М.М. Нікіфоров¹, І.В. Пампуха¹, В.В. Ільченко², О.Л. Кульський²

¹Військовий інститут Київського національного університету ім. Т. Шевченка, Київ

²Київський національний університет ім. Т. Шевченка, Київ

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ П'ЄЗОДАТЧИКІВ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ ЗАХИСТУ ТЕРИТОРІЇ ОХОРОНЯЄМИХ ОБ'ЄКТІВ

В роботі проведено аналіз оптимального вибору сейсmodатчиків, призначених для охорони території військових об'єктів та здатних працювати в складних природних умовах. Встановлено, що для виконання задач охорони периметру військових об'єктів за своїми характеристиками найбільш підходять сейсмоакустичні засоби виявлення, принцип дії яких заснований на п'єзоэффектах, або їх гнучка конфігурація з іншими засобами охорони. Досліджені основні параметри п'єзоелементів загальноприйнятих в п'єзотехніці та визначені оптимальні співвідношення констант п'єзокерамічного матеріалу, з якого виготовлено п'єзоелемент, що впливає на основні електрофізичні властивості п'єзодатчика. Надано висновок, що при проектуванні п'єзодатчиків на п'єзокерамічних матеріалах правильний вибір матеріалу є визначальним фактором щодо визначення оптимальних властивостей сейсμοприймачів з найкращими характеристиками (підвищений точності, стабільності, чутливості, розширення робочого діапазону частот та ін.).

Ключові слова: п'єзодатчик, п'єзокерамічний матеріал, сейсмічні засоби, охорона периметру.

Вступ

Постановка проблеми. Питання охорони важливих військових об'єктів є важливим і актуальним для запобігання несанкціонованого доступу на територію об'єкту, який знаходиться під охороною. Актуальність ролі систем охорони об'єктів підвищується в період ведення державою бойових дій та активізації дій розвідувально-диверсійних груп та підрозділів.

Тільки за останні 19 років на військових та артилерійських складах України відбулося 10 резонансних пожеж і вибухів, що призвело до край негативних наслідків: травмувань та загибелі людей, пошкоджень державних і приватних будівель, об'єктів соціальної сфери, знищення боєприпасів, які вкрай необхідні Збройним силам України в умовах проведення операції Об'єднаних Сил, державі нанесено збитків на мільярди гривень. Всі ці факти свідчать незадовільний стан охорони та оборони військових об'єктів нашої країни. Для виправлення ситуації в 2018 році в Україні розпочато роботи з влаштування на оборонних периметрах огорожі нового типу, обладнання периметрів технічних засобів охорони (ТЗО).

Охорона периметра за допомогою прихованих ТЗО відіграє роль першого рубежу. Одним із ефективних напрямів покращення охорони військових об'єктів є запровадження нових, більш досконалих ТЗО. На сьогоднішній день жодний засіб охорони, який використовується в охороні військових об'єктів, не може вважатися абсолютно ефективним. Отже, виникла нагальна потреба в розробці такого

засобу охорони, який міг би функціонувати у несприятливому електромагнітному середовищі, не розпізнаватися зловмисниками та був би не поміченим [1].

Основне завдання "військових" швидкорозгортаємих охоронних систем (ОС) – це скритна інженерно-технічна розвідка на неконтрольований території в зонах ймовірного пересування противника (стежки, дороги, балки). Такі ОС призначені для скритого виявлення, класифікації, обліку та визначення напрямку пересування живої сили і саморушень техніки, передачі даних по радіоканалу на пульти управління та індикації (ПУІ), які можуть бути віддалені на десятки кілометрів.

На даний час широкого застосування знайшли системи охорони об'єктів, що побудовані на основі використання сейсмічних датчиків збору інформації. Принцип дії сейсмічних систем охорони периметра заснований на реєстрації коливань ґрунту, що викликаються рухомим порушником або технікою, за допомогою високочутливих сейсмічних датчиків.

Сейсмічні системи охорони периметра об'єкту призначені для створення рубежів прихованого типу та для сигналізаційного оповіщення про наявність порушників (людей, транспортних засобів, бойової техніки) на підходах до об'єкту, що знаходиться під охороною. Крім того, сейсмічні засоби, які замасковані, застосовуються для сигналізації про спроби перетину межі охороняємої зони і вторгнення на територію об'єкту, що охороняється, а також подальшого моніторингу про переміщення порушників по зонах внутрішньої території об'єкта [1–2].

Для оптимального розміщення сейсmodатчиків

та сейсмоліній, необхідний попередній моніторинг сейсмічного шуму в даній зоні. Спектр сейсмічних корисних сигналів від людини (поверхневі хвилі) лежить в основному в діапазоні частот 5 до 50 Гц, причому зі збільшенням швидкості руху максимум (~6-8 Гц при $V=0,3-0,5$ м/с) зміщується в бік більш високих частот. Вторгнення групи порушників характеризується розширенням спектра до 80-100 Гц з максимумом в районі 10 Гц. Спектр сейсмосигналів від тварин, як правило, ширший і вкрай нерівномірний, з характерними максимумами. Спектр транспортної перешкоди, як правило, перекриває всю область корисних сигналів без характерних максимумів, проте фронт наростання і убуття транспортної перешкоди менш інтенсивний. Спектр природних мікросейсмічних коливань практично рівномірний в діапазоні 5-70 Гц з невеликими максимумами [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання дослідження електрофізичних характеристик, функціонування та застосування сейсмічних пристроїв на п'єзоелементах в системах виявлення, розглядалися в наукових працях Jan Tichu [3], K. Spanner [4], B. Homeijer [9], Шарапова В.М. [16–18], Жукова С.Н. [15] та ін. У роботах науковців не достатньо зверталась увага дослідженню питань визначення оптимального співвідношення констант п'єзокерамічного матеріалу, з якого виготовлений п'єзоелемент, що впливає на основні електрофізичні властивості п'єзодатчика (підвищення точності, стабільності, чутливості, розширення робочого діапазону частот та ін.) Поряд з цим, питання застосування на військових об'єктах та перспектив розвитку новітніх п'єзоелектричних датчиків та новітніх технологій їх виготовлення, не були достатньо висвітлені науковими та науково-педагогічними працівниками, фахівцями на сторінках наукових видань.

Мета статті – дослідити параметри п'єзоелементів загальноприйнятих в п'єзотехніці та визначити оптимальне співвідношення констант п'єзокерамічного матеріалу, з якого виготовлено п'єзоелемент, що впливає на основні електрофізичні якості п'єзодатчика.

Виклад основного матеріалу

На сьогодні відомо багато різновидів конструкцій сейсмодатчиків, призначених для роботи в складі апаратури високоточного визначення положення джерела сейсмічного сигналу в просторі. Проте варто зауважити, що вони не завжди відповідають вимогам, які ставляться до них, оскільки їм властиві суттєві недоліки. Зокрема, електромеханічні датчики, які діють за принципом маятника, мають не високу чутливість (зазвичай від 20 до 30 В/м/с) і обмежений з боку низьких частот робочий діапазон,

який визначається власною частотою коливань інерційної маси на пружному підвісі. Найбільш поширені електромеханічні сейсмодатчики мають смугу, що починається з 10 Гц. Для її розширення в бік низьких частот доводиться використовувати велику інерційну масу і більш м'який підвіс, що збільшує габарити, масу та ймовірність виходу з ладу під час експлуатації [1–2].

Найважливішою компонентою електроакустичних приладів та багатьох інших систем, пристроїв є п'єзоелектричні датчики. Основою такого датчика є п'єзокерамічна пластина з нанесеними на неї електродними контактами. Використовуючи традиційні методи, неможливо спроектувати датчики з широким діапазоном робочих характеристик, не змінюючи параметри самої пластини (її розмір, форму та матеріал). У той же час п'єзоелектричні сейсмодатчики, що складаються з інерційного елемента, з'єднаного з п'єзоелектричним перетворювачем, мають достатню велику чутливість та динамічний діапазон вимірювань, але незначну точність вимірювань [3]. На сьогоднішній день ефективним варіантом вирішення цієї проблеми, є розробка та запровадження сейсмоакустичних засобів виявлення, принцип дії яких заснований на п'єзоефектах.

Отже, для виконання завдань охорони периметру військових об'єктів за своїми характеристиками найбільше підходять сейсмоакустичні засоби виявлення, принцип дії яких заснований на п'єзоефектах, або їх гнучна конфігурація з іншими засобами охорони.

З усіх відомих типів датчиків, найбільш широкого застосування в даній області знаходять п'єзоелектричні вібровимірювальні перетворювачі або акселерометри.

П'єзоелектричні акселерометри мають наступні переваги:

- широкий робочий діапазон частот;
- лінійність амплітудної характеристики (АХ) в широкому динамічному діапазоні;
- високу стійкість до зовнішніх впливів;
- активний характер перетворення, що не вимагає застосування джерела живлення;
- відсутність рухомих частин, що гарантує високу надійність і довговічність;
- можливість реалізації малогабаритного виконання;
- технологічність у виробництві.

До недоліків п'єзодатчиків слід віднести велику потужність енергоспоживання (понад 3 Вт). До переваг – відносно низьку вартість.

П'єзоелектричні датчики містять кристали або текстури, що електризуються під дією механічної напруги (прямий п'єзоефект) і деформуються в електричному полі (зворотний п'єзоефект).

Особливістю п'єзоефекту є зміна знаку заряду

під час зміни стиснення розтягуванням та зміна знаку деформації при зміні напрямку поля [5–6].

П'єзоелектричними властивостями володіють багатокристалічні речовини: кварц, турмалін, ніобат літію, сегнетова сіль та інші, а також штучно створюванні та спеціально поляризовані в електричному полі полікристалічні матеріали (п'єзокераміки): титанат барію, титанат свинцю, цирконат свинцю та ін. [7].

Перевагою кварцу є стійкість до впливів температури і вологості, механічна міцність. Кварц має незначний коефіцієнт лінійного розширення, його п'єзо модуль практично не залежить від температури до 200° С, а в діапазоні 200 ... 500° С змінюється незначно, електричний опір – близько 1016 Ом/м, але воно сильно залежить від температури і має неоднакове значення в напрямку різних осей.

У сейсмотатчиках найбільш широке застосування знаходять п'єзоелементи з п'єзокерамічних матеріалів (ПКМ), що володіють, в порівнянні з монокристалічними, набагато вищою п'єзо активністю, технологічністю та меншою вартістю.

Основними властивостями ПКМ, що виявляються на стандартних керамічних зразках, є:

- високі значення діелектричної проникності;
- наявність спонтанної поляризації окремих областей (доменів);
- наявність петель гістерезису на залежностях: поляризація-електричне поле, деформація-електричне поле;
- зростання діелектричної проникності з підвищенням температури;
- наявність особливої крапки (температура Кюрі) на кривій залежності діелектрична проникність-температура, вище якої сегнетоелектричні властивості не проявляються;
- виникнення залишкової поляризації та подвійного електричного шару на поверхні спечених зразків після впливу постійного електричного поля, що обумовлює можливість прояву тілом п'єзоелектричного ефекту (перетворення механічної енергії в електричну або навпаки).

На сьогоднішній день для виробництва п'єзокерамічних виробів найбільш широко застосовуються тверді розчини з $PbZrO_3$ та $PbTiO_3$ з модифікаторами, що складаються з 3-х та 5-ти валентних речовин. Промисловий випуск п'єзоелектричних керамічних матеріалів (ПКМ) здійснюють за кордоном десятками фірм, серед яких найбільшу популярність мають "Brüel & Kjær" (Данія), "Endevco" (США), "Kistler" (Швейцарія), "Vibrometer" (Німеччина), "ONO Sokki" (Японія) та інші.

ПКМ представляють собою сегнетоелектричні з'єднання або їх тверді розчини, отримані синтезом з суміші різних оксидів та солей.

Основу більшості сучасних ПКМ складають

тверді розчини титанату-цирконату свинцю (ЦТС, PZT), модифіковані різними компонентами та добавками. Випускаються також ПКМ на основі титанату барію (ТБ), титанату свинцю (ТС), ніобату свинцю (НС), титанату вісмуту (ТВ) та ін.

Проте в останні роки Євросоюзом був прийнятий ряд заходів, спрямованих на захист навколишнього середовища [8], що призвели до того, що велика увага в фізичному матеріалознавстві стало приділятися пошуку нетоксичних п'єзоелектричних матеріалів, які можуть використовуватися (в тому числі і замінити використовувані Pb , що містять матеріали) в різних сферах сучасної техніки як у вигляді активних елементів (п'єзоелементів та ін.), так і в якості основ для створення функціональних елементів (багатослойників та ін.).

П'єзоелектричні плівки володіють наступними унікальними властивостями [9]:

1. Широкий частотний діапазоном: 0.001 ... 109 Гц;
2. Великим динамічним діапазоном;
3. Низьким акустичним імпедансом, близьким до води, людським тканинам та клейових складових;
4. Високою пружною піддатливістю;
5. Високою вихідною напругою: в 10 разів вище, ніж у п'єзокераміці при однакових прикладених силах;
6. Високою електричною міцністю діелектрика: витримують поля до 75 В/мкм, при яких більшість п'єзокерамічних матеріалів втрачають поляризацію;
7. Високу механічну міцність та ударостійкість: 109 ... 1010 границь міцності;
8. Високу стабільність, стійкість до вологості (вологопоглинання менше 0,02%), більшості хімічних реактивів, окиснювачам, потужному ультрафіолету (УФ) та ядерного випромінювання;
9. З них можна отримувати структури довільної форми;
10. Їх можна з'єднувати звичайними клеями.

Але електрофізичні характеристики деяких монокристалів, наприклад кварцу, незрівнянно більш стабільні, ніж ПКМ, що і диктує необхідність застосування кварцових п'єзоелементів в зразкових датчиках. При використанні в акселерометрах, найбільш важливими параметрами ПКМ є: п'єзомодуль (ПМ), діелектрична проникність, модуль пружності, механічна міцність, робочий діапазон температур [10].

При розрахунку показників датчиків замість значення п'єзомодуля іноді зручно використовувати коефіцієнт g_{ij} , який є постійною ПМ під час роботи в режимі холостого ходу. Ця постійна визначається як напруженість 2ω електричного поля, між електродами п'єзоелемента при розімкнутому лан-

цюзі, викликана даними механічної напруги [3]:

$$g_{ij} = \frac{u/h}{F/S} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (1)$$

де h, S – висота і площа п'єзоелемента;

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{ij}^T}{\varepsilon_0} - \text{відносна діелектрична проникність};$$

ε_{ij}^T – діелектрична проникність ПКМ у вільно-му стані, виміряна на частоті, багато меншій від частоти власного резонансу п'єзоелементу;

$\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{М}^{-1}$ – діелектрична проникність вакууму.

Коефіцієнт g_{ij} зручний для розрахунку вихідної напруги п'єзоелектричних перетворювачів без урахування впливу шунтуючої ємності. Не менше значення може мати стабільність названих характеристик в часі до впливу таких зовнішніх впливів, як

температура, механічні навантаження та інших. В даний час існує широка номенклатура п'єзокерамічних матеріалів вітчизняного та зарубіжного виробництва, призначених для різних технічних цілей.

У табл. 1 наведені усереднені значення деяких електрофізичних характеристики п'єзокерамічних матеріалів [2], які можуть застосовуватися в акселерометрах.

Для більшості ПКМ системи ЦТС (PZT) значення п'єзо модуля d_{15} перевищує d_{33} в 1,3-1,6 рази, $\varepsilon_{33} = \varepsilon_{31}^T / \varepsilon_0$ становить приблизно (0,85-0,9) ε_{33} орієнтовна механічна міцність на розрив становить 27-35 МПа, на стиск – 270-300 МПа.

Однією з найважливіших характеристик п'єзокерамічних матеріалів є температура фазового переходу (точка Кюрі, T_k), при якій має місце максимум діелектричної проникності і необоротно зникає залишкова поляризованість [10].

Таблиця 1

Параметри п'єзокерамічних матеріалів

Матеріал	П'єзомодуль 10-12, Кл/Н		Діелектрична проникність $\varepsilon_{33} = \varepsilon_{31}^T / \varepsilon_0$	Температура точки Кюрі, T_k , оС	Механічна добротність Q_m	Виробник
	d_{31}	d_{33}				
ЦТС-19	-160	330	1750	300	70	Росія
ЦТС-21	-40	100	500	400	150	
ЦТС-26	-160	320	1650	350	80	
ЦТБС-3	-135	290	2150	180	200	
PZT-4	-125	290	1350	325	500	США
PZT-5A	-170	370	1750	325	75	
PZT-5H	-270	590	3400	193	65	
P14	–	15	175	650	–	США (Ендевко)
P15	–	1	–	950	–	

Джерело: [10, С. 11]

Від значення температури точки Кюрі залежить гранично-допустима температура ПКМ, тобто та максимальна температура, при якій ще не відбуваються незворотні зміни характеристик. Для більшості ПКМ вона лежить в межах (0,5-0,8) T_k . Верхня межа робочого діапазону температури п'єзоелектричного пристрою залежить від обмежень, що накладаються на допустимі температурні зміни його характеристики, природно, не може перевищувати гранично-допустиму температуру ПКМ.

При роботі з п'єзоелементами на ПКМ слід брати до уваги, що їх електрофізичні характеристики можуть помітно змінюватися з часом або під впливом таких зовнішніх впливів, як температура, механічні навантаження, електричні поля та іонізуючі випромінювання. При цьому спостерігаються як оборотні, так і необоротні зміни. Природне старіння ПКМ характеризується зниженням значень п'єзо

модуля і діелектричної проникності від часу приблизно за експоненціальним законом і призводить до підвищення стабільності характеристик до чинників, що впливають. Витримка п'єзоелементів при впливі підвищеної температури дозволяє прискорити цей процес.

Статичний тиск також приводить до зниження п'єзо модуля. При перевищенні критичного значення тиску, визначеного для кожного складу ПКМ, спостерігається незворотна зміна п'єзо модуля.

У випадках комплексного впливу тиску і температури ефект впливу кожного з названих чинників посилюється, що може використовуватися для штучної стабілізації властивостей п'єзоелементів шляхом термобаротренажу [10].

На роботу п'єзоелектричного датчика, при деяких умовах експлуатації, може вплинути явище піроефекту що властиве ПМ.

Піроэффект проявляється при зміні температури п'єзоелементу і викликаний зміною спонтанної поляризації в результаті теплової деформації кристалічних осередків.

Це призводить до появи різниці потенціалів на електродах. Якщо зміна температури відбувається за час менший ніж час, необхідний для стікання заряду що виник, то можуть бути перекручені результати вимірювань або порушена робота первинного електронного пристрою. П'єзокерамічний матеріал, з якого виготовлений п'єзоелемент в першу чергу впли-

ває на його властивості, таким чином, всі основні електрофізичні властивості п'єзоелемента визначаються з співвідношень констант ПКМ [1; 6].

Основні співвідношення і методи вимірювань п'єзоелектрики представлені в [11–12].

Найбільш важливі фізичні вирази для прямого і зворотного п'єзоэффекту представлені в табл. 2. Представлені в табл. 2 лінійні залежності описуються за допомогою апарату тензорного аналізу в матричній формі.

Таблиця 2

Основні вирази прямого і зворотного п'єзоэффекту

Прямий п'єзоэффект	Зворотний п'єзоэффект
$D = dD + \varepsilon^T E$	$S = d_t E + S^E T$
$D = dD + \varepsilon^T E$	$S = d_t E + S^E T$
$E = -gT + \beta^T D$	$S = g_T D + S^D T$
$D = eS + \varepsilon^S E$	$T = -e_t E + C^E S$

Джерело: [13, С.22].

Для дослідження динамічно пов'язаних електропружних процесів в п'єзокерамічних тілах наведені рівняння стану, необхідно доповнити рівняннями руху елементу суцільного середовища, тобто рівняннями Ньютона і Максвелла, а також врахувати реальні початкові і граничні умови. П'єзоелектричні коефіцієнти пов'язані співвідношеннями (2):

$$d = \varepsilon^T g; e = \varepsilon^S h; h = C^D g. \quad (2)$$

У табл. 3 наведені вираження параметрів, загальноприйнятих в п'єзотехніці.

В даний час контроль якості п'єзокерамічного

матеріалу та п'єзокерамічного елементу (ПКЕ) проводиться або за величиною коефіцієнта електроємності зв'язку k_{ij} , або за величиною коефіцієнта п'єзо модуля d_{ij} . Зазначені значення визначаються за частотами резонансу ω_r і антирезонансу ω_a , отриманим при вимірюванні модуля провідності ПКЕ (метод “резонансу-антирезонансу”) [15].

Метрологічні і експлуатаційні характеристики акселерометрів насамперед залежать від властивостей використовуваного п'єзоматеріалу (ПМ) і конструктивних особливостей електроємності перетворювача, а також датчика в цілому.

Таблиця 3

Вираження параметрів загальноприйнятих в п'єзотехніці

Параметри	Позначення	Розмірність (СІ)	Примітка
Пружне напруження	T	Н/м²	Механічне напруження, $T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}$; T_{ij} – тензор другого рангу, в матричній формі $T_j = C_{jk} S_k$
Пружна деформація	S	м/м	S_{kl} –тензор другого рангу, $S_{ij} = S_{ijkl} T_{kl}$ в матричній формі $S_j = S_{jl} T_l$
Напруженість електричного поля	E	В/м	–
Електричне зміщення (індукція)	D	Кл/м²	$D_1 = \varepsilon_{11} E_1$; $D_2 = \varepsilon_{22} E_2$; $D_3 = \varepsilon_{33} E_3$; $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22}$ – на практиці

Продовження табл. 3

Пружна податливість $s \cdot \text{м}^2 / \text{Н}$	s	$\text{м}^2 / \text{Н}$	Механічна податливість, $S_{ijkl} = S_{ij} / T_{kl}$ – тензор четвертого рангу, в матричній формі $S_{jl} = S_j / T_l$
Пружна жорсткість	c	$\text{Н} / \text{м}^2$	Механічна жорсткість $C_{ijkl} = T_{ij} / S_{kl}$ – тензор четвертого рангу, в матричній формі $C_{jk} = T_j / S_k$
Діелектрична проникність (відносна)	$\varepsilon / \varepsilon_0$	-	-
П'єзоелектричний модуль	d	Кл/Н, м/В	$d_{ij} = D_i / T_j$; $d_{ij} = S_i / E_j$; (в матричному запису), тобто п'єзоелектричний модуль для прямого і зворотного п'єзо ефекту Н/м ² і В/м відповідно
П'єзоелектричний коефіцієнт	e	Кл/м ² , Н/(В·м)	$e_{ij} = D_i / S_j$; (в матричному запису), тобто e – визначає щільність заряду при од. деформації і механічну напр. при впливі електричного поля
П'єзоелектричний коефіцієнт напруги	g	(В·м)/Н, м ² /Кл	$g_{ij} = -S_i / D_j$ (в матричному записі),
П'єзоелектричний коефіцієнт деформації	h	В/м, Н/Кл	$h_{ij} = -E_i / S_j$; $h_{ij} = -T_i / D_j$ (в матричному записі), тобто для прямого і зворотного п'єзо ефекту.
Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	K	-	КПД перетворення
Електрична добротність	Q_E	-	$Q_E = 1 / \text{tg} \delta$
Механічна добротність	Q_M	-	-
Тангенс кута діелектричних втрат	$\text{tg} \delta$	-	Визначається як співвідношення ефективного активного опору до реактивного

Джерело: [13, С.28].

Відповідно, основними тактико-технічними характеристиками (ТТХ) засобів виявлення, є їх чутливість (здатність виявлення) та стійкість перед перешкодами (порог спрацьовування). Як надмірна, так і недостатня чутливість, в тому, чи іншому діапазоні частот сейсмоакустичних сигналів, шкідлива для надійної локалізації того чи іншого виду порушників. Властивості сейсморейсмерів (СП) визначається його частотною характеристикою і чутливістю. Крім впливу вищевказаних характеристик, які безпосередньо пов'язані з п'єзоелементом, на амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) суттєво впливають конструкційні параметри перетворювача. Тому оптимізація форми і розмірів п'єзоелемента і конструкційних параметрів перетворювачів в цілому

пов'язана з проведенням численних дослідів для виявлення впливу вищевказаних факторів на АЧХ первинних перетворювачів. Чутливість сейсморейсмерів показує величину напруги на виході при зміщенні ґрунту на 1 см.

Частотна характеристика показує, як змінюється напруга на виході сейсморейсмерів в залежності від частоти коливань ґрунту, якщо швидкість зсуву задається у вигляді:

$$\dot{X} = \dot{X}_0 \sin 2\pi f t, \quad (3)$$

де f – частота;

$\dot{X}_0$ – амплітуда швидкості зміщення.

Частотні характеристики сейсморейсмерів визначають лише їх потенційні можливості. Реальний

процес перетворення залежить від умов установки, від сили зчеплення сейсмоприймачів з ґрунтом і пружних властивостей ґрунту [16]. Важливою характеристикою СП є його власна частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} \Gamma \zeta. \quad (4)$$

За значеннями f_0 сейсмоприймачі поділяють на низькочастотні (5-10 Гц) та середньо частотні (15-30 Гц). Чутливість сейсмоприймачів становить (0,3-0,7) В/см. В частотній характеристиці відображаються особливості реєстрації сейсмоприймачем коливань ґрунту в залежності від загасання сигналу (рис. 1).

Рис. 1. Амплітудно-частотні характеристики СП:

- 1 – слабо задущений СП;
- 2 – оптимальне загасання;
- 3 – сильно задущений СП.

Джерело: [10, С.14].

Таким чином, щоб хвилі реєструвалися без спотворень, власна частота f_0 СП повинна бути менше нижньої граничної частоти f_H реєстрованих коливань. Поліпшення АЧХ п'єзо перетворювачів здійснюється, в основному двома способами:

1. Розробкою більш ефективних п'єзо чутливих елементів з різними електрофізичними і фізико-механічними параметрами [19];
2. Оптимізацією конструкційних параметрів перетворювачів [18–20].

Варіація конфігурації п'єзо композитного елемента призводить до зміни його модуля пружності, електричної ємності, п'єзо модуля d_{ij} і п'єзочуттєвості g_{ij} . Всі ці параметри при оптимальних конструкціях і конфігураціях підвищують експлуатаційні показники перетворювача. При проектуванні датчиків на ПКМ правильний вибір матеріалу є визначальним фактором основних характеристик і функціональних можливостей п'єзоелементів, п'єзо актуаторів. При виборі матеріалу для таких пристроїв основну увагу приділяють наступним параметрам [13; 16; 21]:

1. d (d_{33}, d_{31}) – п'єзо модулі (у напрямку робочих деформацій) визначають робочий діапазон переміщень виконавчого пристрою.

2. K_{EM} (k_{33}, k_{31}) – коефіцієнти електро-механічного зв'язку характеризують ефективність перетворення електричної енергії, що підводиться до матеріалу, в механічну. Квадрат коефіцієнта електро-механічного зв'язку дорівнює відношенню механічної енергії, що генерується до електричної енергії, що підводиться (в разі зворотного п'єзоефекту). Коефіцієнт електро-механічного зв'язку залежить як від властивостей матеріалу, так і від напрямків, в яких підводиться і знімається енергія. Тому кожен матеріал може характеризуватися декількома такими коефіцієнтами залежно від виду перетворення. Так, наприклад, коефіцієнт k_{33} характеризує ступінь перетворення енергії збуджуючого електричного поля, спрямованого по осі поляризації, в енергію поздовжньої деформації в тому ж напрямку; коефіцієнт k_{31} характеризує ступінь перетворення енергії того ж поля в енергію деформації, перпендикулярної напрямку поля.

3. Y_{ij} – модуль Юнга визначає пружні та резонансні властивості матеріалу.

4. Q_M – характеризує втрати енергії в матеріалі на внутрішнє тертя, визначає ефективну ширину смуги пропускання, впливає на ступінь загасання коливальних процесів.

5. ϵ_r – відносна діелектрична проникність визначає повний опір п'єзо елемента, характеризує діелектричні і в кінцевому підсумку ємнісні властивості п'єзо елемента.

6. $\tan \delta$ та $\tan \sigma$ – тангенси кутів діелектричних і механічних втрат характеризує діелектричні і механічні втрати в матеріалах.

7. T_K – температура Кюрі визначає граничну температуру, при якій настає область фазового переходу в матеріалі (тепловий рух молекул руйнує дипольні структуру матеріалу і п'єзоелектричні властивості зникають).

8. ΔT – рекомендований робочий діапазон температур, в якому флуктуації параметрів матеріалу будуть знаходитися в межах допустимих значень.

Методи вимірювань резонансних і анти резонансних частот п'єзоелементів докладно описані в ОСТ 11 0444-87 і [14; 17; 21–22]. Експерименти показують, що резонансні частоти і чутливість в цих частотах, а також частотний діапазон перетворювача залежать від модуля Юнга і товщини п'єзо композитного елемента.

Висновки

1. Досліджені основні параметри п'єзоелементів загальноприйнятих в п'єзотехніці та визначені оптимальні співвідношення констант п'єзокерамічного матеріалу з якого виготовлено п'єзоелемент,

що впливає на основні електрофізичні властивості п'єзодатчика.

2. При проектуванні п'єзодатчиків на ПКМ правильний вибір матеріалу є визначальним фактором відносно визначення оптимальних властивостей сейсмоприймачів з найкращими характеристиками (підвищення точності, стабільності, чутливості, розширення робочого діапазону частот

та іншими.)

3. Актуальним завданням є дослідження щодо розробки нових конструкцій п'єзоелектричних датчиків і нової технології їх виготовлення, що забезпечує отримання більш високонадійних і високоефективних датчиків, які представляють достовірну вимірювальну інформацію.

Список літератури

1. Дзевєрін І.Г. Синтез структури комплексної охорони і оборони військових об'єктів Повітряних Сил / І.Г. Дзевєрін, І.Л. Костенко, О.М. Борщевський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України – 2010. – № 2(4). – С. 186-189.
2. Дементьев А.Н. Технические средства охраны / А.Н. Дементьев, Г.В. Дементьева. – Томск: ТГУСУР, 2012. – 119 с.
3. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics / Tichy Jan, Erhart Jiry, Kittinger Erwin, Privratska Jana. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010. – 12 p.
4. Spanner K. Piezoelectric motors, an overview [Electronic resource] / K. Spanner, B. Koc // Physic instrumente. – 2016. – № 5. – P. 2-18. – Available at: <https://www.mdpi.com/2076-0825/5/1/6>.
5. Казаков В.К. Современные многослойные пьезоэлектрические актюаторы. Методы расчета параметров актюаторов в статических и динамических режимах / В.К. Казаков // Известия Южного Федерального Университета. – 2008. – № 11. – С. 225-234.
6. Пономарев С.В. Исследование электромеханических процессов в пьезоэлектрической системе / С.В. Пономарев, С.В. Рикконен, А.В. Азин // Известия высших учебных заведений. – 2014. – № 8(57). – С. 196-202.
7. Акопян В.А. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов / В.А. Акопян, А.Н. Соловьев, С.Н. Шевцов. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 144 с.
8. Директива 2002/95/ ЕС. Ограничение содержания вредных веществ. – Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/RoHS>.
9. Hartwell Hewlett Packard's seismic grade MEMS accelerometer / Homeijer B., Lazaroff D., Milligan D., Alley R., Wu J., Szepesi M., Bicknell B., Zhang Z., Walmsley R.G. // IEEE 24th International Conference "Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)". – Cancun, Mexico, 23-27 January 2011, P. 385-388.
10. Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения / В.В. Янчич. – Ростов-на-Дону: ЮФУ. – 2008. – 77 с.
11. Чернов В.А. Совершенствование конструктивно-технологических параметров многослойных пьезоэлектрических пьезоактюаторов: дис.... канд. техн. наук / В.А. Чернов. – Москва, 2009. – 212 с.
12. Быстров С.В. Экспериментальное исследование характеристик пьезопроводов нового поколения / С.В. Быстров, А.Н. Коровяков, И.П. Салмыгин // Известия вузов. – Приборостроение. – 2009. – № 11(52). – С. 77-82.
13. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
14. Нагаенко А.В. Изучение методов исследования пьезокерамических материалов и элементов в процессе их производства / А.В. Нагаенко, М.А. Мараховский. – Ростов-на-Дону: ЮФУ. – 2008. – 49 с.
15. Жуков С.Н. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение: монография / С.Н. Жуков. – Минск: ООО ФУАинформ, 2003. – 112 с. – Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/2175128/>.
16. Шарапов В.М. Динамічні характеристики біморфних домено-дисипативних п'єзотрансформаторів / В.М. Шарапов, В.В. Туз, Ж.В. Сотула // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2008. – № 3. – С. 75-79.
17. Шарапов В.М. Пьезоэлектрический датчик с акустическим резонатором / В.М. Шарапов, О.Н. Петрищев, К.В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2014. – № 4. – С. 25-29. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchdtu_2014_4_7.
18. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Heidelberg / V. Sharapov. – Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011. – 498 p. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/260733733_Sharapov_V_Piezoceramic_sensors_-_Springer_Verlag_Heidelberg_Dordrecht_London_New_York_2011_-_498_p.
19. Spicci L. Ultrasound Piezo-Disk Transducer Model for Material Parameter Optimization / L. Spicci, M. Cati // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. – Paris, 2010. – P. 1-7. – Режим доступа: https://uk.comsol.com/paper/download/63120/spicci_paper.pdf.
20. Maslennikova S. Calculating the Ultra-Sound Engine Piezoelectric Element Characteristics / S. Maslennikova, A. Sitnikov, I. Mironova // Radiooptics Scientific Journal. – 2016. – № 4(16). – P. 25-40. doi: 10.7463/rdopt.0416.0847731.
21. [Електронний ресурс] ОСТ 11 0444-87. Материали пьезокерамические. Технические условия. – 140 р. – Режим доступа: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/1053/info/48256>.
22. [Електронний ресурс] ГСССД МЭ 183-2011 Методика экспериментального определения пьезоэлектрических и упругих характеристик // Резниченко Л.А., Андрюшин К.П., Павленко А.В., Вербенко И.Л. – 21 с. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data/662/66269.pdf>.

References

1. Dzeverin, I.G., Kostenko, I.L., Borshhevsjkyj, O.M. (2010), "Syntez struktury kompleksnoji okhorony i oborony vijsjkovykh ob'ektiv Povitrjanykh Syl" [Synthesis of the structure of the complex protection and defense of the Air Force military facilities], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(4). pp. 186-189.

2. Dementij'ev, A.N., Dementij'eva, Gh.V. (2012), "Tekhnicheskoye sredstva okhrany" [Security Equipment], TGUSUR, Tomsk, 119 p.
3. Tichy, J., Erhart, J., Kittinger, E. and Privratska, J. (2010), *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*, Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 12 p.
4. Spanner, K. and Koc, B. (2016), Piezoelectric motors, an overview, *Physic instrumente*, No. 5, pp. 2-18.
5. Kazakov, V.K. (2008), "Sovremennyye mnohosloynnye p'ezoelektrycheskiye aktiatory. Metody rascheta parametrov aktuatorov v staticheskikh y dinamicheskikh rezhymakh" [Modern multilayer piezoelectric actuators. Methods for calculating the parameters of actuators in static and dynamic modes], *Proceedings of the Southern Federal University*, No. 11, pp. 225-234.
6. Ponomarev, S.V., Rykkonen, S.V. and Azyn, A.V. (2014), "Yssledovanye elektromekhanicheskikh protsessov v p'ezoelektrycheskoy sistemye" [Research of electromechanical processes in a piezoelectric system], *News of higher educational institutions*, No. 8(57), pp. 196-202.
7. Akop'ian, V.A., Solov'ev, A.N. and Shevtsov, S.N. (2008), "Metody y alhorytm opredeleniya polnoho nabora sovместимых material'nykh konstant p'ezokeramicheskikh materialov" [Methods and algorithm for determining the complete set of compatible material constants of piezoceramic materials], YuFU, Rostov-na-Donu, 144 p.
8. Directive 2002/95/ ES. "Ohranychenye soderzhaniya vrednykh veschestv" [Limitation of harmful substances], available at: www.uk.wikipedia.org/wiki/RoHS.
9. Homeijer, B., Lazaroff, D., Milligan, D., Alley, R., Wu, J., Szepesi, M., Bicknell, B., Zhang, Z., Walmsley, R.G. and Hartwell Hewlett, P.G. (2011), *IEEE 24th International Conference "Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)"*, 23-27 January, Cancun, Mexico, pp. 385-388.
10. Yanchich, V.V., (2008), "P'ezoelektricheskie datchiki vibratsionnogo i udarnogo uskoreniya" [Piezoelectric sensors for vibration and shock acceleration], YUFU, Rostov-na-Donu, 77 p.
11. Chernov, V.A., (2009), "Sovershenstvovanye konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov mnohosloynnykh p'ezoelektrycheskikh p'ezodaktyatorov: dissertatsiya" [Improving the structural and technological parameters of multilayer piezoelectric piezo actuators: dissertation], Moscow, 212 p.
12. Bystrov, S.V., Korov'iakov, A.N. and Salmyhyn, Y.P. (2009), "Eksperymental'noye yssledovanye kharakterystyk p'ezopryvodov novoho pokoleniya" [An experimental study of the characteristics of a new generation of piezo drives], *University News*, No. 11(52), pp. 77-82.
13. Bobcov, A.A., Bojkov, V.I., Bystrov, S.V. and Grigoriev, V.V. (2011), "Grigor'ev Ispolnitel'nye ustrojstva i sistemy dlya mikroperemeshchenij" [Actuators and systems for microdisplacement], SPB GU ITMO, St. Petersburg, 131 p.
14. Nahaenko, A.V. and Marakhovskiy, M.A. (2008), "Yzuchenye metodov yssledovaniya p'ezokeramicheskikh materialov y elementov y protsesse ykh proyzvodstva" [The study of methods for the study of piezoceramic materials and elements in the process of their production], YuFU, Rostov-na-Donu, 49 p.
15. Zhukov, S.N., (2003), "P'ezoelektrycheskaya keramika: pryntsyipy y prymerenyye" [Piezoelectric ceramics: principles and applications], OOO FUAuynform, Minsk, 112 p.
16. Sharapov, V.M., Tuz, V.V. and Sotula, Zh.V. (2008), "Dinamichni kharakterystyky bimorfnykh domenydyssypatyvnykh p'iezotransformatoriv" [Dynamic characteristics of bi-morph domain-dissipative domain transformers], *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, No. 3, pp. 75-79.
17. Sharapov, V.M., Petryshev, O.N. and Bazylo, K.V. (2014), "P'ezoelektrycheskiy datchyk s akusticheskym rezonatorom" [Piezoelectric sensor with an acoustic resonator], *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, No. 4, pp.25-29, available at: www.nbuv.gov.ua/UJRN/Vchdtu_2014_4_7.
18. Sharapov, V. (2011), *Piezoceramic sensors*, Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 498 p. – available at: www.researchgate.net/publication/260733733_Sharapov_V_Piezoceramic_sensors_-_Springer_Verlag_Heidelberg_Dordrecht_London_New_York_2011_-_498_p.
19. Spicci, L. and Cati, M. (2010), *Ultrasound Piezo-Disk Transducer Model for Material Parameter Optimization Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, available at: www.uk.comsol.com/paper/download/63120/spicci_paper.pdf.
20. Maslennikova, S., Sitnikov, A. and Mironova, I. (2016), Calculating the Ultra-Sound Engine Piezoelectric Element Characteristics, *Radiooptics Scientific Journal*, No. 4(16), pp. 25-40. doi: 10.7463/rdopt.0416.0847731.
21. OST 11 0444-87 "Materyaly p'ezokeramicheskoye Tekhnicheskoye usloviya" [Piezoceramic materials. Technical conditions], available at: www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/1053/info/48256.
23. Reznichenko, L.A., Andriushyn, K.P., Pavlenko, A.V. and Verbenko, Y.L. (2011), "Metodika eksperimental'nogo opredeleniya pezoelektricheskikh i uprugih kharakteristik" [Method of experimental determination of piezoelectric and elastic characteristics], available at: <https://meganorm.ru/Data/662/66269.pdf>.

Надійшла до редколегії 12.02.2020

Схвалена до друку 16.04.2020

Відомості про авторів:

Нікіфоров Микола Миколайович

кандидат військових наук
старший дослідник старший науковий співробітник
науково-дослідного центру Військового інституту
Київського національного університету ім. Т. Шевченка,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2849-5688>

Information about the authors:

Mykola Nikiforov

Candidate of Military Sciences Senior Research
Senior Researcher at the Research Center
of the Military Institute
of the Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2849-5688>

Пампуха Ігор Володимирович

кандидат технічних наук доцент начальник
науково-дослідного центру Військового інституту
Київського національного університету ім. Т. Шевченка,
Київ, Україна
[https:// orcid.org/ 0000-0002-4807-3984](https://orcid.org/0000-0002-4807-3984)

Ihor Pampukha

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor
Military Institute of the Taras Shevchenko
National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine
[https:// orcid.org/ 0000-0002-4807-3984](https://orcid.org/0000-0002-4807-3984)

Ільченко Володимир Васильович

доктор фізико-математичних наук професор
директор Інституту високих технологій
Київського національного університету ім. Т. Шевченка,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5844-2248>

Vladimir Ilchenko

Doctor of Physics and Mathematics Professor
Director of the Institute of High Technologies
of Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5844-2248>

Кульський Олександр Леонідович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
старший науковий співробітник інституту
високих технологій
Київського національного університету ім. Т. Шевченка,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1987-1696>

Oleksander Kulsky

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Senior researcher at the Institute
of High Technologies
of Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1987-1696>

ОБОСНОВАНИЕ ПО ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ ПЬЕЗОДАТЧИКОВ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.Н. Никифоров, И.В. Пампуха, В.В. Ильченко, А.Л. Кульский

В работе проведен анализ оптимального выбора сейсмодатчиков, предназначенных для охраны территории военных объектов, способных работать в сложных природных условиях. В этой статье изложено, что для выполнения задач охраны периметра военных объектов за своими характеристиками наиболее подходят сейсмоакустические средства обнаружения, принцип действия которых основан на пьезоэффектах, или их гибкая конфигурация с другими средствами охраны. На работу пьезоэлектрического датчика, при некоторых условиях эксплуатации, может повлиять явление пьезоэффекта. Пьезокерамический материал, из которого изготовлен пьезоэлемент в первую очередь влияет на его свойства, таким образом, все основные электрофизические свойства пьезоэлемента определяются из соотношений констант пьезокерамического материала. Исследованы параметры пьезоэлемента общепринятого в пьезотехнике и определены оптимальное соотношение констант пьезокерамического материала из которого изготовлен пьезоэлемент, что влияет на основные электрофизические свойства пьезодатчика. Дано заключение, что при проектировании пьезодатчиков из пьезокерамического материала правильный выбор материала является определяющим фактором по определению оптимальных параметров сейсмоприемниками с наилучшими характеристиками (повышение точности, стабильности, чувствительности, расширение рабочего диапазона частот и т.д.).

Ключевые слова: пьезодатчик, пьезокерамический материал, сейсмические средства, охрана периметра.

SUBSTANTIATION ON THE SELECTION OF PIEZODESTER MATERIALS FOR PERFORMANCE OF PROTECTION TERRITORIES OF PROTECTED OBJECTS

M. Nikiforov, I. Pampuha, V. Ilchenko, O. Kulsky

The paper analyzes the optimal selection of seismic sensors designed to protect the territory of military facilities that can operate in difficult natural conditions. This article states that to perform the tasks of protecting the perimeter of military installations, seismic-acoustic detection means are most suitable for their characteristics, the principle of operation of which is based on piezo-effects, or their configuration is flexible with other means of protection. Of all the known types of sensors, the most widely used in the field under consideration are piezoelectric vibration transducers or accelerometers. The operation of the piezoelectric sensor, under certain operating conditions, may be affected by the pyroelectric effect. The piezoelectric material from which the piezoelectric element is made primarily affects its properties, so all the basic electrophysical properties of the piezoelectric element are determined from the ratios of the constants of the piezoceramic material. The parameters of the piezoelectric element generally accepted in piezoelectric engineering are investigated and the optimal ratio of the constants of the piezoceramic material of which the piezoelectric element is made is determined, which affects the basic electrophysical properties of the piezoelectric sensor. It is determined that when designing sensors from piezoceramic material, the correct choice of material is a determining factor in the basic characteristics and functionality of piezoelectric elements, piezoactuators. The metrological and operational characteristics of accelerometers primarily depend on the properties of the piezoelectric material used and the design features of the electromechanical transducers, as well as the sensor as a whole, which accordingly affects the main tactical and technical characteristics of the detection tools, their sensitivity (detection ability) and noise immunity (response threshold). In addition to the influence of the above characteristics, which are directly related to the piezoelectric element, the design parameters of the converter significantly affect the amplitude-frequency characteristic. Therefore, the optimization of the shape and size of the piezoelectric element and the structural parameters of the transducers as a whole is associated with conducting numerous experiments to identify the influence of the above factors. It is concluded that when designing a piezoelectric sensor from a piezoceramic material, the correct choice of material is a determining factor in determining the optimal parameters by geophones with the best characteristics (increasing accuracy, stability, sensitivity, expanding the operating frequency range, etc.).

Keywords: piezoelectric transducer, piezoceramic material, seismic means, perimeter protection.