

Библиографический список:

1. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом.- Донецк: УкрНИМИ, 2004.- 127с.
2. А.Я.Мамонтов, А.С.Ведяшкин, Я.Я.Мамонтов. Расчет рационального места заложения подготовительных выработок в пластах при малой кратности их подработки // Уголь.-1991.-№6.-С.58-59.
3. Б.А.Кодунов. Метод прогнозирования сдвижений горных пород и земной поверхности при подземной разработке угольных месторождений // Уголь.- 1991.-№2.-С.54-56.
4. Бака Н.Т. Графоаналитическое описание максимальных оседаний при формировании мульды сдвижения / Н.Т. Бакка, В.А. Назаренко, А.С. Кучин, Н.С. Кашина // Науковий вісник Національного гірничого університету.-2006.-№9.-С. 3-6.
5. Кодунов Б.А. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от размеров лавы и глубины разработки / Б.А. Кодунов // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – 2011. - №1. – С. 3 – 8.

УДК 622.02 (075.8)

**РЯЗАНЦЕВ А.М., РЯЗАНЦЕВ М.О., СКАКУН Д.В., ПАРХОМЕНКО Т.С.
(КП ДонНТУ)**

ВІД П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО КВАРЦОВОГО РЕЗОНАТОРУ ДО ЕФЕКТУ АКУСТИЧНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛИНАННЯ

Розглянуті процеси, що відбуваються у кварцовому резонаторі і породних пластинках при їх прозвучуванні резонансними частотами акустичних коливань.

*Многие понятия нам не понятны
не потому, что мы не понимаем,
а потому, что эти понятия не
входят в круг наших понятий.*

Стан рівноваги – це стан, при якому робота рівноважної сили на будь-якому переміщенні дорівнює нулю. З векторної алгебри і теорії комплексних чисел відомо, що це можливо лише при умові, коли вектор дії сили і вектор переміщення ортогональні один одному. Це значить, що в стані рівноваги будь-яка частина речовини або система в цілому здійснює поперечні коливання на власній частоті.

Під дією будь-якого зовнішнього впливу система отримує додаткову енергію або імпульс і амплітуда коливання часток зростає. При цьому виникає цілий ряд фізичних ефектів.

Наприклад, під дією механічних напружень або деформацій в кристалі твердого тіла може виникнути електрична поляризація, величина і знак якої залежить від прикладеного напруження. Це явище називають прямим п'єзоелектричним ефектом. Зворотній п'єзоелектричний ефект – це механічна деформація кристалу, викликана електричним полем [1-3].

Механізм прямого п'єзоефекту можна прослідити на моделі, що імітує структуру кварцу SiO₂ (рис.1). Кожний з іонів кисню одночасно пов'язаний з двома іонами

кремнію. Позитивні іони кремнію чергуються з від'ємними іонами кисню. В недеформованому вічку центри позитивних і від'ємних зарядів співпадають. Якщо прикласти зовнішній тиск, то іони зміщуються таким чином, що утворюються електричні диполі, і кристали стають поляризованими. Зміна знаку деформацій викликає перемену знаку заряду. Таким чином, п'єзоэффект анізотропний. В напрямку, що співпадає з напрямком вектору деформації він повздовшний, в ортогональному напрямку – поперечний.

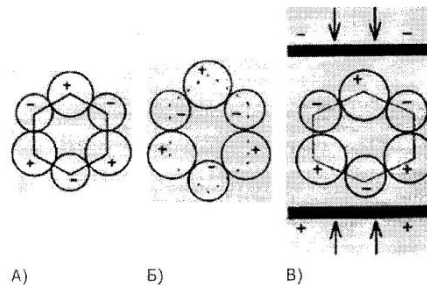


Рисунок 1 – Схема структури кварцу і виникнення п'єзоелектричного ефекту

Збудження в п'єзоелектрику перемінного електричного поля приводить до вимушених механічних коливань в такт зміні зовнішнього поля. На рис.2 показано коливання кварцової пластини розмірами $h \times b \times l$, вирізану перпендикулярно осі поляризації X (х-зріз). У відповідності з фазою перемінного поля кварц буде попеременно стискатися і розтягатися. Коли частота електричного поля досягне частоти власних механічних коливань пластинки, амплітуда стане максимальною. Якщо площа пластинки велика, в напрямку осі X коливання будуть повздовжними, в напрямку Y і Z – поперечними.

Вперше п'єзоэффект був виявлений у 1880 р. французькими фізиками братами П'єром і Жаком Кюрі. Ефект кварцевого резонатору був виявлений у 1917 році, але для його пояснення була запропонована модель у вигляді еквіваленту декількох віртуальних конденсаторів і катушок індуктивності, хоча а ні віртуальних, а ні реальних конденсаторів і катушок у кварці буцімто нема. Частота кварцевого резонатора f_0 визначається товщиною кварцевої пластини h , і при виготовленні її користуються емпіричною формулою:

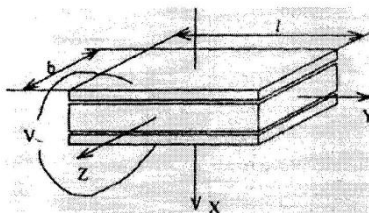


Рисунок 2 – Орієнтація кварцової пластинки між збуджуючими електродами

$$f_0 = k/h,$$

де k – технологічний коефіцієнт, який, як виявилось пізніше, ототожнюється з величиною швидкості поперечної (граничної) хвилі.

Робота таких приборів заснована на використанні п'єзоелектричного ефекту, пов'язаного з перетворенням механічних деформацій п'єзоелектричного кристалу в електричний сигнал, що знімається з протилежних граней кристалу і, навпаки. Для того щоб зняти сигнал або, навпаки, прикласти до кристалу, на протилежних гранях кристалу формують електроди. При подачі електричного напруження на електроди в

кристалі збуджуються поперечні коливання, які стабілізують частоту. Внаслідок анізотропії кристалу швидкості розповсюдження акустичної хвилі вздовж кристалографічних осей різні. Для забезпечення синхронності повертання фронтів акустичної хвилі в область збудження після віддзеркалення від країв кристалу висуваються вимоги до співвідношення довжини і ширини пластини, яке знаходиться в межах 0,385-0,395. Але резонанси, частота яких визначається шириною і довжиною кристалу, є небажаними. Тому для частот менше 5МГц використовують лінзовидні (циліндричні) п'єзоелементи, де небажана частота обумовлена тільки діаметром пластин. Використовують також круглі пластини з локальним виступом у формі кульового сегменту у її центральній частині і збуджуючі електроди симетричні відносно цього виступу. Граничні значення радіусу кривизни кульового сегменту встановлюються на основі теоретичних розрахунків. Резонатори працюють, як правило, на основній резонансній частоті, мають малі габарити і добру спектральну характеристику. Але вони мають велике ємносне відношення C_0/C і великий динамічний опір R .

В залежності від призначення кварцовий резонатор виконується різними способами. При використанні в якості коливального контуру в генераторі він повинен бути розрахований на певну потужність розсіювання. При використанні у фільтрах і для контролю частоти радіопередаючих пристроїв суттєве значення має не потужність розсіювання, а мінімальне затухання, малий зв'язок з зовнішньою мережею тощо. Тому розміри кристалів, їх форма, номер гармоніки, а також конструкція кристалоутримувача у вказаних випадках різні.

Для різних типів кварцових резонаторів параметри еквівалентної схеми змінюються за величиною, хоч форма схеми залишається незмінною. Кварцовий резонатор, включений в електричну мережу, виявляє себе еквівалентно контуру, що показаний на рис.3.

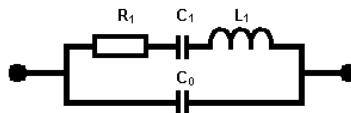


Рисунок 3 – Еквівалентна схема заміщення резонатору

На цій схемі величини C_1 , C_0 , L_1 , R_1 – називають еквівалентними параметрами резонатору. Величину C_0 називають статичною ємністю. На частотах, далеких від резонансу, резонатор веде себе як звичайний конденсатор з ємністю C_0 . Для більшості кристалів кварцу $C_0 = 10...20$ пФ. Параметри C_1 , L_1 , R_1 називають динамічною ємністю, динамічною індуктивністю і динамічним опором відповідно, оскільки вони виявляються тільки при коливаннях з частотою, близькою до частоти власного резонансу кварцової пластини. Відношення C_0/C_1 – називають ємнісним коефіцієнтом або ємнісним відношенням. За наявності ємності C_1 резонатор має частоту послідовного резонансу, а завдяки ємності C_0 – частоту паралельного резонансу. Величини L_1 і C_1 залежать від механічних властивостей кварцової пластини, а опір R_1 характеризує затухання механічних коливань. Частота послідовного резонансу залежить тільки від певних параметрів резонатору L_1 і C_1 .

Якщо контур, вказаний на рис.3, включити в реальну електричну мережу, то через вплив реактивних елементів цієї мережі резонансна частота буде декілька відрізнятися від резонансної частоти контуру. Знаючи параметри еквівалентної схеми резонатору і реактивних елементів мережі можна визначити величину зміни частоти резонансу.

Основні розрахункові співвідношення:
Частота резонансу кварцового резонатору

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

Частота антирезонансу кварцового резонатору

$$f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1 C_0}}$$

Динамічна ємність кварцового резонатору

$$C_1 = \frac{2(C_0 + C_L) \Delta f_{C_L}}{f_s}$$

Динамічна індуктивність кварцового резонатору

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C_1}$$

Динамічний опір кварцового резонатору

$$R_1 = \frac{2\pi f_s L_1}{Q}$$

Добротність кварцового резонатору

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1}$$

Зміна частоти кварцового резонатору при послідовно включеному ємнісному навантаженню

$$\Delta f_{C_L} = \frac{f_s C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

Опір кварцового резонатору при послідовно включеному ємнісному навантаженню

$$R_{C_L} = \frac{(C_0 + C_L)^2}{C_L} R_1$$

Зміна реактивної складової повного опору еквівалентної схеми, що розглядається як резонансний контур, при зміні частоти змушуючої сили призводить до того, що на низьких частотах реактивна складова менше нуля (повний опір має ємнісний характер), а при частоті послідовного резонансу

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

спостерігається резонанс напружень у динамічній мережі, при цьому реактивна складова опору більше нуля. При подальшому збільшенні частоти змушуючої сили реактивна складова більше нуля (реакція контуру носить індуктивний характер). Еквівалентна індуктивність спочатку зростає з ростом частоти, а потім зменшується, проходячи через нуль при частоті паралельного резонансу (резонансу токів)

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}}$$

При подальшому підвищенні частоти реактивність зберігає ємнісний характер (менше нуля). У всіх без винятку випадках використання кварцу в якості резонатора реактивна складова повного опору має індуктивний характер (більше нуля). Частота коливань кварцового генератору завжди знаходиться в межах між частотами послідовного і паралельного резонансу, хоча вони досить близькі (10-15%).

Розрахунок динамічних параметрів R_1 , C_1 , і L_1 засновано на вирішенні

диференційних рівнянь, що описують пружні коливання п'єзоелектричного кристалу. Але при їх вирішенні, як правило, не враховується вплив зовнішніх факторів на поведінку пристрою. Наприклад, якщо кристал кварцу затиснути (заборонити його коливання), то динамічна гілка R_1 , C_1 , и L_1 зникне, і еквівалентна схема перетвориться в схему, що складається тільки із статичних ємностей кристалу C_0 , кристалоутримувача C_2 і зазору кристалоутримувача C_3 . Всі три ємності можуть бути вимірені або розраховані за геометричними розмірами і діелектричною постійною середовища.

Відомі рішення диференційних рівнянь для коливальних систем з одним ступенем вільності передбачають існування лише одного виду коливань в одному напрямку, а тому ці рішення можна використовувати тільки для безкінечно тонких брусів (повздовжні коливання) або пластин безкінечно великої площі (повздовжні або поперечні коливання по товщині). Для кварцових резонаторів ці рішення не придатні. Як наближені їх можна використовувати для гірського масиву.

Еквівалентні параметри резонатору можуть бути розраховані за формулами:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{\varepsilon_{LC} b \ell}{4\pi d} ; \\ C_1 &= \frac{8e_{11}^2 b \ell}{C_{11} \pi^2 d} ; \\ L_1 &= \frac{\rho d^3}{8b \ell e_{11}^2} ; \\ R_0 &= \frac{\pi^2 \rho \eta d}{8e_{11}^2 b \ell} ; \end{aligned}$$

де e_{11} – п'єзоелектрична константа, має величину порядку 10^{-12} К/Н;

C_{11} – електрична ємність кристалу, що коливається,

ρ – щільність кристалу, для кварцу $\rho = 2650$ кг/м³;

η – константа, що визначає внутрішні механічні втрати, для кварцу $\eta = 0,25$;

ε_{LC} - діелектрична постійна кристалу, що коливається,

$$\varepsilon_{LC} = \varepsilon \left(1 - \frac{4\pi d^2 C_{11}}{\varepsilon} \right) ;$$

ε - діелектрична проникливість кристалу, $\varepsilon = 4,6$.

Сучасні кварцові резонатори при напруженні живлення 1,8...5 В для частот від 32 кГц до 200 МГц мають $C_0 = 1,3...7$ пФ, $C_1 = 12,5...30$ пФ, $R_1 = 30...150$ Ом.

У 1977 році було виявлено, що резонаторами є не тільки кварцеві пластини, а й об'єкти з більшості твердих середовищ (метали і сплави, скло, керамика, гірські породи тощо) [4-11]. При цьому виявилось, що кількість власних частот цих резонаторів дорівнює кількості їх характерних розмірів. Куля має одну власну частоту, пов'язану з єдиним розміром – діаметром. Пластина з довжиною a , шириною b и товщиною h має три власні частоти, кожна з яких пов'язана з відповідним розміром. Резонансні властивості не залежать від наявності п'єзоефекту, він лише спрощує індикацію і використання цих властивостей. При нагріванні п'єзоэффект зникає, але резонансні властивості від цього не змінюються.

Крім кристалічних п'єзогенераторів і п'єзодатчиків все ширше використовуються пьезоплівки органічних і неорганічних матеріалів. Частіше всього використовується п'єзоплівка з полівінілденфториду (ПВДФ), який випускається листами різної площі і товщини. Використовують її в різних типах датчиків або для виробництва гучномовців. Металізація п'єзоплівки може здійснюватись за допомогою еластичної срібної фарби або напиленням металу. Стандартне напилення мідно-нікелевим сплавом. За бажанням замовника може бути виконано напилення золотом.

Про наявність п'єзоелектричного ефекту в природних полімерах відомо ще з 1924 року. Але інтенсивне їх дослідження почалось у 1970-х роках після відкриття сильних п'єзоелектричних властивостей у синтетичних полімерах (ПВДФ). В подальшому

високу п'єзочутливість встановлено і в інших плівочних матеріалах: ZnO, CdS, ZnO₂, P₂S₂, ZnSe тощо. Використовуються вони в акустичних датчиках і датчиках швидкоперемінного тиску. У п'єзоплівок отримані наступні характеристики:

- ємність плівочного елементу $C_0 = 3 \dots 4,6 \text{ пФ}$;
- п'єзочутливість – $Y = 2,5 \dots 4,8 \text{ мкВ/Па}$;
 $S = 1500 \dots 2180 \text{ пКл/(кг см}^{-2}\text{)}$;
- об'ємний п'єзомодуль $d_v = 210 \dots 693 \text{ пКл/(кг см}^{-2}\text{)}$;
- діелектрична проникливість $\epsilon = 85 \dots 115$;
- діелектричні втрати $\text{tg}\delta = 0,01 \dots 0,1$.

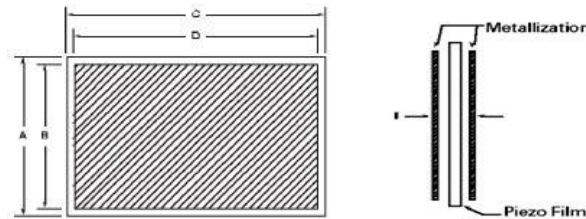


Рисунок 4 – П'єзоплівка з металізацією (товщина плівки 0,1...0,75 мм)

Розібратися з фізичною сутністю коливальних процесів, що відбуваються в твердих середовищах вдалось в результаті експериментального виявлення ряду нових, раніш невідомих фізичних ефектів і явищ, одним з яких є ефект акустичного резонансного поглинання (АРП) [5-7, 9].

Ефект АРП полягає в тому, що при нормальному прозвучуванні гармонійним сигналом пластини товщиною h , на частоті f_0 частина зонduючого поля переорієнтовується так, що перевипромінюється цією пластинкою в ортогональному (відносно первинного) напрямку через торці. Зв'язок між f_0 і h існує наступний

$$f_0 = V_s / h ,$$

де V_s - швидкість поперечних (зсувних) хвиль.

Частота f_0 – це власна частота коливань, якою характеризуються гармонійні затухаючі коливання, що виникли внаслідок імпульсної дії (удару) на пластину резонатор товщиною h . Коливальний процес, який завжди сприймали як заваду при виділенні ехо-сигналу, насправді спектрально пов'язаний з розмірами об'єкту, що прозвучується, і може бути використаний при визначенні геологічної будови гірського масиву.

На рис. 5 показано установку, за допомогою якої можливе спостереження ефекту АРП. П'єзокерамічний дисковий перетворювач 1 збуджується генератором гармонійного електричного напруження 2. Перетворювач 1 має достатню направленість, щоб можна було описувати поле, що ним випромінюється, паралельними променями. Пластина породи, що досліджується 3 товщиною h встановлюється нормально (перпендикулярно) напрямку поля, що випромінюється. П'єзоперетворювач 1

використовується як в режимі випромінювача, так і в режимі приймача, і тому поле, що віддзеркалилось від пластини 3, реєструється п'єзокерамічним диском 1. Та частина поля, яка проходить через пластину 3, реєструється п'єзокерамічним дисковим приймачем 4. На відміну від стандартної установки для прозвучування схема вміщує також п'єзокерамічний диск 5, орієнтований ортогонально до її основної осі X. Форма зонduючого сигналу показана на рис.6а. Вимірювання проводились у басейні 6 з водою. Щоб компенсувати віддзеркалення хвиль від стінок басейну, басейн 6 повернутий відносно головної осі X, а крім того використовувались розсіювачі 7. Аналізатор інформації – трьохканальний осцилограф 8. На канал I приходять сигнали з

п'єзодатчика 1 (сигнали а і b). Сигнал а – зонduючий, з генератора 2, а сигнал b – віддзеркалений від пластини 3, і зсунутий в часі відносно сигналу а. На канал II приходить сигнал с, який пройшов через пластину 3. На канал III надходить сигнал d, що знімається з п'єзокерамічного приймача 5.

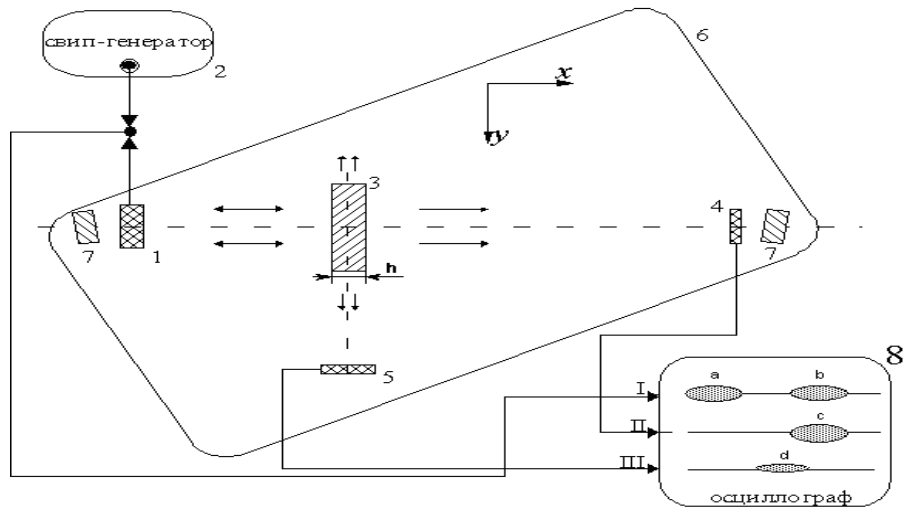


Рисунок 5 - Схема проведення експерименту

Спочатку досліджувались властивості пластини 3 як монохроматора. Монохроматор не є резонатором. Його робота описується інтерференцією і полягає в тому, що на частоті f_{mx} , коли на товщині пластини h вміщується ціла кількість (n) повздовжніх напівхвиль ($\lambda_{np}/2$), відбувається повне проходження гармонійного сигналу і повна відсутність його віддзеркалення.

$$h = n \lambda_{np} / 2 \quad \text{або} \quad f_{mx} = V_{np} / (2h) .$$

Треба відзначити, що до цього ефект монохроматора в акустиці ніхто не спостерігав. Математичний опис цього ефекту було взято з оптики, а експерименталь-

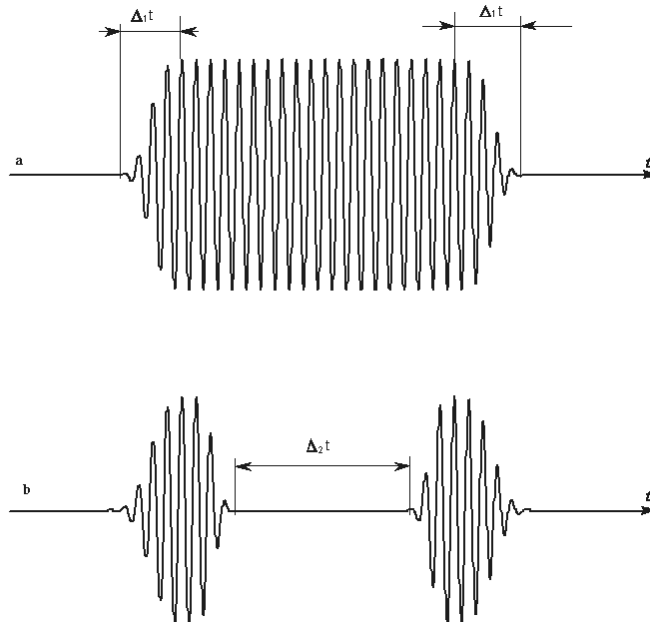


Рисунок 6 – Форма зонduючого сигналу:

а – зонduючий сигнал з генератора; b- віддзеркалений сигнал

но у чистому вигляді в акустиці його не бачили. Справа в тому, що побачити його неможливо, якщо не використовувати зонduючий сигнал особливої форми. Особливістю необхідного сигналу (рис.6а) є те, що, обмежений у часі, він при цьому є вузькосмужним. Це досягається тим, що як зростання амплітуди гармонійного заповнення, так і спад відбуваються не миттєво (удароподібно), а за експонентою протягом часу $\Delta_1 t$. Насправді вузькосмужним є не весь зонduючий сигнал, а тільки середня його частина, де амплітуда залишається незмінною. Тому про зміну коефіцієнтів віддзеркалення і проходження звуку при прозвучуванні пластини 3 слід говорити по зміні тільки середньої частини зонduючого сигналу.

Ефект монохроматору спостерігається в пластинках з усіх матеріалів, і виявляється він в наступному. На частоті монохроматора f_{mx} віддзеркалення сигналу від пластини 3 відсутнє, що виявляється відсутністю середньої частини сигналу **b** на час $\Delta_2 t$, як це показано на рис.6б. При цьому сигнал є ідентичним по формі сигналу, наведеному на рис. 6а, і має таку ж амплітуду, як буцімто ніякого об'єкту між п'єзоперетворювачами 1 і 4 не було. Факт повного проходження сигналу через пластину 3 встановлюється дуже просто. Вилучаючи під час вимірювання на частоті f_{mx} пластину 3 з басейну, можна переконатися в тому, що амплітуда сигналу **c** залишається незмінною. Таке співвідношення коефіцієнтів віддзеркалення і проходження на частоті f_{mx} свідчить про відсутність поглинання в матеріалі пластини 3 і, саме головне, про правомірність використання обраної вимірювальної установки для подальшого використання її при дослідженні ефекту АРП.

На частоті на 10-15% більше частоти f_{mx} можна спостерігати ефект, по суті, протилежний ефекту монохроматора, коли відсутнє не віддзеркалення, а наскрізне проходження сигналу. Це відбувається на частоті f_0 , що дорівнює власній частоті шару-резонатору. Зникнення сигналу **c** виявляється на осцилографі 8 пропаданням середньої частини сигналу на час $\Delta_2 t$ так, як показано на рис. 6б. Але при цьому і не збільшується віддзеркалення від пластини 3 (амплітуда сигналу **b**), як, начебто, повинно бути за законом збереження. Як виявилось, та частина сигналу, яка на інших частотах проходить наскрізь, на частоті f_0 переорієнтовується у ортогональному напрямку і випромінюється торцями пластини, що і фіксується п'єзокерамічним приймачем 5.

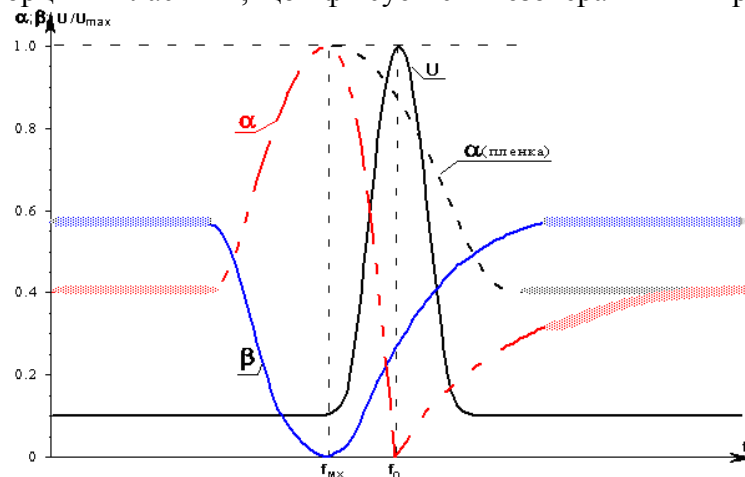


Рисунок 7 - Частотні залежності коефіцієнтів віддзеркалення β , проходження α , а також величини ЕДС (U).

На рис.7 показано частотні залежності коефіцієнтів віддзеркалення β , проходження α , а також величини ЕДС (U), що знімається з приймача 5. Подальші від резонансних явищ, що вивчаються, залежності показані неявно за різними неоднорідностями частотних характеристик елементів вимірювальної установки.

Для того, щоб удостоверитись в тому, що частота f_0 є власною частотою коливань пластини 3, в якості пластини-резонатора було використано п'єзокерамічний диск. При цьому частотна залежність ЕДС, що знімається з пластини 3, повністю співпала з залежністю $U(f)$. А поскільки ця залежність є спектральним зображенням затухаючого гармонійного сигналу, то наявність її свідчить про те, що f_0 є власною частотою коливань пластини-резонатора.

Після нагрівання пластини вище критичної температури (коли пластина лишилася п'єзовластивостей) виміри відновили, і отримали ту ж картину. Це означає, що резонансні властивості п'єзокераміки не залежать від наявності у неї п'єзовластивостей.

Співпадіння власної частоти коливальної системи з частотою зовнішнього впливу (в даному випадку генератора 2) - це резонанс. Таким чином, на резонансі відбувається переорієнтація частини поля в ортогональному напрямку. По аналогії з іншими відомими фізичними ефектами резонансного поглинання (парамагнітний, ядерно-магнітний, феромагнітний, електронний резонанси), цей ефект було названо акустичним резонансним поглинанням (АРП). Виявилось, що спостерігається він тільки в шарах-резонаторах. В пластинах з органічного скла, в органічних п'єзоплівках тощо цей ефект не існує. Дійсно, якщо вихідне поле, що розпоширюється в напрямку X , характеризується тільки одним вектором, що співпадає з ним за напрямком, то ні при яких умовах у випадку нормального прозвучування пластини 3 поворот цього поля на 90° відбутися не зміг би. Значить, вихідне поле ($\vec{I}_1$), що розпоширюється в напрямку X , повинно описуватись двома взаємно ортогональними складовими ($I_{1x} + jI_{1y}$). I , значить, сумарний вектор, що характеризує поле, який розпоширюється а напрямку X , за напрямком не співпадає з напрямком X .

Якщо на резонансі удавана складова поля перевипромінюється в напрямку Y , то реальна частина, в принципі, не повинна була б нікуди не зникнути, і ми повинні були б виявити її за допомогою приймача 4. Виявити реальну складову вдалося, коли в якості приймача 4 була використана п'єзоплівка. При реєстрації поля, що проходить через пластинку 3, за допомогою п'єзоплівочного перетворювача ніяких резонансних проявів поблизу частоти f_0 не видно. Частотна залежність коефіцієнту проходження при використанні п'єзоплівочного приймача 4 на рис.7 показана штриховою лінією і помічена знаком (плівка). Як би з самого початку в якості матеріалу приймача 4 використовувалась п'єзоплівка, то про ефект АРП ми б нічого не знали. Виявляється, що п'єзокераміка в режимі приймача працює як датчик вдаваної складової поля, а п'єзоплівка – реальної. В режимі ж випромінювання п'єзокераміка створює як реальну, так і удавану складові поля пружних коливань. Якщо при проходженні через об'єкт поле не просто зменшується по амплітуді, але й змінюється співвідношення між векторами, що його складають, це свідчить про те, що коефіцієнт проходження має комплексний характер. Коефіцієнт проходження α є відношення амплітуди поля в зоні приймача 4 ($\vec{I}_4$) до амплітуди випроміненого поля ($\vec{I}_1$). Для того, щоб при комплексному характері поля I_1 поле I_4 не мало вдаваної складової, коефіцієнт α повинен мати комплексний характер:

$$\alpha = \frac{I_{4x}}{I_{1x} + jI_{1y}} = \frac{I_{4x} \times I_{1x}}{I_1^2} - j \frac{I_{4x} \times I_{1y}}{I_1^2}$$

Звукопровідні властивості шару-резонатора на резонансі такі, що вихідне поле розділяється на дві його складові. Активна складова проходить скрізь резонатор і реєструється п'єзоплівкою, а вдавану складову реєструємо за допомогою п'єзокерамічного приймача 5. Пластина з органічного скла таких властивостей не має. Середовища, подібні органічному склу, мають чисто активний характер і відношення

між реальною і вдаваною складовими поля не змінює. Звукопровідність більшості твердих тіл, в тому числі гірських порід, має комплексний характер звукопровідності. І саме тому земна товща є сукупністю не віддзеркалюючих поверхонь, а коливальних систем.

Якщо зробити комбінований приймач 4, в якому суміщені п'єзоплівочний і п'єзокерамічний перетворювачі, то сигнали, що реєструються, відповідають обом складовим поля, приходять до приймача 4 одночасно (це стосується вимірів поза частотою f_0). Це означає, що швидкість розповсюдження в рідині обох складових поля – реальної і вдової – одна і та ж.

Таким чином, можна рахувати доведеним, що поле пружних коливань в загальному вигляді складається з реальної і вдової частин. Вдова частина відповідає за формування власних коливань. Виникає питання, чи маємо ми право називати реальну і вдову складові поля відповідно повздовжними і поперечними хвилями. За ознакою значень швидкостей можемо. Тоді можемо запропонувати наступні формулювання:

- повздовжню хвилю є реальна частина поля пружних коливань, що характеризується швидкістю, яка визначається за допомогою ефекту монохроматора при паралельному резонансі (резонансі токів), коли спостерігається повне проходження сигналу (надпровідність);
- поперечню хвилю є вдова частина поля пружних коливань, що характеризується швидкістю, яка визначається за допомогою ефекту акустичного резонансного поглинання (АРП) при послідовному резонансі (резонансі напружень), коли проходження сигналу відсутнє (активний ток дорівнює нулю).

Але, з другого боку, між швидкістю розповсюдження і швидкостями повздовжних і поперечних хвиль існує принципова різниця. Швидкість, що характеризує різного роду резонатори або об'єкти, що працюють в режимі стоячих хвиль (наприклад, монохроматор), не є швидкістю розповсюдження, оскільки даний процес нікуди не розповсюджується, а існує в замкнутому об'ємі - це фазова швидкість. Швидкості $V_{пр}$ і $V_{сдв}$ – це фазові швидкості відповідно повздовжних і поперечних хвиль, і вони є характеристиками середовища. В рідині обидві складові мають однакові значення. Швидкість розповсюдження хвиль залежить від геометрії вимірювальної установки і може змінюватись в кілька разів.

Все, сказане вище, суттєво відрізняється від загальноприйнятих підходів до кінематичних характеристик повздовжних і поперечних хвиль. Але характеризувати який-небудь тип пружних коливань параметрами зміщення часток, що коливаються, як мінімум, неправомірно, оскільки на разі не існує технічних засобів, які дозволяють оцінити ці параметри. Ні для амплітуди зміщень часток, що коливаються, ні для швидкості або прискорення їх зміщення, ні для механічних напружень у пружній хвилі – датчиків не існує. З тієї ж причини зовсім неправомірні ствердження про придатність якихось сейсмоприймачів для реєстрації тих чи інших пружних хвиль. Поняття повздовжних і поперечних хвиль виникли внаслідок умозаключення і не підкріплені результатами вимірів. Тепер стало ясно, що всі сеймосигнали, які мають вигляд затухаючого гармонійного коливання, сформувались внаслідок збудження відповідних геологічних або штучних структур, що виявляють властивості коливальних систем. Притягати для їх описання який-небудь вид пружних коливань не має сенсу. Коли стане для всіх зрозумілим, що реальна частина поля пружних коливань є повздовжними хвилями, а вдова – поперечними, то будуть переглянуті і властивості субстанцій, відомих сьогодні під цими назвами. Скоріш за все обидві складові поперечні, але зсунуті по фазі на чверть періоду. Тоді піде в небуття легенда про те, що

поперечні хвилі не розповсюджуються в рідинних і газоподібних середовищах. При певних умовах резонатори на поперечних хвилях формуються і в цих середовищах.

Ефект акустичного резонансного поглинання має багато різних наслідків:

1. Шари більшості твердих середовищ є коливальними системами.
2. Земна товща за акустичними властивостями є не сукупністю віддзеркалюючих поверхонь, а сукупністю коливальних систем.
3. Зонduючий імпульс не розпоширюється в земній товщі, а спектрально перетворюється у відповідності з властивостями шарів порід, які є коливальними системами.
4. Виникаючі спектральні складові розпоширюються вздовж відповідних коливальних систем.
5. Ехо-сигнали, що сприймаються під час сейсморозвідувальних робіт, виникають при віддзеркаленні від тектонічних порушень, що обмежують структурні блоки породних шарів-резонаторів. Віддзеркалення йде не знизу, а збоку.
6. Традиційна сейсморозвідка, заснована на реєстрації віддзеркалення і проходження зонduючого сигналу, є науковою помилкою.
7. Майбутнє за спектральною сейсморозвідкою. Спектральна сейсморозвідка заснована на використанні експериментально виявлених ефектів, і в тому її відміна від традиційної. Спектрально-акустичні і спектрально-сейсморозвідувальні методи дозволяють виявити межі, які раніше у фізиці навіть не розглядалися (фазові і їм подібні межі без розкриття, мікротріщини тощо). Стало можливим виявлення тектонічних порушень і зон їх впливу. За допомогою методу спектрально-сейсморозвідувального профілювання (ССП) можливе прогнозування змін несучої здатності ґрунтів, прогнозування раптових обвалень гірських порід та інших геодинамічних явищ.

Таким чином, при імпульсному впливі (ударі) на шар-резонатор бокові поверхні шару-резонатора стають випромінювачами коливань його власної частоти, а при дії гармонічних коливань на послідовному резонансі шар стає звуконепрозорим. Але в обох випадках, при будь-якій дії, вздовж шару-резонатору розпоширюється поле пружних коливань з власною частотою. Власні коливання є поперечними. Дуже слабе затухання коливань, що розпоширюються вздовж шару-резонатору, є наслідком акустичної ізоляції його від сусідніх шарів породи. При аналізі сейсмосигналів виявилось, що швидкість поперечних хвиль V_s має постійну для всіх порід величину $V_s = 2500$ м/с.

Характеристикою поперечних хвиль є поляризація, що описує поведінку вектору амплітуди величини, що коливається, в площині, перпендикулярній напрямку розпоширення хвилі (хвильовому вектору). В трьохмірному просторі вектор амплітуди повертається навколо хвильового вектору. В загальному випадку для гармонічних хвиль кінець вектору амплітуди описує в площині, поперечній хвильовому вектору, еліпс (рис.8). В залежності від напрямку обертання поляризація може бути правою або лівою. Така поляризація називається еліптичною. Окремими випадками є лінійна поляризація (вертикальна або горизонтальна).

Слід відзначити, що у Санкт-Петербурзькому державному електротехнічному університеті «ЛЕТІ» була вирішена задача розпоширення зсувної акустичної хвилі через шарувату анізотропну систему і було показано, що при певних умовах траєкторія руху частинок у хвилі наближається до кругової (рис.6) [12, 13].

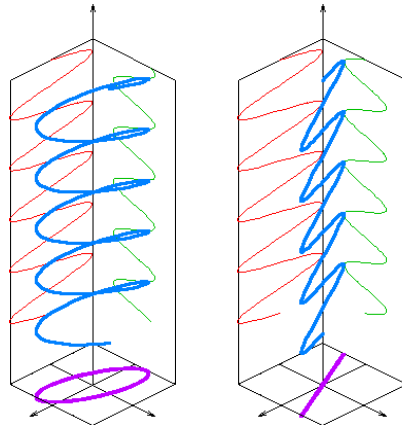


Рисунок 8 - Еліптична і лінійна поляризація хвилі

Хвиля кругової поляризації може бути представлена як суперпозиція двох чисто зсувних хвиль з різницею фаз рівній чверті періоду коливань. При цьому кожна частинка середовища в такій хвилі рухається по круговій траєкторії в одному напрямку. Така модель повністю співпадає з електромагнітною хвилею, тому визначення ємності, індуктивності і активного опору, запропонованих як електромагнітний еквівалент резонаторів викликає певний інтерес. Більшість гірських порід в звичайних умовах є або напівпровідниками, або ізоляторами, широко використовуються в електротехніці і під дією зовнішнього впливу суттєво змінюють свої електромагнітні властивості. При послідовному резонансі більше виявляються ємнісні властивості, при паралельному -

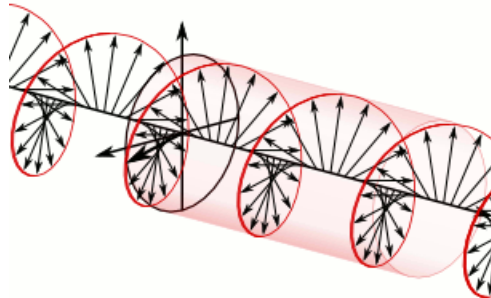


Рисунок 9 – Кругова поляризація хвилі

- індуктивні. На резонансі ємність і індуктивність порід суттєво зростають. Можливо припустити, що природа акустичних і електромагнітних коливань одна і та ж. Багато дослідників акустичні хвилі окремо не виділяють, а називають їх радіохвилями в звуковому діапазоні.

Література:

1. Мартынов В.А. Кварцевые резонаторы. Серия «Элементы радиоэлектронной аппаратуры». Вып.34. М.: Советское радио, 1976.- С.11-14.
2. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. М.: Радио и связь, 1981.
3. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Климов Т.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле. /Физическая мезомеханика, 2004.- 7 спецвыпуск.- ч.2. –С.285-287.
4. Гликман А.Г. Экспериментальное изучение структурных и спектральных характеристик поля упругих колебаний. Деп. №3312-В92. М.: ВИНТИ, 1992.

5. Гликман А.Г. Некоторые явления и эффекты, возникающие при формировании и распространении поля упругих колебаний в твердых средах. Деп. 322-B95.- М.: ВИНТИ, 1995.
6. Гликман А.Г. О формировании упругих колебаний в слоистых средах. //Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений.- 1999.-№6.- С.25-29.
7. Гликман А.Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки. /НТФ «Геофизпрогноз», Санкт-Петербург: 2013.- 26с.
8. Гликман А.Г. О смысле мнимости в акустике. /НТФ «Геофизпрогноз», Санкт-Петербург: 2008.- 11с.
9. Гликман А.Г. Эффект акустического резонансного поглощения (АРП) как основа новой парадигмы теории поля упругих колебаний. Геофизика XXI столетия: 2003-2004 годы. Сб. трудов Пятых и Шестых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М., Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2005.- С.293-299.
10. Гликман А.Г. Особенности метрологического обеспечения сейсмоприемников. //Преобразователи акустической эмиссии к системам контроля горного давления. М.: ИПКОН АН СССР, 1990.- С.66-76.
11. Гликман А.Г. О новом принципе сейсморазведки. Геофизика XXI столетия: 2002 год./Сб.трудов Четвертых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный мир, 2003.- С.345-352.
12. Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н., Грибкова Е.С. Технические и экспериментальные исследования возможности возбуждения акустических волн круговой поляризации. XXVII сессия РАО, Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014 г.
13. Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. Преобразователь ультразвуковых волн круговой поляризации. Теория и эксперимент. Известия СПбЭТУ «ЛЭТИ», 2013.-№7.-С.78-84.

УДК 622.831.322:635

**РАДЧЕНКО А.Г., РАДЧЕНКО А.А. (ООО «ПРИОРИТЕТ»), ПЕТЕЛИН Э.А.,
ЗИНОВЬЕВ С.Н., РЯЗАНЦЕВ Н.А. (КИИ ДонНТУ)**

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ НА ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ ДОНБАССА

В статье рассмотрены перспективные способы определения минимальной глубины проявления внезапных выбросов угля и газа на пологих пластах Донбасса.

Общепризнанной гипотезой проявления выбросоопасности угольных пластов в настоящее время является энергетическая теория В.В. Ходота, но с позиций этой теории нельзя объяснить волнообразное, мультимодальное проявление выбросоопасности углей в ряду метаморфизма и факт повышенной выбросоопасности углей средней стадии метаморфизма [1]. В работе [2] было высказано предположение о прекращении внезапных выбросов с глубиной для углей различных стадий метаморфизма, что не подтвердилось практикой ведения горных работ в Донбассе за