

УДК 621.317

<sup>1</sup>О. М. Безвесільна, д.т.н, професор  
<sup>2</sup>А. Г. Ткачук, аспірант

## АНАЛІЗ ВИДІВ П'ЄЗОМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВИМЕТРА АВІАЦІЙНОЇ ГРАВИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
e-mail: bezvesilna@mail.ru

<sup>2</sup>Житомирський державний технологічний університет,  
e-mail: andrew\_tkachuk@i.ua

*У статті наведено аналіз видів п'єзоматеріалів для чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи та обрано найоптимальніший із них.*

**Ключові слова:** п'єзоматеріал, п'єзоелектричний гравіметр, прискорення сили тяжіння.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність.** Дослідженню коливальних процесів приділяється велика увага при розробці, випробуванні та експлуатації різноманітних технічних і технологічних пристроїв, в енергетиці, машинобудуванні, металургії, авіаційній та ракетно-космічній техніці, суднобудуванні, геології, нафто-газодобувній та переробній промисловості, медицині. В останні роки широке поширення набувають вимірювально-інформаційні системи віброконтролю, моніторингу, діагностики та автоматичного керування складними технічними системами і технологічними процесами, що дають не тільки великий техніко-економічний ефект, а й сприяють запобіганню аварій та можливих екологічних катастроф.

Початковою ланкою таких систем є датчики параметрів вібраційних та ударних коливань, які здійснюють перетворення вимірюваної механічної величини в електричний сигнал, що надходить на реєструючий пристрій [1]. Зосередимо детальніше увагу на датчиках параметрів вібраційних коливань в авіаційних гравіметричних системах (АГС) для дослідження параметрів гравітаційного поля Землі (зокрема, її гравітаційних аномалій  $\Delta g$ ). В АГС такі датчики називаються гравіметрами і вимірюють вони прискорення сили тяжіння [2].

Відомі і найбільш застосовні на сьогоднішній день наступні гравіметри АГС: "ГРИН – 2000", "Чекан-АМ", "ГИ 1/1", "LaCoste & Ромберга (LRS)". Реально досяжна точність авіаційних гравіметричних вимірювань із використанням перерахованих гравіметрів – (3 ... 10) мГал [3]. Сьогодні така точність авіаційних гравіметрів недостатня. Перераховані гравіметри також вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення  $\ddot{h}$ . Вимірювання  $\ddot{h}$  є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування додаткових фільтрів.

Тому авторами розроблено новий п'єзоелектричний гравіметр (ПГ) авіаційної гравіметричної системи [4] для підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння та його аномалій (рис. 1). Чутливий елемент (ЧЕ) ПГ складається із п'єзоелектричного елемента 1, що працює на основі деформації стиснення-розтягування, із ізоляторів 2 на торцях та інерційної маси 3. З метою підвищення надійності та міцності конструкції, ЧЕ пружно піджятий до основи гвинтом 6. Гравіметр за допомогою кабелю 7 з'єднаний із операційним підсилювачем. Принцип дії гравіметра оснований на фізичному явищі прямого п'єзо ефекту.

На сьогоднішній день існує багато видів п'єзоматеріалів, які можна використати для конструювання ЧЕ будь-якого п'єзодатчика. Вони мають як свої переваги, так і недоліки. Оскільки спроектований ПГ АГС є новим у своїй подобі, тому необхідно обрати найоптимальніший п'єзоматеріал безпосередньо для конструювання його ЧЕ.

**Метою статті** є проведення аналізу існуючих на сьогоднішній день видів п'єзоматеріалів та обрання найоптимальнішого із них для безпосереднього використання у чутливому елементі п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію та практику гравіметричних вимірювань було зроблено низкою видатних вчених: В.О. Багромлянцем, А.М. Лозинською, В.В. Фединським, Н.П. Грушинським та іншими. Не менш велику роль відіграли й іноземні вчені: А. Граф, В.Торге, М.Гольвані, Д.Гаррісон.

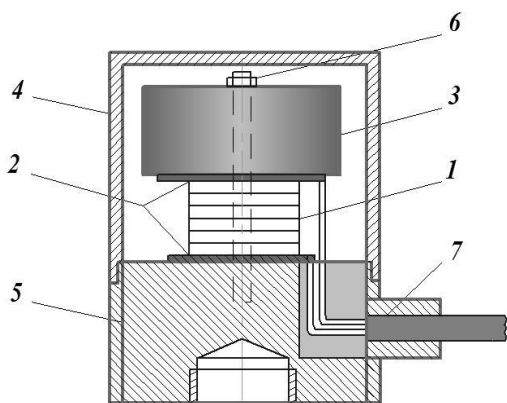


Рис. 1. Конструкція ПГ АГС: 1 – п'єзоелемент; 2 – ізолятори; 3 – інерційна маса (ІМ); 4 – кришка, 5 – основа; 6 – гвинт; 7 – кабель

було виявлено більш ніж у 1500 речовин. Тому фізичну природу п'єзо ефекту краще за все розглядати саме на прикладі найбільш відомого п'єзоелектричного кристалу – кварцу ( $\text{SiO}_2$ ).

У кристалі кварцу розрізняють такі головні осі: повздовжню вісь  $z$ - $z$ , яку називають оптичною; вісь  $x$ - $x$ , що проходить через ребра шестигранної призми нормально до оптичної осі, – електричною; вісь  $y$ - $y$ , нормальну до граней, – механічною (рис. 2).

Якщо з кристала кварцу вирізати пластину так, щоб її грані були паралельні електричній, оптичній і механічній осям, то під впливом  $F_x$  і  $F_y$ , що діють перпендикулярно до оптичної осі, пластина електризується, а на площинах, перпендикулярних до електричної осі, виникають заряди.

Кількість електрики, що виникла на площинах пластини при прикладенні деякої сили, знаходиться за таких умов:

1. Сила  $F_x$  спрямована вздовж електричної осі:

$$Q = d \cdot F_x; \quad (1)$$

2. Сила  $F_y$  спрямована вздовж механічної осі:

$$Q = -d \cdot \frac{S_x}{S_y} F_y, \quad (2)$$

де  $Q$  – електричний заряд;  $d$  – п'єзоелектричний модуль;  $S_x$   $S_y$  – площі поверхонь, перпендикулярних до відповідних осей;  $F_x$ ,  $F_y$  – сили, що діють перпендикулярно до оптичної осі пластини.

Рівняння (1) показує, що величини зарядів, які виникають на гранях  $bc$  під дією сили  $F_x$ , не залежать від геометричних розмірів пластини. А із рівняння (2) видно, що величини зарядів, які виникають на гранях  $bc$  під дією сили  $F_y$ , вже залежать від геометричних розмірів пластини.

П'єзо ефект, що виникає під дією сили  $F_y$  називається поперечним, а під дією  $F_x$  – повздовжнім [5].

Для побудови ПГ обираємо прямий повздовжній п'єзо ефект.

П'єзоелектрики можуть бути як моно- так і полікристалічними. До першої групи відносяться кварц, турмалін, хлорид натрію, сегнетова сіль, титанат барію і багато інших речовин. До другої – штучно створені кристали п'єзокераміки.

*Кварц* – поширений у природі мінерал. Належить до числа найбільш твердих речовин, має високу хімічну стійкість. Зовнішні форми природних кристалів кварцу відрізняються великою різноманітністю. Придатний для використання у п'єзоелектричній апаратурі, кварц зустрічається в природі у вигляді кристалів та уламків. Зазвичай, природні кристали кварцу містять у собі різні дефекти, що знижують їх цінність. На сьогоднішній день, поряд з природними, використовуються синтетичні кристали кварцу, вирощувані в автоклавах за підвищених температур і тисків із насичених діоксидом кремнію лужних розчинів.

*Турмалін* широко поширений у природі, однак у більшості випадків кристали рясніють тріщинами. За хімічним складом турмалін являє собою складний алюмоборосилікат з домішками магнію, заліза або лужних металів (Na, Li, K). Основною перевагою турмаліну є більше значення частотного коефіцієнта у порівнянні з кварцом.

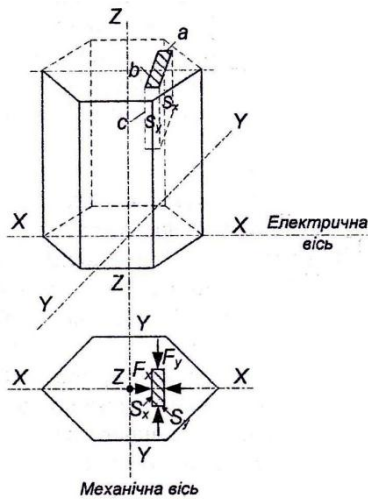


Рис. 2. Осі симетрії у кристалі кварцу

речовина з ромбоподібною структурою. Його кристалічна структура не має центральної симетрії і тому ніобат літію є сегнетоелектриком, і здатний проявляти електрооптичний і п'єзоелектричний ефекти. Не взаємодіє із водою.

Окрім запропонованих монокристалів, які є, переважно, природними хімічними елементами, можна використовувати і штучно створені полікристали. Штучний п'єзоелектричний матеріал за своїми фізичними властивостями є напівкристалічним сегнетоелектриком, представляє собою хімічну сполуку чи твердий розчин. За хімічним складом це складний оксид, який включає іони двовалентного свинцю або барію, а також іони чотиривалентного титану або цирконію. П'єзоелектрична кераміка являє собою твердий, хімічно інертний матеріал, зовсім нечутливий до вологості. Найбільше поширення отримала група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (титану-цирконату свинцю). Разом з тим, є відомою кераміка на основі титанату барію (ТБ) і титанату свинцю (ТС). В останні роки розробляються нові п'єзокерамічні матеріали із більш високими технічними характеристиками і широкими можливостями використання [6].

Порівняльна характеристика монокристалів та кераміки наведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика монокристалів та кераміки

№ п/п	Властивість	Монокристали	Кераміка
1	Область робочих температур, °C	500 – 600	200 – 250
2	Добротність, Q	висока	низька
3	Температурна стабільність властивостей	висока	низька
4	П'єзомодуль, $d_{ij}$	невисокий	високий
5	Економічність	низька	висока

Як бачимо із табл. 1, монокристали мають значні переваги над керамікою по більшості властивостей. Однак, для кінцевого вибору необхідного п'єзоматеріалу для чутливого елемента ПП треба розрахувати і порівняти ще основні параметри та характеристики вищезгаданих п'єзоелектриків.

Основними параметрами п'єзоелектричних матеріалів є [7]:

- коефіцієнт електромеханічного зв'язку ( $K_p$ );
- відносна діелектрична проникність ( $\epsilon$ );
- густина ( $\rho$ );
- п'єзомодуль ( $d_{ij}$ );
- модуль Юнга ( $Y$ );
- механічна добротність ( $Q_M$ );
- водопоглинання, %;
- температура точки Кюрі ( $T_K$ ) та інші.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку характеризує ефективність перетворення електричної енергії в механічну:

$$K_p = \sqrt{\frac{\eta^2 - \chi^2}{2(1 + \chi)}} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_a^2}\right), \quad (3)$$

де  $\eta$  – найменший додатний корінь частотного рівняння;  $\chi$  – коефіцієнт Пуассона;  $\omega_p$  – резонансна частота;  $\omega_a$  – антирезонансна частота.

Дві останні змінні визначаються шляхом експериментальних досліджень, а коефіцієнт Пуассона, в залежності від значення деякого коефіцієнта  $\mathcal{G}$ , обирається із таблиці 2.

Таблиця 2

Визначення коефіцієнта Пуассона							
$\mathcal{G}$	2,6746	2,6670	2,6559	2,6529	2,6448	2,6375	2,6304
$\chi$	0,2400	0,2500	0,2600	0,2700	0,2800	0,2900	0,3000

Коефіцієнт  $\mathcal{G}$  визначають за формулою:

$$\mathcal{G} = \frac{\omega_{01}}{\omega_p}, \quad (4)$$

де  $\omega_{01}$  – частота першого обертоу;  $\omega_p$  – резонансна частота, визначена амплітудним методом.

Відносна діелектрична проникність показує у скільки разів напруженість електричного поля у вакуумі менша за напруженість електричного поля у діелектрику. Розраховується за формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{11,3C_0b}{S_E}}, \quad (5)$$

де  $C_0$  – статична електрична ємність;  $d$  – товщина ПЕ;  $S$  – площа ПЕ.

Статична електрична ємність  $C_0$  визначається експериментально за допомогою спеціальної мостової схеми на частоті 1000 Гц.

П'єзомодуль  $d_{ij}$  у динамічному режимі визначається:

$$d_{ij} = \frac{0,19 \cdot 10^{-5} K_p}{\omega_p} \frac{2}{D} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} \frac{1}{\rho}}, \quad (6)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $d=D$  – діаметр ПЕ;  $\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0}$  – відносна діелектрична проникність.

Модуль Юнга – характеристика пружних властивостей ізотропних речовин, один із модулів пружності. Вимірюється переважно у гігапаскалях. Модуль Юнга встановлює зв'язок між деформацією розтягу й механічним напруженням направленим на розтяг. У динамічному режимі визначається за формулою:

$$Y = \frac{0,4\pi^2}{\eta^2} \omega_p^2 \frac{D^2}{4} \rho(1 - \chi^2). \quad (7)$$

Температура точки Кюрі – це температура, при якій спостерігається максимум величини діелектричної проникливості даного матеріалу. Вона визначається у спеціальній термокамері. За дійсне значення температури точки Кюрі приймається середнє значення температури, отримане при вимірюванні у 10 зразків одного матеріалу.

Водопоглинання визначається у процесі вимірювання густини шляхом зважування на повітрі сухих і насичених водою зразків згідно з ГОСТ 473.3-72.

Вище перераховані параметри ПЕ були розраховані та взяті із [6,7] та відповідають геометричним розмірам ПЕ нового ПГ АГС.

У табл. 3. наведені основні параметри найпоширеніших п'єзоелектричних матеріалів.

Проведено аналіз основних параметрів п'єзоелектричних матеріалів та обрано найоптимальніший із них для конструкції ЧЕ нового ПГ, а саме – ніобат літію.

Із точки зору повноти використання вхідної енергії, яка характеризується коефіцієнтом електромеханічного зв'язку, найкращим матеріалом є сегнетова сіль, а найгіршим – кварц. Однак,

низькі температурні властивості такої солі не дозволяють на практиці реалізовувати її високі електромеханічні характеристики. Усі штучно створені п'єзокерамічні матеріали, як видно із табл.3, виділяються високими діелектричною проникністю та коефіцієнтом електромеханічного зв'язку. Але кераміка має малий модуль пружності, що унеможлиблює її використання в умовах експлуатації ПГ на борту літака у складі АГС.

Серед кристалічних матеріалів слід окремо виділити ніобат літію. Незважаючи на посереднє значення п'єзомодуля та відносної діелектричної проникності у порівнянні із п'єзокерамікою, ніобат літію має високу стійкість до зміни зовнішніх температур та тисків, високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку та стабільні п'єзоелектричні властивості, що є важливим безпосередньо для конструкції ПГ. Тому саме ніобат літію є найоптимальнішим матеріалом для ЧЕ нового ПГ АГС.

Таблиця 3

Основні параметри п'єзоелектричних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Коеф. ел-механ. зв'язку $K_p$	Відносна діелектр. проникл., $\epsilon$	Густина, $\rho$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	П'єзомодуль $d_{ij}$ , $10^{-12}$ Кл/Н	Водопоглинання, $W$ , %	Модуль Юнга $Y$ , Н/м <sup>2</sup> $10^9$	Допустима температура, $T_{доп}$ , °С	Механічна добротність, $Q_M$	Тангенс кута діелектричних втраг, $\text{tg}$ $\times 10^2$
1	Кварц	0,095	3,50 – 4,50	2,65	2,31	–	80	550	$> 10^4$	$< 0,5$
2	Турмалін	0,10	6,60	3,10	1,90	–	160	–	$> 10^2$	$< 1,0$
3	Ніобат літію	0,32	28,60	4,64	16,20	–	95	1142	$< 10^5$	–
4	Дигідрофосфат амонію	0,28	15,30	1,80	24	–	19,3	125	$> 10^2$	$< 1,0$
5	Сульфат літію	0,37	10,30	2,05	16	0,34	46	75	$> 10^2$	$< 1,0$
6	Сегнетова сіль	0,67	250	1,77	27	0,63	19,3	45	–	$> 5$
7	Титанат барія, ТБ-1	0,40	1500	5,30	45	0,20	100	120	400	2 – 3
8	Титанат барія-кальцю, ТБК-3	0,46	1180	5,40	45	0,20	120	105	450	3 – 4
9	Титан-цирконат свинцю ЦТС-23	0,50	1100	7,40	100	0,09	0,85	285	50	0,75 – 2,0

**Висновки.** Проведено аналіз видів п'єзоматеріалів для чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи та обрано найоптимальніший із них – ніобат літію.

#### Список літературних джерел

12. Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. Пособие / В.В. Янчич. – Ростов-на-Дону, 2008. – 77с.
13. Безвесільна О. М. Вимірювання прискорень / Безвесільна О. М. – К. : Либідь, 2001. – 261с.
14. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / Безвесільна О. М. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
15. П'єзогравіметр: Патент України на винахід 99084, МПК G 01 V 7/00 / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, А.Г. Ткачук – № а201113894; Заявл. 25.11.2011; Опубл. – 10.07.2012. – Бюл. № 13.
16. Безвесільна О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів / О. М. Безвесільна, Г.С. Тимчик: підручник – Житомир : ЖДТУ, 2012. – 812 с.
17. Таблицы основных свойств пьезокерамических материалов ПКР, изготавливаемые Отделением сегнетопьезоэлектрических материалов, приборов и устройств НИИ физики ЮФУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.piezotech.ru/PKR.htm>.
18. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2010. – 592с.