-тимчасова локалізація і ін. дозволяють з високою точністю визначати параметри компонентів акустичних сигналів і відстежувати їх зміни в часі. Це дозволить в результаті обробки сигналів в системі оперативного сканування масиву вирішити задачу побудови карти меж відзеркалювальних поверхонь тобто виконати локалізацію структурних і силових неоднорідностей породного масиву.

## **6 РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ШАХТНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ.**

6.1. Принципи перетворення акустичної інформації в системах геомоніторингу.

Безпечна і ефективна експлуатація гірничодобувного підприємства в сучасних умовах можлива тільки при детальному вивченні об'єкту технологічної дії, а також постійній обробці і аналізі великого об'єму оперативної інформації про напружено-деформований стан (НДС) порідного масиву, параметри технології, даних про розвиток робіт і так далі

Виконання перерахованих завдань в повному об'ємі можливо тільки з використанням автоматизованих систем геомоніторингу на основі сучасної комп'ютерної техніки і відповідного програмно-апаратного забезпечення. Одному з найважливіших завдань, вирішуваної в рамках системи геомоніторингу, є здійснення оперативної діагностики НДС тієї частини порідного масиву, яка недоступна для візуальних спостережень. При цьому, зазвичай аналізується детермінована складова просторової неоднорідності масиву – тренд, що описує (на даному масштабному рівні) зміни значень показників масиву, наприклад, в зоні підвищених напружень або в зоні зміцнення. Виділення тренда в масиві навколо гірською виробки є основним завданням при контролі напруженого стану або процесу зміцнення масиву.

При оцінці властивостей і стану масивів гірських порід геофізичними методами, процедура вимірювань і методи їх інтерпретації повинні бути пов'язані тільки з реальною структурою масиву. Іншими словами, для підвищення ефективності вимірювань необхідно забезпечити узгодження параметрів вимірювальної системи з характеристиками області досліджень (тип неоднорідності, її розміри і т. п.).

Найбільшого поширення для завдань геомоніторингу набули методи пасивного контролю, що дозволяють виконати аналіз стану пласта за

допомогою акустичних імпульсів, що виникають в пласті при взаємодії з ним шахтних механізмів (комбайн, відбійний молоток і т. п.).

Допустимо, що кожне вимірювання при геофізичному контролі охоплює деяку область масиву, яка називається *областю дії експерименту*  $V_0$ , що робить істотний вплив на параметри фізичного поля, що розповсюджується в цьому об'ємі, а в масиві знаходиться *неоднорідність*, характеристичний розмір якої рівний  $a$ .

При використанні акустичних методів хвильового контролю, область дії експерименту  $V_0$  визначається згідно положенням геометричної оптики через зону Френеля в припущенні, що тривалість випромінюваного сигналу менше часу його розповсюдження в межах області вимірювання. При цьому радіус  $R$  першої зони Френеля, що визначає параметр області дії експерименту, можна представити таким чином [24]:

$$R = \sqrt{\Lambda L / 4} , \quad (6.1)$$

де  $\Lambda$  – довжина хвилі фізичного випромінювання, визначувана відношенням швидкості розповсюдження хвилі в середовищі до частоти її коливань, а  $L$  – база спостереження.

Узгодження вимірювальної системи з об'єктом досліджень проводиться через правильний підбір співвідношення між існуючими неоднорідностями і областю дії експерименту, а також довжиною хвилі поля, що впливає на масив. Оцінка співвідношення між характеристичним розміром неоднорідності масиву і областю дії експерименту дозволяє коректно ставити і правильно вирішувати завдання раціонального вибору параметрів точок мережі спостережень в масиві (вибір бази  $L$  і кроку  $\Delta l$  вимірювань і т.п.) і обробки результатів вимірювань, отриманих в різних точках масиву.

Зокрема, для типових завдань геомоніторингу породного масиву (вивчення розподілу напружень і визначення зон порушеності в масиві навколо гірських виробок; прозвучування масиву з метою виділення крупних включень і т.п.) справедливі співвідношення:



$$a^3 > V_0; \quad a \gg \Lambda. \quad (6.2)$$

Ці умови відповідають завданням вивчення просторової неоднорідності нижчого порядку щодо області дії.

В рамках системи геомоніторингу, блок акустичного контролю забезпечує обробку геоакустической інформації, що отримується з порідного масиву за допомогою датчиків. Першочерговим завданням обробки акустичних сигналів є виділення прогностичних ознак, необхідних для управління прохідницькими, видобувними або іншими механізмами, а також для надійного акустичного прогнозу викидонебезпечності. В результаті повинна бути отримана оперативна оцінки стану неторканої області масиву. Подальша обробка повинна забезпечити виділення окремих параметрів в структурі акустичних сигналів, що приймаються, для забезпечення вирішення хвильового рівняння в системі геомеханічного моніторингу. Результатом цього рішення повинна бути побудова карти меж відзеркалювальних поверхонь на значному видаленні від оголення, тобто локація неоднородностей (структурних і силових).

Одним з найважливіших компонентів системи геомоніторингу є зовнішні датчики наглядових станцій, що встановлюються в товщі порід контрольованого масиву (підземний напівкомплект). Вони забезпечують перетворення в електричний сигнал сейсмоакустичних сигналів, що розповсюджуються в гірських породах, виникають в породному масиві в процесі ведення гірничих робіт [3]. Крім того, вони так само виконують попередню обробку перетворених сигналів і передачу їх по шахтних лініях зв'язку в наземну частину блоку акустичного контролю.

В якості датчиків, що забезпечують перетворення сейсмоакустичних сигналів, зазвичай застосовують геофони – сейсмографи, що володіють високою чутливістю до сейсмічних коливань звукового діапазону. Залежно від вирішуваних завдань, розрізняють [60]:

- геофони, призначені для збору сейсмоакустичної інформації з обширної області гірського масиву;

- геофони, призначені для реєстрації акустичної обстановки в найближній до геофону ділянці масиву.

Геофони першого вигляду зазвичай відносяться до типу віброметрів швидкості або зсуву і використовуються, наприклад, для спостереження за режимом сейсмоактивних районів або очисних виробок вугільних шахт. Вони зазвичай реалізуються на основі принципів електродинамічного перетворення. Ці геофони мають підвищену чутливість до низькочастотних компонентів спектру акустичних сигналів, які характеризуються відносно невисоким загасанням і, отже, можуть простежуватися на значному видаленні від місця установки геофону. До того ж такі геофони володіють достатньо рівномірною амплітудно-частотною характеристикою в робочому діапазоні частот, що, надалі, вельми істотно при використанні спектральних методів обробки і аналізу цих сигналів.

Геофони другого вигляду володіють властивостями акселерометрів і використовуються для спостереження за станом приконтурного масиву при проходці виробок. Вони мають підвищену чутливість в області високих частот спектру сейсмоакустичних сигналів. Ці частоти відповідають достатньо швидко затухаючим сейсмоакустичним процесам. Тому геофони цього типу добре реагують на багатих високочастотними компонентами сейсмоакустичні імпульси, що породжуються в ближніх до геофону ділянках масиву, але практично не реагують на сейсмоакустичні сигнали, що приходять здалеку. Такі геофони зазвичай реалізуються на основі п'єзоелектричних або ємкісних принципів перетворення сигналу.

Як показали дослідження, основна енергія сейсмоакустичних сигналів, що виникають у вугіллі і вміщуючих породах (пісковиках, вапняках) в процесі ведення гірничих робіт лежить в діапазоні частот від 100 до 2000 Гц, а для порід типу гранітів або кварцитів розширюється убік вищих частот до 5-10 кГц [60]. В той же час, протяжність підвищеного гірського тиску за простяганням в призабійній області вугільного пласта може досягати до 40 м [61]. Слід мати на увазі, що апаратура акустичного контролю повинна мати певний запас за

чутливістю, обумовлений тим, що, по-перше, необхідно контролювати структурні порушення порідного масиву, області підвищеного гірського тиску, що знаходяться поблизу, а по-друге, слід враховувати можливу зміну відстані від джерела сигналу (комбайна) до геофону в процесі проходження гірничої виробки. Тому, її чутливість повинна бути достатньою для забезпечення радіусу області дії експерименту не менше 100 м. Необхідність контролю такої обширної області гірського масиву і нижня межа частотного діапазону спектру сейсмоакустических сигналів, обумовлюють доцільність використання електродинамічних геофонів-віброметрів типу СВ, СГ (Росія), SM-4 (Польща) і інших аналогічних.

## 6.2. Вимоги, що пред'являються до апаратури акустичного контролю

До складу системи геомоніторингу входять зовнішні датчики наглядових станцій, що встановлюються в товщі порід контрольованого масиву (підземний напівкомплект) і наземний напівкомплект, що забезпечує прийом і остаточну обробку сейсмоакустичних сигналів, що поступають.

Підземний напівкомплект апаратури акустичного контролю повинен забезпечувати попередню обробку сигналів, що поступають з акустичних датчиків (геофонів) і передачу їх по шахтних лініях зв'язку в наземну частину блоку акустичного контролю.

Сейсмоакустичні сигнали, що поступають на вхід системи геомоніторингу при пасивному акустичному контролі, мають достатньо широкий динамічний діапазон (до 60 дБ), що визначається, в основному, відстанню (по масиву гірських порід) від геофону до шахтного механізму (від одиниць до десятків метрів), що взаємодіє з породою, і типом цього механізму. В більшості випадків, цей діапазон перевищує можливий динамічний діапазон лінійних електронних вузлів апаратури акустичного контролю, що, в загальному випадку, неминуче призведе до спотворення форми сейсмоакустичного сигналу, що передається. Тому, невід'ємною частиною підземного напівкомплекту апаратури акустичного контролю повинна бути

система автоматичного регулювання посилення (АРУ), що здійснює стиснення динамічного діапазону вхідного сигналу.

Структура підземного напівкомплекту апаратури акустичного контролю істотно залежить від розподілу завдань з обробки сигналу між наземним і підземним напівкомплектами, а також - від способу передачі інформаційного сигналу (аналоговий або цифровий) по шахтних лініях зв'язку.

Аналіз розподілу довжин кабелів показує, що для шахт видалення очисного або підготовчого забою від центрального диспетчерського пункту лежить в межах від 1,5 до 7,2 км, хоча, у ряді випадків, воно може досягати і 10 км [62]. В більшості випадків, передача сигналу здійснюється по шахтній лінії телефонного зв'язку, який можна розглядати як довгу відкриту лінію з розосередженими параметрами, що має достатньо велику активну складову (в середньому 75 Ом/км), і що знаходиться в середовищі з потужними електромагнітними перешкодами. Вхідний опір шахтної телефонної лінії зв'язку визначається її хвильовим (характеристичним) опором, який істотно залежить від частоти передаваного сигналу, зменшуючись у міру її зростання. Зокрема, для діапазону, в якому знаходяться спектральні складові шахтних сейсмоакустических сигналів, воно змінюється в межах від 1 кОм до 200 Ом. Для зниження втрат в каналі зв'язку, необхідно забезпечити узгодження лінії зв'язку з її навантаженням. Це реалізується шляхом підключення до виходу каналу зв'язку активного опору, чисельно рівного усередненому хвильовому опору лінії зв'язку, що забезпечує її перехід в режим хвилі, що біжить.

Важливою вимогою, що пред'являється до підземного напівкомплекту апаратури акустичного контролю, є наявність автономного дистанційного живлення, що забезпечує його працездатність в контрольованих зонах порідного масиву незалежно від наявності в них мереж електропостачання і можливість безперервного моніторингу навіть за відсутності напруги живлення в зоні проведення гірничих робіт. Це обумовлює необхідність живлення підземного напівкомплекту від іскробезпечних джерел живлення, що знаходяться в наземному напівкомплекті апаратури акустичного контролю.

Слід зазначити, що для скорочення кількості пар провідників шахтної лінії телефонного зв'язку, що використовуються, доцільно забезпечити поєднання лінії передачі інформації з ланцюгами живлення підземного напівкомплекту, що дозволить забезпечити повне підключення цього напівкомплекту до системи за допомогою всього лише двопровідної лінії зв'язку. Це обумовлює необхідність наявності як в підземному, так і в наземному напівкомплектах спеціальних вузлів, що забезпечують поєднання/розділення ланцюгів живлення і інформаційних сигналів.

Описана вище структура підземного полукомплекту відповідає випадку, коли сейсмоакустичний сигнал передається в наземний напівкомплект в аналоговій формі. Вона використовується в апаратурі акустичного контролю АК-1. В наземному напівкомплекті здійснюється відділення сейсмоакустичного сигналу від напруги живлення, а потім виконується його обробка з метою виділення прогностичної ознаки викиднебезпечності. Крім того, отриманий сейсмоакустичний сигнал региструється на магнітній стрічці магнітофону в шахтній службі (групі) прогнозу викидів.

В той же час, спосіб передачі інформаційних сигналів в наземний напівкомплект по шахтних лініях зв'язку в аналоговій формі має і певні недоліки. По-перше, це певні частотні спотворення інформаційного сигналу, обумовлені частотними характеристиками електронних вузлів і тракту передачі інформаційних сигналів. У друге, це порівняльно низька перешкодостійкість, обумовлена високим рівнем перешкод в шахтних телефонних мережах, що виникають в процесі роботи шахтного електроустаткування. До того ж спектральний склад цих перешкод частково співпадає із спектральним складом сейсмоакустичних сигналів. Не роблячи істотного впливу на набуття узагальненої прогностичної ознаки викиднебезпечності, ці чинники утрудняють подальший аналіз отриманих сейсмоакустичних сигналів з метою виділення їх “тонкої” структури (приватних параметрів і тому подібне), необхідної для побудови карти меж відзеркалювальних поверхонь.

У зв'язку з цим, виникає необхідність забезпечення передачі інформаційних сигналів в наземний напівкомплект по шахтних лініях зв'язку в цифровій формі. Для цього до складу підземного напівкомплекту необхідно включити між системою АРУ і вихідним формувачем блок аналого-цифрового перетворення (АЦП) і блок управління передачею цифрового сигналу.

Розглянемо вимоги, що пред'являються до блоку АЦП. На рис. 1 суцільною лінією показаний типовий миттєвий спектр сейсмоакустичного сигналу, отриманого у викидонебезпечній зоні вугільної шахти (інтервал аналізу – 42,7 мс). Тут же наведена огинаюча спектру цього сигналу, отримана на 3-х секундному інтервалі спостереження (точкова лінія).

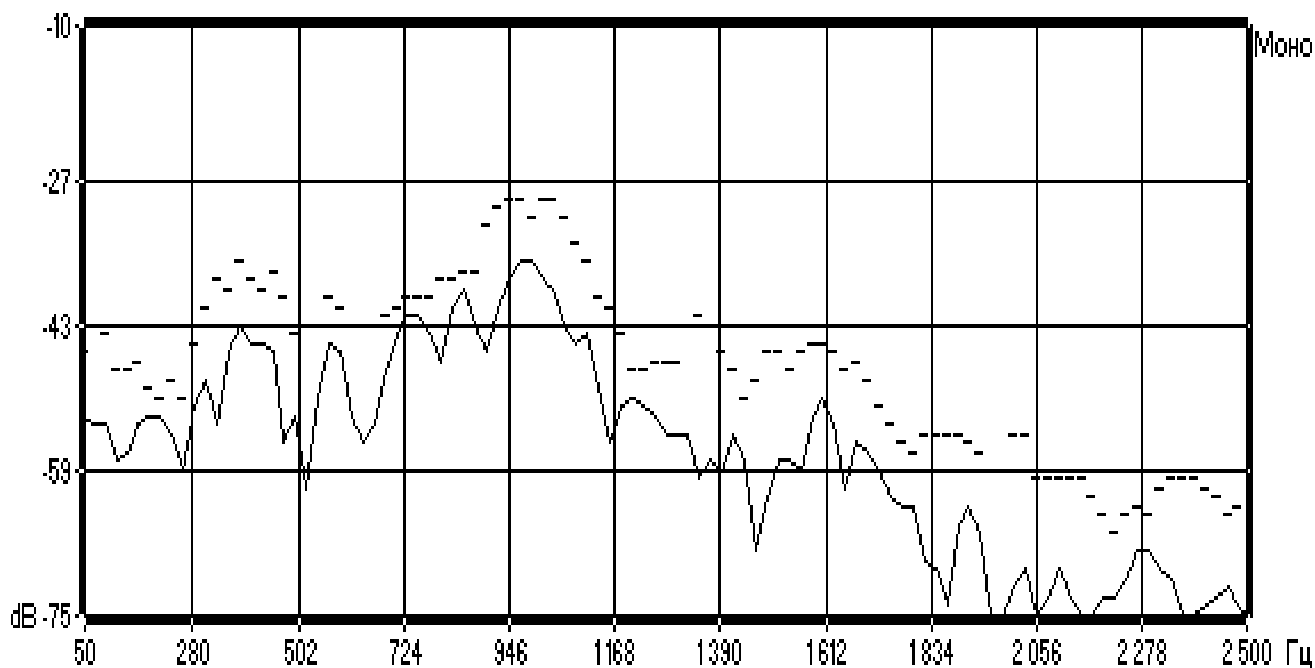


Рисунок 6.1 – Миттєвий спектр сейсмоакустичного сигналу в викидонебезпечній зоні вугільної шахти (сплошна лінія) та його огинаюча на 3-х секундному інтервалі (точкова лінія)

Як видно з наведених залежностей, високочастотні спектральні компоненти з частотами більше 2 кГц мають рівень на 32 дБ (40 разів) нижче, ніж низькочастотні складові. Тому їх впливом цілком можна нехтувати і вважати, що верхня межа спектру сейсмоакустичного сигналу  $F_{hs}$  складає 2,0

кГц. Згідно теоремі дискретизації [63], мінімально необхідна частота дискретизації  $F_d$ :

$$F_d = 2 F_{hs} \quad . \quad (6.3)$$

На практиці, реальне значення частоти дискретизації  $F_d$  повинне бути в 1,5...2,0 рази вище, ніж значення  $F_{hs}$ , отримане за формулою (6.3). Тому, значення  $F_d$  може бути вибрано рівним 6,0 кГц.

Необхідна розрядність АЦП  $N_R$  багато в чому залежить від алгоритму обробки інформаційного сигналу. Цифрове моделювання на комп'ютері алгоритму обробки, реалізованого в апаратурі акустичного контролю АК-1 в аналоговому варіанті, показало, що для цифрової реалізації цього алгоритму достатнє, що б  $N_R = 10$ .

Необхідна швидкість передачі інформації  $R_k$  в цифровому каналі зв'язку складе:

$$R_k = F_d N_R = 6000 \cdot 10 = 60000 \text{ бит/с} \quad .$$

Якщо врахувати необхідність передачі на кожен відлік вхідного сигналу 1 або 2-х біт службової інформації (біт контролю парності і т. п.), то для цифрового каналу вугільної шахти швидкість передачі інформації  $R_k$  може складати 66.72 кбит/с.

Для цифрових каналів зв'язку, як і у разі передачі сигналів в аналоговій формі, також необхідно виконати узгодження лінії зв'язку з її навантаженням. Для сигналів з частотами від 10 до 100 кГц хвильовий (характеристичний) опір шахтної телефонної лінії зв'язку змінюється в межах від 135 до 105 Ом [62].

Порівняльний аналіз стандартних дротяних інтерфейсів (шин), вживаних в промислових системах збору цифрової інформації [64] показує, що вони не здатні забезпечити безпосередню передачу цифрових сигналів з вказаною вище швидкістю на відстань декількох кілометрів, характерну для шахтних каналів зв'язку. Для промислових умов рекомендується включення повторювачів (регенераторів) цифрових сигналів через певні відрізки лінії зв'язку (звичайні 500...1000 м), що забезпечують відновлення цих сигналів і що дозволяють

збільшити довжину лінії зв'язку при збереженні пропускної спроможності каналу зв'язку. Проте для шахтних умов, ці рекомендації не прийнятні.

В той же час, можливості телефонної лінії зв'язку дозволяють забезпечити і набагато вищу швидкість передачі інформації, забезпечуючи для лінії зв'язку завдовжки в декілька кілометрів не тільки передачу низькочастотної складової (мови), але і високошвидкісну передачу даних з використанням діапазону частот до декількох МГц. Зараз активно розвивається технологія передачі даних ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) і її модифікації, що надають можливість організації цифрової широкосмугової виділеної лінії по існуючій аналоговій телефонній лінії із збереженням функцій звичайного телефону. Системи ADSL зазвичай використовують частоти від 25 кГц приблизні до 1,1 МГц, і тому передача даних не заважає паралельній передачі мови по одним і тим каналах зв'язку. Разом з тим, безпосереднє застосування технології ADSL в системах геомоніторингу навряд чи доцільно. В першу чергу це обумовлено тим, що можливості, що надаються технологією ADSL, для систем геомоніторингу є надмірними. Крім того, слід врахувати, що каналостворююча ADSL-апаратура має високу вартість, і, оскільки призначена для наземних ліній зв'язку, не випускається в шахтного виконання. До того ж, технології ADSL пред'являють достатньо жорсткі вимоги, до якості телефонної лінії зв'язку.

Відповідно до поставлених задач були виконані дослідження щодо можливості високошвидкісної передачі цифрових даних в системах геомоніторингу з використанням частотного діапазону від 50 до 100 кГц. Для проведення експериментів використовувався модифікований підземний напівкомплект апаратури акустичного контролю АК-1 [45, 46] доповнений вузлом АЦП і вузлом управління передачею цифрового сигналу. Крім того, був допрацьований вузол, що забезпечує поєднання/розділення ланцюгів живлення і інформаційних сигналів, внаслідок чого по шахтній телефонній лінії зв'язку стала можливою передача двох інформаційних сейсмоакустичних сигналів - аналогового з частотним діапазоном від 100 Гц до 2,0 кГц, і цифрового з амплітудою 1,5 В, частота якого могла складати від 50 до 100 кГц.



Модифікований підземний напівкомплект підключався до наземного напівкомплекту апаратури акустичного контролю АК-1 через телефонну лінію зв'язку, довжина якого могла змінюватися від 1 до 4 км. Узгодження лінії зв'язку здійснювалося для аналогового інформаційного сигналу. Таким чином, модифікований комплект повністю зберігав всі функціональні можливості апаратури АК-1, а додатково – дозволяв також передавати і оцифровані сейсмоакустические сигнали.

Блок-схема конфігурації апаратури при проведенні експерименту подана на рис. 6.2.

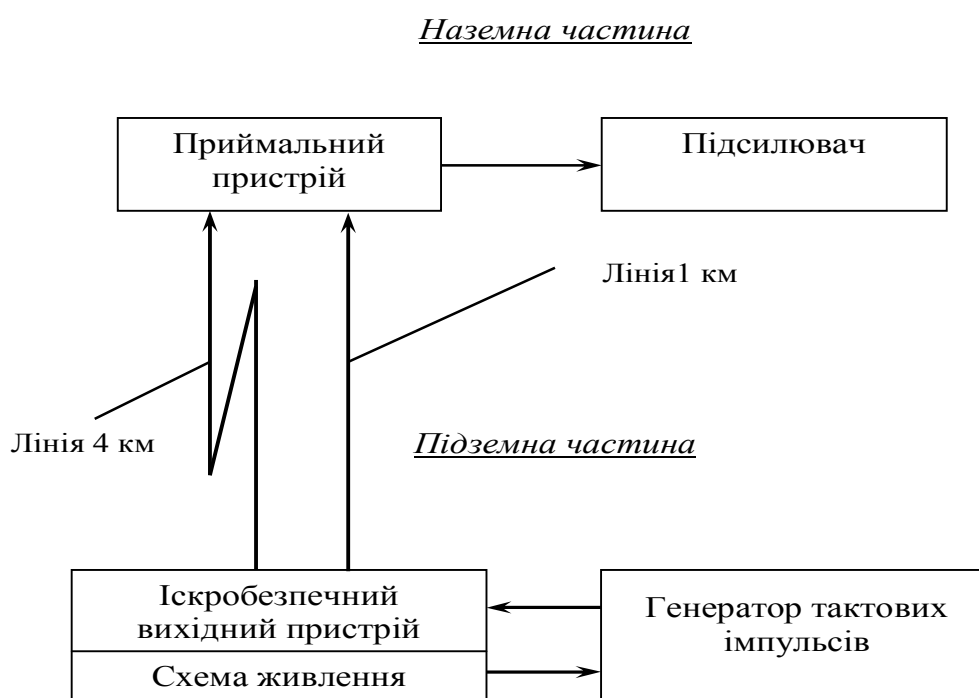
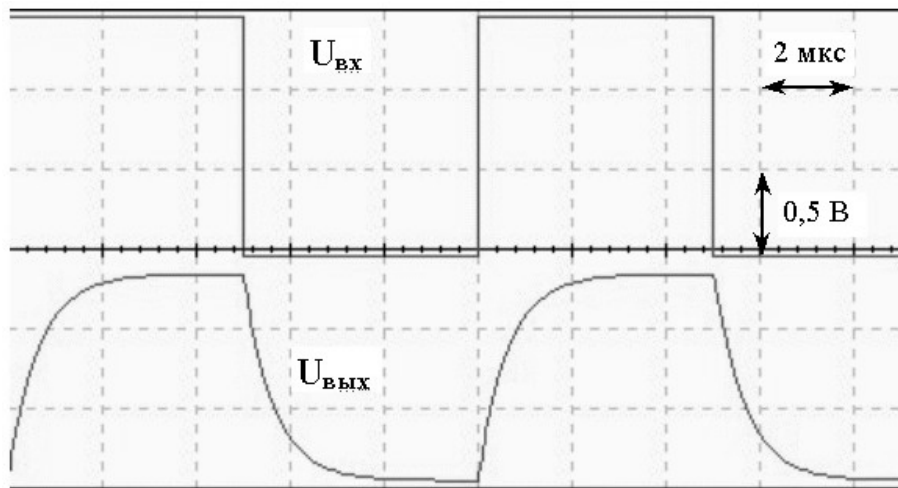


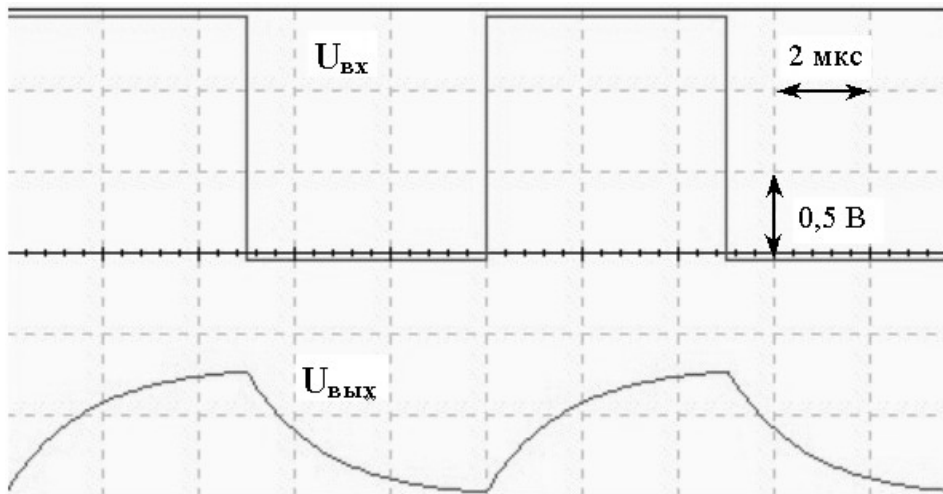
Рисунок 6.2 - Блок-схема конфігурації апаратури при проведенні експерименту

На рис. 6.3 наведені осцилограми цифрових сигналів, що передавалися в лінію зв'язку з частотою 100 кГц ( $U_{вх}$ ), і спостережуваних на її виході ( $U_{вих}$ ) при довжині лінії зв'язку  $L_{лс}$  рівною 1 км (рис. 6.3, а) і 4 км (рис. 6.3, б) відповідно. Вихід лінії зв'язку підключався безпосередньо до входу наземного напівкомплекту апаратури АК-1. Для наочності, осцилограми сигналу на виході лінії зв'язку показані без урахування затримки часу розповсюдження сигналу,

яка в реальних каналах зв'язку (залежно від довжини лінії зв'язку і характеристик кабелю) може складати від одиниць до десятків мікросекунд (тобто від доль до декількох періодів вхідного сигналу). Проте для обробки інформації в системах геомоніторингу ця затримка не має принципового значення.



а)



б)

Рисунок 6.3 – Спотворення форми цифрових сигналів, що передаються по лініям шахтної телефонного зв'язку: а -  $L_{лс} = 1,0$  км, б -  $L_{лс} = 4,0$  км

З приведених на рис. 6.3 осцилограм видно, що цифровий сигнал на виході кабельної лінії зв'язку, хоча і має певне загасання і спотворення форми, але в той же час достатній добре зберігає свої спектральні властивості.

Оскільки інформаційний сигнал передається в лінії зв'язку з частотою, що істотно відрізняється від діапазону спектральних частот перешкод в шахтних каналах зв'язку обумовлених роботою шахтного електроустаткування [62], то це дозволяє відновити його в результаті подальшої обробки [63].

Таким чином, блок-схема реальної системи зв'язку для високошвидкісної передачі даних наведена на рис. 6.4.

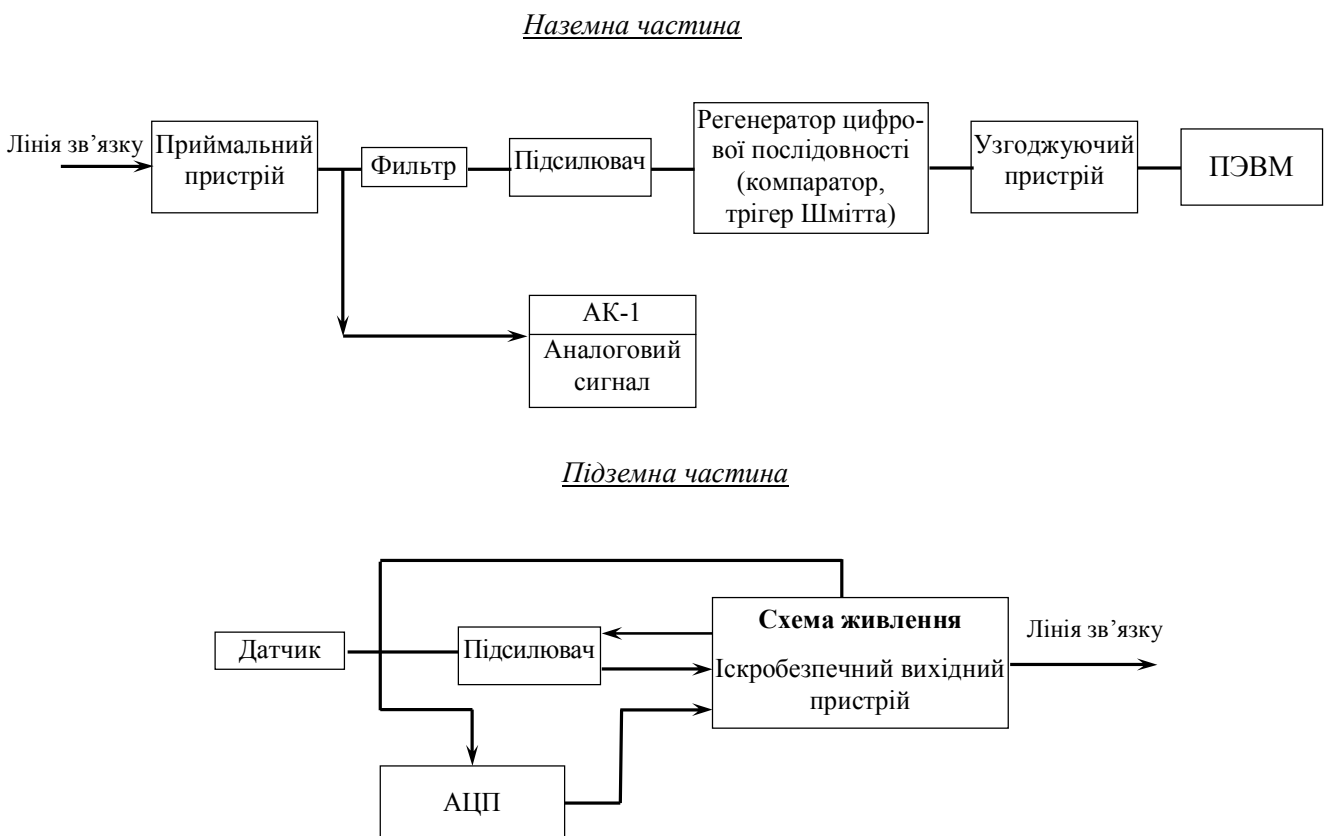


Рисунок 6.4 - Блок-схема реальної системи зв'язку для високошвидкісної передачі даних

### 6.3. Висновки

1. Передача інформаційних сигналів в наземний напівкомплект по шахтних лініях зв'язку в цифровій формі дозволяє розширити можливості систем шахтного геомоніторингу, забезпечуючи можливість аналізу отриманих

сейсмоакустических сигналів з метою виділення їх “тонкої” структури (окремих параметрів і т.п.), необхідної для побудови карти меж відзеркалювальних поверхонь.

2. На основі результатів спектрального аналізу сейсмоакустичних сигналів, що виникають в масиві гірських порід при взаємодії з ним шахтних механізмів, визначені вимоги до апаратури, що забезпечує передачу інформаційних сигналів в наземний напівкомплект по шахтних лініях зв'язку в цифровій формі.

3. Показана принципова можливість високошвидкісної передачі цифрової інформації по шахтних лініях зв'язку в автоматизованих системах геомоніторингу.

## 7 ЗДІЙСНЕННЯ ЗАПИСУ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ШАХТНИХ УМОВАХ ПРИ ПЕРЕТИНІ РЕАЛЬНИХ ЗОН ЗІ СТРУКТУРНИМИ ТА СИЛОВИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ

### 7.1 Установка апаратури на вибраних об'єктах досліджень

Для здійснення вимірів застосовувалася апаратура акустичного контролю типу АК-1, що складається з наземного блоку обробки сигналів, розташованого на поверхні в приміщенні АСУП шахти, і підземної капсули-підсилювача з виносним геофоном, розташованих на підземній станції виміру. Станція виміру була шпуром  $\varnothing 42$  мм і завдовжки 2 м, пробуреного в породах покрівлі на відстані 15-20 м від площі забою (рис. 7.1).

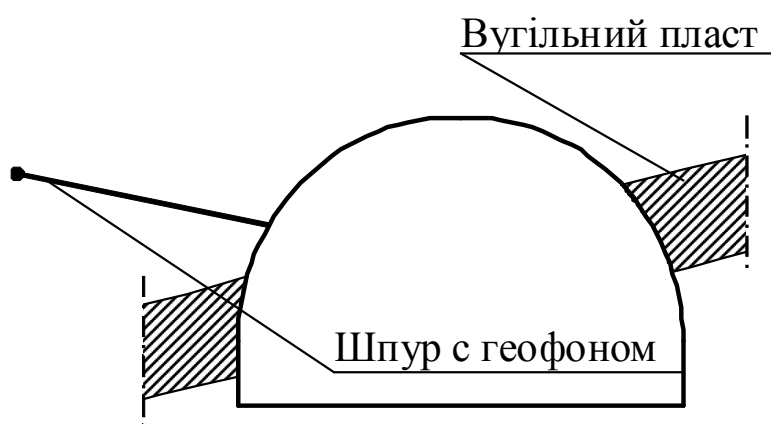


Рисунок 7.1 – Схема станції виміру

Зв'язок наземної і підземної частин апаратури відбувається по штатній лінії зв'язку («відкрита пара») загальношахтної системи АГЗ або внутрішньошахтному зв'язку.

Перехід станції виміру в робочий режим вимірювання відбувається після закінчення 1-2 діб з моменту установки підземної частини, які необхідні для обтискання геофону породним масивом.

В ході посування забою (у міру збільшення відстані до джерела звуку – прохідницького комбайна) на відстань до 50 м від геофону, готується наступний шпур, встановлюється другий геофон і надземний блок перемикається на новий геофон. Геофон, встановлений на попередній станції, витягується і використовується надалі для підготовки наступних станцій.

Надземна частина апаратури аналізує сигнал, що поступає з шахти. Результат аналізу шуму роботи комбайна фіксується на жорсткому диску комп'ютера, встановленого поряд з надземним блоком апаратури АК-1 в приміщенні АСУП, у вигляді кривої, що відображає рівень напружень, що виникає попереду забою штреку в неторканій області гірського масиву.

#### 7.1.1 Вимоги до місця установки приймальних датчиків

Підземна частина (приймальні датчики) апаратури збору і передачі акустичній інформації з масиву на поверхню шахти є невід'ємною складовою системи проведення вимірювань. Якість системи, її точність залежать від ступеня відповідності початковій інформації, що вміщена в структурі акустичних сигналів, що розповсюджуються в породному масиві і електричних сигналів, що поступають на вхід поверхневого блоку обробки. Проміжною ланкою в такому ланцюзі є датчик-перетворювач (геофон, підсилювач) і лінія зв'язку. Технічна реалізація розміщення датчика з погляду забезпечення достовірності інформації, що приймається, вимагає одночасного виконання ряду вимог.

До *функціональних вимог* відноситься, в першу чергу, забезпечення можливості реєстрації коливань у вуглепородному масиві. Така можливість повинна бути забезпечена встановленням датчика в масив. Оскільки в процесі встановлення (буріння шпуру) створюється оголення, то виявляється, що датчик встановлений на межі розділу двох середовищ – повітрям і твердою, де швидкісні параметри акустичних коливань, з одного боку відрізняються на порядок, з іншого боку – повітряне середовище є джерелом перешкод у вигляді

звуків випадкового характеру, що не підлягають подальшому аналізу. Тут мається на увазі те, що кінець кінцем повинне аналізуватися зміна стану вуглепородного масиву, а не повітряного середовища.

Оцінка стану досліджуваної області шляхом «прозвучування» її за допомогою акустичних коливань має на увазі розташування її між джерелом сигналу і датчиком. Така умова стосовно існуючих технологій відробітку пластів виявляється практично нездійсненною. Проте, з урахуванням шаруватої структури вуглепородного масиву «вугілля – вміщуючі породи» завдяки істотній відмінності фізико-механичних властивостей цих шарів, виявляється можливим приймати сигнали з досліджуваної області на значному видаленні від неї (у бік виробленого простору) за рахунок високої акустичної провідності міцного шару пісковика або інших вміщуючих порід основної покрівлі, що володіють значно більшою акустичною жорсткістю порівняно з вугіллям.

До *технологічних вимог* відносяться, в першу чергу, відсутність втручання в існуючу технологію проведення основних робіт в шахті (очисних, прохідницьких, підготовчих) при проведенні акустичних спостережень. Така можливість забезпечується відповідним розміщенням датчика поза зоною ведення робіт за рахунок використання вказаної вище можливості.

Наявність кута нахилу вугільного пласта щодо горизонтального рівня в перетині виробки в умовах достатньої високої його водонасиченості обумовлює наявність ризику попадання вологи в електричний ланцюг датчика. Виходячи з цього, доцільною є установка датчика в шпур, що вибурюють під деяким позитивним кутом щодо горизонту з боку частини пласта, що повстає, спостережуваного в перетині виробки.

Обов'язкова умова забезпечення приналежності тіла датчика загальній структурі масиву може бути досягнуте за рахунок затиску (розклинювання) його в свердловині. Якісніший контакт досягається задавлюванням датчика за рахунок деформації свердловини в місці установки вагою вищерозміщених порід і додатковим навантаженням в зоні концентрацій напружень. Достатній

для цих цілей час повинен бути врахований при перемиканнях від одного датчика до подальшого в ході посування виробки. Для вибору оптимального місця установки датчика необхідним є урахування конкретних гірничо-геологічних умов шахти, характеристик залягання пласта і профілю виробки.

Окрім вищесказаного, до технологічних вимог слід також віднести вимогу до інтеграції робіт з установки підземної частини апаратури і подальшій її періодичній перестановці в ході посування забою виробки (а отже, і джерела сигналу – механізму видобувного або прохідницького). Така інтеграція є доповненням (змінюю) в паспорт ведення робіт у виробці (лаві), в якому встановлюється апаратура, що відображає додаткові роботи по бурінню свердловин, установці в них датчиків і тому подібне.

#### 7.1.2 Установка періодичності перенесення підземної частини вимірювальної апаратури

Періодичність перестановки датчика визначається швидкістю посування виробки і радіусом його дії. Визначальною вимогою є нерозривність процесу акустичного контролю стану виробки при можливих місцеположеннях джерела акустичної дії (комбайн, буровий механізм, струг). Оцінка проводиться суб'єктивним методом шляхом прослуховування роботи вказаних механізмів. Визначення радіусу дії епізодично підтверджується методом експертної оцінки при прослуховуванні контрольних ударів по забою (пікетам по довжині лави). Визначення періодичності перестановки датчика при веденні прохідницьких робіт проводиться за формулою:

$$T_{пер} = \frac{20}{l_{см}}, \text{ змін}$$

де  $T_{пер}$  – періодичність перестановки датчика, змін; 20 – максимальна відстань від місця установки датчика до площини забою, м;  $l_{см}$  – змінне посування забою, м/зміну:



$$l_{см} = \frac{v_{мес}}{n_{р.дней} \cdot n_{прох.см}}, \text{ м,}$$

де  $v_{мес}$  – темпи проходки в місяць, м/міс;  $n_{р.дней}$  – число робочих днів за місяць;  $n_{прох.см}$  – кількість змін по проходці за добу. Фактична відстань від датчика до площини забою змінювалася від 40 до 10 м, тобто періодичність перестановки (перебурювання) датчика складала 30 м. При цьому включення датчика в роботу проводилося не раніше, чим через добу після його установки для навантаження його масивом з метою забезпечення їх надійного контакту.

## 7.2 Методика проведення акустичних спостережень

Подана методика регламентує порядок проведення акустичних спостережень з використанням апаратури АК-1

1. Апаратура АК-1 підключається до окремої лінії зв'язку і встановлюється на службі сейсмопрогнозу шахти (поверхневий блок), блок підземний встановлюється в забої вибраного для установки апаратури виробки.
2. Оператори служби сейсмопрогнозу роблять поточні відмітки в журналі про час початку-закінчення робіт в забої згідно «Інструкції для операторів».
3. Начальник служби прогнозу періодично здійснює візуальний контроль за поточними свідченнями блоку поверхневого АК-1.
4. У разі перевищення поточними значеннями критерію «небезпечно», начальник служби прогнозу приймає цю інформацію до уваги і може здійснювати її повторну перевірку нормативними способами.
5. Слюсарі служби сейсмопрогнозу забезпечують періодичну перестановку датчиків, перевірку лінії зв'язку і перемикання датчиків згідно «Інструкції для слюсаря»

### 7.2.1 Інструкція для співробітників служби сейсмопрогнозу шахти по веденню акустичних спостережень із застосуванням комплексу апаратури АК-1

- I. Оператори служби сейсмопрогноза ведуть журнал поточних спостережень з відмітками часу початку-закінчення робіт в забої, вказівки видів робіт і вживаних механізмів.
- II. У разі пропажі мережі живлячої напруги 220 В/40 Гц забезпечити перезавантаження комп'ютерів згідно інструкції «Порядок першого включення комплексу АК-1» і «Робота з комплексом «Самописець».
- III. Періодично (не рідше за 2 рази на добу) контролювати стан лінії зв'язку з підземною частиною апаратури АК-1 за допомогою перемикача на передній панелі поверхневого блоку АК-1 і на слух за допомогою акустичних колонок.
- IV. Поточну інформацію блоку обробки АК-1 про поточний стан контрольованої виробки взяти до відома, при необхідності робити відмітки в журналі у разі підтвердження критичних значень, що набувають, нормативними методами (по початковій швидкості газовиділення і тому подібне).
- V. Начальник служби перевіряє поточне відставання місця установки приймальних датчиків і досягши 50 метрів ухвалює рішення про їх перестановку.
- VI. Слюсарі служби забезпечують поточну перестановку підземних приймальних датчиків згідно затвердженому головним інженером шахти доповненню до паспорта прохідницької ділянки і забезпечують нарощування і перевірку лінії зв'язку.

### 7.3 Порядок первинного накопичення і зберігання інформації

При установці на шахті акустичної апаратури з моменту її запуску в роботу проводиться первинне накопичення результатів акустичного аналізу

стану виробки і зіставлення отримуваної інформації з даними обстеження виробки шляхом застосування нормативних локальних методів оцінки її стану з метою формування «базових рівнів» для апаратури акустичних вимірювань. Час накопичення повинен складати не менш 3-х прохідницьких циклів, або виїмки не менш 3-х смужок вугілля. Ситуація у виробці, що оцінюється локальними методами повинна бути безпечною. При використанні методу і апаратури АК-1 в цьому випадку проводиться установка режимів фільтрації (силами представників НГУ) для даної виробки. Нормальному режиму фільтрації апаратури відповідають свідчення її вихідного пристрою в межах значень  $K=0,5-1$  при роботі механізмів. При проведенні подальших вимірювань вибрані режими залишалися незмінними.

Зберігання на жорстких носіях підлягають початкова акустична інформація, передана із забою виробки у вигляді шуму механізмів, що працюють в ній (з відміткою часу, номера виробки і так далі)

7.4 Обробка і аналіз інформації, зібраної в ході оперативного контролю стану вуглепородного масиву акустичним методом на прикладі шахти «Краснолиманська» ДП «Вугільна компанія «Краснолиманська»

Метою проведених досліджень було віднайдення зон аномальної напруженості у структурно-неоднорідному вуглепородному масиві, небезпечних з точки зору можливості розвитку ГДЯ, методом акустичного зондування ближньої області гірничого масиву. Інформація про зміни НДС середовища, що прозвучується, обумовлені входженням вибою виробки у небезпечну зону, отримувалася шляхом проведення спектрального аналізу акустичних сигналів, які розповсюджуються у масиві і генеруються механізмами, що працюють у вибої.

Об'єктом досліджень був вибраний монтажний ходок у 8-му південному конвеєрному штреку ухилу 1 «біс» пласта  $K_5$ . При виборі виробки враховувались такі фактори як перехід зон геологічних порушень, наявність

ГДЯ за час проведення випробувань.

Для здійснення вимірів використовувалася апаратура АК-1 за методикою, викладеною вище.

Обробка інформації полягала у взаємній ув'язці всіх отриманих даних з метою отримання цілісної картини процесу зміни напруженого стану масиву і відбору проміжків часу, відповідних роботі механізмів у виробці, що генерують в масив пружні коливання. Цей відбір проводився на підставі даних, отриманих з журналу, що заповнюється операторами служби сейсмопрогнозу шахти за свідченнями часу початку-закінчення робіт в забої з вказівкою виду робіт.

Аналіз інформації полягав у спостереженні зміни рівня сигналу показників апаратури АК-1 на електронному самописці у часі, тобто у процесі посування вибою, і обліку даних про поточну ситуацію у вибої. На рис. 7.2 показані приклади оброблених п'ятихвилинних фрагментів запису реєстраційної інформації з результатами статистичної обробки.

На рис. 7.3 та у додатку А наведені погодинні (з вказівкою часу) інтервали часу запису показань апаратури АК-1 у відносних одиницях відносного рівня напружень показника  $K$  у масиві при різних видах роботи (виїмка, буріння, нагнітання) в ході посування вибою у період з 05.05.2008 по 26.05.2008 року.

Протягом доби відмічаються годинні інтервали часу, що дозволяє прив'язати показання апаратури АК-1 до місця знаходження комбайна, який працює

Комплексний показник викидонебезпечності  $K$  відображає результат обробки спектрального складу акустичних коливань, які розповсюджуються у масиві на деякій відстані від їх джерела (робочого органу комбайна). Зміни величини показника  $K$  викликані змінами властивостей середовища розповсюдження коливань, а саме змінами НДС на достатньому видаленні від джерела коливань. Зменшенню значень  $K$  відповідають зменшення значень напруженості і навпаки.

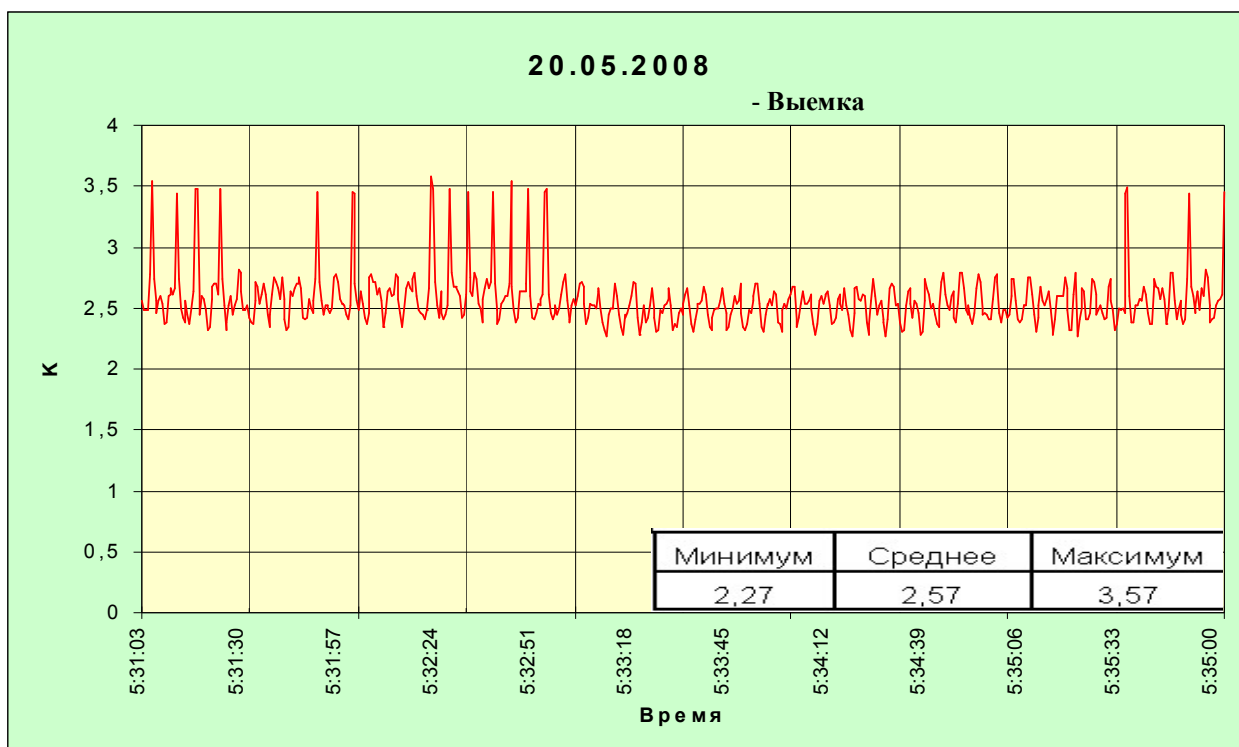


Рисунок 7.2 - Фрагменты п'ятихвилинного запису реєстраційної інформації з результатами статистичної обробки

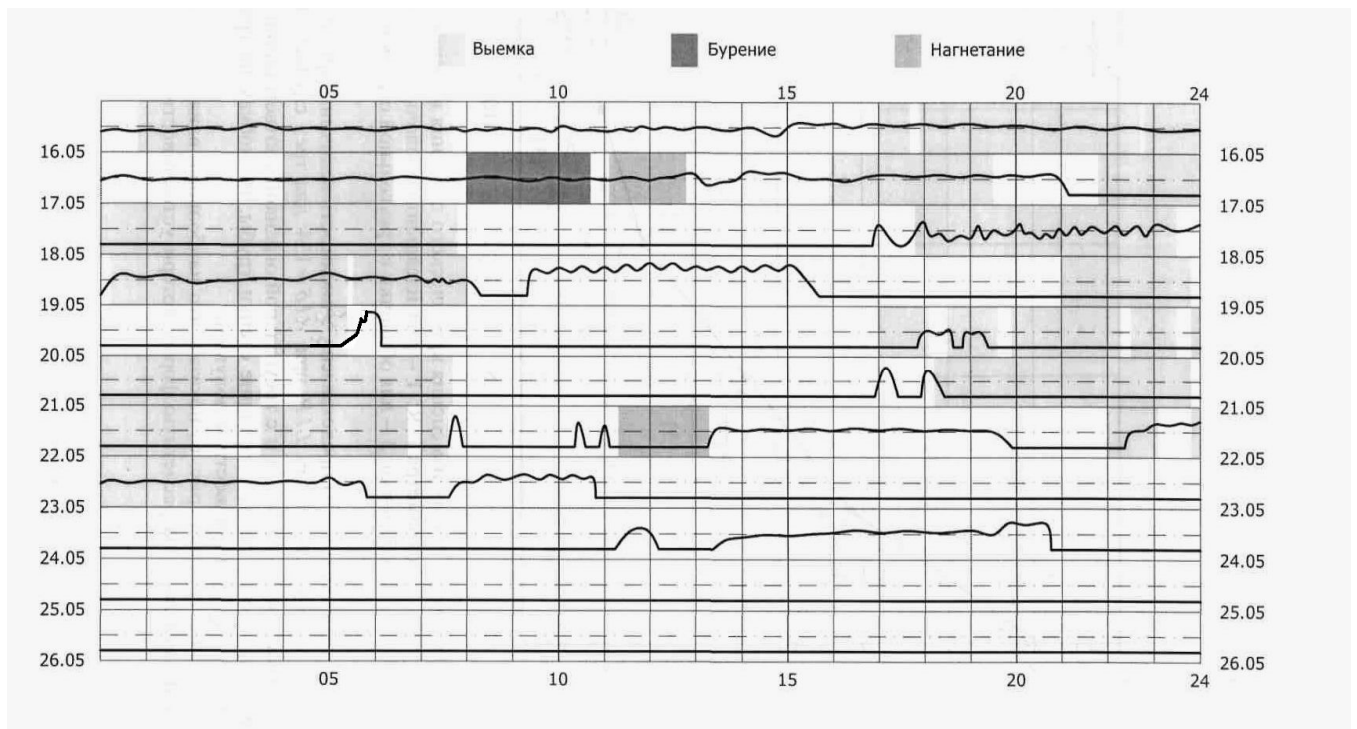
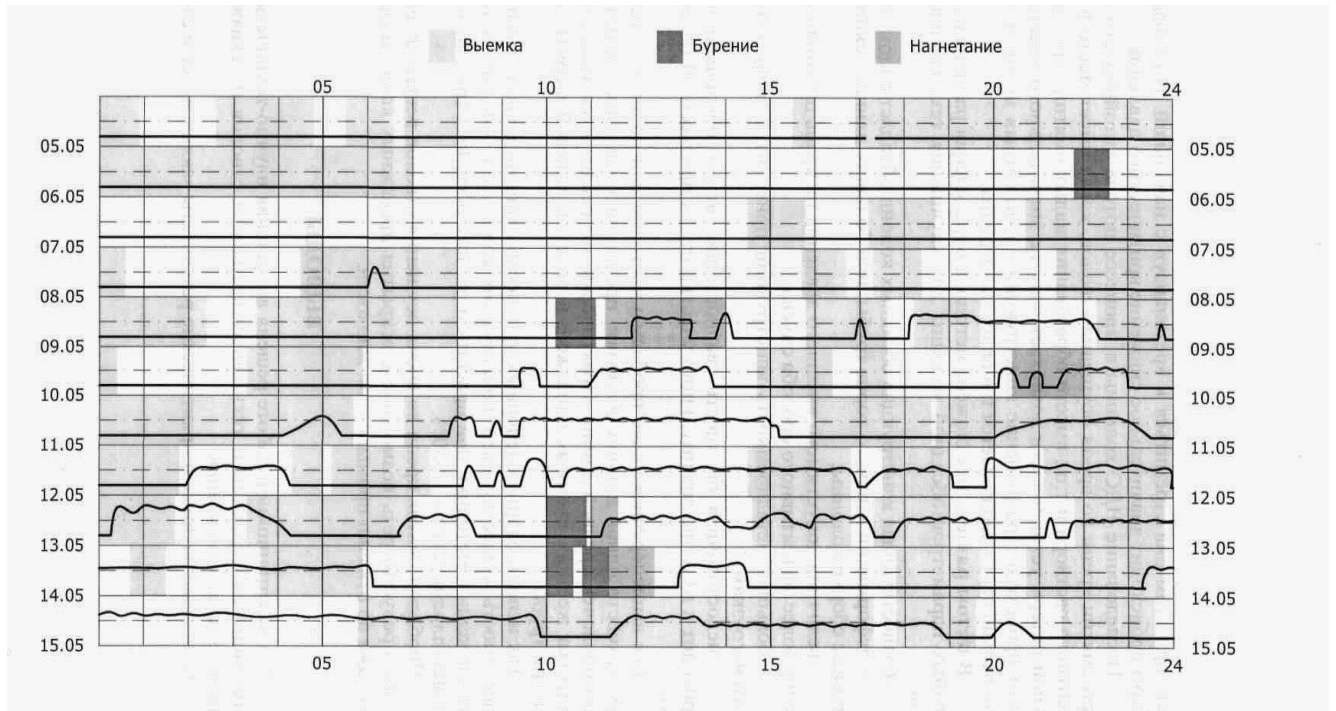


Рисунок 7.3 - Погодинні інтервали часу запису показників апаратури АК-1 у відносних одиницях рівня напружень ( $K$ )

Пунктиром на рис. 7.3 показаний рівень показника викидонебезпечності  $K$ , який відповідає прогнозу «небезпечно», тобто  $K = 3$  [47, 48, 65].

Інформативними вважалися тільки показання апаратури АК-1, зафіксовані у процесі виїмки під час роботи комбайна.

Слід зазначити, що настройки апаратури АК-1 орієнтовані на спектральний склад акустичних коливань в породному масиві, що виникають при роботі комбайна, і в процесі реєстрації не змінюються. Тому інформативними слід рахувати тільки свідчення апаратури АК-1, зафіксована в процесі виїмки при працюючому комбайні. Оскільки спектральний склад акустичних коливань, що виникають в процесі буріння і нагнітання свердловин, відмінний від спектру коливань, обумовлених роботою комбайна, то свідчення апаратури АК-1 під час виконання цих робіт (а також при виконанні інших видів робіт) можуть розрізнятися.

Оскільки дія робочого органу комбайна на забій, результатом якого є зондуєчий сигнал в масиві, носить випадковий характер, то для отримання об'єктивнішої оцінки, інформація, зареєстрована за допомогою реєстратора, піддавалася попередній обробці – згладжуванню (усередненню) на п'ятихвилинному інтервалі. Це дозволило мінімізувати флуктуації інформаційного сигналу, обумовлені нерівномірністю взаємодії робочого органу комбайна з породним масивом, а також позбавитись впливу стаціонарних і нестаціонарних перешкод, що впливають на корисний сигнал, який передається лінією зв'язку. Приклад такої обробки наведений на рис. 7.4. Отримані в результаті обробки усереднені значення позначені маркерами-колами і умовно віднесені до початку п'ятихвилинного інтервалу, який аналізується.

Для отримання загальної картини поведінки комплексного показника викидонебезпечності  $K$  в ході спостереження з 22.03.2008 по 02.06.2008 року, що відповідало посуванню прохідницького комбайна на 290 м, були об'єднані всі добові інтервали запису показника  $K$ , який характеризує ступінь напруженості масиву. Вони були співставлені з видами робіт, що

виконувалися, що дозволило здійснити відбір інформативних показників апаратури АК-1.

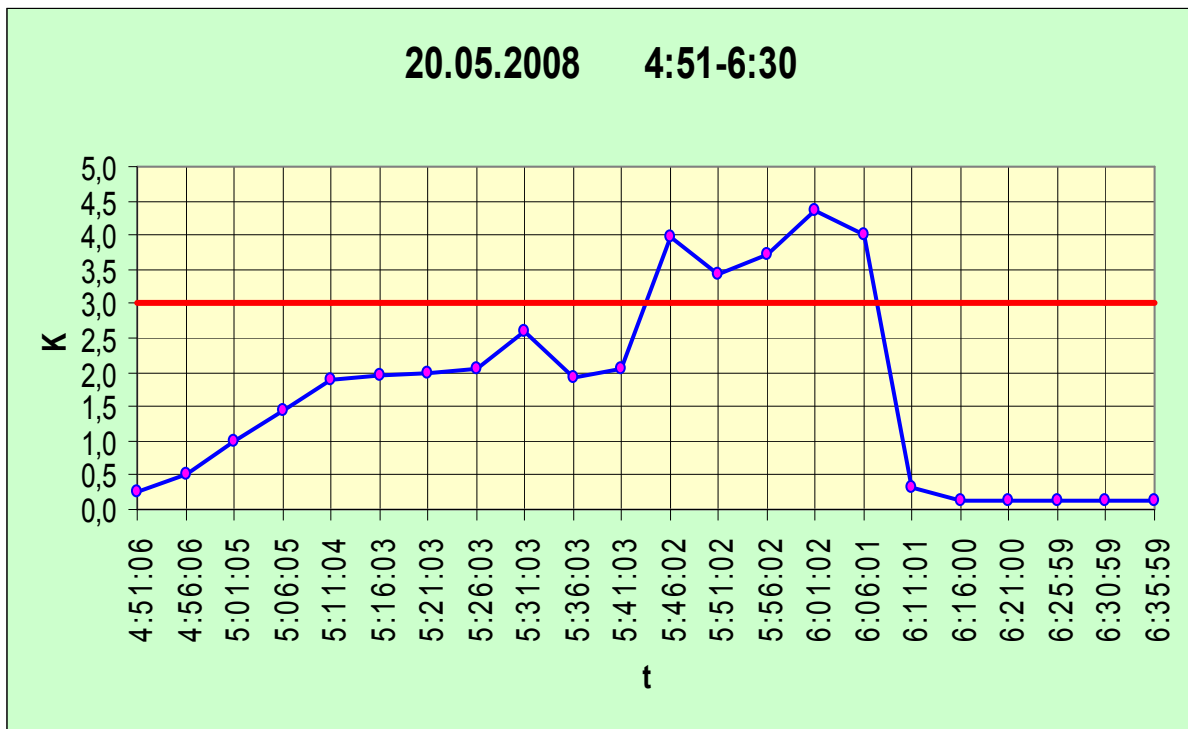


Рисунок 7.4 – Приклад попередньої обробки запису інформаційного сигналу апаратури АК-1

На рис. 7.5 поданий результативний графік добового прогнозу на основі показань апаратури АК-1, який дає оцінку загальної ситуації у вибої за весь період спостереження від 22.03.2008 по 05.06 2008 року. За наявності протягом доби принаймні одного прогнозу «небезпечно» результативним добовим прогнозом вважається «небезпечно», що відображається на графіку одиничним стовпчиком. Якщо протягом доби не було прогнозу «небезпечно», то результативним добовим прогнозом вважається «не небезпечно», що відображається на графіку нульовим рівнем. У період з 23.05 по 29.05 спостереження не проводились у зв'язку з зупинкою роботи шахти з причини раптового викиду вугілля та газу у вентиляційному ходку 2-ї західної лави пласта  $L_3$ , що стався о 04:10 23.05.2008 року. Ділянка, на якій стався викид, не відносилася до зони спостереження при проведенні поточного експерименту.



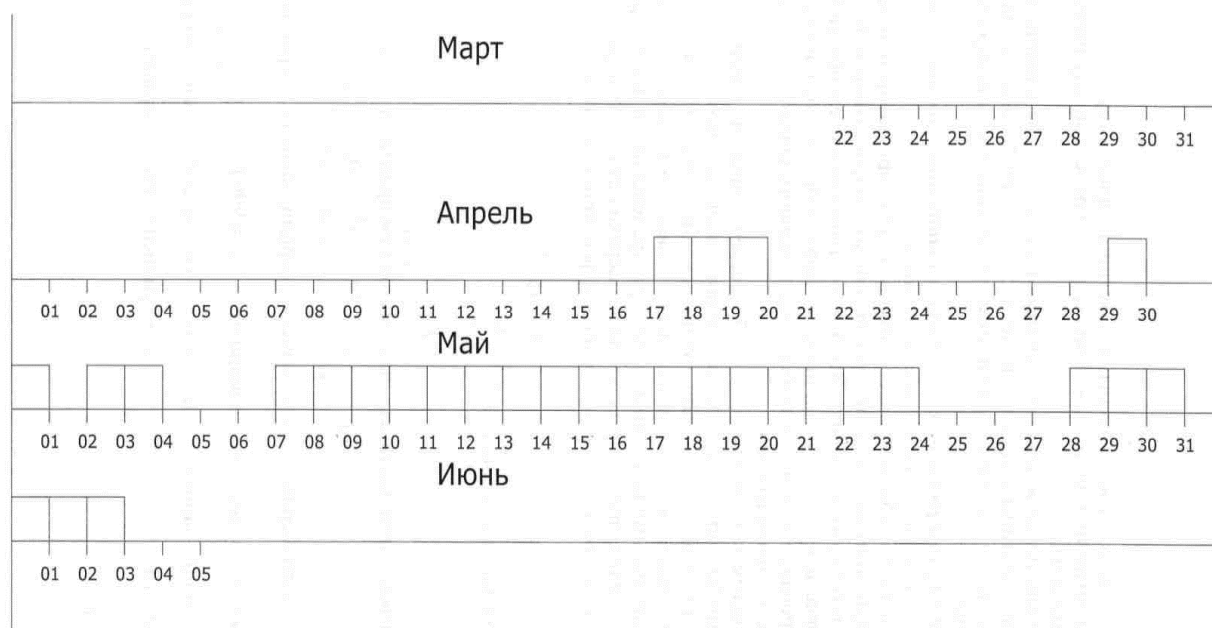


Рисунок 7.5 - Результуючий графік добового прогнозу на основі показань апаратури АК-1, за термін спостережено з 22.03.2008 по 05.06.2008 року

Таким чином, інформація, зібрана в ході натурних вимірювань представлена в наступному вигляді:

1) Результуючого графіка (рис. 7.3), що подобово відображає значення прогностичної ознаки  $K$  (за свідченнями апаратури АК-1) в породному масиві при різних видах роботи (виїмка, буріння, нагнітання). Він показує загальну картину зміни показника  $K$  (напруженості масиву) в ближній області масиву в ході посування прохідницького комбайна. У середині доби наголошуються годинні інтервали часу, що дозволяє прив'язати свідчення апаратури АК-1 до місцеположення працюючого комбайна, що змінюється в ході посування забою в процесі виїмки.

2) Результуючого графіка добового прогнозу на основі свідчень апаратури АК-1 (рис. 7.5), що дає оцінку загальної ситуації в забої. За наявності в перебігу доби хоч би одного прогнозу «небезпечно», результуючий добовий прогноз вважається «небезпечно», і відображається на графіку одиничним стовпцем. Якщо протягом доби не було прогнозу «небезпечно», то результуючий добовий

прогноз вважається «не небезпечно», і відображається на графіку нульовим рівнем.

## 7.5 Висновки

1. Для здійснення вимірів застосовувалася апаратура акустичного контролю типу АК-1, що складається з наземного блоку обробки сигналів, розташованого на поверхні, і підземної капсули-підсилювача з виносним геофоном, розташованих на підземній станції виміру.

2. Сформульовані вимоги до установки підземної частини апаратури акустичного спостереження, розрахована періодичність її перестановки в ході проведення спостережень залежно від режиму роботи забою виробки і швидкості його посування.

3. Розроблена методика проведення акустичних спостережень на об'єктах досліджень і інструкція для співробітників служби сейсмопрогноза шахти по веденню акустичних спостережень із застосуванням комплексу апаратури АК-1. Встановлений порядок первинного накопичення і зберігання акустичної інформації.

5. Обробка інформації полягала у взаємній ув'язці всіх отриманих даних з метою отримання цілісної картини процесу зміни напруженого стану масиву і відбору проміжків часу, відповідних роботі механізмів у виробці, що генерують в масив пружні коливання.

6. Аналіз інформації полягав в спостереженні зміни рівня сигналу свідчень апаратури АК-1 на електронному самописці з часом, тобто в процесі посування забою, і обліку даних про поточну обстановку в забої.

7. В результаті обробки та аналізу отриманої інформації можна зробити наступні висновки:

- зміни показника  $K$ , який характеризує рівень НДС масиву у межах області, що досліджується, за час спостережень мали нульові значення протягом березня., 24-х днів квітня і перевищили небезпечний рівень протягом

практично усього травня і чотирьох днів квітня. Якісна оцінка стану виробки протягом періода спостережень може бути дана як нормальна протягом березня і як небезпечна протягом травня;

- незмінність технології робіт у виробці протягом періоду спостережень відносно методу оцінки її стану дозволяє зробити висновок що акустичні показники у вигляді конкретного комплексного показника викидонебезпечності  $K$  віддзеркалюють реальну ситуацію у вибої з тоочки зору можливого розвитку ГДЯ;

- висновки «небезпечно», отримані за даними вимірів, протягом місяця не підтверджені реальними ГДЯ у межах виробки, що контролювалася, можуть свідчити про занадто високу чуйність апаратури щодо показника викидонебезпечності  $K$ , тобто у даному випадку виявилися зафіксованими аномалії напруженого стану вуглепородного масиву, які не мали у подальшому розвитку у вигляді раптового викиду вугілля та газу. Відмічаючи ефективність існуючих методик прогнозу НДС породного масиву на основі спектральних методів аналізу акустичного сигналу слід продовжити дослідження з удосконалення методики їх використання з метою підвищення надійності виявлення зон з аномально високим НДС.

## 8 СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМІ ОПЕРАТИВНОГО СКАНУВАННЯ ПОРОДНОГО МАСИВУ

8.1 Програмне забезпечення реєстрації прогностичного коефіцієнту для системи моніторингу напружно-деформованого стану породного масиву методами акустичного контролю

Апаратура акустичного контролю АК-1 [45], розроблена на кафедрі будівництва і геомеханіки НГУ, відображає поточний рівень прогностичного коефіцієнту викидонебезпечності  $K$  на шкалі стрілочного приладу. В разі необхідності до її виходу може бути підключена апаратура реєстрації, яка забезпечує накопичення інформації про зміни прогностичного коефіцієнту у часі. Зазвичай для реєстрації використовуються самописці або шлейфові осцилографи. Проте вони забезпечують тільки реєстрацію на паперові чи плівкові носії і все подальше, досить трудомістке, обробка інформації здійснюється вручну.

Можна суттєво прискорити процес обробки інформації про зміни прогностичного коефіцієнту у часі шляхом використання в якості апаратури реєстрації персонального комп'ютера (ПК), який підключається до виходу апаратури АК-1. Крім задач реєстрації та створення електронних архівів вимірювальної інформації така система дозволяє:

- підвищити наочність подання інформації шляхом забезпечення візуалізації динаміки процесу зміни прогностичного коефіцієнту на екрані монітора ПК;
- проводити аналіз і статистичну обробку інформації у задані проміжки часу;
- автоматизувати процес підготовки різноманітної звітної інформації про зміни НДС породного масиву у часі.

Згідно з цим був розроблений програмно-апаратний комплекс для реєстрації прогностичного коефіцієнту у системі моніторингу НДС породного масиву. Комплекс призначений для вводу у ПК даних, що надходять з виходу апаратури акустичного контролю АК-1, візуалізації даних на екрані монітора у реальному масштабі часу та збереження цих даних у файлі на жорсткому магнітному диску. В разі необхідності збережені на жорсткому магнітному диску дані можуть бути візуалізовані на екрані монітора ПК, а також скопійовані на зовнішні носії інформації (дискети, оптичні компакт-диски і т.п., або флеш-диски).

Розроблений програмно-апаратний комплекс включає:

- 1) модуль узгодження** вихідного сигналу апаратури акустичного контролю АК-1 з ПК (апаратна частина). Модуль узгодження підключається до LPT-порту ПК, а на його вхід подається сигнал з виходу апаратури АК-1. Напруга живлення модуля (+5В) береться з одного з USB-роз'ємів, розташованих на задній панелі корпусу системного блоку ПК;
- 2) персональний комп'ютер.** Мінімально необхідна конфігурація – системний блок, монітор, клавіатура, маніпулятор «миша»;
- 3) програмна частина,** яка складається з двох програм:
  - А) програма реєстрації,** яка забезпечує введення у ПК даних, що надходять з виходу апаратури акустичного контролю АК-1, та візуалізацію даних на екрані монітору у реальному масштабі часу. Програма також забезпечує автоматичне збереження цих даних у файлі на жорсткому магнітному диску. При цьому кожній календарній даті відповідає один файл даних.

(Програмне забезпечення реєстрації прогностичного коефіцієнту для системи моніторингу НДС породного масиву акустичними методами, було апробоване в умовах шахти «Краснолиманська» ДП «Вугільна компанія «Краснолиманська» [66] (див. розділ 7)).

- Б) програма перегляду,** яка забезпечує візуалізацію на екрані монітору ПК даних, раніше збережених на жорсткому магнітному диску.

Програмна частина комплексу розроблена на мові програмування Borland Pascal 7.0, частина комплексу розроблена на мові програмування і забезпечує роботу у реальному масштабі часу під управлінням операційної системи MS-DOS.

8.2 Розробка структури програмного забезпечення для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву

8.2.1 Принципи розробки архітектури програмного забезпечення для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву

В [67] було показано що вихідний сигнал системи оперативної діагностики НДС породного масиву має досить складну просторово-часову структуру, характерними особливостями якої є багатокomпонентність і нестационарність. Мультиплікативний характер формування цього сигналу призводить до того, що фрагменти вихідного сигналу, які відповідають різним технологічним процесам, мають різну інформативність для задач діагностики стану масиву і повинні оброблятися різними методами для визначення потрібних інформаційних ознак.

Розглянута вище багатоваріантність методів обробки вихідного сигналу системи оперативної діагностики НДС породного масиву помітно ускладнює задачу реалізації програмного забезпечення (ПЗ) для комплексного аналізу інформаційних сигналів. Вибір методів обробки, що програмно реалізуються, необхідних для реалізації системи для конкретного гірничовидобувного підприємства, суттєво залежить як від технологій відпрацювання породного масиву, що застосовуються, так і від гірничо-геологічних характеристик масиву. Тому набір методів обробки може змінюватись навіть у межах одного підприємства. У зв'язку з цим при розробці ПЗ для комплексного аналізу інформаційних сигналів системи діагностики необхідно передбачити, по перше, можливість комплексування різних методів обробки сигналу, а, по друге, має

бути передбачена можливість гнучкої настройки ПЗ під конкретні умови технологічного процесу. У зв'язку з цим була поставлена задача розробки спеціалізованого ПЗ для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву, яке мало б достатній ступінь універсальності, придатний для рішення широкого кола задач обробки і, на той же час, мало б достатню гнучкість, яка забезпечує настройку ПЗ на конкретний технологічний процес.

В основу розробки цього ПЗ були покладені наступні основні принципи:

- 1. Відкрита архітектура ПЗ**, яка дозволяє забезпечити безпроблемне додавання до програми нових методів обробки і, в разі необхідності, їх комплексування;
- 2. Здатність ПЗ до конфігурування**, яка дозволяє безболісно виключати надлишкові або невідповідні для даних умов методи, що забезпечує настройку ПЗ на конкретний технологічний процес;

У цьому звіті розглянута реалізація першої черги ПЗ для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву, в рамках якої з урахуванням вищевказаних принципів були реалізовані наступні можливості:

- а) введення акустичних інформаційних сигналів – з файлу (у форматі \*.wav) або пряме захоплення сигналу зі звукової карти ПК;
- б) реалізація базових можливостей спектральної обробки акустичних інформаційних сигналів;
- в) виконана програмна емуляція алгоритму обробки інформаційного сигналу в апаратурі АК-1 [47, 65], яка дозволила забезпечити співпоставимість результатів, отриманих у результаті роботи апаратури АК-1 з результатами обробки інформації у розробленому ПЗ;
- г) забезпечується архівація результатів обробки акустичних інформаційних сигналів;

ПЗ було розроблене у середовищі Delphi 7.0 з використанням стандартної для Windows бібліотеки DirectX.

8.2.2 Укрупнений алгоритм програмної реалізації методу визначення прогностичної ознаки викидонебезпечності, реалізованого в апаратурі АК-1

На основі методу визначення прогностичної ознаки, реалізованого в апаратурі АК-1 [47, 48, 65 ], можна запропонувати наступний алгоритм, який забезпечує визначення ознаки викидонебезпечності програмним шляхом:

1. Розділення оцифрованих відліків сигналу на блоки, рівні розміру швидкого перетворення Фур'є \*(ШПФ), кратного ступеню двійки.
2. Множення кожного блоку на вікно зважування для зменшення пульсацій на границях, рівних розміру ШПФ;
3. Виконання швидкого перетворення Фур'є на даному інтервалі;
4. Побудова АЧХ вхідного сигналу;
5. Виділення максимальної і мінімальної амплітуди для заданої смуги верхніх і нижніх частот;
6. Визначення співвідношення амплітуд у області верхніх і нижніх частот для прогностичного коефіцієнту К.

Для зменшення пульсацій на границях перед його виконанням відліки сигналу множуються на вікно зважування. Одною з найчастіше використовуваних функцій вікна є вікно Блекмена:

$$w(k) = 0,45 - 0,5 \cos\left(2\pi \frac{k-1}{n-1}\right) + 0,08 \cos\left(4\pi \frac{k-1}{n-1}\right) \quad (8.1)$$

Рівень першої бокової пелюстки вікна Блекмена становить -58 дБ. Однак вікно Блекмена має дещо більш широку головну пелюстку і менший рівень бокових пелюсток порівняно з вікнами Хаана і Хеммінга тої ж довжини [68].

У основі алгоритму ШПФ лежать формули отримання реальної  $Re$  і уявної  $Im$  складових спектру сигналу  $X(t)$ , які враховують [69]:

$$Re X(i) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * \cos(k * \omega * n) dt, \quad (8.2, a)$$

$$Im X(i) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * \sin(k * \omega * n) dt, \quad (8.2, б)$$

де  $Re X$ ,  $Im X$  – реальна і уявна частини спектру відповідно;



$N$  – кількість виборок значень сигналу;

$x(n)$  – виборка  $n$  значення вхідного сигналу;

$i$  – індекс спектру сигналу;

$\omega = 2\pi / N$  – кругова частота, яка відповідає періоду повторення сигналу, рівному  $N$ ;

Для отримання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) сигналу необхідно скористатися формулою:

$$A_i = \sqrt{(\operatorname{Re} X_i)^2 + (\operatorname{Im} X_i)^2} \quad (8.3)$$

де  $A_i$  –  $i$ -е значення амплітуди сигналу;

$\operatorname{Re} X, \operatorname{Im} X$  – реальна і уявна частини спектру відповідно;

$i$  – індекс, відповідний частоті.

Для перетворення значень частоти у індекс, який відповідає значенню  $n$  спектрального відліку, вирахованого за формулами (8.2а), (8.2б) і (8.3) необхідно скористатися формулою:

$$\text{Index} = \text{Round}((\text{FFTSize}/\text{Sps}) * F_{\text{req}}) \quad (8.4)$$

де  $F_{\text{req}}$  – задана частота;

$\text{Index}$  – індекс частоти  $F_{\text{req}}$ , відповідний індексу масивів спектральних відліків  $\operatorname{Re} X$  і  $\operatorname{Im} X$ ;

$\text{FFTSize}$  – розмір БПФ;

$\text{Sps}$  – кількість виборок за секунду (частота дискретизації аналогового сигналу);

$\text{Round}$  – функція, яка округляє до найближчого цілого значення;

Для отримання максимальної амплітуди у смузі частот, яка аналізується, використовуючи формулу (8.3), вираховують початковий і кінцевий індекси масиву амплітуд частот за формулою (8.4). Для обчислення коефіцієнту  $K$  необхідно скористатися формулою [47, 48]:

$$K = \frac{\operatorname{Max}(A_e)}{\operatorname{Max}(A_n)}, \quad (8.5)$$

де  $\operatorname{Max}(A_e)$  – максимальна амплітуда у заданій області верхніх частот;

$Max(A_n)$  – максимальна амплітуда у заданій області нижніх частот.

Вищеописані дії можна представити у вигляді наступного укрупненого алгоритму (рис. 8.1).

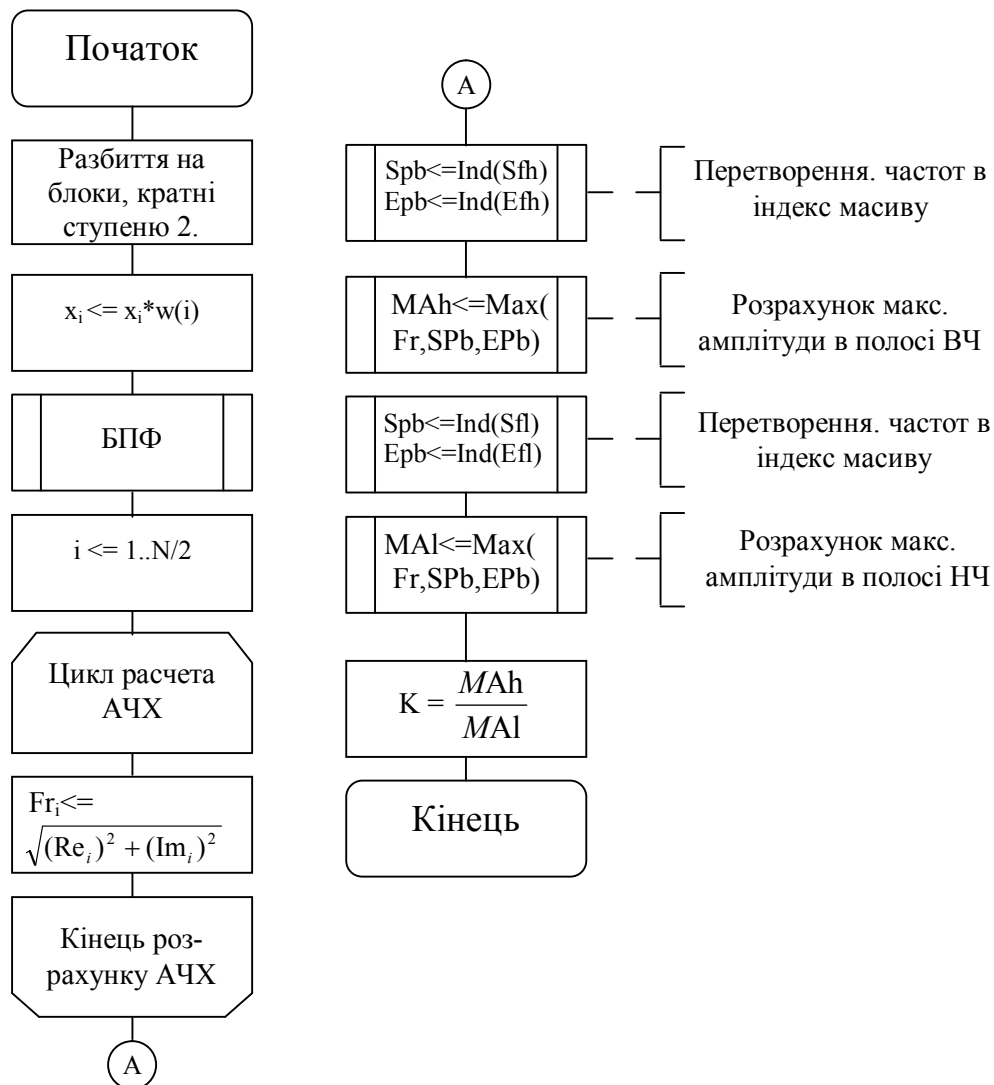


Рис. 8.1 Схема алгоритму обробки цифрової акустичної інформації

8.2.3 Структурна схема ПЗ для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану породного масиву

На основі розглянутої у п. 8.4.2 схеми алгоритму обробки акустичної інформації можна скласти укрупнену схему роботи програми, наведену на рис. 8.2:

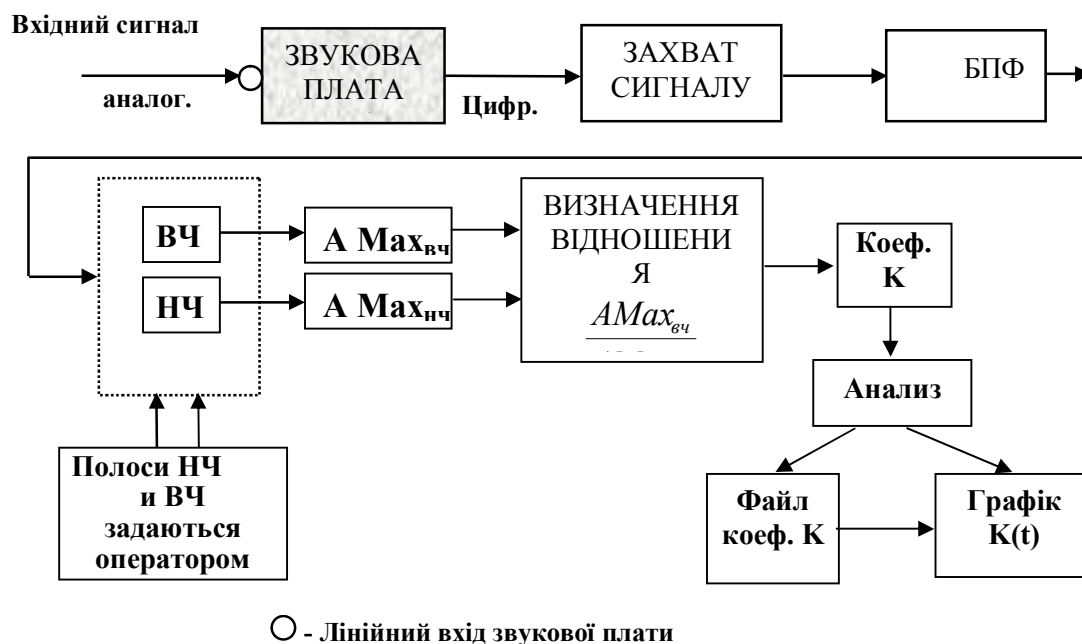


Рисунок 8.2 - Укрупнена структурна схема роботи програми

При аналізі структурної схеми, представленої на рис. 8.2 можна виділити найповільніші за часом виконання ділянки програми. Очевидно, що операції виводу у файл і відображення на графіку є найбільш «вузьким» місцем програми і їх необхідно винести у окремі потоки. Захоплення звуку також доцільно проводити у окремому потоці для виключення можливих затримок на введенні-виведенні.

Враховуючи ці особливості, можна розробити архітектуру ПЗ, представлену на рис. 8.3. Тут показана взаємодія частин програми, пунктирною лінією виділені окремі потоки.

Потік №1 обробляє запити користувача і виконує частково малювання графіка коефіцієнтів виконує частково малювання графіку коефіцієнтів К и графіку АЧХ. Потік № 1 також розділяє з потоком 2 об'єкт "Файл" і забезпечує малювання графіка коефіцієнтів К за заданий час за запитом користувача.

Потік № 2 розділяє кільцевий буфер, у якому знаходяться коефіцієнти К, з потоком № 3. Задача складається в добуванні коефіцієнтів из

потоку – полягає у вилученні значень коефіцієнтів з буфера та їх аналізі, виводі у файл і малюванні їх на графіку.

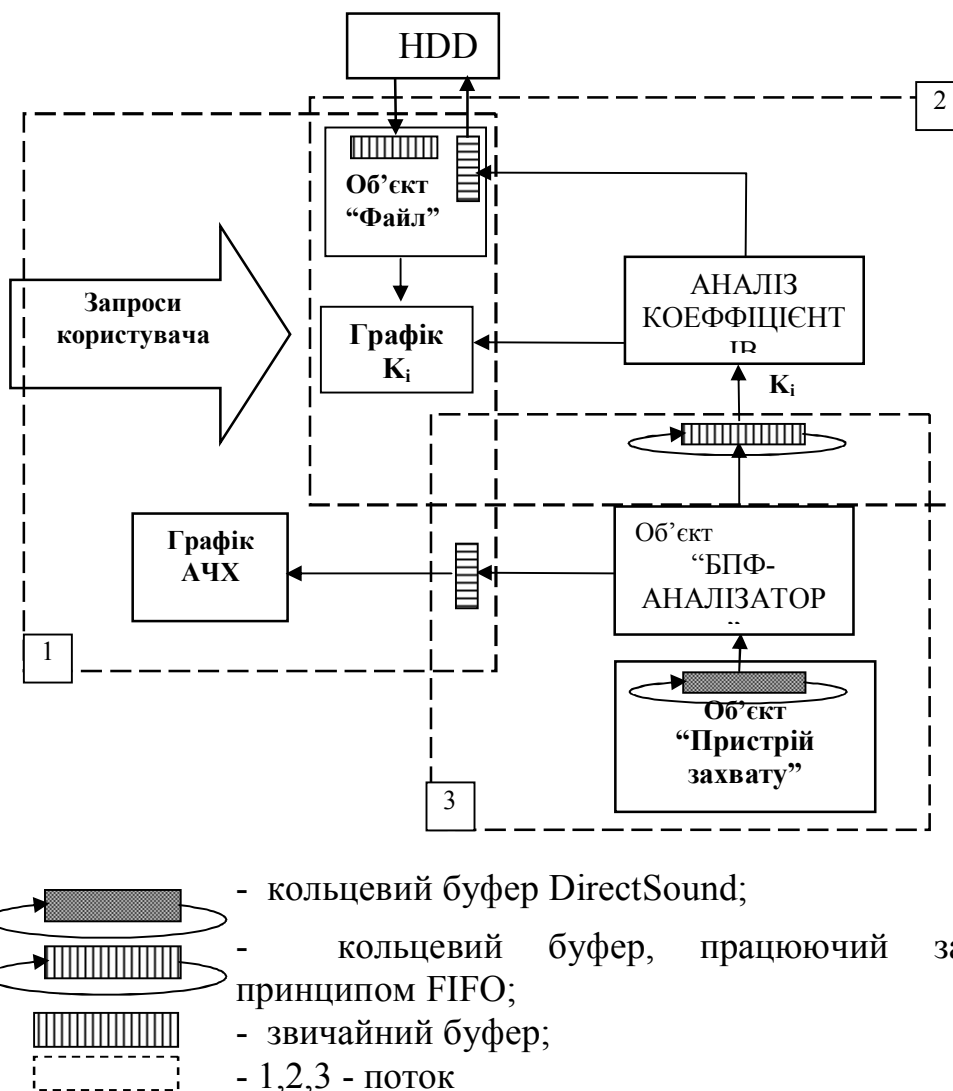


Рисунок 8.3 - Архітектура розробляемого ПЗ, що розробляється

Потік № 3 розділяє з потоком № 1 буфер, у якому містяться значення амплітуд частот, здійснює захоплення звуку і підрахунок коефіцієнтів  $K$ . Також до його задач входять посилання повідомлень до потоку № 1 про заповнення буферу і необхідності будування графіку АЧХ.

Синхронізація між потоками 1 і 2; 1 і 3 виконується за допомогою критичних секцій, між потоками 1 і 2 запис та зчитування з кільцевого буферу синхронізується за допомогою Interlocked-функцій [70].

Затримки на виведення у файл і на графік усуваються завдяки буферизації з використанням внутрішніх буферів у класі «файл», а також за рахунок застосування кільцевого буферу, який працює за принципом FIFO між потоками 2 і 3. Зчитування з файлу здійснюється за запитом користувача потоком № 1, при цьому виведення на графік з потоку № 2 автоматично припиняється.

Затримки на будовання графіку АЧХ усуваються шляхом введення змінної, яка перешкоджає викликанню методу будовання графіку якщо графік вже знаходиться у стані «будовання».

8.2.4 Розробка класів, які забезпечують визначення пристроїв захоплення і задання налаштувань лінійного входу

8.2.4.1 Розробка класу, який забезпечує визначення пристроїв захоплення

Для визначення пристрою захоплення слід скористатися функцією `DirectSoundCaptureEnumerate(...)`, при цьому попередньо описавши функцію зворотнього виклику `DSEnumCallback` і визначивши угоду про її виклик як `stdcall`.

Для зручності визначення всіх пристроїв захоплення у системі і пов'язаних з ними GUID було ухвалене рішення розробити клас – список пристроїв захоплення `TDSCapObjLst`. При цьому для зменшення витрат на написання програмного коду зручно унаслідувати клас `CapObjLst` від вже існуючого класу – списку `TList`. Кожний елемент списку був описаний як укажчик на структуру:

```
TPDirectSoundCaptureObject = ^TDirectSoundCaptureObject;
```

```
TDirectSoundCaptureObject = record
```

```
    pGUID:PGUID;
```

```
    Description:String;
```

```
    Module:String;
```

```
end;
```

де *pGUID* – укажчик на GUID знайденого пристрою;

*Description* – опис пристрою захоплення;

*Module* – назва модуля драйвера пристрою захоплення;

Властивість *Items* класу *TDSCapObjLst* була перевизначена наступним чином:

```
property Items[Index: Integer]:TPDirectSoundCaptureObject read GetDSCapObj
write PutDSCapObj;
```

При виклику функції *DirectSoundCaptureEnumerate(...)* параметр *lpContext* вказує на об'єкт класу *TDSCapObjLst*, що дозволяє додавати до цього списку з пристроїв захоплення нові пристрої.

Клас *TDSCapObjLst* має вигляд, представлений на рис. 8.4:

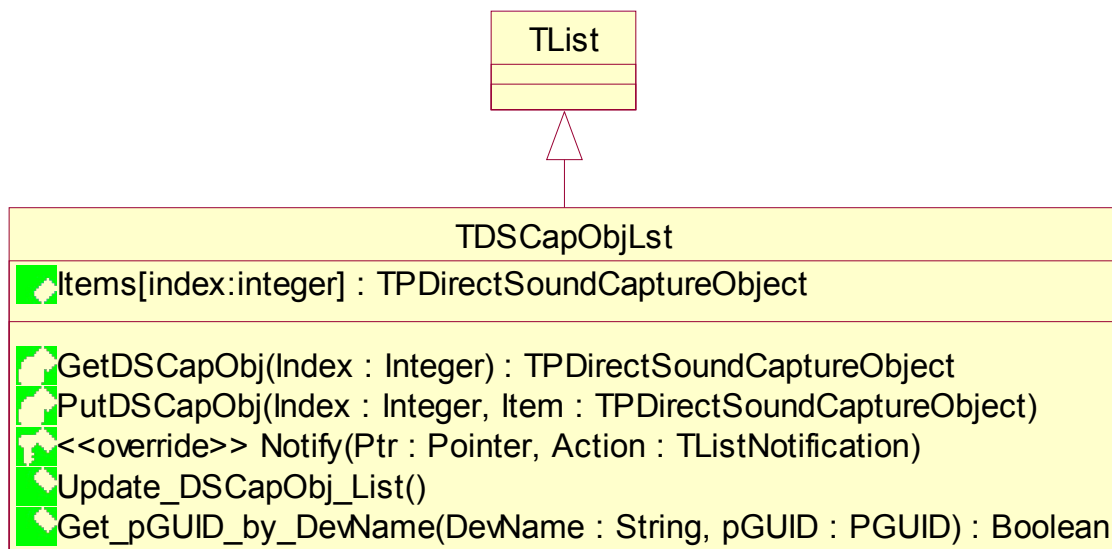


Рисунок 8.4 - Клас *TDSCapObjLst*

На рис. 8.4 показані тільки нові методи і властивості, визначені у класі *TDSCapObjLst*.

Після створення об'єкту класу *TDSCapObjLst* необхідно викликати метод *Update\_DSCapObj\_List()*, який забезпечує заповнення списку інформацією про знайдені пристрої.

Для визначення GUID пристрою можна скористатися методом *Get\_pGUID\_by\_DevName(...)*, передавши у якості *DevName* ім'я пристрою, GUID якого необхідно знайти.

Список всіх пристроїв і інформацію про них можна отримати, скориставшись властивістю Items.

8.2.4.2 Розробка класу, що забезпечує установку настройок лінійного входу

До настройок лінійного входу можна віднести рівні запису і відтворення, включення і виключення виведення звуку з лінійного входу на динаміки ПЕВМ, вибір лінійного входу як джерела захоплення.

Оскільки DirectSound не дає можливості активувати лінійний вхід на вибраному пристрої захоплення, то ухвалено рішення реалізувати дане завдання через функції, що надаються підсистемою аудіо мікшерів (Audio Mixers).

Для завдання настройок лінійного входу необхідно отримати ідентифікатор мікшера необхідного пристрою і ідентифікатори відповідних елементів управління (CONTROLID). Також, для вибору лінійного входу як джерела захоплення необхідно знати додатково:

- а) Індекс лінійного входу в мультиплексорі (або мікшері);
- б) Кількість входів мультиплексора (або мікшера);

Необхідно визначити використовувані константи:

а) Джерелом є:

MIXERLINE\_COMPONENTTYPE\_SRC\_LINE - лінійний вхід;

б) Приймачем є:

1) MIXERLINE\_COMPONENTTYPE\_DST\_SPEAKERS – у разі регулятора гучності лінійного входу для колонок;

2) MIXERLINE\_COMPONENTTYPE\_DST\_WAVEIN – у разі регулятора рівня запису лінійного входу;

в) Тип елемента управління:

1) MIXERCONTROL\_CONTROLTYPE\_VOLUME – у разі завдання рівня запису і гучності;

- 2) MIXERCONTROL\_CONTROLTYPE\_MUTE – у разі включення виведення звуку з лінійного входу на динаміки;
- 3) MIXERCONTROL\_CONTROLTYPE\_MUX або MIXERCONTROL\_CONTROLTYPE\_MIXER – у разі вибору лінійного входу як джерела захоплення;

Для отримання ідентифікаторів елементів управління необхідно виконати наступну послідовність дій:

- а) Визначити необхідний мікшер і його порядковий номер в системі;
- б) Відкрити мікшер пристрою, використовуючи його порядковий номер;
- в) Використовуючи функцію mixerGetLineInfo(.) і вищеописані константи джерела і приймачів, отримати ідентифікатор лінії (LINEID), на якій знаходиться елемент управління;
- г) Використовуючи вищеописані константи елементів управління, ідентифікатор лінії (LINEID) і функцію mixerGetLineControls(.) визначити ідентифікатор елементу управління (CONTROLID).

Для завдання параметрів елементів управління викликається функція mixerSetControlDetails(.) з ідентифікатором заздалегідь відкритого мікшера і покажчиком на структуру **MIXERCONTROLDETAILS**, що містить встановлювані значення.

Отримання параметрів елементів управління виконується тим же способом, що і завдання, за винятком функції mixerGetControlDetails(.), що викликається.

Для зручності завдання параметрів рівня гучності лінійного входу був створений тип TVolArray, оголошений як

$$TVolArray = Array[0..1] \text{ of } Cardinal;$$

При цьому нульовий індекс масиву відповідає рівню лівого каналу, перший – правого.

На рис. 8.5 представлений розроблений клас з його основними властивостями і методами:



| TLineIn |  |
|---------|--|
| ◆       | <<property>> MixerDeviceNumber : Integer                                   |
| ◆       | <<property>> VolControlPlay_ID : Cardinal                                  |
| ◆       | <<property>> VolControlRec_ID : Cardinal                                   |
| ◆       | <<property>> MutePlayControl_ID : Cardinal                                 |
| ◆       | <<property>> MuxOrMixerControl_ID : Cardinal                               |
| ◆       | <<property>> MuxOrMixerCountItems : Cardinal                               |
| ◆       | <<property>> Index_LineIn_in_MuxOrMixer : Cardinal                         |
| ◆       | <<property>> PlayVol : TVolArray   |
| ◆       | <<property>> RecVol : TVolArray  |
| ◆       | <<property>> PlayMute : Boolean  |
| ◆       | OpenMixerByDevNum(MixerDevNumber : Integer, HandleWindow : HWND) : Boolean |
| ◆       | SelectLineIn()   |
| ◆       | LineInIsSelected() : Boolean   |

Рисунок 8.5 - Клас, що забезпечує задання налаштувань лінійного входу

Після створення об'єкту класу TLineIn, необхідно відкрити мікшер, заданого пристрою захоплення за допомогою функції описаної як:

```
OpenMixerByDevNum( MixerDevNumber : integer;
                  HandleWindow : HWND );
```

де *MixerDevNumber* – порядковий номер в системі мікшера, що відкривається;

*HandleWindow* – дескриптор вікна, одержуючого повідомлення про зміну стану мікшера. Може бути нульовим;

Вибір лінійного входу здійснюється за допомогою виклику процедури SelectLineIn(). Дізнатися про вибір лінійного входу як джерело захоплення можна за допомогою виклику функції LineInIsSelected:Boolean.

Задати або отримати рівень запису і відтворення можна скориставшись властивостями PlayVol і RecVol.

Виведення звуку з лінійного входу відключається/включається за допомогою зміни властивості PlayMute.

8.2.4.3 Розробка класу, що забезпечує захоплення звукового сигналу із заданого пристрою захоплення

Процес проведення запису (захоплення) з використанням DirectSound можна розділити на етапи [70]:

### **1. Вибір пристрою.**

За допомогою DirectSoundCaptureCreate і GUID заданого пристрою ініціалізувався інтерфейс IDirectSoundCapture. Список всіх пристроїв з їх GUID-ами можна отримати за допомогою функції DirectSoundCaptureEnumerate(.). Якщо використовується пристрій за умовчанням, то замість покажчика на GUID пристрою необхідно передати NULL.

### **2. Ініціалізація буфера захоплення.**

За допомогою методу інтерфейсу

IDirectSoundCapture::CreateCaptureBuffer(.)

і структури DSCBUFFERDESC

ініціалізувався інтерфейс

IDirectSoundCaptureBuffer.

При цьому в структурі DSCBUFFERDESC задається розмір буфера, його формат, додаткові прапори.

### **3. Ініціалізація об'єкту сповіщень DirectSound.**

За допомогою методу IDirectSoundNotify::SetNotificationPositions(.) і структури DSBPOSITIONNOTIFY задаються позиції в буфері досягши яких відбудеться повідомлення за допомогою установки в сигнальний стан заданого об'єкту-події (Event Object).

### **4. Початок захоплення.**

Починається після виклику IDirectSoundCaptureBuffer::Start(.)

### **5. Прочитування аудіоінформації з буфера.**

Для прочитування аудіоінформації з буфера, його необхідно заблокувати методом IDirectSoundCaptureBuffer::Lock(.); по завершенню прочитування буфер розблоковується методом Unlock(.

Читати з буфера захоплення можна тільки до позиції запису або після позиції захоплення. Дані після позиції читання, до і включно позицію захоплення не завжди дійсні.

## 6. Закінчення захоплення

Закінчується після виклику `IDirectSoundCaptureBuffer::Stop()`

## 7. Звільнення інтерфейсів `DirectSound`.

Інтерфейси `DirectSound` бажано звільняти в порядку зворотному їх отриманню.

Для полегшення завдання захоплення звуку і подальшого аналізу звукових даних було ухвалено рішення розробити клас-потік `TPCMStream`, що містить абстрактні методи запису і читання; які надалі необхідно буде перевизначити. Це дозволить працювати з абстрактним потоком, не вдаючись до подробиць його реалізації. Від класу `TPCMStream` необхідно буде створити нащадка, що забезпечує аналіз записуваних в нього даних безпосередньо в процесі запису.

Клас `TPCMStream` має вигляд представлений на рис. 8.6:

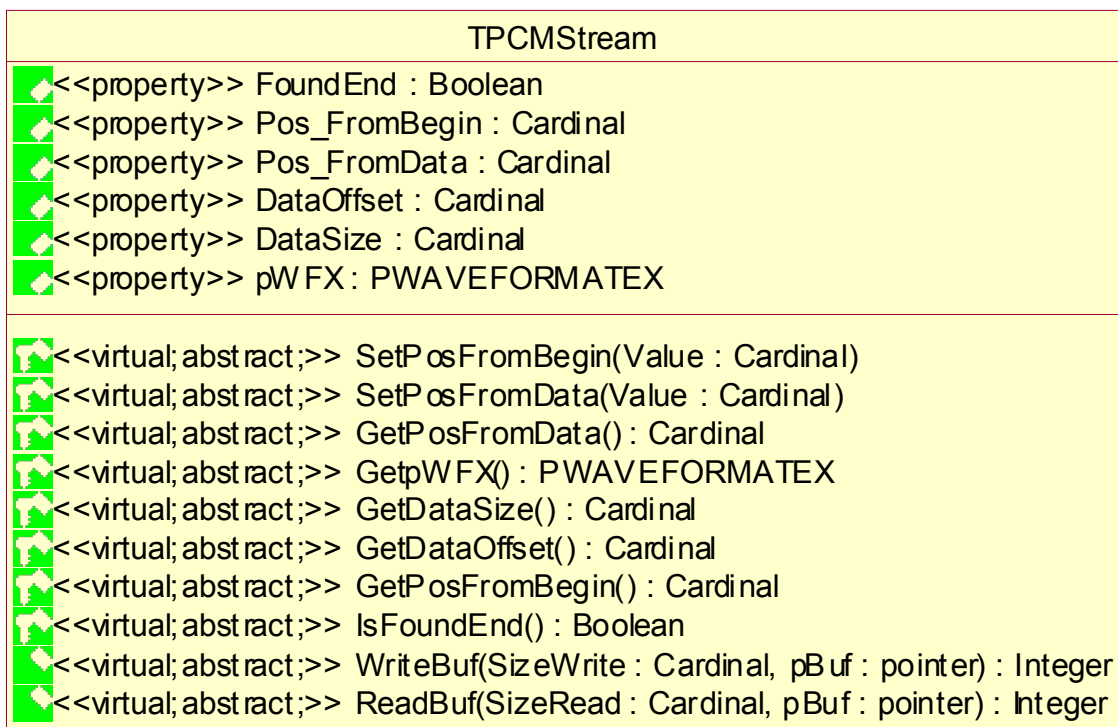


Рисунок 8.6 - Клас `TPCMStream`

Для читання з потоку призначений метод `ReadBuf()`, описаний як

*ReadBuf(SizeRead: Cardinal; pBuf: pointer): integer;*

де *SizeRead* – кількість прочитуваних байт;

*pBuf* – покажчик на буфер, куди проводиться читання

Для запису в потік призначений метод `WriteBuf()`, описаний як

*WriteBuf(SizeWrite: integer; pBuf: pointer): integer;*

де *SizeWrite* – кількість записуваних байт;

*pBuf* – покажчик на буфер, що містить дані для запису

Властивість `pWFX` містить покажчик на структуру `WAVEFORMATEX`.

Для отримання позиції покажчика читання від початку ІКМ-ДАНИХ призначене властивість `Pos_FromData`; від початку потоку – властивість `Pos_FromBegin`.

Про досягнення покажчика читання кінця ІКМ-ДАНИХ свідчить властивість `FoundEnd`.

Розмір даних і зсув даних від початку потоку визначають властивості `DataSize` і `DataOffset` відповідно.

На рис. 8.7 представлені основні властивості і методи класу `TDSCaptureSound`:

| TDSCaptureSound |   |
|-----------------|---|
| ◆               | <<property>> State : TDSCaptureState  |
| ◆               | <<property>> DS_BufferSize : Cardinal   |
| ◆               | <<property>> DS_BuffAlign : Cardinal  |
| ◆               | <<property>> DS_NotifySize : Cardinal   |
| ◆               | <<property>> DS_Capture : IDirectSoundCapture   |
| ◆               | <<property>> DS_CaptureBuffer : IDirectSoundCaptureBuffer   |
| ◆               | Init_DS_Capture(pDevGUID : PGUID, OutStream : TPCMStream, SecondsBuffered : Cardinal, BuffAlign : Cardinal) : Boolean |
| ◆               | StartCapture() : Boolean  |
| ◆               | StopCapture() : Boolean   |

Рисунок 8.7 - Клас `TDSCaptureSound`, забезпечуючий захоплення звуку

Після створення об'єкту класу `TDSCaptureSound` необхідно виконати ініціалізацію пристрою захоплення за допомогою методу описаного як:

*Init\_DS\_Capture(pDevGUID: PGUID);*

*OutStream:TPCMStream;*

*SecondsBuffered, BuffAlign:Cardinal ) : Boolean;*

де *pDevGUID* – покажчик на GUID заданого пристрою захоплення;

*OutStream* – потік, в який буде проводитися захоплення;

*SecondsBuffered* – кількість секунд, буферизуємих буфером захоплення;

*BuffAlign* – довжина блоку в байтах, досягши кінця якого відбуватиметься виклик методу *OutStream.WriteBuf(.)*;

Спершу і зупинки захоплення звуку використовуються методи *StartCapture* і *StopCapture*, що повертають значення типу *Boolean*, що свідчить про успішність виконання.

Властивість *State* відповідає поточному стану об'єкту класу *TDSCaptureSound*.

Тип *TDSCaptureState* описаний як:

*TDSCaptureState = ( dscClosed, dscOpened, dscStoped, dscCaptured );*

де *dscClosed* – пристрій закритий;

*dscOpened* – пристрій відкритий і готовий на початок захоплення;

*dscStoped* – захоплення зупинене;

*dscCaptured* – здійснюється захоплення звуку;

Дістати доступ до інтерфейсів *IDirectSoundCapture* і *IDirectSoundCaptureBuffer* можна через властивості *DirectSoundCapture* і *DirectSoundCaptureBuffer*.

#### 8.2.4.4 Розробка класу, що забезпечує отримання коефіцієнтів К і АЧХ вхідного сигналу

Для отримання коефіцієнтів К і АЧХ вхідного сигналу був розроблений клас *TPCM\_FFT\_Analyzer*, представлений на рис. 8.8.

Після створення об'єкта класу *TPCM\_FFT\_Analyzer* його необхідно проініціалізувати, задавши з допомогою методу *Init(...)* параметри формату ІКМ-даних. Метод *Init(...)* описаний так:

*Init(pWFX:PWAVEFORMATEX):Boolean;*

де *pWFX* – покажчик на структуру *WAVEFORMATEX*.

| TPCM_FFT_Analyzer |   |
|-------------------|---|
| <<property>>      | FFTSize : Integer   |
| <<property>>      | OnKi : TOnKiEvt   |
| <<property>>      | OnDrawFreq : TOnDrawFreqEvt   |
| <<method>>        | Init(pWFX: PWAVEFORMATEX) : Boolean   |
| <<method>>        | SetPassBand(PassBand1L : Double, PassBand1R : Double, PassBand2L : Double, PassBand2R : Double) : Boolean |
| <<method>>        | AnalyzeBuf(SizeBuf : Cardinal, pBuf : pointer)  |

Рисунок 8.8 - Клас, аналізуючий вхідний сигнал

Для завдання смуг пропускання в області нижніх і верхніх частот призначений метод, описаний як:

```
SetPassBand( PassBand1L
             PassBand1R
             PassBand2L
             PassBand2R : Double ) : Boolean;
```

де *PassBand1L* і *PassBand1R* – ліва і права крайні частоти смуги пропускання нижніх частот;

*PassBand2L* і *PassBand2R* – ліва і права крайні частоти смуги пропускання верхніх частот

Для виконання аналізу буфера, ІКМ-ДАННИЄ, що містить, використовується метод *AnalyzeBuf()*, названий:

```
AnalyzeBuf( SizeBuf:Cardinal;pBuf:pointer );
```

де *SizeBuf* – розмір буфера в байтах;

*pBuf* – покажчик на буфер, ІКМ-ДАННИЄ, що містить

Розмір БПФ задається за допомогою властивості *FFTSize*.

Для отримання розрахованих за формулою (8.6) коефіцієнтів *K* використовується властивість *OnKi*. Процедурний тип *TOnKiEvt* описаний як:

```
TOnKiEvt = procedure(Ki:double) of object;
```

де  $K$  –  $i$ -е розраховане значення  $K$ ;

Для отримання амплітуд частот<sup>1)</sup> вхідного сигналу використовується властивість `OnDrawFreq`. Процедурний тип `TOnDrawFreqEvt` описаний як:

```
TOnDrawFreqEvt = procedure(
    var ArrR, ArrI: Array of Double;
    Norm: Double ) of object;
```

де `ArrR, ArrI` – покажчики на масиви, що містять спектр вхідного сигналу;

`Norm` – нормалізувальний множник

Для аналізу сигналу, захопленого сигналу із звукової карти класом `TDSCaptureSound` був створений клас `TAnalyzedPCMStream`, що є спадкоємцем від класу `TPCMStream` і що містить конкретизовані методи читання, запису і властивості.

Основні властивості і методи класу `TAnalyzedPCMStream` приведені на рис. 8.9.

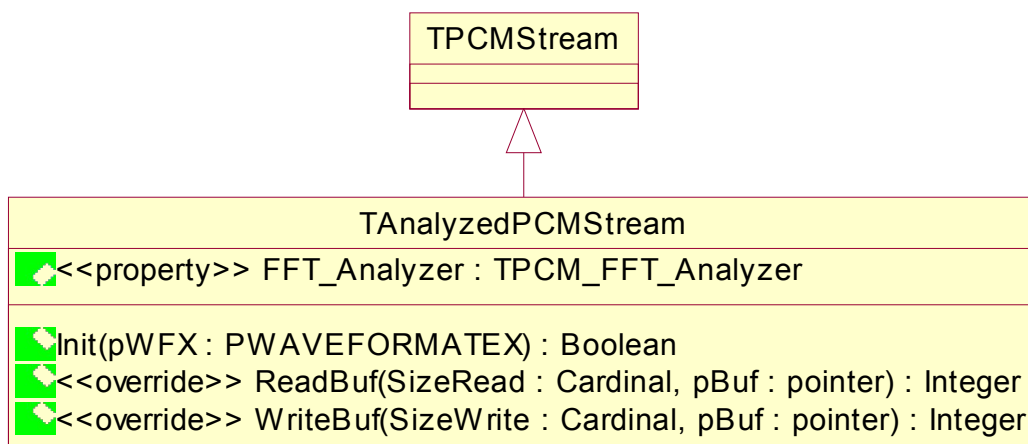


Рисунок 8.9 - Клас, що забезпечує аналіз вхідного сигналу

Як видно з рис. 8.9, клас `TAnalyzedPCMStream` містить в собі екземпляр класу `TPCM_FFT_Analyzer`, що дозволяє виконувати аналіз вхідного сигналу.

<sup>1)</sup> В процедуру типу `TOnDrawFreqEvt` передається спектр сигналу. Для отримання амплітуд частот вхідного сигналу (АЧХ сигналу) необхідно скористуватися формулою (8.4). Розрахунок АЧХ вхідного сигналу виконується при обрисовці графика АЧХ.

Клас `TAnalyzedPCMStream` програмно емулює алгоритми обробки інформації в апаратурі АК-1. Якщо необхідно підключити до системи інші методи обробки інформації, то необхідно створювати класи, що також є спадкоємцем від класу `TPCMStream` і відповідні методи читання, що містять, запис і обробки інформації, аналогічно класу `TAnalyzedPCMStream`.

8.2.4.5 Розробка класу, що забезпечує зберігання і доступ до інформації про стан порідного масиву

Даний клас забезпечує збереження інформації (прогнозні коефіцієнти  $K$ ) про стан порідного масиву у файл. Можливо також використання однієї з існуючих СУБД, проте із збереження інформації у файл має наступні переваги:

- а) запис у файл здійснюється швидшим, ніж звернення до таблиці через сервер бази даних;
- б) файл матиме менший розмір, чим файл бази даних, що містить додаткові дані про структуру таблиць.

Дані зберігаються у файлі за кожну минулу добу, тобто по закінченню доби відкривається новий файл і запис здійснюється в нього. При цьому у файлі містяться тільки коефіцієнти  $K$ , що відображають стан порідного масиву і деяка додаткова інформація. Ім'я файлу автоматично встановлюється в поточну дату у форматі дд/мм/ггг.

При збереженні отриманих коефіцієнтів  $K$  необхідний опис додаткових структур даних.

Для зменшення розміру займаного даними були створені структури для зберігання дати і часу.

**Структура, описи часу:**

*T\_3bTime = packed record*

*Sec : Byte;*

*Min : Byte;*



*Hour* : Byte;

*end*;

де *Sec* – секунда;

*Min* – хвилина;

*Hour* – година

### Структура, описи дати:

*T\_3bDate* = packed record

*Day* : byte;

*Month* : byte;

*Year* : byte;

*end*;

де *Day* – число;

*Month* – місяць;

*Year* – рік, починаючи з 2000.

### Заголовок файлу описаний як:

*TKiFileZag* = packed record

*Date* : *T\_3bDate*;

*MaxValueK* : Byte;

*K\_PerSecond* : Double;

*OffsTableOfOffs* : Cardinal;

*SizeTableOfOffs* : Cardinal;

*end*;

де *Date* – дата створення файлу;

*MaxValueK* – максимально можливе значення *K*;

*K\_PerSecond* – кількість вибірок *K* в секунду;

*OffsTableOfOffs* – зсув від початку файлу таблиці зсувів;

*SizeTableOfOffs* – розмір таблиці зсувів

Речове значення вибірки  $K(t)$  зберігається в слові (WORD) як ціле число.

Перетворення речового значення  $K$  в ціле здійснюється по формулі:

$$K_{\text{цел}} = \text{Round}(K_{\text{вещ}} * (\$FFFF / \text{MaxValueK}))$$

де *Round* – функція, що округляє до найближчого цілого числа;

*MaxValueK* – максимально можливе значення *K* із структури *TKiFileZag*.

Зворотне перетворення цілого значення *K* з файлу в речове, здійснюється за формулою:

$$\text{Квещ} = \text{Round}(\text{Кцел} * (\text{MaxValueK} / \$\text{FFFF}))$$

де *Round* – функція, що округляє до найближчого цілого числа;

*MaxValueK* – максимально можливе значення *K* із структури *TKiFileZag*.

Для знаходження коефіцієнта *K* за заданий час, використовується поле *K\_PerSecond* структури *TKiFileZag* і рядок таблиці зсувів, описаний як:

*TRowTableOffsets* = *packed record*

*Time* : *T\_3bTime*;

*Offs* : *Cardinal*;

*end*;

де *Time* – час початку вибірки коефіцієнтів *K*;

*Offs* – зсув вибірки відносний початку файлу;

Тоді зсув коефіцієнта *K* від початку файлу за заданий час обчислюється за формулою:

$$\text{Offs} = \text{OffsInRowTableOffsets} + \text{Round}((\text{DestTimeSec} - \text{TableOfOffsTimeSec}) \times \text{K\_PerSecond}) \times \text{SizeOf}(\text{WORD}); \quad (8.6)$$

де *Offs* – шуканий зсув відносний початку файлу;

*OffsInRowTableOffsets* – зсув, отриманий з *i*-тої рядка таблиці зсувів;

*Round* – функція, що округляє до найближчого цілого числа;

*DestTimeSec* – шуканий час, переведений в секунди;

*TableOfOffsTimeSec* – час, отриманий з *i*-тої рядка таблиці зсувів;

*K\_PerSecond* – кількість вибірок *K* в секунду, отримане із структури *TKiFileZag*;

$SizeOf(WORD)$  – розмір в байтах коефіцієнта  $K$ .

При цьому мається на увазі, що завжди  $DestTimeSec \geq TableOfOffsTimeSec$ .

Для знаходження коефіцієнта  $K$  за заданий час послідовно є видимою таблиця зсувів і визначається час менше або рівний заданому часу. Далі за формулою (8.7) обчислюється зсув коефіцієнта відносно початка файлу.

Структура файлу має вигляд, представлений на рис. 8.10.

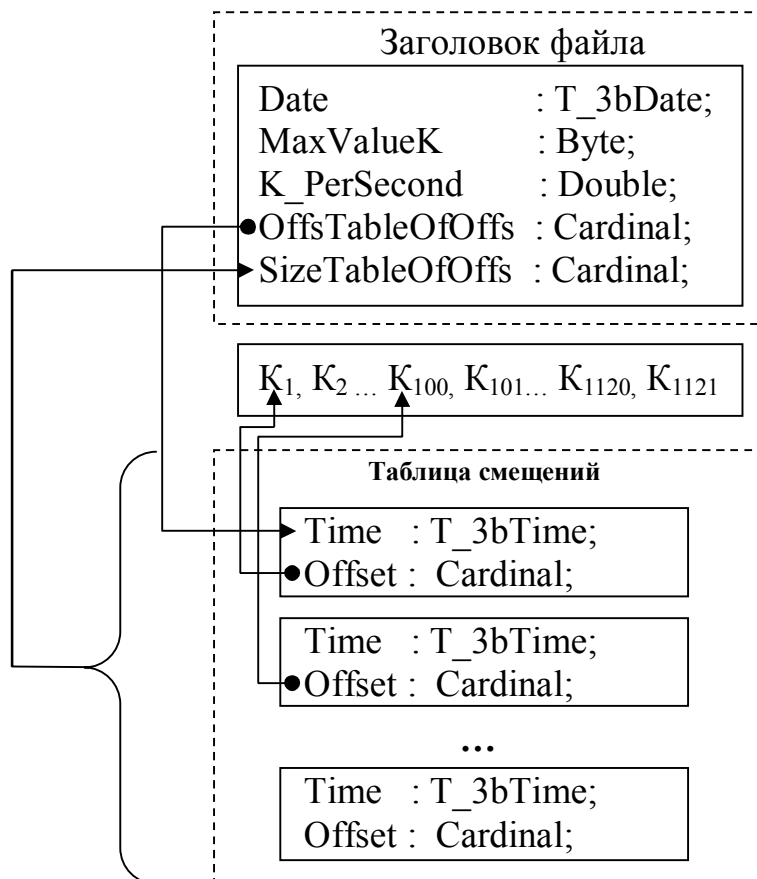


Рисунок 8.10 - Структура файлу, що вміщує прогностичні коефіцієнти  $K$

Перевагою даної структури файлу є швидкий доступ до вибірки коефіцієнтів  $K$  за заданий час.

Недоліком даної структури файлу є необхідність змісту всієї таблиці зсувів в оперативній пам'яті.

Основні методи класів, що забезпечують доступ до вищеописаного файлу, представлені на рис. 8.11.

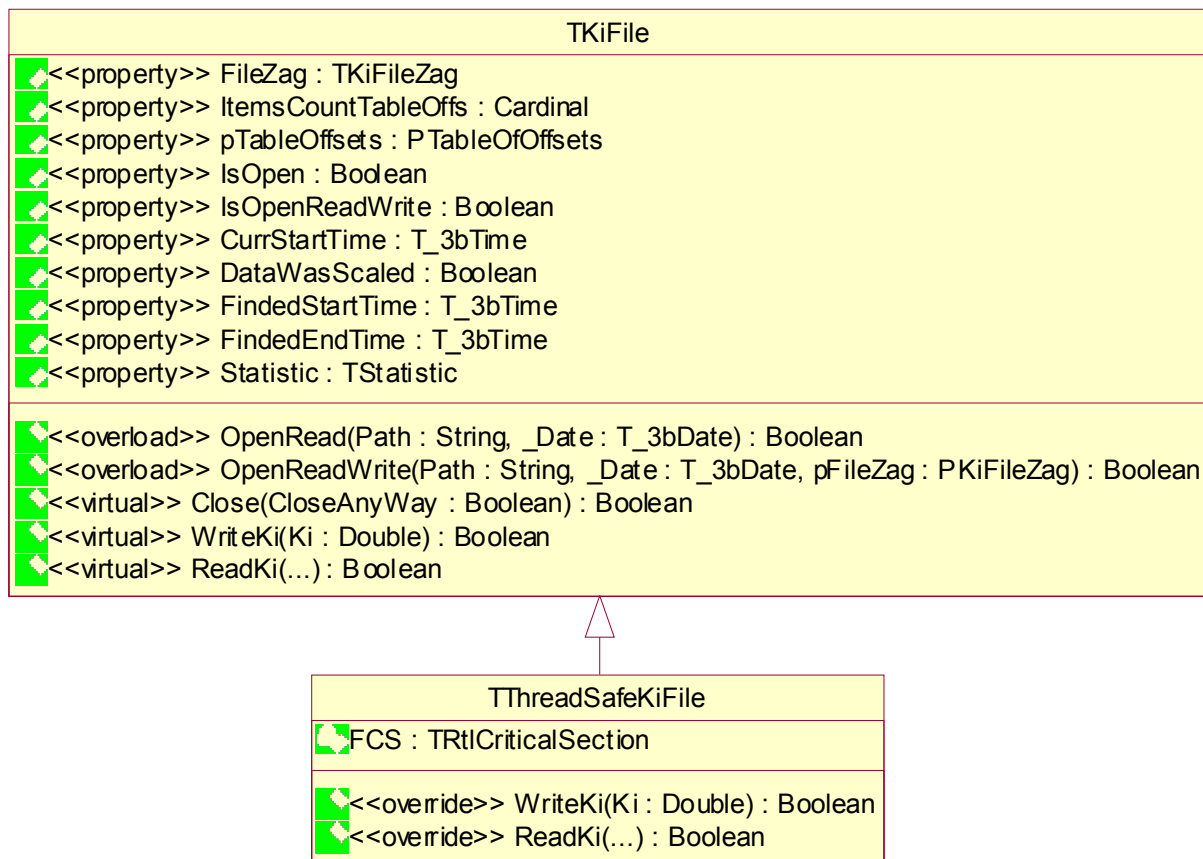


Рисунок 8.11 - Класи, що забезпечують доступ до файлів з даними

Для створення класу, що дозволяє забезпечити доступ з різних потоків для запису і читання одночасно, був створений клас `TThreadSafeKiFile` - спадкоємець від `TKiFile`, що забезпечує безпечний сумісний доступ для читання/запису для декількох потоків.

Як видно з рисунка 8.11 клас `TThreadSafeKiFile` не вносить нічого нового до механізму роботи з файлом, окрім критичної секції, за допомогою якої здійснюється синхронізація потоків.

Оскільки потрібно було забезпечити доступ до файлів для читання і запису одночасно, то можливі два варіанти:

- а) Файл відкритий для читання/запису і до нього відбувається одночасне звернення на читання і запис;

б) Файл відкритий для читання/запису, в нього відбувається запис; читання здійснюється з іншого файлу.

Клас TKiFileManager забезпечує інтерфейс звернення файлам по заданій даті і часу вибірки коефіцієнтів  $K$ . Всі операції з читання/запису відбуваються за допомогою використання методів і властивостей даного класу.

Основні методи класу TKiFileManager наведені рис. 8.12.

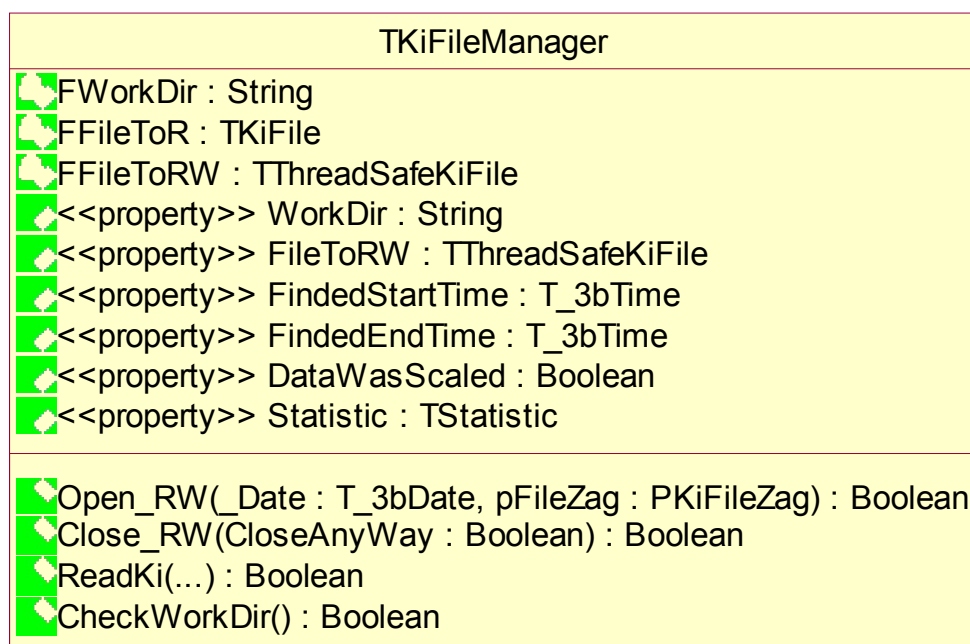


Рисунок 8.12 - Клас TKiFileManager, що забезпечує інтерфейс при роботі з файлами коефіцієнтів  $K$

Властивість WorkDir містить шлях до робочого каталога, в якому створюються файли з коефіцієнтами  $K$ . Також в класі присутній метод CheckWorkDir, що дозволяє провести перевірку доступності вибраної директорії.

Для відкриття файлу для читання/запису використовується метод описаний як:

```
Open_RW( _Date:T_3bDate;
        pFileZag:PKiFileZag ):Boolean;
```

де *\_Date* – поточна дата;

*pFileZag* – покажчик на структуру *TKiFileZag*.

Функція повертає значення, що свідчить про успішність виконання операції відкриття файлу.

Для закриття файлу, відкритого для читання/запису використовується метод, описаний як:

*Close\_RW(CloseAnyWay: Boolean): Boolean;*

де *CloseAnyWay* – вимога закрити файл у будь-якому випадку, ігноруючи можливі помилки скидання буфера запису на диск та інші

Для отримання вибірки коефіцієнтів *K* за задану дату і час використовується метод, описаний як:

```
procedure ReadKi( _Date : T_3bDate;
                StartTime, EndTime : T_3bTime;
                LimKOpt          : TLimKOpt;
                pArrMaxK, pArrAvgK : PDoubleDynArray;
                pArrTime          : P_DynArr3bTime;
                var CountReaded   : Cardinal   );
```

де *\_Date* – дата;

*StartTime, EndTime* – початковий і кінцевий час вибірки коефіцієнтів *K*;

*LimKOpt* – структура, що містить параметри розрахунку статистики перевищень значеннями *K* заданої межі;

*pArrMaxK, pArrAvgK* – масиви з середніх і максимальних значень *K*;

*pArrTime* – покажчик на масив, одержуючий наближений час запису кожного коефіцієнта *K*;

*CountReaded* – кількість прочитаних коефіцієнтів.

У разі успішного виклику методу `ReadKi(.)` відбувається зміна властивостей `FindedStartTime`, `FindedEndTime`, `DataWasScaled`, `Statistic`;

де *FindedStartTime*, *FindedEndTime* – знайдений початковий і кінцевий час;

*DataWasScaled* – містить дійсне значення (`true`), у випадку якщо знайдені дані не уміщалися в масив `pArrMaxK` і були масштабовані за часом, при цьому `pArrAvgK` містить усереднені значення коефіцієнтів  $K$ ;

*Statistic* – структура, що містить статистичну інформацію по значеннях  $K$ ;

#### 8.2.4.6 Експериментальна перевірка ПО для комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану порідного масиву

В рамках виконання даної роботи була проведена експериментальна перевірка розробленого ПО комплексного аналізу інформаційних сигналів при акустичному контролі стану порідного масиву.

##### 8.2.4.6 1 Перевірка правильності розрахунку прогностичного коефіцієнта $K$ і відображення спектральних складових акустичного сигналу.

При підготовці до експерименту з'єднання генератора аналогового сигналу з лінійним входом звукової карти ПЕВМ виконувалося згідно рис. 8.13:

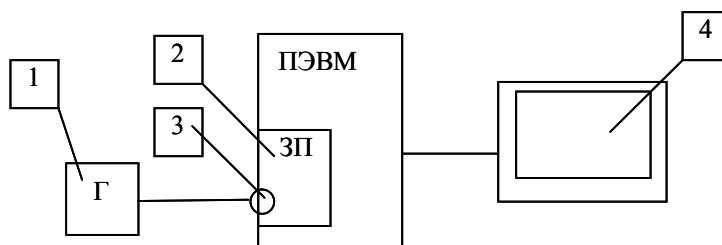


Рисунок 8.13 - Схема підключення генератора аналогового сигналу до ПЕВМ

1 – генератор аналогового сигналу; 2 – звукова плата; 3 – лінійний вхід звукової плати; 4 - монітор

### Порядок проведення експерименту:

1. Зібрати експериментальну схему, згідно з рис. 8.13.
2. Задати однакові частоту дискретизації, розмір БПФ, вид віконної функції, максимальну частоту, що відображається (для наочності). Подати на вхід ПК двочастотний сигнал з виходу генератора аналогового сигналу.
3. Визначити частоти, що генеруються генератором аналогового сигналу за допомогою розробленого ПЗ і програми спектрального аналізу;
4. Порівняти дані на виході розробленого ПЗ з даними на виході програми спектрального аналізу;
5. Задати параметри смуг пропускання в розробленому ПЗ відповідно до отриманих в п.1 частотами;
6. Визначити відношення максимальних амплітуд двох частот присутніх в сигналі використовуючи засоби генератора сигналу, розроблене ПЗ і програму спектрального аналізу;
7. Порівняти дані на виході розробленого ПЗ з даними на виході генератора.

Параметри обробки сигналу наведені в табл. 8.1:

Таблиця 8.1 - Параметри обробки сигналу

| Параметр                               | Значення       |
|--|----------------|
| Частота дискретизації                  | 44100Гц        |
| Розмір БПФ                             | 16386 крапок   |
| Віконна функція                        | Вікно Блекмена |
| Максимальна частота, що відображається | 1,5 КГц        |

На рис. 8.14 показана АЧХ акустичного сигналу, що побудована за допомогою програми-спектроаналізатора.



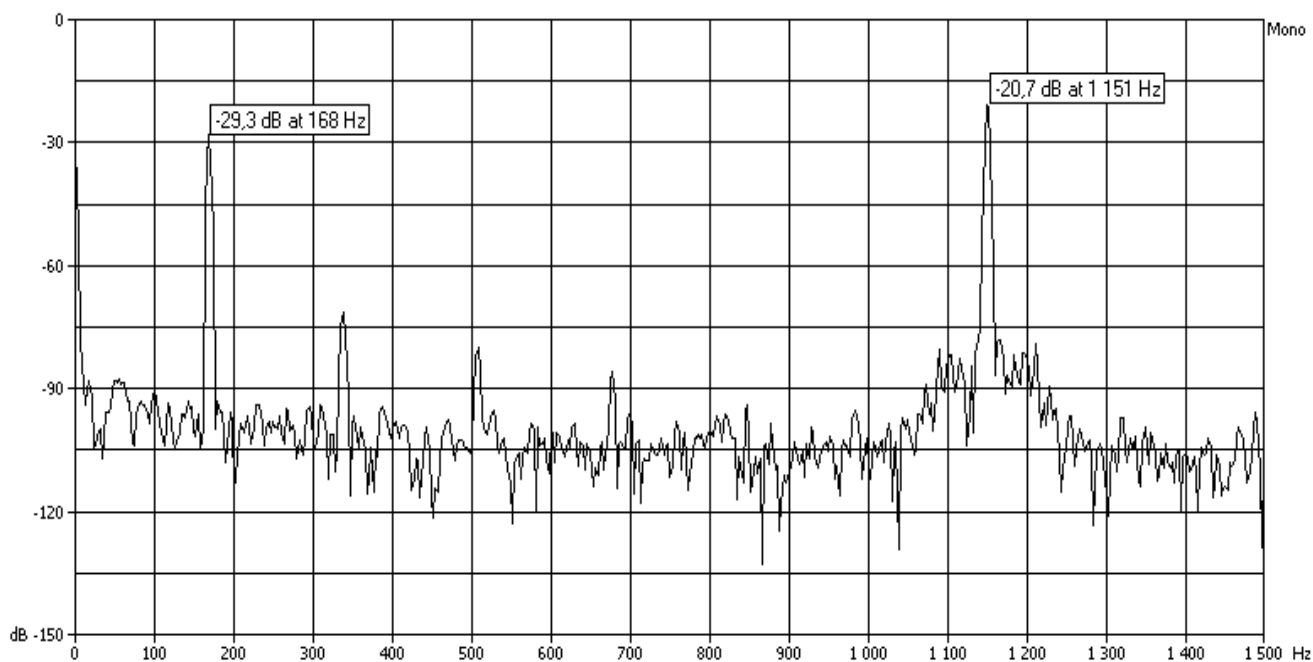


Рисунок 8.14 - АЧХ сигналу з виходу генератора, що побудована за допомогою програми-спектроаналізатора

На рис. 8.15 показана АЧХ акустичного сигналу, побудована за допомогою розробленого ПЗ:

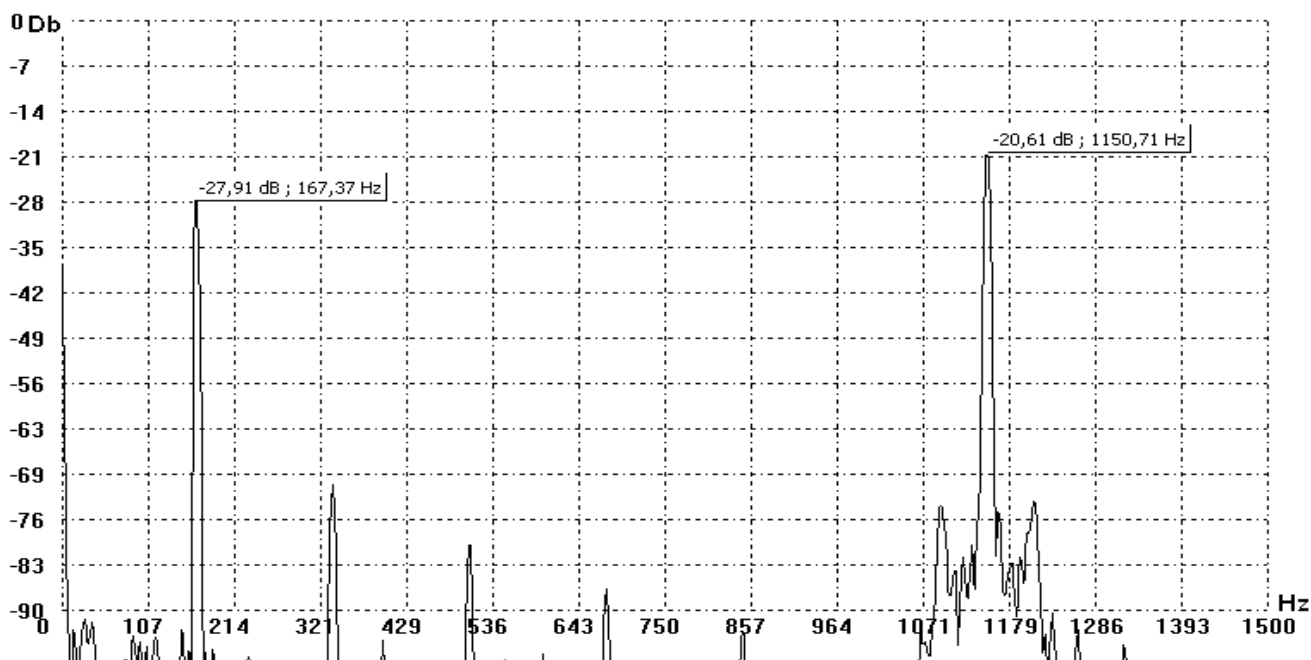


Рисунок 8.15 - АЧХ сигналу з виходу генератора, побудована за допомогою розробленого ПЗ:

Отримані експериментально значення частотних складових двотонального сигналу наведені в табл. 8.2:

Вибір полос пропущення фільтрів для даних частот здійснювався з урахуванням розрешення за частотою для вибраного розміру буфера при БПФ. В даному експерименті розрешення склало:

$$44100 \text{ Гц} / 16386 \text{ точок} = 2,96 \text{ Гц/точку.}$$

Відповідно, задані наступні смуги пропущення в області низьких частот НЧ – 164 ... 171 Гц; в області високих частот ВЧ – 1148 . 1154Гц.

Таблиця 8.2 - Порівняння частот, що відображаються

|               | Програма спектрального аналізу | Розроблене ПЗ | Відносна погрішність % |
|---------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Частота 1, Гц | 168                            | 167,37        | 0,38                   |
| Частота 2, Гц | 1151                           | 1150,71       | 0,03                   |

Значення прогностичного коефіцієнта  $K$  на виході генератора (показання апаратури АК-1) і значення прогностичного коефіцієнта  $K$ , розраховані розробленою програмою і програмою спектрального аналізу наведені в табл. 8.3. Як еталонне значення були прийняті результати спектрального аналізу, виконаного в програмі-спектроаналізаторі.

Таблиця 8.3 - Порівняння експериментально набутих значень прогностичного коефіцієнта  $K$

| $K$ на виході генератора | $K$ на виході розробленого ПО | $K$ розраховане за наслідками спектрального аналізу, виконаного в програмі-спектроаналізаторі | Відносна погрішність % |
|--------------------------|-------------------------------|---|------------------------|
| 2,77                     | 2,49                          | 2,48  | 0,4                    |
| 4,63                     | 4,39                          | 4,32  | 1,62                   |
| 2,63                     | 2,45                          | 2,4   | 2,08                   |
| 4,22                     | 4,24                          | 4,27  | -0,7                   |
| 5,41                     | 5,39                          | 5,37  | 0,37                   |
| 3,27                     | 3,01                          | 3,01  | 0                      |

#### 8.2.4.6 2 Перевірка оцінки стану породного масиву по наявних фонограмах акустичного сигналу

У даному експерименті перевірялася точність оцінки НДС породного масиву (прогноз) за допомогою розробленого ПЗ. Як джерело інформаційного сигналу використовувалися оцифровані фрагменти фонограми акустичного сигналу, що порушується шахтним механізмом в процесі руйнування гірських порід і що пройшов через аналізований породний масив з відомим станом. Точність прогнозу визначалася шляхом порівняння результатів програмної оцінки НДС породного масиву з його відомим станом.

##### **Порядок проведення експерименту:**

1. Відповідно до рекомендацій [47, 48] вибрати смуги пропускання в області низьких і високих частот і встановити їх як параметри розробленого ПЗ;
2. Почати відтворення фонограми;
3. Здійснити захоплення сигналу з відтворної фонограми;
4. Отримати за допомогою розробленого ПЗ оцінку стану породного масиву;

Для проведення експериментів було відібрано п'ять фонограм акустичного сигналу, що порушується шахтним механізмом в процесі руйнування гірських порід і що пройшов через аналізований породний масив. З них дві фонограми відповідали безпечному стану породного масиву, а три – небезпечному. Результати експерименту подані в табл. 8.4.

З таблиці 8.4 видно, що максимальне значення показника  $K$  при аналізі фонограм 1 і 2 не перевищує 1,9. Отже, для них прогнозований стан – **ненебезпечно**. Мінімальне значення показника  $K$  при аналізі фонограм 3,4,5 перевищує значення 3, тому для них прогнозований стан – **небезпечно**.

Результати експерименту показали, що стани породного масиву, що прогнозуються розробленим ПЗ, співпадають з його відомими станами, визначеними іншими методами.

Таблиця 8.4 - Результати прогнозу ПДВ порідного масиву  
на основі фонограм акустичних сигналів

| № фонограм-ми | Задана смуга НЧ, Гц | Задана смуга ВЧ, Гц | Діапазон змін свідчень коефіцієнта $K$ на виході розробленого ПЗ | Прогнозуємий стан (програмна оцінка) | Відомий стан |
|---------------|---------------------|---------------------|--|--------------------------------------|--------------|
| 1             | 0-400               | 1180-14000          | 0,2 – 1,0  | Ненебезпечно                         | Ненебезпечно |
| 2             | 0-250               | 600-14000           | 0,7 – 1,9  | Ненебезпечно                         | Ненебезпечно |
| 3             | 0-200               | 700-14000           | 0,9 – 4,5  | Небезпечно                           | Небезпечно   |
| 4             | 0-200               | 700-14000           | 0,9 – 3,5  | Небезпечно                           | Небезпечно   |
| 5             | 0-400               | 800-14000           | 1,5 – 5,3  | Небезпечно                           | Небезпечно   |

### 8.3 Висновки

1. Виконана модифікація програмного забезпечення для реєстрації прогностичного коефіцієнту  $K$ , що забезпечує введення інформації з виходу апаратури АК-1, відображення поточних значень цього коефіцієнту на екрані монітора ПК, та щодобового збереження цих значень на жорсткому диску ПК.

2. Розроблена і обгрунтована структура програмного забезпечення, що забезпечує захоплення і ефективну обробку інформаційного сигналу при акустичному контролі стану породного масиву. Розроблені класи, що забезпечують визначення пристроїв захоплення і установку налаштувань лінійного входу, захоплення сигналу із заданого звукового пристрою.

3. Розроблений алгоритм програмного отримання прогностичного коефіцієнта  $K$  для системи моніторингу НДС породного масиву.

4. Розроблена система архівації, зберігання і отримання доступу до архіву прогностичної інформації про НДС породного масиву.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Метою роботи є розробка математичних моделей для створення інформаційного середовища в системі геомоніторингу.

Ідея роботи полягає в комплексному підході до розробки адаптивної моделі породного середовища зі структурними та силовими неоднорідностями, шляхом застосування сполучених методів аналізу складних геомеханічних систем.

Основні результати роботи можна узагальнити у вигляді наступних висновків.

1. Розроблена імовірнісна модель міцності та деформування тріщинуватого породного середовища з урахуванням мінливості його фізичних властивостей, для використання в геомеханічних розрахунках. Сполучення методу скінчених елементів і прийомів імітаційного моделювання дозволяє відбити в геомеханічних розрахунках неоднорідність породного масиву у вигляді мінливості фізико-механічних характеристик у різних точках середовища.

2. Встановлено, що наявність макродефектів (систем тріщин) у породному середовищі збільшує розкид значень характеристик властивостей порід у залежності від щільності тріщин, та змінює розподіл імовірностей кількісної ознаки, що характеризує властивості породного масиву. Значення асиметрії й ексцесу розподілів нелінійно залежать від відстані між тріщинами в породному середовищі і ступеня внутрішньої неоднорідності структурних елементів масиву.

3. Встановлено, що максимальне збільшення зсувів контуру виробки, обумовлене мінливістю властивостей середовища, що деформується лінійно, має місце в замку склепіння виробки аркової форми і складає 21% від величини зсувів цієї точки в однорідному масиві. На переміщення контуру виробки круглої форми мінливість механічних характеристик позначається незначно.

4. Розроблена «Методика обліку макродефектів породного середовища» та апробована при впровадженні нового способу підвищення стійкості виробок на шахті «Шахтарська-Глибока» ГП «Шахтарськантрацит». Очікуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій при застосуванні способу підтримки виробок і «Методики...» складе 25,8 тис. грн на 1000 п.м.

5. Розроблена конструкція приймального датчика акустичних коливань, що розповсюджуються в породному масиві, з урахуванням обмежень з вибору місця та способу встановлення.

6. Розроблена модель формування інформаційного сигналу при акустичному зондуванні стану породного середовища та показано, що фрагменти вихідного сигналу, які відповідають різним технологічним процесам, мають різну інформативність для задач діагностики стану масиву і повинні оброблятися поетапно, різними методами для визначення потрібних інформаційних ознак.

7. Розроблений алгоритм програмного забезпечення щодо застосування прогностичного коефіцієнту  $K$  для системи моніторингу НДС породного масиву.

8. Розроблена та обґрунтована структура програмного забезпечення, що виконує захват та ефективну обробку акустичного сигналу, відображення поточних його значень на екрані монітору ПК, включає систему архівації, збереження та отримання доступу до архіву прогностичної інформації про НДС породного масиву на жорсткому диску ПК.

9. В умовах шахти «Краснолиманська» виконані інструментальні спостереження з використанням апаратури АК-1, за результатами яких підтвержена висока чутливість апаратури по показнику викидонебезпечності  $K$  та ефективність методики прогнозу НДС породного масиву на основі спектральних методів аналізу акустичного сигналу.

10. Розроблені «Рекомендації по обработке принятой из массива акустической информации при работе источника сигнала со случайными

характеристиками и изменяемым местоположением с целью выделения аномальных зон со структурными и силовыми неоднородностями» (затверджена проректором з наукової роботи Національного гірничого університету 18.12.2007 р.).

Всі результати, що одержані на підставі виконаних досліджень, мають наукову новизну. Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням апробованих методів механіки суцільного середовища, ефективних чисельних методів, фундаментальних положень теоретичної механіки, теорії хвильових процесів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие // М.М. Протоdjяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др. - М.: Недра, 1981.-192 с.
2. Шаумян Л.В. Физико-механические свойства массивов скальных пород. - М.: Недра, 1972. - 118 с.
3. Глушко В.Т., Кирничанский Г.Т. Инженерно-геологическое прогнозирование устойчивости выработок глубоких угольных шахт. М.: Недра, 1974. – 176 с.
4. Руппенейт К.В. Деформируемость трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975. – 223 с.
5. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. - М.: Недра, 1985. - 271 с.
6. Исследование физико-механических свойств горных пород и проявлений горного давления в подготовительных выработках глубоких шахт Донбасса / Глушко В.Т., Ваганов И.И., Кравцов И.С., Усатенко Б.С./ Реферативная информация. - К.: Наукова думка, 1969. – 72 с.
7. Исследование физико-механических свойств горных пород, упрочненных цементацией / Дуда Е.Г. и др. // Тр. КузНИИшахтостроя: Кемерово, 1975. – Вып. 14. – С. 123-131.
8. Заславский Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна. - М.: Недра, 1966. – 180 с.
9. Карасев Б.В. Статистический подход к изучению природы и некоторые закономерности распределения вещества Земли // Пути познания Земли. - М.: Наука, 1971. - С. 131 – 151.
10. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. - М.: Мир, 1969. – 388 с.



11. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле. - М.: Высшая школа, 1973. – 287 с.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 572 с.
13. Каталог шахтопластов Донецкого угольного бассейна с характеристикой горно-геологических факторов и явлений. – М.: ИГД им. Скочинского, 1982. – 267 с.
14. Рубец Г.Т. Вероятностно-статистические методы оценки прочности пород и массива для совершенствования расчетных моделей надежности подземных сооружений. - Дисс.... канд. техн. наук. - Днепропетровск: ИГТМ АН УССР, 1983. - 181 с
15. Lognormal distributions & Theory and applications/Ed by E.L. Crow, K.Shimizu. - N.Y: Dekker, 1988. - 387 p.
16. Прохоров А.В. Логарифмически нормальное распределение // Математическая энциклопедия. т. 3. - М.: Сов. энциклопедия, 1982. - С. 408.
17. Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. Методы теории вероятностей в геомеханике. - К: Техника, 1994.-209 с.
18. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – Київ: Університетське видавництво "Пульсари", 2002. – 302 с.
19. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород.-Киев: «Науковий друк»,2003.- 399 с.
20. Рац М.В., Чернышов С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. - М.:Недра.- 1970. - 59 с.
21. Руппенейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. - М.:Недра .-1975. - 221 с.
22. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М.Карташев, Б.В.Матвеев, Г.В.Михеев и др. -М.: Недра, 1979. -267 с.
23. Оценка прочности неоднородного породного массива, содержащего системы трещин, как основы расчетов устойчивости горных выработок:

- Отчет о НИР (промежуточный) / НГА Украины; Руководитель А.Н. Шашенко, - № ГР 0198U001239; Инв.№ В119986. - Днепропетровск, 1994. - 57 с.
24. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях, - М.: Недра, - 1987. - 288 с.
  25. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. - М.: Недра. - 1980. – 359 с.
  26. Свойства горных пород и методы их определения / Под ред. М.М. Протодяконова. - М.: Недра. - 1969. – 392 с.
  27. Васильев П.В., Малинин С.И. Влияние основных геологических факторов на поведение пород в горных выработках. - М.: Госгортехиздат. - 1960. – 93 с.
  28. Розин Л.А. Расчет гидротехнических сооружений на ЭЦВМ. Метод конечных элементов. – Л.: Энергия, 1971. – 214 с.
  29. Розин Л.А. Метод конечных элементов в приложении к упругим системам. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.
  30. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред: Пер. с англ. – М.: Недра, 1974. – 239 с.
  31. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392с.
  32. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
  33. Деклу Ж. Метод конечных элементов: Пер. с фран. – М.: Мир, 1976. – 96 с.
  34. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
  35. Амусин Б.З. Расчет взаимодействия крепи подземных выработок некругового очертания с неоднородным вязкоупругим массивом горных пород // ФТПРПИ. – 1979. – № 2. – С. 100-102.
  36. Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. – Алма-Ата.: Наука, 1975. – 238 с.

37. Амусин Б.З., Троицкий А.П., Фадеев А.Б. Применение метода конечных элементов к задачам горной геомеханики // Тезисы докладов к конференции по применению ЭВМ в строительной механике. – М.: 1972. – С. 16-20.
38. Новикова Л.В., Калашников А.И., Лесников В.С. Распределение напряжений в массиве горных пород на участке сопряжения двух выработок // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – №2. – С. 25.
39. Зильберман А.И., Новикова Л.В., Лесников В.С. Решение на ЭВМ задачи о распределении напряжений и деформаций в массиве горных пород в зоне сопряжения двух выработок // Шахтное строительство. - 1983. - № 5. - С. 9-10.
40. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
41. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
42. Демидович Б.П. Численные методы анализа. - М.: Физматгиз, 1965.
43. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке.– М.: Мир, 1981.– 374 с.
44. Масленников Е. В., Шмаков Ю. Д. Задачи создания аппаратуры акустического контроля в системе геомониторинга породного массива / Науковий вісник НГУ.– Днепропетровск, 2006. – № 9.– с. 69-74.
45. Мирер С. В., Масленников Е. В., Хмара О. И. Метод и аппаратура для акустического контроля выбросоопасности угольных пластов // Внезапные выбросы угля и газа, рудничная аэрология: Научн. сообщ. ин-та горного дела им. А. А. Скочинского. – М.: 1988. – С.20-24.
46. Шашенко А.Н., Масленников Е.В., Пашко А.Н. The Control of an Intense Condition of Coal-Face Area of File With the Help of Acoustic Sounding // Материалы международного симпозиума MPES'98.– Канада: Калгари, 1998.– С. 305-306.

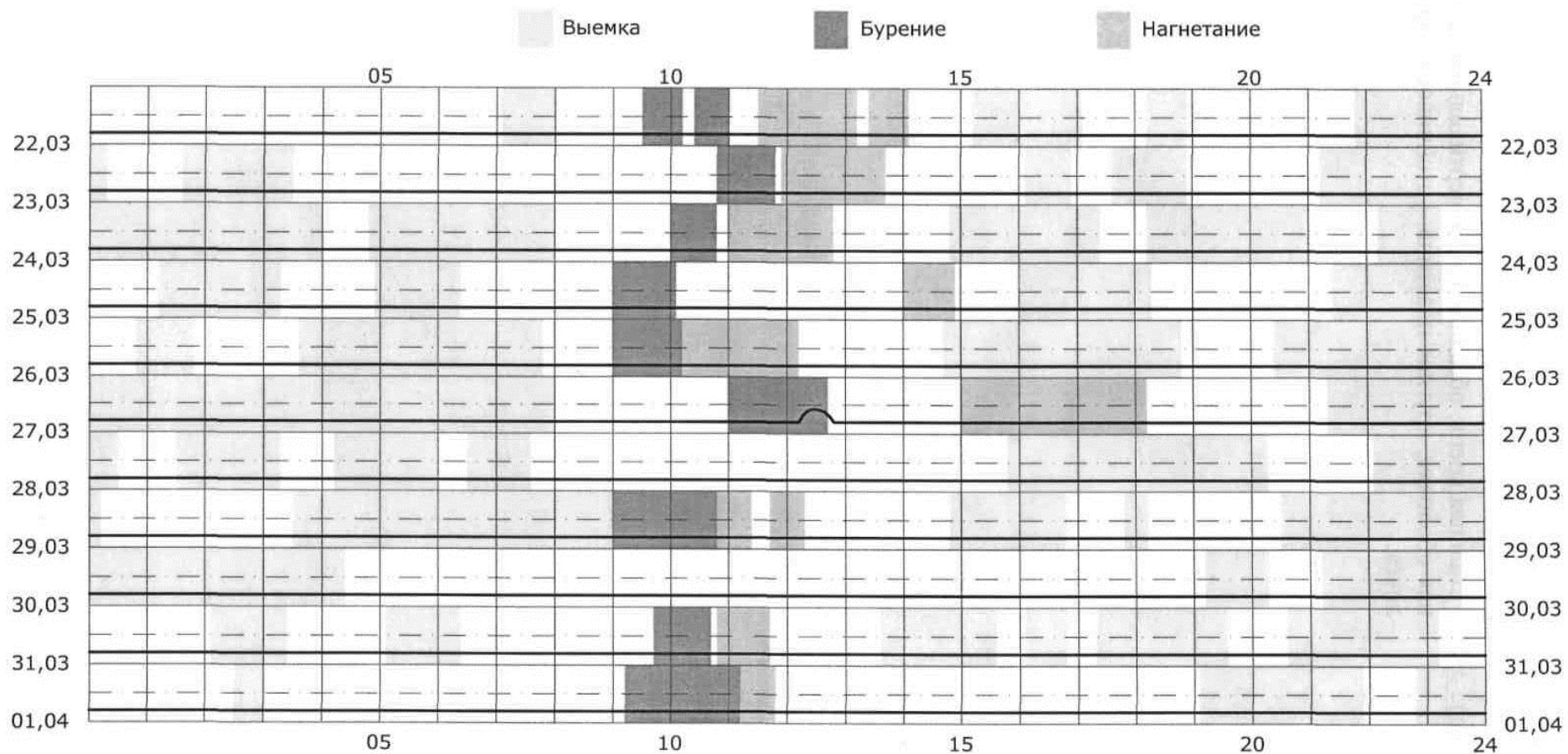
47. Прогноз викидонебезпеки вугільних пластів за амплітудно-частотними характеристиками акустичного сигналу (АК-1). П.6.3.4. розділу 6 «Прогноз і контроль небезпеки вугільних пластів та порід за газодинамічними явищами» // Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Мінвуглепром України., Київ. 2005.221с.
48. Руководство по применению текущего прогноза выбросоопасности по амплитудно-частотным характеристикам акустического сигнала. АК-1. Прилож. к разд.2, п.2.4.2 // Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа.– М.,1989.– 294 с.
49. Закономерности катастрофических проявлений горного давления глубоких угольных шахт // Отчет по теме ГП-366 (заключительный).– Днепропетровск: НГУ, 2006. – 120 с.
50. Шульце К.-П., Реберг К.-Ю. Инженерный анализ адаптивных систем.– М.: Мир, 1992. – 280 с.
51. Разработка метода контроля выбросоопасного горного массива, основанного на регистрации искусственного акустического сигнала при работе механизмов в горных выработках. Отчет о НИР / Днепропетровский горный институт (ДГИ); Руководитель Мирер С.В.– №Г.Р.81060820.– Днепропетровск,1985.– 110 с.
52. Петухов И. М., Линьков А. М. Распределение напряжений в пласте угля в случае совместного влияния нескольких зон опорного давления // Тр. ВНИМИ, 1974.– Вып. 94.– С. 8-19.
53. Минеев С.П., Ленда В.А. Управление состоянием напряженного массива посредством виброударного воздействия // В кн.: Управление состоянием предельно напряженных горных пород.– Киев: Наукова думка, 1992.– С. 101-106.

54. Потураев В.Н., Булат А.Ф., Минеев С.П. Научно-технические принципы виброволновой и пульсационной обработки выбросоопасных пластов // Уголь Украины.– 1993.– № 3.– С. 29-36.
55. Скипочка С.И. Фазовая характеристика механо-электрического эффекта как неформативный параметр оценки состояния предельно напряженной породы // Геотехническая механика: Сб. науч. тр. ИГТМ НАНУ.– 1998.– №9.– С. 164-167.
56. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний.– М.: Наука, 1964.– 246 с.
57. Пейн Г. Физика колебаний и волн.– М.: Мир, 1989. – 389 с.
58. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: Солон-Р, 2004.– 400 с.
59. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
60. Анциферов М. С. Теория геофонов и виброметров звукового диапазона. — М.: Наука, 1976.
61. Потураев В. Н., Минеев С. П. Волновые и пульсационные эффекты в горном массиве. — К.: Наукова думка, 1993.
62. Демченко Н. П. Технические средства передачи информации в системах управления угольных шахт. — М.: Недра, 1990.
63. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: Вильямс, 2003.
64. Лапин А. А. Интерфейсы. Выбор и реализация. —М.: Техносфера, 2005.
65. Масленников Е. В. Обоснование параметров прогноза выбросоопасности в угольных шахтах на основе анализа акустического сигнала – Дис. на соискание уч. ст. к.т.н. — Днепропетровск, НГУ 2002.
66. Король В. И., Шмаков Ю. Д. Оперативный контроль состояния угленосного массива акустическим методом в условиях шахты “Краснолиманская” // Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників-2008” (частина 2) – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – С. 78-84.

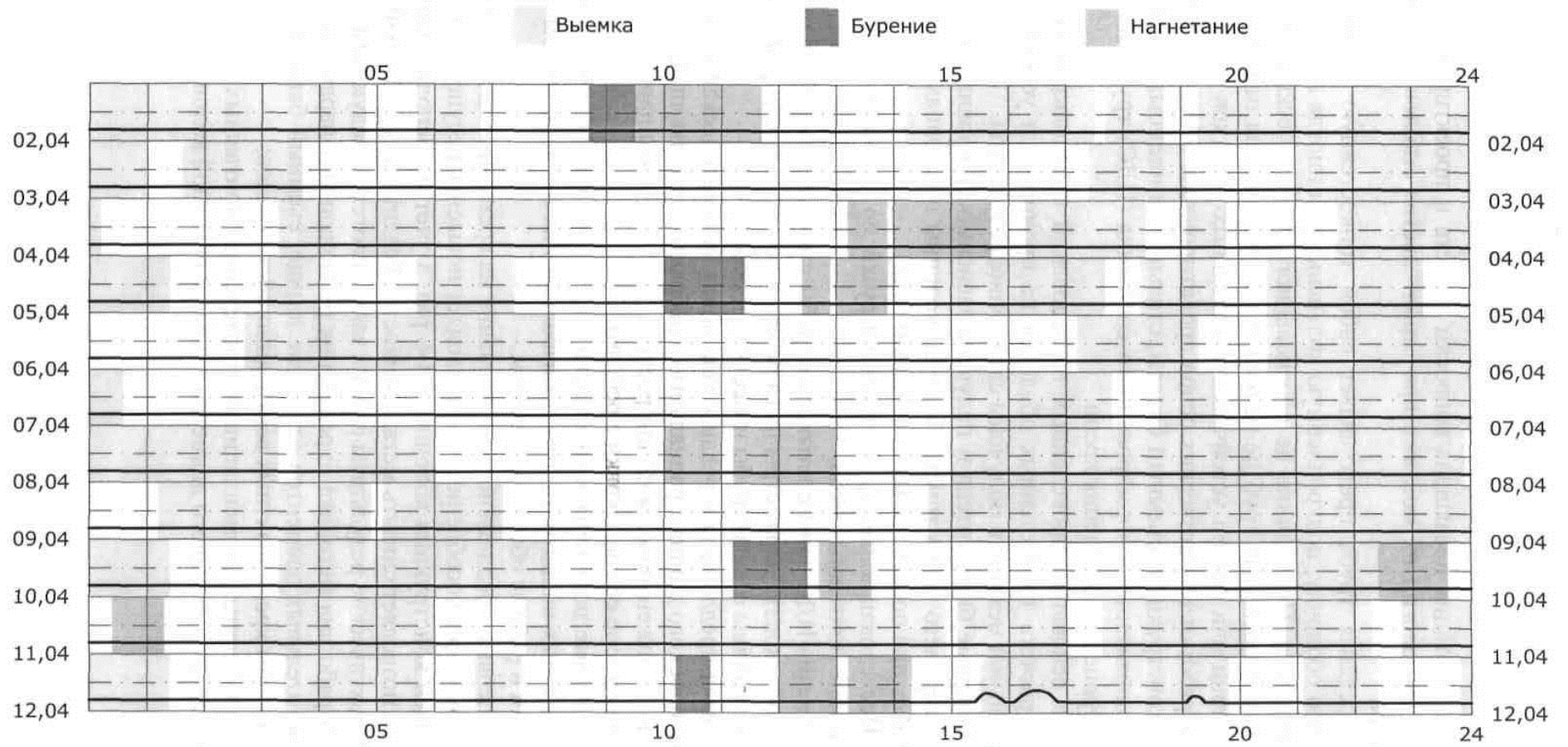
67. Закономерности катастрофических проявлений горного давления глубоких угольных шахт – Отчет по теме ГП-366 (заключительный) - Днепропетровск, НГУ, 2006. – с.
68. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.:ил.
69. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. - М.: Издательский дом Вильяме, 2004. - 992 с.
70. Джеффри Рихтер Windows для профессионалов: программирование для Windows 95 и Windows NT 4 на базе Win32 API/Пер. с англ. – М.: Издательский отдел “Русская редакция” ТОО “Channel Trading Ltd,” 1997. – 712 с.

## **ДОДАТКИ**

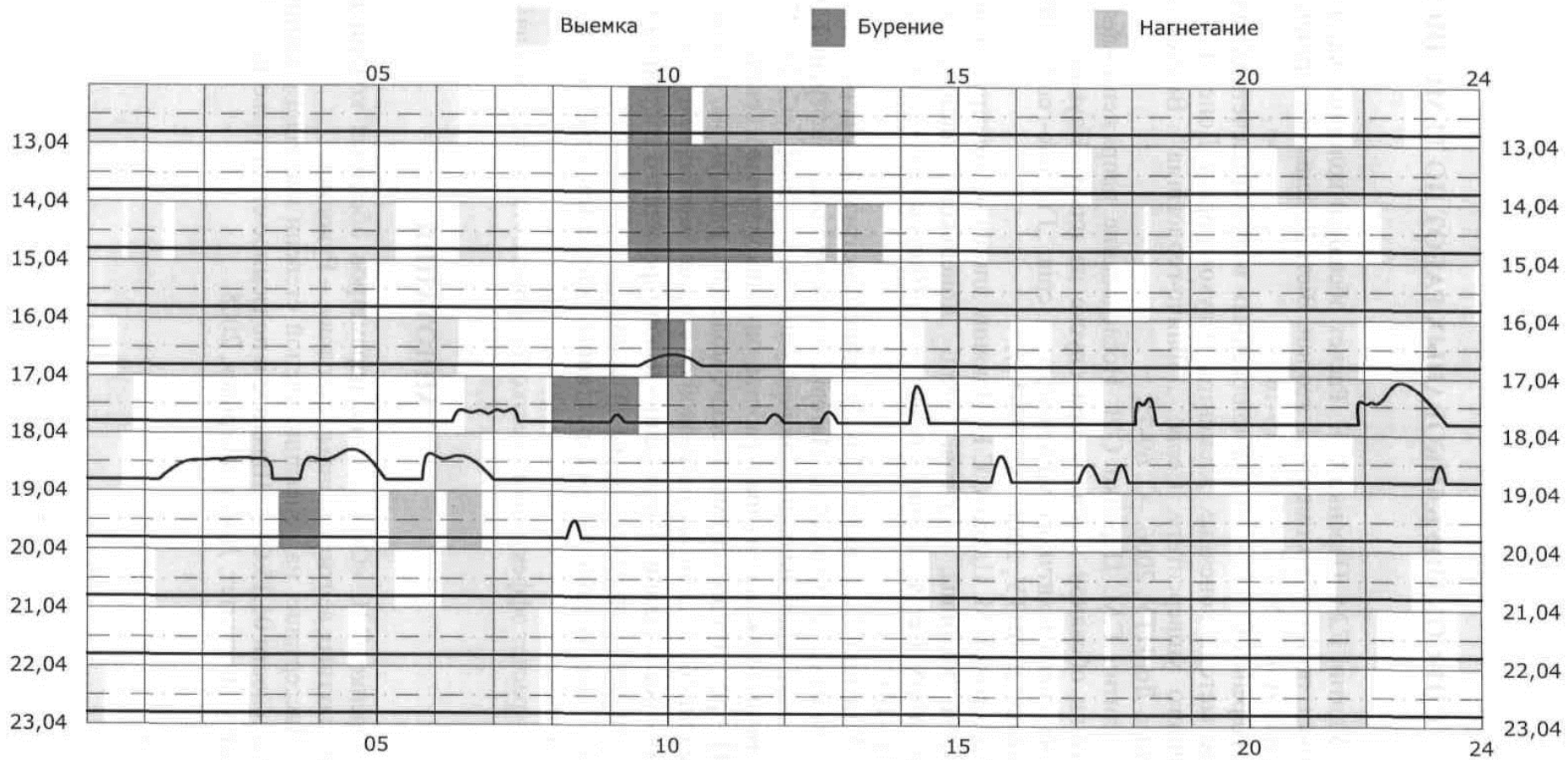
Значення прогностичної ознаки  $K$  (за показниками апаратури АК-1) в порідному масиві при різних видах роботи (виїмка, буріння, нагнітання)



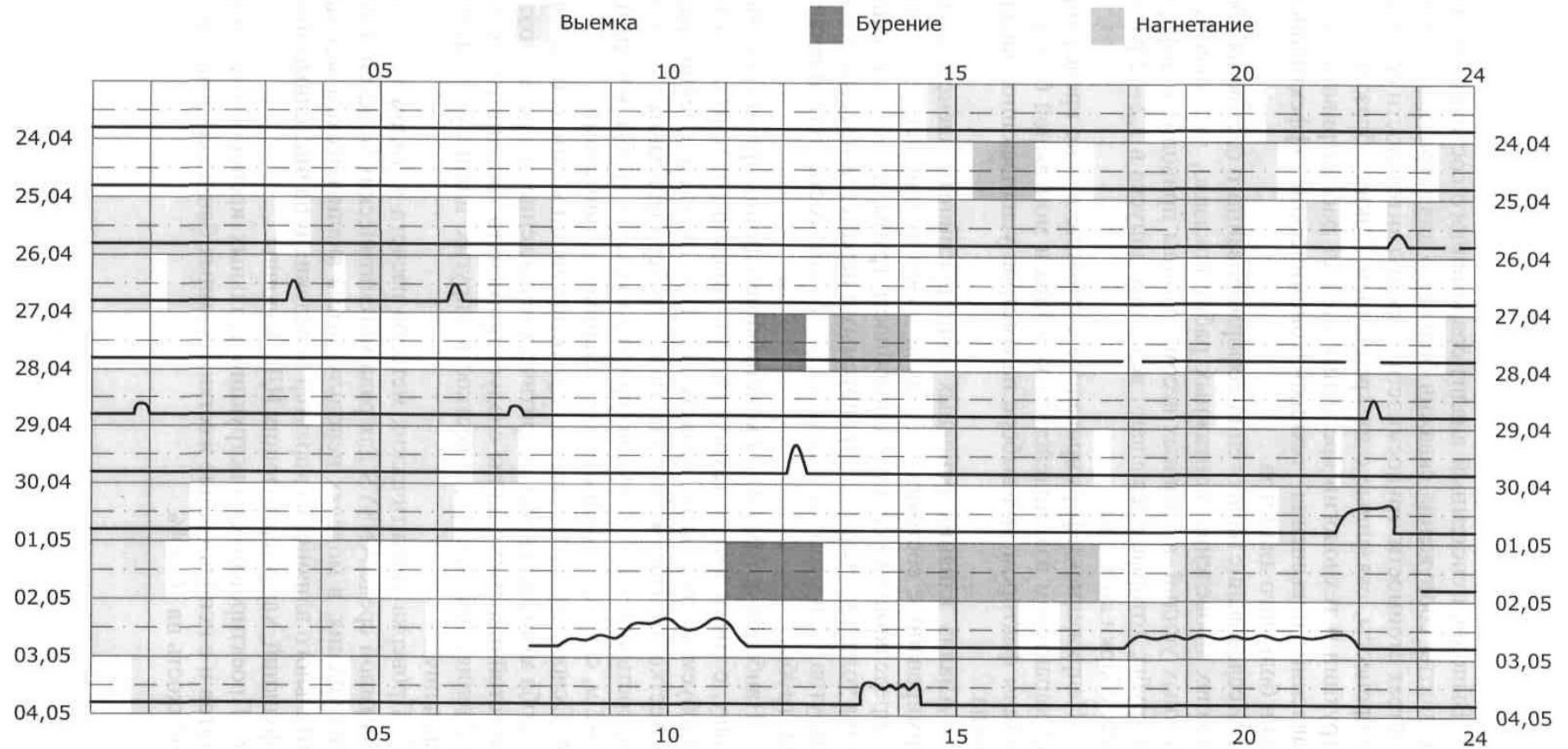




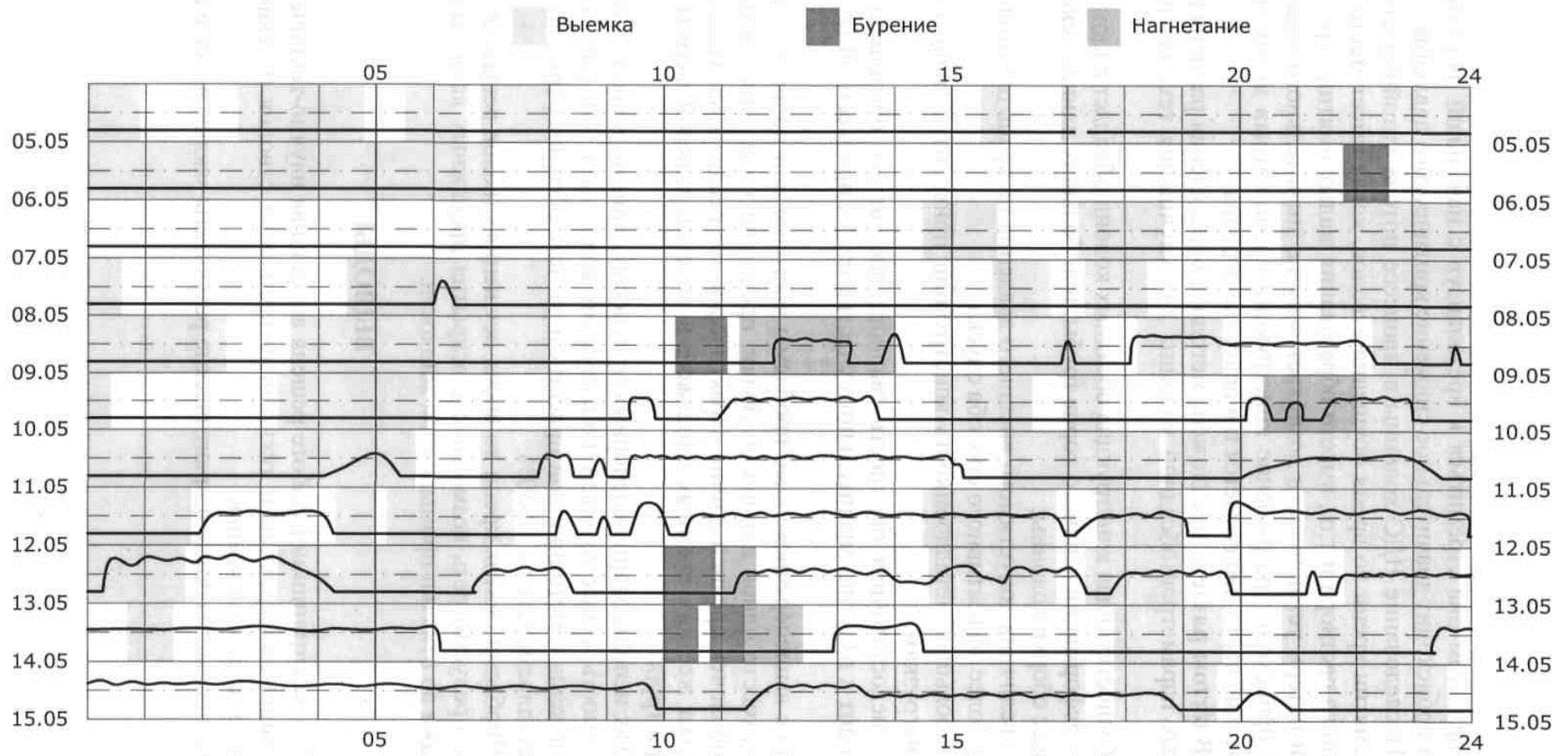
Продовження додатка А



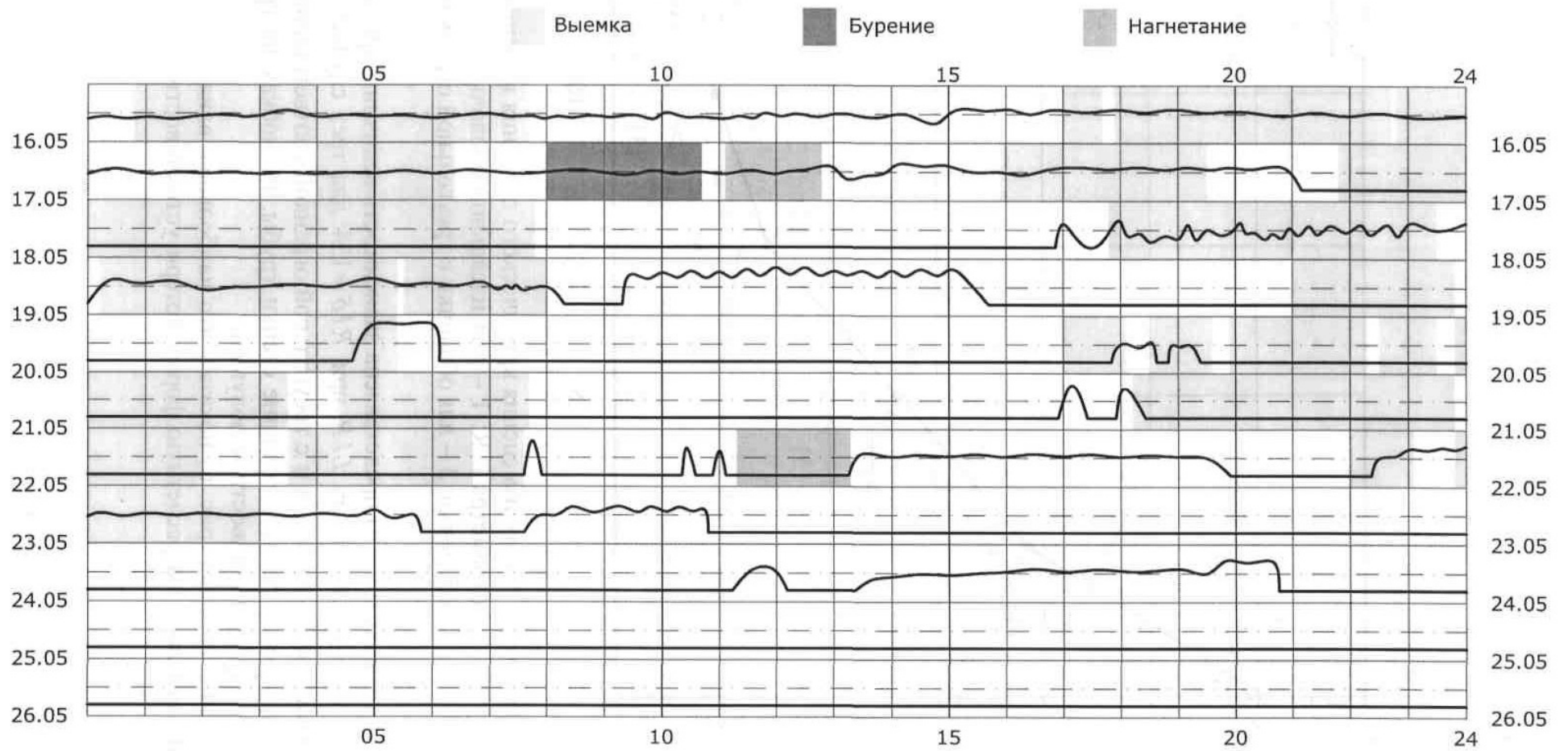
Продовження додатка А



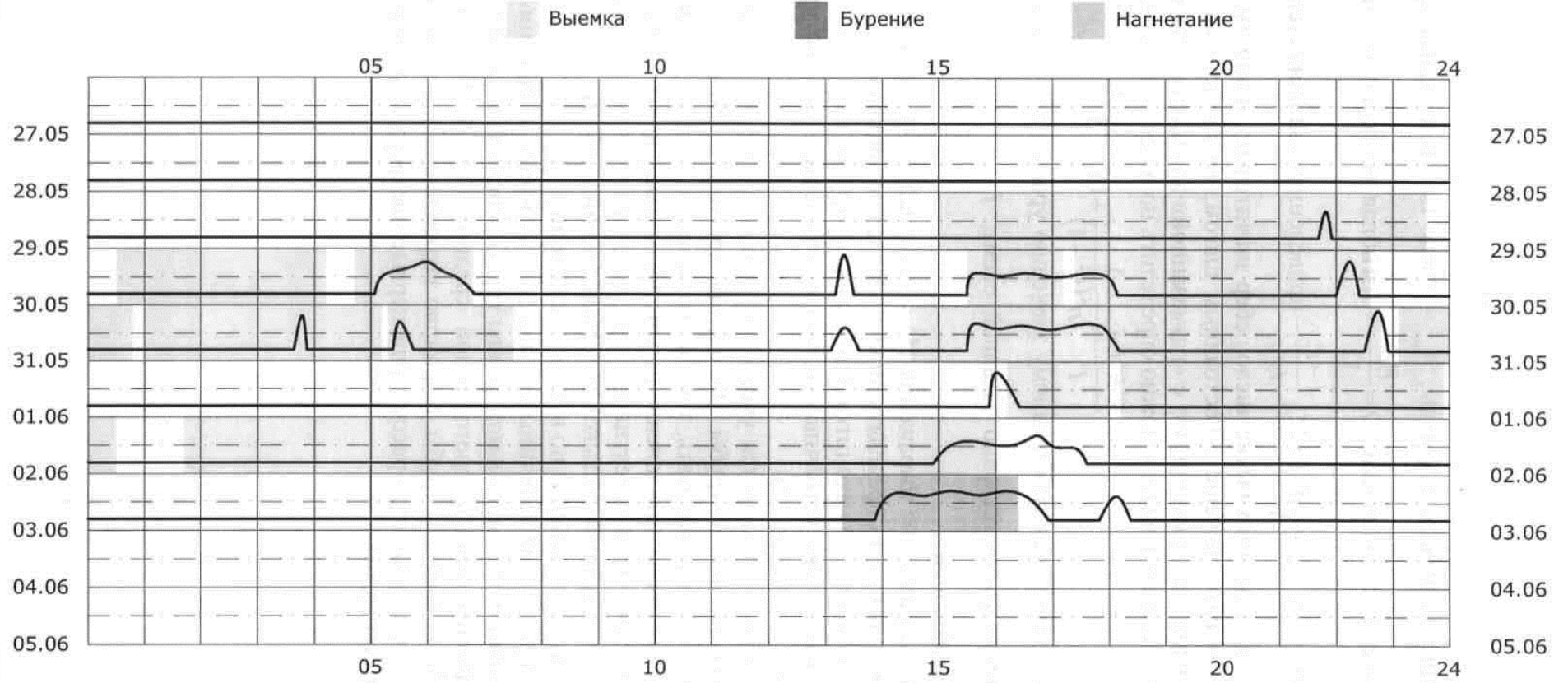
Продовження додатка А



Продовження додатка А



Продовження додатка А



**ВЫПИСКА**

из протокола № 5  
заседания кафедры строительства и геомеханики  
Национального горного университета

г. Днепропетровск

03 декабря 2008 г.

**ПРИСУТСТВОВАЛИ:** всего – 18 человек, д.т.н. – 4.

**СЛУШАЛИ:** сообщение д.т.н., проф. Шашенко А.Н., научного руководителя темы ГП-405 «**Разработка математических моделей для создания информационной среды в системе геоминиторинга**» о результатах выполнения темы.

В обсуждении приняли участие проф. Роечко А.Н., проф. Минеев С.П., доц. Матюшин А.П., доц. Рева С.Н.

Ими было отмечено, что работа носит фундаментальный характер, выполнена на высоком профессиональном уровне. Полученные в работе результаты исследований опираются на богатый материал шахтных исследований, известные теоретические предпосылки, а также новые идеи в применении и совершенствовании численных методов моделирования и акустических методов контроля и прогноза для изучения НДС массива вокруг выработок.

**ПОСТАНОВИЛИ:**

1. Работа выполнена в полном объеме в соответствии с календарным планом и техническим заданием.
2. Выполняемая НИР является прикладной.
3. Научное и практическое значение выполненных исследований заключается в следующем:
  - Разработана вероятностная модель прочности и деформирования трещиноватой породной среды с учетом изменчивости физических свойств, для использования в геомеханических расчетах. Комплексное использование метода конечных элементов и приемов имитационного моделирования позволяет отразить в геомеханических расчетах неоднородность породного массива в виде изменчивости физико-механических характеристик в разных точках среды.
  - Установлено, что наличие макродефектов (систем трещин) в породной среде увеличивает разброс значений характеристик свойств пород в зависимости от плотности трещин, и изменяет распределение вероятностей количественного признака, который характеризует свойства

породного массива. Значения асимметрии и эксцесса распределений нелинейно зависят от расстояния между трещинами в породной среде и степени внутренней неоднородности структурных элементов массива.

- Установлено, что максимальное увеличение смещений контура выработки, обусловленное изменчивостью свойств линейно деформирующейся среды, имеет место в замке свода выработки арочной формы и составляет 21 % от величины смещений этой точки в однородном массиве. На перемещение контура выработки круглой формы изменчивость механических характеристик отражается незначительно.
- Разработана «Методика учета макродефектов породной среды», апробированная при внедрении нового способа повышения устойчивости выработок на шахте «Шахтерская-Глубокая» ГП «Шахтерскантрацит». Ожидаемый экономический эффект от реализации предложенных рекомендаций при применении способа поддержания выработок и «Методики ...» составит 25,8 тыс. грн на 1000 п.м.
- Разработана конструкция приемного датчика акустических колебаний, которые распространяются в породном массиве, с учетом ограничений по выбору места и способа установки.
- Разработана модель формирования информационного сигнала при акустическом зондировании состояния породной среды и показано, что фрагменты исходного сигнала, которые отвечают разным технологическим процессам, имеют разную информативность для задач диагностики состояния массива и должны обрабатываться поэтапно, разными методами для определения нужных информационных признаков.
- Разработан алгоритм программного обеспечения применительно к использованию прогностического коэффициента  $K$  для системы мониторинга НДС породного массива.
- Разработана и обоснована структура программного обеспечения, которое выполняет захват и эффективную обработку акустического сигнала, отображение текущих его значений на экране монитора ПК, включает систему архивации, сохранения и получения доступа в архив прогностической информации о НДС породного массива на жестком диске ПК.
- В условиях шахты «Краснолиманская» выполнены инструментальные наблюдения с использованием аппаратуры АК-1, по результатам которых подтверждена высокая чувствительность аппаратуры по показателю выбороопасности  $K$  и эффективность методики прогноза НДС породного массива на основе спектральных методов анализа акустического сигнала.
- Разработаны «Рекомендации по обработке принятой из массива акустической информации при работе источника сигнала со случайными характеристиками и изменяемым местоположением с целью выделения аномальных зон со структурными и силовыми неоднородностями» (утвержденная проректором по научной работе Национального горного университета в 18.12.2007 г.).



4. Результаты НИР содержат материалы, которые составляют предмет изобретения. Отчет содержит конфиденциальные сведения «НОУ-ХАУ», которые исполнитель самостоятельно может передать другим лицам на договорной основе. Отчет не содержит сведений, составляющих государственную тайну.
5. Научно-технический уровень НИР соответствует современному уровню науки и техники.
6. Заключительный отчет по теме ГП-405 одобрить и рекомендовать к утверждению.

Заведующий кафедрой строительства  
и геомеханики,  
д-р техн. наук, проф.

А.Н. Шашенко

Секретарь кафедры  
к.т.н., доц.

Р.Н. Терещук

**ВИТЯГ**

з протоколу № 7

засідання секції ради за науковим напрямом

"Прогресивні технології видобутку і переробки корисних копалин"

Національного гірничого університету

м. Дніпропетровськ

9 грудня 2008 р.

**Порядок денний:** розгляд проміжних та заключних звітів за результатами виконаних науково-дослідних робіт у 2008 році за рахунок бюджетного фінансування.

**Присутні:** Голова ради, д.т.н., проф. Пілов П.І., заступник голови ради д.т.н., проф. Бондаренко В.І., д.т.н., вчений секретар ради к.т.н. Медяник В.Ю., члени ради: д.т.н., проф. Голінько В.І., д.т.н., д.т.н., проф. Симоненко В.І., д.т.н., проф. Шашенко О.М., д.т.н., проф. Бузило В.І.

**Слухали:** Повідомлення д-ра техн. наук, професора Шашенка О.М. – наукового керівника про результати виконання роботи ГП-405 “Розробка математичних моделей для створення інформаційного середовища в системі геомоніторингу”.

У ході обговорення звіту були поставлені запитання, на які керівник теми дав вичерпні відповіді.

На закінчення виступили проф. Бузило В.І, проф. Бондаренко В.І. які визначили важливість і актуальність досліджених питань для підприємств вугільної промисловості України.

**Ухвалили:**

1. Робота виконаний у повному обсязі відповідно до календарного плану і технічного завдання.

2. Виконана робота є прикладною.

3. Основні наукові результати полягають у наступному:

• Розроблена імовірнісна модель міцності та деформування тріщинуватого породного середовища з урахуванням мінливості його фізичних властивостей, для використання в геомеханічних розрахунках. Сполучення методу скінчених елементів і прийомів імітаційного моделювання дозволяє відбити в геомеханічних розрахунках неоднорідність породного масиву у вигляді мінливості фізико-механічних характеристик у різних точках середовища.

• Встановлено, що наявність макродефектів (систем тріщин) у породному середовищі збільшує розкид значень характеристик властивостей порід у залежності від щільності тріщин, та змінює розподіл імовірностей кількісної ознаки, що характеризує властивості породного масиву. Значення асиметрії й ексцесу розподілів нелінійно залежать від відстані між тріщинами в породному середовищі і ступеня внутрішньої неоднорідності структурних елементів масиву.

• Встановлено, що максимальне збільшення зсувів контуру виробки, обумовлене мінливістю властивостей середовища, що деформується лінійно, має місце в замку склепіння виробки аркової форми і складає 21% від величини

зсувів цієї точки в однорідному масиві. На переміщення контуру виробки круглої форми мінливість механічних характеристик позначається незначно.

- Розроблена «Методика обліку макродефектів породного середовища» та апробована при впровадженні нового способу підвищення стійкості виробок на шахті «Шахтарська-Глибока» ГП «Шахтарськантрацит». Очікуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій при застосуванні способу підтримки виробок і «Методики...» складе 25,8 тис. грн на 1000 п.м.

- Розроблена конструкція приймального датчика акустичних коливань, що розповсюджуються в породному масиві, з урахуванням обмежень з вибору місця та способу встановлення.

- Розроблена модель формування інформаційного сигналу при акустичному зондуванні стану породного середовища та показано, що фрагменти вихідного сигналу, які відповідають різним технологічним процесам, мають різну інформативність для задач діагностики стану масиву і повинні оброблятися поетапно, різними методами для визначення потрібних інформаційних ознак.

- Розроблений алгоритм програмного забезпечення щодо застосування прогностичного коефіцієнту  $K$  для системи моніторингу НДС породного масиву.

- Розроблена та обґрунтована структура програмного забезпечення, що виконує захват та ефективну обробку акустичного сигналу, відображення поточних його значень на екрані монітору ПК, включає систему архівації, збереження та отримання доступу до архіву прогностичної інформації про НДС породного масиву на жорсткому диску ПК.

- В умовах шахти «Краснолиманська» виконані інструментальні спостереження з використанням апаратури АК-1, за результатами яких підтвержена висока чутливість апаратури по показнику викидонебезпечності  $K$  та ефективність методики прогнозу НДС породного масиву на основі спектральних методів аналізу акустичного сигналу.

- Розроблені «Рекомендации по обработке принятой из массива акустической информации при работе источника сигнала со случайными характеристиками и изменяемым местоположением с целью выделения аномальных зон со структурными и силовыми неоднородностями» (затверджена проректором з наукової роботи Національного гірничого університету 18.12.2007 р.).

4. Всі отримані в даній роботі результати та встановлені на їх основі закономірності мають наукову новизну та практичне значення. Результати наукових досліджень відповідають світовому рівню.

5 Результати роботи містять відомості “know how” щодо механізму і застосовуваного комплексного підходу до оцінки напружено-деформованого стану породного масиву та чисельного моделювання складноструктурного породного масиву.

6. Науково-технічний рівень одержаних результатів. Даний напрямок має новизну, конкурентноздатність і спрямований на рішення актуальної проблеми забезпечення тривалої стійкості гірничих виробок, підземних об'єктів різного призначення і боротьби з негативними проявами гірського тиску на гірничо-видобувних підприємствах. Технічний рівень НДР відповідає сучасному рівню науки і техніки. У порівнянні зі світовими аналогами, напрямок досліджень має новизну і відмінність в частині нового підходу до рішення проблеми. Перспективність – першочергові важливі.

Світовий рівень даних розробок забезпечений використанням існуючих на сьогодні високоефективних, досить апробованих сучасних чисельних методів комп'ютерного моделювання; узагальненням світового та вітчизняного досвіду в галузі геомеханіки, аналізом значного обсягу статистичної інформації щодо механічних процесів, які реалізуються при підземному видобутку корисних копалин.

Результати роботи можуть бути використані на всіх підприємствах гірничо-видобувної галузі при будівництві та експлуатації, для забезпечення тривалого стійкого стану комплексу підземних виробок, вибору своєчасних та оптимальних засобів їх кріплення та підтримки в експлуатаційному стані; в інститутах по проектуванню підземних об'єктів, а також для підготовки спеціалістів з гірничої та будівельної справи.

7. Заключний звіт схвалити, рекомендувати до затвердження.

Заступник голови секції ради,  
д-р техн. наук, проф.

В.І. Бондаренко

Вчений секретар,  
к.т.н.

В.Ю. Медяник



**Министерство образования и науки Украины  
Национальный горный университет  
(НГУ)**

49005, г. Днепропетровск, пр. К.Маркса,19;  
тел. (0562) 47-32-09; факс 744-62-14; телекс 143457 «AGAT SU»  
E-mail: victorlapko@yahoo.com

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе,  
д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ А.С. Бешта

«\_\_\_\_» декабря 2007 г.

**РЕКОМЕНДАЦИИ**

**ПО ОБРАБОТКЕ ПРИНЯТОЙ ИЗ МАССИВА АКУСТИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ПРИ РАБОТЕ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА СО  
СЛУЧАЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ИЗМЕНЯЕМЫМ  
МЕСТОПОЛОЖЕНИЕМ С ЦЕЛЬЮ ВЫДЕЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ  
ЗОН СО СТРУКТУРНЫМИ И СИЛОВЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

Научный руководитель,  
зав.кафедрой СГМ,  
д-р техн. наук, проф.

А.Н. Шашенко

Днепропетровск 2007

**РЕЦЕНЗИЯ**

