

ДО АНАЛІЗУ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В статті проведено аналіз методів, які використовуються для дослідження вимірювальних перетворювачів акустичної емісії. Зокрема розглянуті п'єзоелектричні перетворювачі, які перетворюють найрізноманітніші сигнали – різні за формою, амплітудою і спектральним складом. Встановлено, що п'єзоелектричні датчики працюють в жорстких умовах експлуатації при високих і низьких температурах, квазістатичних і динамічних тисках, лінійного прискорення, акустичних шумах, механічних і гідравлічних ударах, агресивних і криогенних середовищах. Розглянуті характеристики п'єзоперетворювачів та виділення найважливіші при розгляді в лінійному наближенні – передавальні функції або перехідні характеристики. Цими характеристиками визначаються широкополосність і ефективність електромеханічного перетворення в режимі випромінювання і, відповідно, чутливість механоелектричного перетворення в режимі прийому. Серед методів, які використовуються для дослідження вимірювальних перетворювачів варто виділити метод кінцевих елементів, в якому вихідна розрахункова область розбивається на дрібні елементи. Для розрахунків методом кінцевих елементів використовується програмний пакет ANSYS.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, акустична емісія, електротермопружна задача.

У промисловості та різноманітних обслуговуючих сферах широко використовуються сучасні звукові і ультразвукові контрольно-вимірювальні системи. Серед електроакустичних перетворювачів таких систем п'єзоелектричні використовуються найбільш широко. Залежно від області застосування за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів перетворюються найрізноманітніші сигнали – різні за формою, амплітудою і спектральним складом. Водночас, до п'єзоперетворювачів пред'являються найрізноманітніші вимоги в сенсі як частотного, так і динамічного діапазону.

Як правило, п'єзоелектричні датчики працюють в жорстких умовах експлуатації при високих і низьких температурах, квазістатичних і динамічних тисках, лінійного прискорення, акустичних шумах, механічних і гідравлічних ударах, агресивних і криогенних середовищах. При цьому датчик повинен мати механічну міцність і діяти довше, ніж агрегат, в якому він встановлений, і одночасно – як вимірювальний пристрій повинен володіти необхідними метрологічними характеристиками при впливі всіх дестабілізуючих факторів.

Наприклад, в ультразвукових приладах для дослідження фізичних властивостей матеріалів п'єзоперетворювачі виконують важливі спектрометричні функції. В ультразвукової дефектоскопії та деяких медичних діагностичних приладах ними перетворюються сигнали, що несуть інформацію локаційного характеру. Ультразвукові лінії затримки самі не є вимірювальними пристроями, але оскільки вони використовуються для обробки вимірювальної інформації, і входять в лінії перетворювачі володіють багатьма з відповідних ознак, то їх теж можна віднести до групи вимірювальних. Таким чином, до контрольно-вимірювальних відносяться п'єзоелектричні перетворювачі, що працюють в системах визначення різних характеристик середовищ. Зокрема за параметрами звукових і ультразвукових полів, а також перетворювачі, що використовуються при обробці вимірювальної інформації.

Більшість ультразвукових вимірювальних систем, за винятком фазометричних і інтерферометричних, є широкодіапазонними, отже, до перетворювачів цих систем також пред'являються вимоги широкодіапазонності частотного спектра. Тому найважливішими характеристиками п'єзоперетворювачів при розгляді в лінійному наближенні є передавальні функції або перехідні характеристики. Цими характеристиками визначаються широкополосність і ефективність електромеханічного перетворення в режимі випромінювання і, відповідно, чутливість механоелектричного перетворення в режимі прийому.

При роботі зі слабкими сигналами важливою характеристикою є рівень власних шумів п'єзоелектричних приймачів.

Коефіцієнт корисної дії не є для контрольно-вимірювальних перетворювачів такою першорядною характеристикою, як для випромінювачів, призначених для створення потужних полів. Але це не зменшує важливості узгодження цих перетворювачів з електричною схемою і робочим середовищем, оскільки це значною мірою визначає чутливість і широкополосність. Узгодження ж хвильових акустичних опорів п'єзоелектричних перетворювачів та

досліджуваних середовищ має принципове значення при побудові фазометричних приладів.

Аналізу зазначених характеристик п'єзоелектричних перетворювачів присвячено багато робіт. Але результати більшості з них відомі лише з наукових статей в різних журналах і, з урахуванням великого практичного значення, вимагають деякого узагальнення.

Питання проектування апаратури датчиків для спеціальних умов експлуатації є виключно складними. Є значна кількість публікацій, в яких розглядаються методи проектування п'єзоелектричних датчиків, заснованих, як правило, на одновимірних моделях і обмежуються нормальними умовами. У тих же випадках, коли потрібно забезпечити роботу датчика в заданому діапазоні температури і тиску, рекомендації мають якісний характер, а прийняті технічні рішення часто базуються тільки на досвіді і інтуїції розробника і не є оптимальними, особливо в тих випадках, коли потрібне створення принципово нових виробів. Тому необхідні технічні параметри або взагалі не досягаються, або досягаються за рахунок зниження інформативності або надійності приладів.

Складність аналізу п'єзоелектричних пристроїв, поряд з очевидною просторовою конфігурацією конструкції, обумовлена наступними причинами: їх принципової неоднорідністю, анізотропією властивостей, зв'язністю механічного, електричного і теплового станів.

Більш досконалими є моделі, в яких чутливий елемент п'єзоелектричних датчиків розглядаються в рамках теорії електропружності. У цих випадках використовуються аналітичні або чисельні методи аналізу, кожен з яких має свої переваги і недоліки.

Відомі роботи, в яких розглядалося напружений стан неоднорідних п'єзоелектричних композицій аналітичними методами теорії пружності. Вказані праці можна розділити на 3 групи.

1. Аналіз стану проблеми до першої з них відносяться дослідження тришарових циліндричних пакетів, що включають в якості робочого елемента кварцову мозаїку або монолітний керамічний диск, які розміщені між металевими накладками (перетворювач Ланжевена) [1]. Перетворювачі даного типу використовуються в якості гідроакустичних випромінювачів. Варіювання геометрії металевих накладок дозволяє змінювати в широких межах власну частоту резонатора. Частотні характеристики таких конструкцій детально досліджені як в наближенні складових стрижнів, так і 3-шарових тонких дисків.

Розроблено методи розрахунку частот для перетворювачів довільної довжини (короткі стрижні). Досліджувався також напружений стан перетворювачів Ланжевена [1]. Однак ці моделі не можуть бути застосовані до чутливих елементів п'єзоелектричних датчиків генераторного типу, що працюють на прямому п'єзоелектричного ефекту через відмінності принципів збудження, електричних і механічних граничних умов.

До другої групи належать дослідження перетворювачів для п'єзоелектричних датчиків з коливаннями вигину. Розглянуто різні варіанти конструкцій: дві жорстко пов'язані антипаралельно поляризовані пластини (біморфа) [1], перетворювачі типу біморфа, що містять пасивний шар в центрі у вигляді металевої смуги [2] або клею [3], п'єзокерамічні диски, жорстко пов'язані з мембраною [4- 6], несиметричні біморфи [7] та інші. Детально розглянуті: напружений стан [4], спектри частот [6], функція перетворення тиску в заряд [6, 7], прогин під дією електричної напруги і механічного навантаження [3].

Однак ці моделі непридатні для аналізу напруженого стану чутливого елемента з деформацією розтягу-стиску, які частіше за інших застосовуються в датчиках, призначених для роботи в жорстких експлуатаційних умовах.

До третьої групи відносяться роботи Ю.А. Устинова і його учнів [8-10], в яких розглянуті електропружні задачі для неоднорідних п'єзокерамічних плит. Авторами [9] розроблені методи побудови розв'язку для механічного напруження, зсувів, електричного потенціалу і індукції в плитах з довільним законом зміни пружних і п'єзоелектричних властивостей по товщині і з п'єзоелектричними та металевими шарами, які чергуються. Розв'язок може бути отриманий при довільних граничних умовах у вигляді нескінченних рядів. Однак фізична інтерпретація цих розв'язків практично неможлива.

Узгодження напруженого стану з інформативністю і надійністю п'єзоелектричних перетворювачів як засобів виміральної техніки авторами не проводилася.

У статті [10] досліджувався розподіл механічного напруження при дії осьової сили в п'єзоелементі, розміщеному між сталевими накладками. Розглянуто вплив крайових ефектів і коефіцієнта тертя на межі. Однак рішення отримані для абсолютно жорстких накладок, що не відповідає реальним конструкціям.

Слід зазначити, що в згаданих вище роботах не враховувалися зміни температури. Хоча

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

температурні напруження в кусочно-однорідних плоских і просторових структурах, що складаються з матеріалів, що не володіють п'єзоелектричними властивостями, досліджені досить детально [11-13], для електропружних систем, які, крім загальних рівнянь теорії пружності, підкоряються також законам електродинаміки і п'єзоэффекту [14], такі роботи нечисленні. Квазістатичне завдання термопружності для однорідного анізотропного шару з урахуванням п'єзо- і піроефект розглянута А. С. Космодам'янським та В. Н. Ложкіним [15]. Будь-які кількісні оцінки автори не наводять. Про необхідність урахування зв'язності електричного і пружного станів при розрахунках п'єзоелектричних датчиків єдиної думки немає. Ряд авторів [16, 17] вказують, що цей вплив малий. Як доказ наводяться розрахунки для п'єзоелементів найпростіших форм в нормальних умовах в режимі короткого замикання. Однак в загальному випадку неврахування зв'язності електричного і пружного станів може привести до суттєвих помилок при аналізі характеристик п'єзоелементів [14].

Тому можливість нехтування електричними ефектами при вирішенні термопружної задачі для п'єзоелектричних тіл в загальному випадку не очевидна.

Великого поширення в останні роки отримали чисельні методи аналізу просторового напруженого стану і характеристик різних виробів [18-22].

Найбільш розвинені серед них є метод кінцевих елементів (МСЕ), в якому вихідна розрахункова область розбивається на дрібні елементи. У середині кожного елемента задаються пробні функції в максимально простій формі - зазвичай це поліноми. Точність рішення підвищується за рахунок більш дрібного розбиття розрахункової області зі збереженням тих же пробних функцій.

МСЕ дозволяє аналізувати інженерні конструкції зі складною геометрією. Число публікацій з МСЕ, як в технічній літературі, так і в літературі по чисельному аналізу, надзвичайно велика і продовжує зростати. Випускаються спеціалізовані збірники по застосуванню МСЕ для дослідження характеристик різних конструкцій. Є сайти в Інтернеті з описом деяких типових інженерних задач чисельними методами для автомобілебудування, авіакосмічній галузі, суднобудування і морської техніки, двигунобудування, приладобудування, атомної енергетики, будівництва, електротехніки та електроніки, нафтогазової, хімічної та металургійної промисловості.

Як приклад завдань, досліджених для приладобудування, можна навести такі: власні моди CD-плеєра, еквівалентні деформації в друкованій платі, руйнування пейджерів при падінні, поля швидкостей і температур при вентиляції приладового відсіку, ізотермічні поверхні в околиці мікросхем, вплив технологічних розкидів на характеристики емісійного датчика лінійного прискорення і ін.

До теперішнього часу МСЕ в електропружності розроблений до рівня готових програмних продуктів, і накопичений значний досвід в практиці розрахунків різноманітних п'єзоелектричних пристроїв.

Незважаючи на деякі обмеження на клас розв'язуваних задач, безсумнівним світовим лідером для розрахунків МСЕ є програмний пакет ANSYS [23].

Чисельні моделі п'єзоелектричних пристроїв, наведені в науковій літературі, можна розділити на дві групи: електропружні і електротермопружні.

Як об'єкти дослідження в рамках електропружних завдань можна навести такі: композиційні п'єзокерамічні матеріали; однорідні п'єзоелектричні перетворювачі у вигляді диска, стрижня або балки, з лінзою, яка фокусує, з акустичним або контактним навантаженням; багатопарові п'єзоелектричні випромінювачі; антенні решітки для літотриптера і гідроакустики; хвилеводи з рухомими джерелами і навантаженням; перетворювачі на поверхневих акустичних хвилях; перетворювачі акустичної емісії; акустичні датчики для пошуку протікання; п'єзоелектричний актуатор з контактним навантаженням для оптичного затвора лазерного далекоміра.

У роботах, які присвячені п'єзоелектричним перетворювачам, в основному досліджуються амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) виробів зі складною геометрією при гармонійному і імпульсному збудженні, форми коливань робочої поверхні, а також проводиться оптимізація геометрії по найпростішим функціям мети.

Недоліком цих моделей є те, що в них не розглядається вплив на роботу п'єзоелектричних перетворювачів дестабілізуючих факторів, таких як вібрація, деформація об'єкта, на якому він встановлений, надлишковий тиск і зміна температури, не проводиться оптимізація конструкції з їх урахуванням. Без аналізу впливу дестабілізуючих чинників неможливе повноцінне проектування п'єзоелектричних пристроїв для реальних умов експлуатації.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Електротермопружні задачі розглядаються в роботах [24-28], в яких пропонуються лише загальні підходи до їх вирішення чисельними методами. У цих роботах не досліджуються будь-які конкретні об'єкти або геометричні моделі, не наводяться кількісні оцінки параметрів або їх залежності.

Відзначимо, що в програмному пакеті ANSYS немає кінцевих елементів, що враховують піроефект і всі п'єзоелектричні кінцеві елементи ANSYS (Ref. 8.0) - PLANE13, SOLID5, SOLID98, SOLID223, SOLID226, SOLID227 - не мають пов'язаних термоелектричних властивостей. Тому пряме проведення пов'язаного термопіроелектричного аналізу в ANSYS не представляється можливим. У цій ситуації є два виходи. Або використовувати власні програмні засоби при вирішенні не стаціонарних температурних задач, або, використовуючи пакет ANSYS, розглядати статичні завдання і аналізувати температурні напруження, викликані експериментально вимірними температурами [29].

Слід зазначити, що істотним недоліком МСЕ є неможливість отримання аналітичних залежностей для параметрів досліджуваних об'єктів і безпосередня фізична інтерпретація явищ. Тому МСЕ доцільно поєднувати з традиційними аналітичними рішеннями крайових задач теорії пружності.

Інформаційні джерела

1. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в ультразвуке // В кн.: Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. т.1. Ч.А.М.: Мир, 1966. С. 204-324.
2. Ультразвуковые преобразователи / Под ред. Е. Кичуци. М.: Мир, 1972. 422 с.
3. Кадомцев И.Г., Крамаров О.П., Царюк Л.Б. Влияние клеяющего слоя на работу биморфного пьезоэлемента в статическом режиме // Электронная техника. Сер. IX. Радиокomпоненты. 1966. Вып. 3. С.117-123.
4. Усачев В.В., Шекунова НВ. К исследованию напряженного состояния пьезоэлектрических преобразователей с колебаниями изгиба // Электронная техника. Сер. IX. Радиокomпоненты. 1968. Вып. 3. С. 76-89.
5. Цеханский к.р, Макеев в.п. Способ повышения коэффициента преобразования пьезоакселерометров // В кн.: Вибрационная техника. М.: МДНТП, 1978. С. 151-159.
6. Баженов А.А., Яровиков В.И. Универсальная модель пьезоэлектрических преобразователей механических величин с распределенными параметрами // Измерительная техника. 2007, № 12. С.30-35.
7. Домаркас В., Петраускас А. Колебания ассиметричных биморфных излучателей // Ультразвук: Научн. труды вузов Литовской ССР. 1976. Вып. 8. С. 57-63.
8. Устинов Ю.А. Электроупругость. Некоторые вопросы математического моделирования // Соросовский образовательный журнал. 1996, Ng 9. С. 122-127.
9. Гетман И.П., Устинов Ю.А. К теории неоднородных электроупругих плит // Прикладная механика и математика. 1979. Т. 43. С.923-937.
10. Мадорский В.В., Устинов Ю.А. К оценке неоднородности поля механических напряжений в пьезокерамических дисках // В кн.: Пьезоэлектрические материалы и пьезопреобразователи. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1971. С . 65-80.
11. Мотовиловец И.А. Теплопроводность пластин и тел вращения. Киев: Наукова думка, 1969. 144 с.
12. Микитюк С.А., Колеватов Ю.А., Сентюрин Е.Г Влияние толщины слоев на температурные напряжения в трехслойной пластине // Физико-химическая механика материалов. 1975. Т. 11. № 1. С.79-81.
13. Белейчева Т.Г Термоупругие напряжения в кусочно-однородных структурах // Прикладная механика и техническая физика. 1978, № 5. С. 135.
14. Улитко А.Ф. К теории колебаний пьезокерамических тел // В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. М., 1975. Вып. 15. С. 90-99.
15. Космодамянский А.С., Ложкин В.Н. Квазистатическая задача термоупругости для анизотропного слоя с учетом пьезо- и пироэффектов // Известия АН Арм. ССР. 1975, XXVIII, № 3. С. 29-34.
16. Дунаевский В.П., Санин Е.И., Донсков В.И. Чувствительность пьезоакселерометров к переменным температурам // В кн.: Вибрационная техника. М.: МДНТП, 1978. С. 151-159.
17. Янчич В.В., Санин Е.И. Инженерный расчет монолитных пьезоэлектрических преобразователей // В кн.: Пьезоэлектрические материалы и преобразователи . Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1985. С.52-59.
18. Zienkiewicz O.C. The finite element method: from intuition to generality // Appl. Mech. Rev. 1970, № 23. P. 249-256.
19. Allik H, Hughes T. J. R. Finite element method for piezoelectric vibration // Int. J. Numer. Meth. Eng.

1970, у. 2, № 2. P.151-157.

20. Kagawa Y., Yamabuchi T. A finite element approach to electromechanical problems with an application to energy trapped end // Surface wave devices. JEEE, SU-23, 1976, № 4. P. 263.

21. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов . М.: Мир, 1977. С. 349.

22. ATILA. Finite-element code for piezoelectric and magnetostrictive transducer and actuator modeling. У.5.1.1. User's Manual/Lille Cedex (France): ISEN, 1997.

23. Программы. Решения. www.cadfem.ru 2013.

24. Белоконь А.В., Наседкин А.В. Расчет некоторых типов задач термоэлектроупругости с использованием пакетов ANSYS и ACELAN // Изв. вузов. Сев.- Кавк. Регион // Естеств. науки. 2004. Спецвыпуск. Математика и механика сплошной среды . С. 52-55.

25. Ватульян А.О., Кирютенко А.Ю., Наседкин А.В. Плоские волны и фундаментальные решения в линейной термоэлектроупругости // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т 37, № 5. С.135-142.

26. Белоконь А.В., Наседкин А.В. Колебания термоэлектроупругих тел ограниченных размеров // Современные проблемы механики сплошной среды: Сб. научн. статей. Ростов н/Д: МП «Книга», 1995. С. 31-46.

27. Ватульян А.О., Кирютенко А.Ю., Наседкин А.В. О формулировке граничных интегральных уравнений связанной термоэлектроупругости // Интегродифференциальные операторы и их приложения: Межвуз. сб. науч. Трудов. Ростов н/Д: ДПУ, 1996. С.19-25.

28. Наседкин А.В. Моделирование некоторых типов задач термоэлектроупругости в ANSYS: Сборник трудов четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBL. М., 2004. с. 311-315.

29. Kanayata K. Thermal analysis of piezoelectric transformer // IEEE Ultrasonics Symp. 1988. P. 901-904.

Мороз С.А., к.т.н. Петрук И.В., Петрук О.В.

Луцкий национальный технический университет

К АНАЛИЗУ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В статье проведен анализ методов, используемых для исследования измерительных преобразователей акустической эмиссии. В частности рассмотрены пьезоэлектрические преобразователи, которые превращают самые разные сигналы - по форме, амплитуде и спектральным составом. Установлено, что пьезоэлектрические датчики работают в жестких условиях эксплуатации при высоких и низких температурах, квазистатических и динамических давлениях, линейного ускорения, акустических шумах, механических и гидравлических ударах, агрессивных и криогенных средах. Рассмотрены характеристики пьезопреобразователей и выделены важнейшие при рассмотрении в линейном приближении - передаточные функции или переходные характеристики. Этими характеристиками определяются широкополосность и эффективность электромеханического преобразования в режиме излучения и, соответственно, чувствительность механоэлектрического преобразования в режиме приема. Среди методов, используемых для исследования измерительных преобразователей стоит выделить метод конечных элементов, в котором исходная расчетная область разбивается на мелкие элементы. Для расчетов методом конечных элементов используется программный пакет ANSYS.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, акустическая эмиссия, электротермоупругая задача.

S. Moroz, I. Petruk, O. Petruk

Lutsk National Technical University

TO THE ANALYSIS METHODS OF THE STUDY THE MEASUREMENT ACCUMULATIVE EMISSION TRANSFORMERS

The article analyzes the methods used to study the measuring transducers of acoustic emission. Piezoelectric transducers are considered which convert signals of different form, amplitude and spectral composition. Found that piezoelectric sensors operating in harsh conditions: high and low temperature, quasi-static and dynamic pressure, linear acceleration, acoustic noise, mechanical and hydraulic shocks, aggressive and cryogenic environments. Selection of characteristics when considering in a linear approximation. The most important characteristics are transfer functions or transient characteristics. These characteristics are defined by the broadness and efficiency of the electromechanical conversion mode exposure and sensitivity mechanical-electrical transformation in receive mode. Among the methods used for the study measuring transducers emit finite element method, where the original settlement area is divided into small elements. For calculations using the finite element method, ANSYS software package is used.

Key words: piezoelectric converter, acoustic emission, electrothermolar problem.