

можна використовувати для нарощування або додавання матеріалу до виливки, що може бути корисним для ремонту зношених або пошкоджених деталей.

Окрім того, метод мікроплазмового наплавлення дозволяє усувати дефекти лиття з високою точністю, забезпечуючи точніший і послідовніший результат, ніж традиційні методи. Метод наплавлення також універсальний і може використовуватися для усунення широкого спектра дефектів лиття, включаючи пористість, тріщини та шорсткість поверхні.

### Список літератури

1. Гнатенко М.О., Чигілейчик С.Л., Сахно С.С. Виготовлення авіаційних деталей з жароміцних нікелевих сплавів методом адитивного плазмового наплавлення. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. №5(175). С. 48-51. DOI: 10.32620/akt.2021.5.06
2. Bintaо W., Zengxi P., Donghong D., Dominic C., Huijun L., Jing X., John N. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 35, October 2018, P. 127-139
3. M. Gnatenko, P. Zhemaniuk, I. Petrik, S. Sakhno, S. Chigileichik, V. Naumyk, O. Ovchinnikov, M. Matkovska Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a directenergy deposition method. *Eastern–european journal of enterprise technologies*. 2019. 1/12(97). P. 49 – 54.
4. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*. 2019. P. 68 – 74
5. Leary M. Introduction to AM. In: *Design for Additive Manufacturing*. Elsevier; 2020. p. 1–6.
6. Prakash KS, Nancharaih T, Rao VVS. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. In: *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd; 2018. p. 3873–82
7. Aqib Muzaffar, S. K. Khadheer 3D and 4D printing of pH-responsive and functional polymers and their composites in 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials, 2020.
8. Li N, Huang S, Zhang G, Qin R, Liu W, Xiong H, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Vol. 35, *Journal of Materials Science and Technology*. Chinese Society of Metals; 2019. p. 242–69.
9. Mohammadreza Nematollahi, ... Mohammad Elahinia, in *Metals for Biomedical Devices (Second Edition)*, 2019
10. Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. P. 641–647.

Рукопис подано до редакції 25.03.24

УДК 622.1: 534

Б.І. РИБАЛКО, канд. техн. наук, доц., А.В. БАКАЙ, аспірант  
Криворізький національний університет

## ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІКРОСЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ

**Мета статті** є створення математичної моделі, яка описують процеси трансформації мікросейсмічних сигналів, розробка математичних рівнянь та алгоритмів, які відображають фізичні та геологічні процеси, які відбуваються в мікросейсмічних сигналах.

**Методи дослідження.** Збір та аналіз реальних мікросейсмічних сигналів для визначити їх характеристики та динаміку в різних геологічних умовах. Розроблення математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у напружено-деформованому стані масиві, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

Спектральний аналіз для вивчення частотних характеристик мікросейсмічного сигналу. Розробка математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у глибинах Землі, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

**Наукова новизна.** Встановлено нові залежності амплітуди, тривалості і частоти від відстані для мікросейсмічного сигналу.

**Практична значимість.** Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу важлива для покращення розуміння геологічних процесів та управління ризиками в активних сейсмічних регіонах. Зокрема, модель можна використовувати для моніторингу сейсмічної активності в реальному часі з визначенням відстані до геомеханічного явища, виявляти види сейсмічної активності за частотою (тріщини, заколів, мікроударів), виявлення динаміки незначних геологічних зрушень є важливим для оцінки потенціальних ризиків утворення руйнівних явищ. За допомогою динамічної моделі трансформації мікросейсмічного сигналу можна розробити більш точні моделі для прогнозування геологічних явищ, таких як технічних землетруси, обрушень. При використанні геоінформаційних систем моніторингу збільшить безпеку ведення гірничих робіт.

Такий підхід має велике значення для наукових досліджень та практичного використання в геологічній та цивільній сфері.

**Результати.** Доведено, залежність відстані від амплітуди мікросейсмічного сигналу, залежність відстані від тривалості мікросейсмічного сигналу, залежність частоти від відстані та створено динамічної моделі трансформації сейсмічного сигналу з відстанню.

**Ключові слова:** мікросейсмічний сигнал, динамічна модель, трансформація сейсмічних сигналів, аналіз мікросейсмічних даних, сейсмічна активність, моніторинг геомеханічних процесів, напружено-деформований стан масиву.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-130-137

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** На території України зосереджені одні з найбільших запасів залізної руди у світі [1]. Переважні кількості залізних руд видобуваються підземним способом. Однією з важливих проблем видобування корисних копалин є стійкість гірничого масиву [2]. При збільшенні напружено-деформованого стану масиву виникають руйнування цього масиву, що утворює коливання в цьому масиві [3]. Руйнування гірничого масиву викидає в атмосферу велику кількість забруднюючих речовин, і для зменшення дрібнодисперсного пилу використовують спеціальні реагенти [4,5]. Передбачення та виявлення потенційних проблем у шахти може бути досягнуто за допомогою аналізу мікросейсмічних сигналів. По характеру коливань в масиві можна визначити види геомеханічних явищ, що важливо для впровадження геоінформаційної системи шахти для збільшення безпеки видобувних робіт [6]. Тому важливо дослідити, як змінюється мікросейсмічний сигнал у масиві залежно від відстані, потужності, глибини та інших факторів, що на нього впливають. Розуміння цих змін дозволить розробити динамічну модель трансформації мікросейсмічного сигналу, яка може відтворювати та прогнозувати поведінку цих сигналів в різних умовах. Такий підхід є ключовим для підвищення безпеки та ефективності в управлінні ризиками природних та техногенних катастроф, а також для підвищення нашого розуміння процесів, що відбуваються у напружено-деформованому масиві.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для характеристики сейсмічних сигналів використовуються різноманітні функції з як неперервним, так і дискретним аргументом [7,8,9]. Серед таких функцій можна відзначити періодичні сигнали, системи ортогональних функцій (наприклад, функції Радеміхера) та імпульсні сигнали. [10].

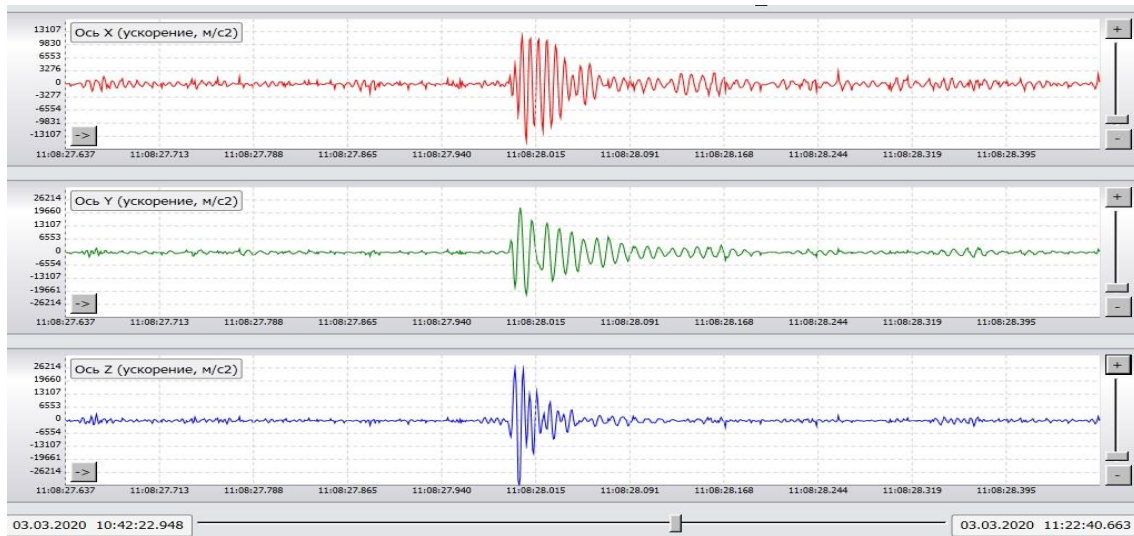
Для різних шахт характеристики геомеханічних явищ відрізняються, в залежності від властивостей самої породи. Сейсмічні хвилі є просторово розходжуваними від гіпоцентру і несуть інформацію щодо розташування явища. Амплітудні, частотні, часові характеристики отриманих сигналів містять інформацію про явище та властивості середовища на шляху поширення хвиль [3]. Відмінність у процесі руйнування формує відмінну комбінацію хвиль, яка використовується для визначення належності сейсмічного сигналу до землетрусу (утворення тріщин) чи вибуху [11,12,13]. Утворення різних геомеханічних явищ призведе до коливання в гірському масиві, з відстанню характеристики цих коливань будуть змінюватися, тому необхідно дослідити як характеристики коливання будуть залежати від відстані.

**Постановка задачі.** Метою представленої роботи є створення математичної моделі, яка описує процеси трансформації мікросейсмічних сигналів, розробка математичних рівнянь та алгоритмів, які відображають фізичні та геологічні процеси, які відбуваються в мікросейсмічних сигналах.

**Виклад матеріалу та результати.** Первинними параметрами геомеханічного явища є його енергія (магнітуда), координати та вид. Найбільш характерними видами геомеханічних явищ є розширення - вибух і зсув - від тріщиноутворення до землетрусу. У результаті досягнення локальних напружень в масиві гірських порід межі міцності, початкове утворення тріщин розвивається в такі прояви, як область заколоутворення, вистріл відкритої поверхні скельних порід, обвал у гірських виробках, утворення воронки на поверхні, гірничий удар, відокремлення блоків та руйнування стелі та інші.

При моніторингу сейсмічної активності найбільш доступними параметрами є амплітуда  $A$ , тривалість  $T$ , частота  $\omega$ , час  $t$  приходу сигналу явища. При використанні трьохкоординатних зондів як інформаційні параметри використовуються фази першого вступу сигналу, модуль вектора та співвідношення амплітуд за напрямками. При визначенні положення геомеханічного явища важливим параметром є відстань (радіус)  $R$  до гіпоцентру явища.

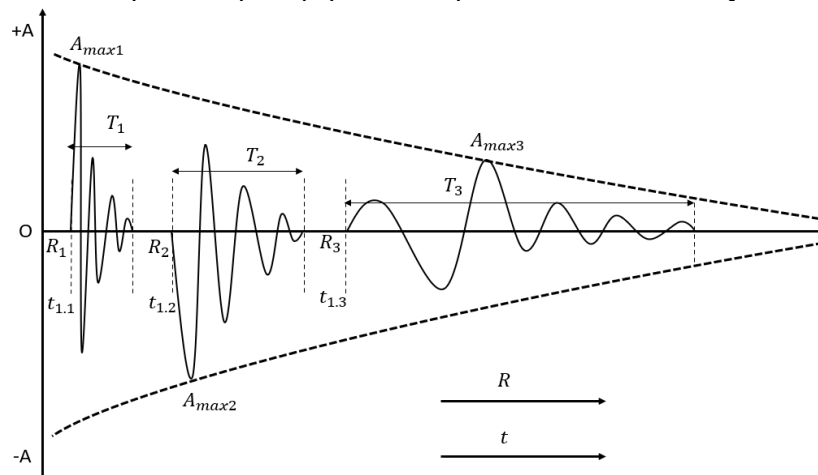
Приклад геомеханічного явища представлений на рис. 1. Також інші дослідження показують подібні форми геомеханічного явища [14,15].



**Рис. 1.** Сигнал тріщини.  $A_x = 13000$ од.ащ,  $A_y = 22000$ од.ащ,  $A_z = 26000$ од.ащ,  $T = 250$ мс. Відстань близько 100 м

До основних показників мікросейсмічного сигналу відносяться:  $t_1$  – час першого вступу первинних P і вторинних S хвиль (відносно епіцентру явища);  $T$  – тривалість мікросейсмічного сигналу;  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$  – тривалість коливання;  $A_{max}$  – максимальна амплітуда сигналу;  $\omega_p$  – резонансна (основна) частота сигналу в точці вимірювання;  $E$  – умовна енергія сигналу (площа сигналу).

На рис. 2. наведено приклад трансформації мікросейсмічного сигналу з відстанню.



**Рис. 2.** Приклад трансформації мікросейсмічного сигналу з відстанню

Час першого вступу первинної P і вторинної S хвиль відносно часу явища в епіцентрі залежить від відстані  $R$  вимірювання і швидкостей первинної  $a_1$  і вторинної  $a_2$  хвиль  $t_1 = \frac{R}{a_1}$ ;  $t_2 = \frac{R}{a_2}$ . Перша півхвиля має максимальну амплітуду  $A_{max}$ , яка може бути представлена в м/с, м/с<sup>2</sup> або в одиницях АЦП. Зі збільшенням відстані кількість коливань в сигналі збільшується і збільшується протяжність сигналу. Необхідно відмітити, що з відстанню протяжність сигналу збільшується також за рахунок збільшення різниці часу приходу первинної і вторинної хвиль і приходу відбитих, переломлених і поверхневих хвиль. Період одного коливання з відстанню збільшується, а частота коливань  $\omega_p$  з відстанню зменшується  $T_n = \frac{1}{\omega_p}$ , що підтверджуються на рис. 3-6.



Рис. 3. Сигнал тріщини на відстані 25м.  $A_y = 28214$ од.ащп,  $T = 48$ мс

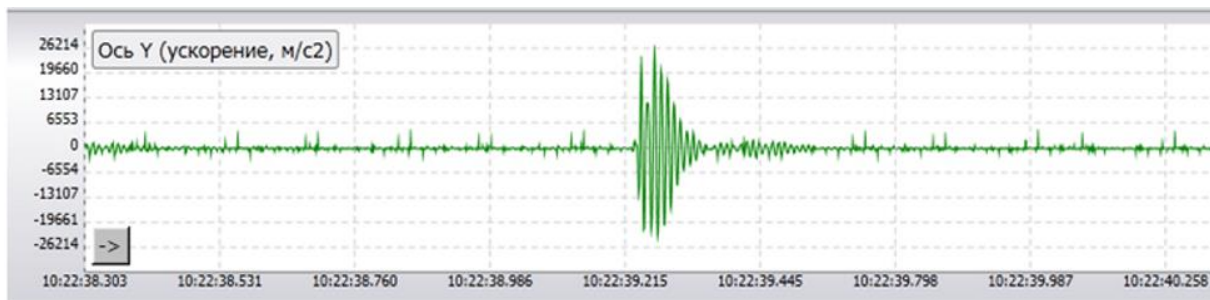


Рис. 4. Сигнал тріщини на відстані 40м.  $A_y = 22214$ од.ащп,  $T = 130$ мс

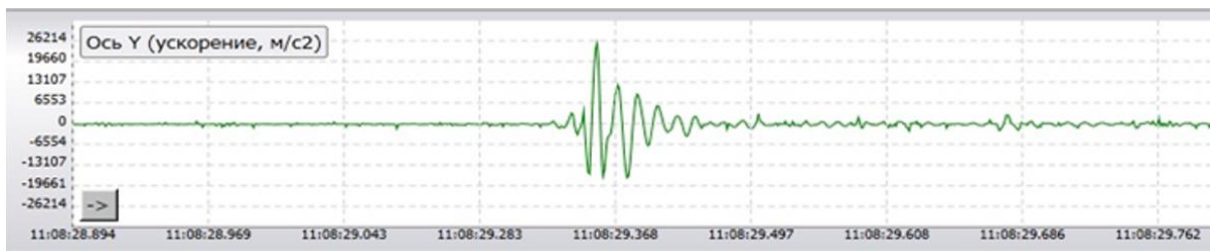


Рис. 5. Сигнал тріщини на відстані 60 м.  $A_y = 26000$ од.ащп,  $T = 150$ мс



Рис. 6. Сигнал тріщини на відстані 100 м.  $A_y = 22000$ од.ащп,  $T = 250$ мс

З відстанню максимальна амплітуда зменшується завдяки поглинання енергії хвиль. Інерційність масиву на шляху від джерела до точки вимірювання згладжує передній фронт сигналу (спочатку максимальну амплітуду має перша напівхвиля, за тим друга і третя і т.д.). Дані трансформації підтверджуються результатними експерименту [16]

«Резонансна» частота  $\omega_p$  в точці вимірювання формується декількома факторами. По-перше, частотний спектр імпульсу в епіцентрі явища рівномірний з частотами від 0 до  $\infty$  Гц. По-друге, з відстанню, за рахунок розподілених резонансних властивостей масиву ( $m$  – маса і  $\gamma$  – пружність) виникають затухаючі коливання. По-третє, вищі частоти поглинаються більше низькочастотних і з відстанню частота сигналу зменшується в залежності від добротності [16].

Енергія сигналу  $E$  (площа під огибаючою сигналу чи інтеграл модуля сигналу)  $E = \int_0^t \sqrt{A^2(t)} \cdot dt$  використовується тільки для порівняння згасання сигналу і оцінки форми. Безрозмірна величина.

Для підтвердження таких трансформацій мікросейсмічного сигналу були виконані дослідження [16]. У табл. 1 представлені усереднені результати експериментальних досліджень амплітуди  $A$  та тривалості  $T$  сигналу при різних відстанях  $R$  до гіпоцентрів явищ при

стабілізації енергії явища  $E_{я}$ . Для імітації явищ виконувались вибухи однакової потужності (тротилі шашки 75г, 200г, 400г та заряди 1кгВР) на відомих відстанях. Також фіксувалися сигнали від технологічних вибухів потужністю до  $5 \div 20$ тВР. Здійснювалися заходи з підтримання однакових умов завантаження та вибухання вибухової речовини (ВР). Реакції на вибухи різної потужності з затримкою вибухання перераховувалися на одиничні вибухи потужністю  $200\text{кгВР} = 845000\text{Дж}$ . Енергія вибухового перетворення 1кг тротилу = 1010 ккал = 4225,84 Дж,  $400\text{гВВ} = 1690\text{ Дж}$ ,  $200\text{гВВ} = 845\text{ Дж}$ ,  $75\text{гВВ} = 316,938\text{ Дж}$

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

відстань до явища, $R$ , м.	Умова проведення дослідження			Вимірювальні параметри сигналу	
	час руху хвилі	заряд ВР, кг	енергія заряду $E_{з}$ , Дж	амплітуда, $A$ , м/с	тривалість, $T$ , с
20	4мс	0,075	316	3,887	9,173
20	-//-	0,200	845	4,782	11,29
30	6мс	0,200	845	2,711	18,36
30	-//-	0,075	316	2,200	14,92
50	10мс	0,200	845	1,326	33,89
50	-//-	0,400	1690	1,474	37,68
70	14мс	0,400	1690	0,921	56,42
100	20мс	0,400	1690	0,558	86,57
200	40мс	0,400	1690	0,2116	198,8
400	80мс	0,400	1690	0,0802	456,9
400	-//-	1,000	4225	0,0900	512,1
600	0,12с	200,0	845000	0,0829	1353
1000	0,2с	200,0	845000	0,0405	2444
10000*	2,0с	200,0	845000	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$39,61 \cdot 10^3$

По результатах виконаних досліджень [16] було виведено залежності амплітуди від відстані (1) та тривалості явища від відстані (2), отримуємо зворотні залежності відстані від амплітуди (3) та відстані від тривалості явища (4):

$$A = 47 \cdot \ln(E_{я} \cdot R^{-1.4}) \quad (1) \quad T = 0,046 \cdot \ln(E_{я} \cdot R^{1.2}) \quad (2)$$

$$e^{A/47} = E_{я} \cdot R^{-1.4}$$

$$e^{T/0,046} = E_{я} \cdot R^{1.2}$$

$$\frac{e^{A/47}}{E_{я}} = R^{-1.4}$$

$$\frac{e^{T/0,046}}{E_{я}} = R^{1.2}$$

$$R = \left(\frac{e^{A/47}}{E_{я}}\right)^{-1/1.4} \quad (3)$$

$$R = \left(\frac{e^{T/0,046}}{E_{я}}\right)^{1/1.2} \quad (4)$$

Отримані вирази дають можливість скласти динамічна модель трансформації сейсмічного сигналу з відстанню рис. 7, також рис. 11 показано залежність сигналу амплітуди, частоти і тривалості сигналу коливань від відстані. Умовні позначення параметрів сигналу на рис. 2 і на рис. 3 однакові.

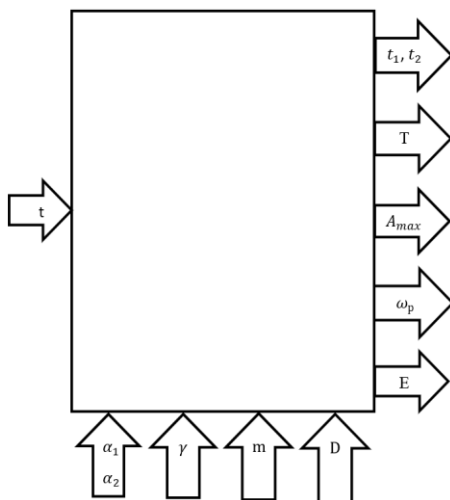


Рис. 7. Динамічна модель трансформації сейсмічного сигналу з відстанню

Збурюючою дією в масиві є руйнування тріщино утворенням модельоване і вигляді одиничного імпульсу  $\beta(t)$ . Руйнування має випадковий характер і відстань  $R$  від епіцентру явища до точки вимірювання невідома. На відміну від інших параметрів сейсмосигналу, цю відстань вимірювати немає можливості. Однією із задач моделей і є визначення відстані по інших параметрах сейсмосигналу (вирішення зворотної задачі). Геомеханічними параметрами масиву і відповідно налаштовувемими параметрами моделі є  $\alpha_1; \alpha_2; \gamma; m; D$  – добротність масиву.

Статичні залежності моделей включають:

$$t_1 = \frac{R}{a_1}; t_2 = \frac{R}{a_2};$$

$$T = f_1(R) \equiv f_2(R, E_{я}, D) \equiv f_3((t_1 - t_2), E_{я}, D);$$

$$A_{max} = f(R, E_{я}, D);$$

$$\omega_p = f(m, \gamma),$$

$$E_c = \int A(t) \cdot dt$$

де  $E_{я}$  – енергія явища;  $E_c$  – енергія сигналу.

Виникнення з часом коливань зумовлене розділеними резонансними властивостями масиву  $m, \gamma$  і поглинанням енергії коливань, і відповідно згасанням амплітуди.

Модель формування коливань в точках вимірювання може бути наглядно зображена в вигляді механічної системи рис. 8, де  $m$  – це маса масиву, яка коливається,  $\gamma$  – пружні властивості масиву,  $D$  – показник механічних втрат чи добротність. І при поширенні енергії в середовищі енергія переходить від одного умовного блоку масиву до іншого.

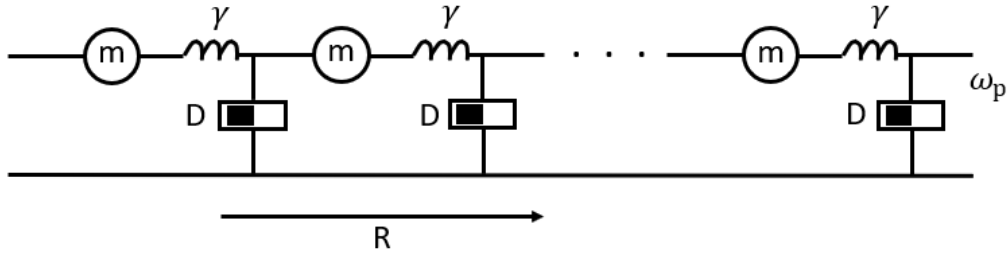


Рис. 8. Модель формування коливань в масиві

Частотно залежне розділене згасання сигналу в масиві може бути наглядно представлене на моделі, що зображена на рис. 9, де  $C$  – конденсатор (масив), який накопичує енергію або її випромінює.

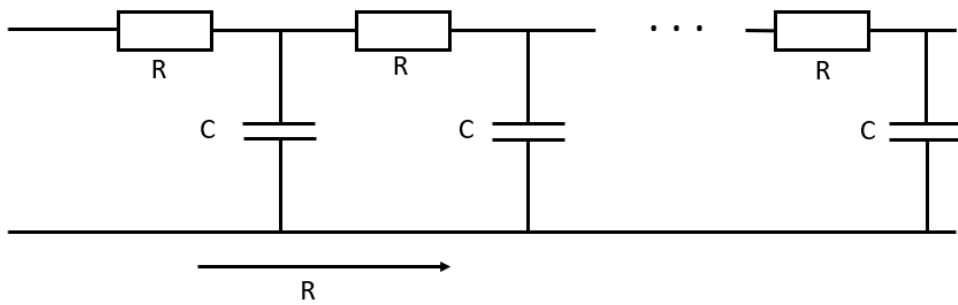


Рис. 9. Модель частотно залежного розділеного згасання сигналу в масиві

Модель залежності частоти і амплітуди мікросейсмічних коливань від відстані може бути зображена рис. 10. Через коливальний контур конденсатора і котушки утворюється певне значення частоти, а опір призводить до зменшення амплітуди коливань.

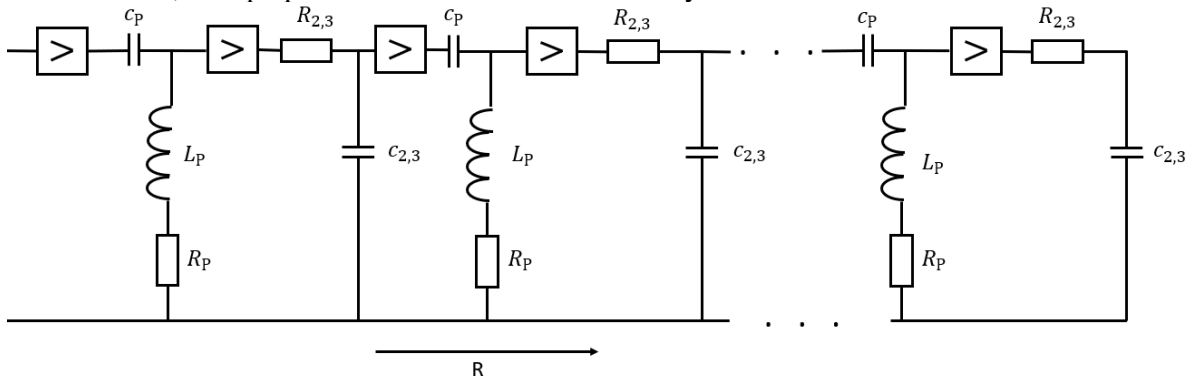


Рис.10. Модель залежності частоти і амплітуди мікросейсмічних коливань від відстані

( $\square$ ) повторювач  $K=1$ ;  $C_p; L_p; R_p$  – елементи коливального контуру;  $R_{2,3}, C_{2,3}$  – елементи контурів частотного резонансного згасання.

Залежність вихідних показників сигналу від відстані мають вигляд рис. 11.

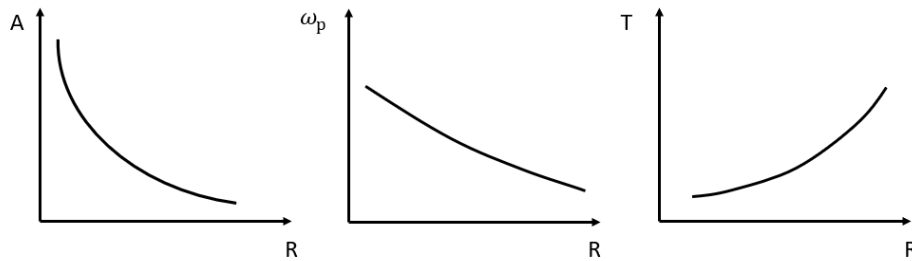


Рис. 11. Вигляд залежності сигналу залежності амплітуди, частоти і тривалості сигналу коливань від відстані

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** На підставі виконаних досліджень залежності амплітуди і тривалості явищ від відстані було отримано:  
 залежності відстані від амплітуди мікросейсмічного сигналу;  
 залежності відстані від тривалості мікросейсмічного сигналу;  
 створено динамічної моделі трансформації сейсмічного сигналу з відстанню;  
 досліджено залежність частоти від відстані мікросейсмічного сигналу.

Отримані залежності дають можливість визначити відстань до геомеханічного явища.

Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу є важливим інструментом для розуміння процесів, які відбуваються у напружено-деформованому стані масиву. Призначення моделі важливо для формування паспортів явищ. Усі ці аспекти динамічної моделі трансформації мікросейсмічного сигналу допомагають в детальному вивченні геологічних процесів та розвитку більш точних методів передбачення та виявлення небезпек в геологічних системах. В цілому, ця модель відіграє важливу роль у розумінні геологічних явищ і має потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення.

### Список літератури

1. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
2. Кузьменко, О.М., Петльованний, М.В. Стійкість штучного масиву при підземній розробці потужного рудного покладу на великій глибині. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, (50), 56-62
3. Рыбалко Б.И. Факторы возникновения волн в массиве Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «КНУ» УДК 622.834.52,53
4. Gerasimchuk O., Skachkov A., Shchokin V., Omelchenko O., Ezhov V. Properties of humatic reagent as a dust binding substance. Ukrainian journal of ecology. - 2022, 12(9), 30-37, doi:10.15421/2022\_401.
5. Shchokin V. Methodology for Determining Emissions of Pollutants into Atmospheric Air by Open(1)Pit Mining Works. Inzynieria Mineralna, - 2023, (1), P.185-188
6. Рыбалко Б.И., Федоренко А.И., Чистяков Д.Е. Значимые геомеханические явления для систем непрерывного мониторинга состояния массивов горных пород ГИС. НИГРИ ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
7. Гольдин С.В. Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.:Недра, 1974. – 252 с.
8. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. Тверь, АИС, 2006. –744 с.
9. Марченко В.Б. Ортогональные функции дискретного аргумента и их приложение в геофизике. – К.: Наукова думка, 1992. – 212 с
10. Гурьянов В.В. Математическая модель плоских сейсмических ударных волн. Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. 2007. №1. Вып. 2. С.7-14.
11. Рыбалко Б.И.,Здещиц В.М., Чистяков Д.Е., Федоренко А.И., Милейко Т.В., Калиниченко О.А. Экспертная идентификация геомеханических явлений по сигналам записей ГИС. УДК 622. 834. 52,53
12. Рыбалко Б.И., Пересулько С.В. Определение координат значимых событий результатов непрерывного мониторинга в процессе опытной эксплуатации ГИС. УДК 622. 834. 52,53
13. Рыбалко Б.И., Федоренко А.И., Чистяков Д.Е., Милейко Т.В. Особенности сейсмограмм для различных событий. УДК622. 012:504(477)
14. Bakai A.V. Implementation of microseismic monitoring for iron ore mines. 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1049 012007
15. Бакай А.В. Частотне виділення інформативних мікросейсмічних сигналів. Матеріали науково-практичної конференції «інноваційний розвиток сучасної науки: нові підходи та актуальні дослідження» (26-27 березня 2021 р.) м. Запоріжжя
16. Рыбалко Б.И., Бакай А. В., Ляш С.И., Романенко А. О., Ткачук В. В. Патент 151906. Спосіб визначення відстані до геомеханічного явища.

Рукопис подано до редакції 25.03.24