



Vol. 1 No. 2 (2023)

Available since: 2023

Published: 2 times a year

Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: C01, C15, C2

DOI: 10.62911/ete.2023.01.02.11

Application of ultrasound detection for dangerous starks and deliveries in the roof and walls of underground mining works


Citation:

Shupov, V., Zhukov, M., Pyrozhenko, A., Tsvitnov, V. & Shaida, R. (2023). Application of ultrasound detection for dangerous starks and deliveries in the roof and walls of underground mining works. *Scientific and practical journal "Economics and technical engineering"*, 1(2), 143–152. <https://doi.org/10.62911/ete.2023.01.02.11>

Vitalii Shupov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shupov@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-4197-7603

Mykola Zhukov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-4308-0218

Andrii Pyrozhenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0001-8148-4956

Vitalii Tsvitnov

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: tsvetnov8@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0002-6870-3090

Ruslan Shaida

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: aumpekmi.nmetau@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0002-7942-9592

Received: 10/09/2023

Accepted: 15/11/2023

Abstract: It has been shown that there is a high incidence of injuries to mountain workers due to falling pieces of rock in underground mining pits. From the published materials it is clear that in deep ore mines, on average, 40% of all injuries on mining robots are mainly caused by falls from invisible pins and scrapes in the walls and walls of mining machines. Increasing productivity works under the influence of a stronger environment. The main way to identify potential stains is by tapping the surface of the oil mass, as the frill is called, which is associated with a forceful infusion onto the mass and is potentially unsafe. The design is based on a device for non-force acoustic ultrasonic scanning of the roofing and walls of the roofing wall with the method of detecting the presence of pins and shading. Active control of the massif is based on the specific nature of the division of mechanical-acoustic springs in the Georgian breed. An analysis of the reaction of the Girsky breed to an exciting acoustic pulse in the ultrasonic spectrum was carried out. It was revealed that the reaction of the breed lies at the stage of mechanical connection of the controlled plot with the entire Girsky massif, therefore, by the magnitude of the amplitude and extinction of the acoustic sound, one can judge the stage of autonomy of the plot and possibly there is a deboning. The detection of cracks, which causes increased reverberation of the signal due to vibrations between the sections in the cracks, which leads to increased amplitude and frequency of strong resonant vibrations. The device was disassembled, prepared and tested until the last moment and fitted with the sensor to accommodate two independent sensors, one of which works on vibration, and the other on reception. To ensure high sensitivity, frequency and small dimensions, a resonant converter based on the active element of the PZT material was used - 23 with barium titanate with added lead and zirconium titanate. The vicinity of the dual-element sensor allows you to insert the middle element of the vibrating element into the receiving element. The elements are acoustically isolated from one type to another. The acoustic scanning frequency is assumed to be 20 kHz, the duration of the scanning pulse is 0.3 ms. Is shown block diagram and a photo of the visible sensor.

Keywords: underground mine, injuries to mining workers, ultrasonic scanning, device design.




JEL: C01, C15, C2

Application of ultrasound detection for dangerous starks and deliveries in the roof and walls of underground mining works

Vitalii Shupov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shupov@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-4197-7603

Mykola Zhukov

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-4308-0218

Andrii Pyrozhenko

Assoc. Prof. PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0001-8148-4956

Vitalii Tsvitnov

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: tsvitnov8@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0002-6870-3090

Ruslan Shaida

Assistant, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: aumpekmi.nmetau@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0002-7942-9592

Abstract: It has been shown that there is a high incidence of injuries to mountain workers due to falling pieces of rock in underground mining pits. From the published materials it is clear that in deep ore mines, on average, 40% of all injuries on mining robots are mainly caused by falls from invisible pins and scrapes in the walls and walls of mining machines. Increasing productivity works under the influence of a stronger environment. The main way to identify potential stains is by tapping the surface of the oil mass, as the frill is called, which is associated with a forceful infusion onto the mass and is potentially unsafe. The design is based on a device for non-force acoustic ultrasonic scanning of the roofing and walls of the roofing wall with the method of detecting the presence of pins and shading. Active control of the massif is based on the specific nature of the division of mechanical-acoustic springs in the Georgian breed. An analysis of the reaction of the Girsky breed to an exciting acoustic pulse in the ultrasonic spectrum was carried out. It was revealed that the reaction of the breed lies at the stage of mechanical connection of the controlled plot with the entire Girsky massif, therefore, by the magnitude of the amplitude and extinction of the acoustic sound, one can judge the stage of autonomy of the plot and possibly There is a deboning. The detection of cracks, which causes increased reverberation of the signal due to vibrations between the sections in the cracks, which leads to increased amplitude and frequency of strong resonant vibrations. The device was disassembled, prepared and tested until the last moment and fitted with the sensor to accommodate two independent sensors, one of which works on vibration, and the other on reception. To ensure high sensitivity, frequency and small dimensions, a resonant converter based on the active element of the PZT material was used - 23 with barium titanate with added lead and zirconium titanate. The vicinity of the dual-element sensor allows you to insert the middle element of the vibrating element into the receiving element. The elements are acoustically isolated from one type to another. The acoustic scanning

frequency is assumed to be 20 kHz, the duration of the scanning pulse is 0.3 ms. Is shown block diagram and a photo of the visible sensor.


Keywords: underground mine, injuries to mining workers, ultrasonic scanning, device design.

Застосування ультразвуку для винаходження небезпечних заколів і відшланень у покрівлі і стінках підземних гірничих виробок

Віталій Шупов

к.т.н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Україна


e-mail: shupov@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-4197-7603

Микола Жуков

к.т.н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Україна


e-mail: krogzhuns@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-4308-0218

Андрій Пироженко

к.т.н., доцент, Державний університет економіки і технологій, Україна


e-mail: a.v.pirozhenko@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0001-8148-4956

Віталій Цвітнов

асистент, Державний університет економіки і технологій, Україна

e-mail: tsvetnov8@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0002-6870-3090

Руслан Шайда

асистент, Державний університет економіки і технологій, Україна

e-mail: aumpekmi.nmetau@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0002-7942-9592

Анотація: Представлено високу поширеність травматизму гірських робітників від падаючих шматків породи в підземних гірничих виробках. З опублікованих матеріалів відомо, що на глибоких рудних шахтах в середньому 40% усіх травм на гірничих роботах в останні роки спричинені падінням невидимих заколів та відшарувань в стелі та стінках гірничих виробок. Зростання продуктивності робіт тягне посилення цього явища. Існуючий спосіб виявлення потенційних заколів та відшарувань методом простукування поверхні гірничого масиву, так звана оборка, пов'язана з силовим впливом на масив і є потенційно небезпечним. Запропоновано конструкцію пристрою для несилового акустичного ультразвукового сканування покрівлі та стінок гірничого вироблення з метою виявлення прихованих заколів та відшарувань. Активний контроль масиву ґрунтується на визначенні характеру розподілу механо-акустичних пружних хвиль у гірській породі. Проведено аналіз реакції гірської породи на збуджуючий акустичний імпульс в ультразвуковому спектрі. Виявлено, що реакція породи залежить від ступеня механічного зв'язку контрольованої ділянки з усім гірським масивом, тому за величиною амплітуди та згасанню акустичного післязвучання можна судити про ступінь автономності ділянки та можливість її обвалення. Наявність тріщин, заколів та відшарування збільшує реверберацію сигналу за рахунок відображень від меж розділу в тріщинах, що призводить до збільшення амплітуди та тривалості вільних резонансних коливань. Розроблено, виготовлено та випробувано дослідний зразок приладу з датчиком, що містить два незалежних п'єзоперетворювача, один з яких працює на випромінювання, а інший

- на прийом. Для забезпечення поєднання високої чутливості, частотності та малих габаритів було використано резонансний перетворювач на основі активного елемента з матеріалу ЦТС – 23 з титанату барію з додаванням титанату свинцю та цирконію. Використання двоелементного датчика дозволяє усунути безпосередній вплив випромінюючого елемента на прийомний. Елементи акустично ізольовані один від іншого. Частота акустичного сканування прийнята 20 кГц, тривалість скануючого імпульса 0,3 мс. Подана блок-схема пристрою та фото загального вигляду датчика.

Ключові слова: підземна виробка, травматизм гірничих робітників, ультразвукове сканування, конструювання пристрою.

Вступ (Introduction)

В Україні та інших країнах із розвиненою гірничодобувною промисловістю широко використовується видобуток рудних корисних копалин підземним способом на шахтах. Останнім часом глибина залягання пластів, що розробляються, неухильно збільшується, що призводить до ускладнення гірничотехнічних умов виробництва та збільшення факторів ризику виробничого травматизму. Незважаючи на вдосконалення технологій та обладнання, рівень травматизму на підземних роботах залишається суттєвим. При цьому більшість травм і смертельних випадків пов'язано з падінням шматків породи з покрівлі та стін гірничих виробок. Порушення суцільності гірничого масиву відбувається постійно під впливом високого гірничого тиску та технологічних причин, переважно вибухових робіт та роботи гірничотранспортного обладнання.

Результати (Results)

З опублікованих даних (Muzaffar et al., 2013, Kleczek et al., 1999, Amegbey et al., 2008, Sanmiguel et al., 2015, Lang, 2015, Coleman et al., 2003-2007) відомо, що на залізрудних шахтах від 40% до 70% травм зі смертельним наслідком пов'язані з падінням гірничої маси. Наприклад, у Кривбасі на шахті "Гвардійська" 12.03.2018 внаслідок обвалу породи на горизонті 1340 м один гірник загинув та один травмований. 03.12.2020 на шахті "Тернівська" троє людей постраждали від обвалу породи на горизонті 1383 м. 02.12.2021 на шахті "Артем-1" загинув гірник через обвал на горизонті 1135 м.

За даними SpkConsulting (Srk Consulting, 2014) на шахтах Австралії 66% смертельних нещасних випадків були зумовлені обвалом гірського масиву, а 40% усіх травм на підземних роботах у період 1992-2014 рр. були спричинені падінням невидимих заколів та відшарувань в стелі та стінах гірничих виробок. При цьому потрібно відрізнити травми від падаючих поодиноких шматків породи, від таких, що виникли при обрушеннях значних зависань гірської маси. За даними (Shcherbatiuk, 1992) на травми від падаючих поодиноких шматків гірничої маси припадає 80% тяжких травм, а на травми при обрушеннях значних зависань гірської маси - 20%. При зростанні площі поперечного перерізу гірничої виробки - це співвідношення ще більше збільшується.

У (Volfson et al., 1986) виявлено кількісну залежність числа нещасних випадків на залізрудних шахтах Кривого Рогу від гірничо-геологічних умов:

$$N = 4,213 - 0,221f + 0,392S + 0,002H, (1)$$

де: N - кількість нещасних випадків на 10^4 м довжини виробки; f - міцність породи за шкалою Протод'яконова; S - площа поперечного перерізу виробки, m^2 ; H - глибина залягання горизонту, м.

Заколи та відшарування гірської маси можуть мати геологічне, динамічне або технологічне походження. Заколи геологічного походження утворилися внаслідок

відокремлення шматків від масиву по тріщинах або на межі порід з різними властивостями міцності. Заколи технологічного походження зумовлені бурильними і вибуховими роботами або аваріями з важким гірничо-транспортним обладнанням. Динамічне утворення заколів відбувається протягом тривалого часу як наслідок порушення суцільності гірського масиву під впливом гірського тиску. Таке утворення заколів пов'язане з наявністю тріщин в гірському масиві (Pantelieiev, 2020).

Для характеристики ступеня напруженості приконтурної частини гірського масиву, у геомеханіці існує поняття категорії небезпеки. Воно визначає можливість порушення цілісності масиву як у вигляді масштабних вивалів і гірських ударів, так і у вигляді локальних лущень, заколів і відшарувань. Останні є найбільш поширеними та непрогнозованими. Зовнішніми ознаками небезпечного стану масиву з погляду ризику падіння шматків гірської маси можуть бути: велика площа поперечного перерізу виробки; пошкодження скельного масиву після вибухових робіт; поява нових тріщин та їх розкриття; поява капель води або значне зволоження поверхні; виявлення малих та великих шматків породи на підлозі виробки; звукові клацання та потріскування.

Щоб уникнути ризику отримати травму від падіння великих шматків породи (бутів) у підготовчих та очисних виробках потрібно регулярно виконувати технологічну процедуру, яка регламентується нормативними документами проведення гірничих робіт. Ця процедура передбачає візуальний огляд і та простукування поверхні гірського масиву з метою виявлення заколів та їх знешкодження: примусове відділення шматка від масиву (оборка). Оборка заколів проводиться на початку кожної зміни. Її виконують спеціально навчені робітники відповідно до плану гірничих робіт (Marshall et al., 2000). Зазвичай, оборка заколів здійснюється вручну за допомогою спеціальної штанги завдовжки не менше 2м. Ручна оборка є трудомісткою та небезпечною операцією. Використовують також механізовану оборку за допомогою самохідних машин, які пересуваються по рейках або на колесах. В таких машин робочим органом є гідравлічний або пневматичний ударний інструмент.

Перед оборкою заколу його спочатку потрібно виявити. Візуально можна виявити лише невелику кількість заколів і відшарувань, які явно проявляють себе. Тому актуальною проблемою є виявлення прихованих заколів. Велика увага розвитку геофізичних методів контролю стану поверхні гірничого масиву приділяється у всіх країнах із розвинутою гірничодобувною промисловістю. В Україні в цьому напрямку працюють такі організації: ІДФ НАН, ІГТМ НАН, УкрНІМІ та НГУ.

Контроль масиву ґрунтується на визначенні характеру розподілу механо-акустичних пружних хвиль у гірській породі. При цьому використовуються пасивний та активний типи контролю і спеціальні електронні прилади. Пасивний контроль заснований на прослуховуванні внутрішніх природних шумів у породі, які виникають при порушенні цілісності скельного масиву, який знаходиться в напруженому стані. При активному контролі використовується штучний збудник пружних коливань певної частоти, які по подають в гірський масив і визначають характер розповсюдження цих коливань. Пасивний метод застосовується для тривалого моніторингу напруженого стану гірського масиву в цілому. Активний метод може бути використаний для виявлення локальних ділянок поверхні масиву, в якому втратився жорсткий механічний зв'язок з основним скельним масивом. Найбільш перспективним у геомеханіці є активний акустичний метод, в якому використовується ультразвуковий діапазон частот понад 20 кГц (Yalanskyi, 2000, Kopylov et al., 2015, Lesso et al., 2007, Khoshuei et al., 2019, Meng et al., 2018). Такий метод контролю використаний у приладі ЕРІДАН, який розроблений в ІГТМ АН України (Serhiienko et al., 1989) для дефектоскопії оголеної поверхні гірничого масиву. Ця розробка була однією з перших спроб створити прилад для оперативного виявлення небезпечних заколів у підземній виробці. В цьому приладі механічний ударник з нормованою силою удару активує акустичну хвилю в гірському масиві і одночасно сейсмоприймачем аналізується спектр згасаючих коливань в масиві. Ознакою порушення цілості масиву є помітна інтенсивність післязвучання породи після удару. Відомі інші аналоги такого приладу різних розробників. Сам принцип не викликає

заперечень, але його реалізація має ряд недоліків. Головними недоліками є потреба генерувати небезпечні механічні силові удари, які впливають на поверхню гірського масиву та використання лише амплітуди акустичної хвилі післязвучання для визначення порушення монолітності масиву.

У цій роботі зроблена спроба створити прилад, який має більш високу достовірність виявлення заколу в гірському масиві навколо виробки без силового впливу на масив. Суть роботи приладу полягає в тому, що у твердій скельній породі розповсюджуються поздовжні та поперечні пружні хвилі, за рахунок акустичного впливу, який генерує прилад. Основні акустичні параметри гірської породи – швидкість поширення пружної хвилі, коефіцієнт поглинання акустичної енергії та хвильовий опір.

Швидкість поширення акустичної хвилі визначається пружними властивостями породи та її щільністю, які мало залежать від частоти. Це дозволяє використовувати весь спектр сигналу, отриманого чутливими елементами приладу. Для скельних порід типу граніту, базальту, кварциту швидкість поздовжніх хвиль знаходиться орієнтовно в межах 4500 – 6000 м/с, а поперечних - 3000 – 3500 м/с. Амплітуда коливань A при віддаленні L від джерела випромінювання зменшується за експоненціальним законом (Rzhevskiy et al., 1984).

$$A = e^{-\beta L}, (2)$$

де: A_0 - амплітуда коливань на виході джерела сигналу; β – коефіцієнт поглинання, m^{-1} .

У місцях виникнення тріщин чи інших порушень суцільності відбувається відбиття пружної хвилі та реверберація акустичного сигналу. При ослабленні зв'язку з масивом характер відгуку на збудливий вплив визначається як загасанням сигналу в породі, так і резонансними явищами в локальному об'ємі контрольованої ділянки. Згасання хвиль обмежує просторову базу контролю та сприяє виявленню в акустичному сигналі лише тих хвиль, які резонують зі структурами гірського масиву. Наявність заколів і відшарування призводить до збільшення амплітуди та тривалості вільних резонансних коливань за рахунок реверберації. При цьому, максимум спектральної щільності зміщується в бік більш низьких частот.

Принципово можливо створити пружні коливання у породі за допомогою магнітострикційних та п'єзоелектричних перетворювачів електричного сигналу в механічну ультразвукову хвилю. Ці ж перетворювачі можуть працювати у зворотному напрямку - як приймачі акустичного ревербераційного сигналу. Для забезпечення посидання високої чутливості, частотності та малих габаритів було використано резонансний перетворювач на основі активного елемента з матеріалу ЦТС – 23 з титанату барію з додаванням титанату свинцю та цирконію. Цей матеріал відноситься до категорії п'єзокераміки і має високі функціональні характеристики: п'єзомодуль $(75-100) \cdot 10^{12}$ Кл/Н; механічна добротність 300; параметр випромінювання $(32-100)$ Кл/м²; параметр прийому 0,68 10-12 Кл / Н; температура Кюрі 285°C.

Конструктивні розміри активного елемента п'єзокераміки вибираються виходячи з необхідної потужності та частоти випромінювання. В приладі використана кругла пластина діаметром $D = 40$ мм та товщиною $h = 4$ мм. Круглі п'єзоелементи можуть працювати як з поздовжніми осьовими, так і з поперечними радіальними коливаннями і мають дві резонансні частоти $f_1 = C / 2h$ і $f_2 = C / 2D$, де C - швидкість звукової хвилі в матеріалі. Для збільшення амплітуди випромінюваних коливань та їхньої локалізації використовується концентратор конічної форми з алюмінієвого сплаву. Електричний зв'язок із приладом здійснюється високочастотним коаксіальним кабелем.

У режимі випромінювання вхідним параметром є амплітуда імпульсу напруги E , а вихідний – амплітуда акустичного тиску коливань P на виході концентратора, тому показником ефективності роботи п'єзоперетворювача є співвідношення P/E . В режимі прийому в якості вхідного сигналу використано акустичний тиск P , який спричиняє гірська порода на

концентратор, а як вихідний – напруга U , що виникає на електродах п'єзопластини та ефективність роботи перетворювача на прийом оцінюється співвідношенням U/P .

В принципі, можливе створення ультразвукового датчика заколів з одним п'єзоперетворювачем, який після збудження та примусового демпфування переводиться в режим прийому сигналів вільних коливань. Але таке рішення виявилось не ефективним через неможливість швидкого демпфування випромінювача. Це пов'язане з тим, що слабкий сигнал, який приймається приладом, накладається на власне випромінювання датчика. Тому використано схему двоелементного датчика, один елемент якого працює тільки на випромінювання, а другий – тільки на прийом. Обидва елементи конструктивно ідентичні та встановлені на спільній рукоятці датчика через гумові трубчасті втулки, які послаблюють взаємний механічний зв'язок.

Зовнішній вигляд двоелементного датчика показано на рис.1.



Рисунок 1. Зовнішній вигляд датчика.

Рукоятка датчика може встановлюватися на подовжувальну штангу з алюмінієвих трубчастих секцій, які поєднуються різьбовим з'єднанням. У процесі контролю датчик обома елементами прикладається до поверхні гірського масиву.

Збудження п'єзоелемента здійснюється імпульсами тривалістю 0,3мс і амплітудою 250В. П'єзоелемент спільно з підвищуючою обмоткою трансформатора схеми генератора імпульсів утворюють послідовний коливальний контур, в якому виникають затухаючі коливання (рис.2).

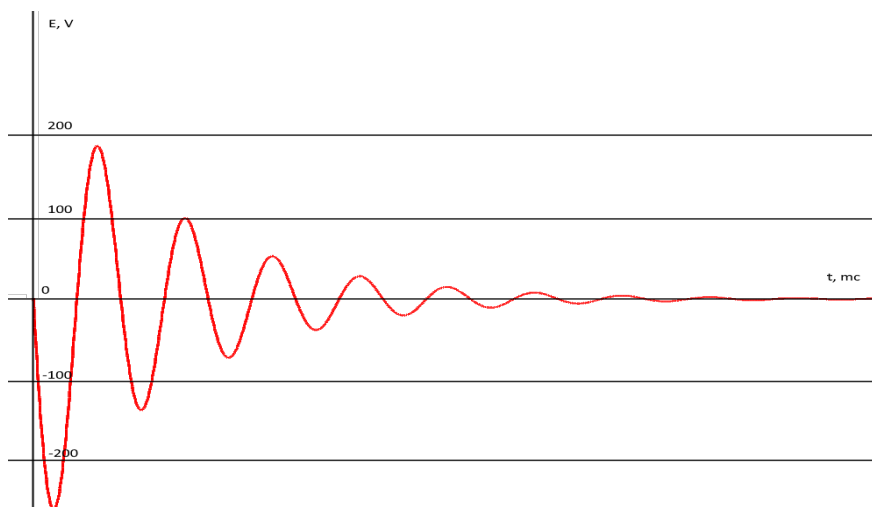


Рисунок 2. Осцилограма збуджуючого сигналу.

Блок – схема пристрою показано на рис. 3.

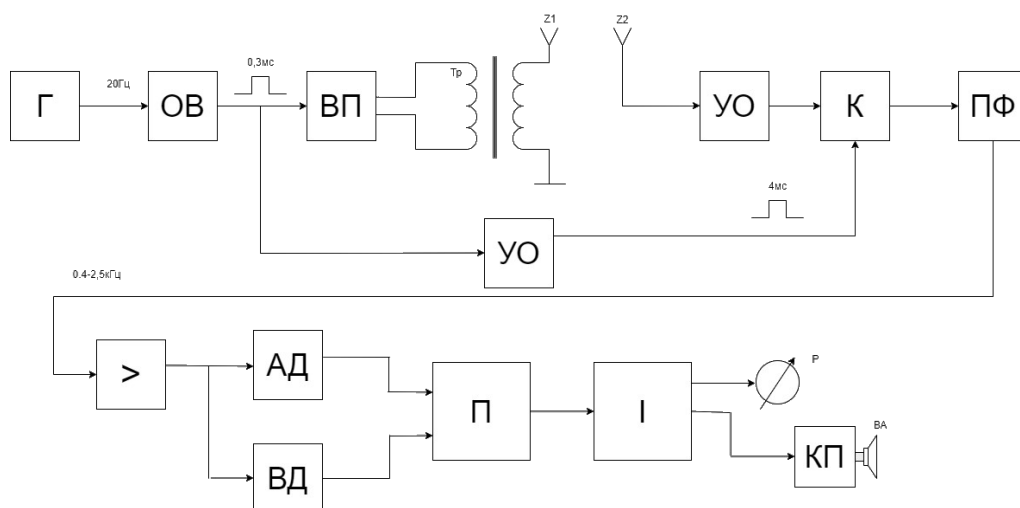


Рисунок 3. Блок-схема пристрою

Генератор G виробляє частоту 20 Гц скануючих збуджуючих імпульсів. Одновібратор OB формує скануючий імпульс тривалістю 0,3 мс, який через імпульсний підсилювач VP і підвищуючий трансформатор Tr надходить на п'єзоелемент збуджуючого перетворювача $Z1$. При цьому виникають мікроколивання контрольованої ділянки гірського масиву. Амплітуда і час згасання цих коливань залежить від ступеня механічної автономності контрольованої ділянки породи. Тобто, вони залежать від жорсткості його зв'язку з усім скельним масивом. У суцільному масиві без тріщин, заколів та відшарування коливання будуть мати незначну амплітуду і швидко згасають.

Приймальний перетворювач $Z2$ сприймає коливання, що виникли в породі, генеруючи на своєму виході електричний сигнал, пропорційний амплітуді акустичних коливань. Цей сигнал попередньо підсилюється обмежувачем YO і через ключ K надходить на полосовий частотний фільтр $ПФ$. Ключ K відкривається після кожного скануючого імпульсу із затримкою 4 мс, яка визначається одновібратором OB . Ця затримка потрібна для уникнення впливу власних коливань датчика на приймальний тракт.

Ширина смуги пропускання фільтра на рівні 0,5 становить (0,4 – 2,5) кГц і знаходиться у смузі робочих частот мікроколивань післязвучання реальних заколів та відшарувань масою до 100 кг. Сигнал із виходу фільтра після підсилення поступає на детектор амплітуди AD і детектор тривалості VD . Детектори містять інтегратори усереднення результатів перетворення. З метою підвищення достовірності контролю використано принцип одночасного обліку амплітуди та тривалості коливань, для чого сигнали з виходів обох детекторів перемножуються - перемножувачем $П$. Вихід перемножувача є кінцевим інформаційним сигналом. Для зменшення впливу акустичних перешкод, наприклад, від шарудіння датчика по породі, використаний інтегратор I з великим часом інтегрування. Рівень вихідного сигналу індикуються стрілочним індикатором P та звуковим індикатором BA . Поріг звучання визначається компаратором рівня $KУ$. Наявність звукового сигналу вказує про те, що контрольована ділянка породи має механічну автономність щодо скального масиву в межах чутливості приладу, яку можна задати. Відхилення стрілки індикатора P показує рівень цієї автономності у відносних одиницях.

Калібрування пристрою здійснюється таким чином, щоб при встановленні датчика на суцільний скельний масив, звуковий індикатор не спрацьовував, але при встановленні датчика на автономні шматки породи масою від 1 до 100 кг, індикатор сигналізував як небезпечний закол.

Висновки (Conclusions)

Перевага пристрою полягає у відсутності силового механічного впливу на поверхню гірського масиву, а також в обліку як амплітуди вимушених коливань у породі, так і в тривалості реверберації. Застосування пристрою підвищує безпеку виявлення заколів. Напрямок удосконалення такого ультразвукового акустичного методу сканування масиву – дистанційне введення та знімання ультразвукових сигналів без безпосереднього механічного контакту з поверхнею гірничого вироблення.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування

Внесок авторів (Authors contribution)

Практична розробка пристрою, Ш.В. та, Ш.Р.; аналітичні дані та аналіз Ж.М., Ц.В. та П.А. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Amegbey N., Ndur S., & Adjei R. (2008) Analysis of underground mining accidents at AngoGold Ashanti Limited, Obuasi Mine. *Ghana Min J*, 10(1).
- Coleman P., Brune J., & Martini L. (2010). Characteristics of the top five most frequent injuries in United States mining operations, 2003-2007. *Trans Soc Min Metal Explor*, 61-70.
- Khoshuei M., & Bagherpour R. Application of Acoustic Emission in mining and earth sciences: a review. (2019) *The Mining-Geological-Petroleum Engineering Bulletin*, 34(4), 19-32.
- Kleczeck Z., & Malec M. (1999). Classification of hazards in underground mines-set against a background of experiences in Polish mining industry. *Coal Int*, -, 247(4), 141-143.
- Kopylov K.M., Smyrnov O.V., & Kulyk A.I (2015). Akustychnyi kontrol stanu masyvu ta prohnaz dynamichnykh yavlyshch 8, 32-37.
- Lang O. (2010) The dangers of mining around the world. Latin America and Caribbean: BBC, <http://www.bbc.com/news/world-latin-america-11533349>.
- Lesso I., Flegner P., Pandula B., & Horovcak P. (2007) New principles of process control in geotechnics by acoustic methods. *Metalurgija* 46(3), 165-168.
- Marshall T.E., Prosser L.J., & Iannachione A.T. (2000). Roof Monitoring in Limestone – Experience with the Roof Monitoring Safety System. Proceedings of the 19th International Conference on Ground in Mining, *Morgantown, WV*, 185 – 191.
- Meng Yao-yao, Xue Shan, Wang Rue, & Deng Xiang-hui. Acoustic Method Based of Integrity Coefficient for Testing the Loose Cscle of Surrounding Rock (2018). *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. - 12(2), 70-72.
- Muzaffar S., Cummings K., Hobbs G., & Kreiss P. (2013). Factors associated with fatal mining injuries among contractors and operators. *J Occup Environ Med*, 55(11), 1337-1344.
- Panteliev A.V. Kasparian E.V., & Semenova I.E. (2020). Metodyka vizualnykh sposterezhen u pidzemnykh hirnychykh vyrobkakh na rodovyshchakh, skhylnykh ta nebezpechnykh za hirskymy udaramy. Apatyty: vydavnytstvo FITs KNTs RAN.
- Rzhevskiy V.V., & Novik H.Ia. Osnovy fizyky hirskykh porid. (1984). *M.: Nadra*, 359s.
- Sanmiguel L., Rossel J., & Vintro C. (2015). Study of Spanish mining accidents using data mining techniques. *Saf Sci*, 75, 49-55.
- Serhiienko V.M., & Usachenko B.M. (1989). Prylad vibroakustychnoho kontroliu pryrodnoho masyvu. *Bezpeka pratsi promyslovosti*. 1, 35-36.

- Shcherbatiuk H.Ia., & Kambarov V.A. (1992) Efektyvni ohorodzhuvalni ta pryvybiini kriplennia. *Hirskyi zhurnal*, 11, 25-27.
- Srk Consulting. Causes of underground fatalities in WA mining between 1992-2014. https://cdn-web-content.srk.com/upload/user/image/04_Minex%20202_spk_GCMP.
- Volfson P.M., & Leonchykov I.A. (1986). Matnamatychna model travmatyzmu vid shmatkiv hirskoho masyvu, shcho obrushuiutsia, pry prokhodtsi vyrobok. *Hirskyi zhurnal*, 3, 56-58.
- Yalanskyi A.A. Osoblyvosti vyvchennia vlastyvostei ta stanu masyvu hirskykh porid ultrazvukovymy metodamy. Heotekhnichna mekhanika (2010). *Dnipropetrovsk.: IDTM NANU*, 91, 33-42.