

УДК 534.134

Н.В.Богданова, канд.техн.наук, Т.Н. Желяскова

## Використання товстих п'єзоелементів для розширення смуги пропускання медичних ультразвукових ехоскопів

Розглянуто можливість використання різних типів нерезонансно-збуджуваних п'єзоелементів для розширення частотної смуги пропускання п'єзоперетворювачів, що використовуються у приладах медичної ультразвукової діагностики. Представлено переваги використання нерівномірно-поляризованих та поверхнево-збуджуваних товстих п'єзоелементів у якості широкосмугових аперіодичних перетворювачів ультразвукових коливань.

The possibility of using various non-resonant-excitatory piezoelements to extend the frequency bandwidth acoustical transducers used in medical ultrasound devices is considered. Preferences of unevenly-polarized and surface-excitatory thick piezoelements as broadband aperiodic transducers of ultrasonic fluctuations is presented.

**Ключові слова:** п'єзоелемент, ширина частотної смуги пропускання, акустичний імпульс, п'єзоперетворювач.

### Вступ

Необхідність у розробці широкосмугових ультразвукових перетворювачів пов'язана, перед усім, з появою ультразвукових ехоскопів, які охоплюють половину чи весь робочий діапазон одночастотних перетворювачів: від 2,5 до 14МГц. Такі ехоскопи мають можливість проведення діагностичної процедури без зміни перетворювача [1].

Крім того, ширина робочої смуги частот п'єзоперетворювача є однією з найважливіших його характеристик, оскільки чим ширша ця смуга, тим кращі основні показники апаратури, наприклад, вища чутливість і розподільна здатність медичних ультразвукових (УЗ) приладів, ширший діапазон і нижча похибка вимірювання параметрів біологічного об'єкту.

Розширення смуги пропускання дає можливість випромінювати у тіло людини акустичні сигнали необхідної форми, а також приймати УЗ імпульси після взаємодії з об'єктом дослідження без спотворення їх форми (частотного спектра),

що підвищує надійність результатів вимірювання.

Яскравою ілюстрацією того, що дає розширення смуги частот п'єзоперетворювача, може бути одержання, за допомогою сканера VFX-13-5 Multi-DTM фірми Siemens зі смугою 5-13 МГц і двовимірним фокусуванням, зображення каналу хребта, можливість чого раніше навіть не обговорювалася.

Проблемі розширення смуги пропускання п'єзоперетворювачів було присвячено роботи багатьох дослідників і в результаті сформувалися три основні групи способів створення широкосмугових п'єзоперетворювачів [2-6].

1. Розширення смуги пропускання при використанні звичайних півхвильових п'єзоелементів шляхом їх механічного демпфування, оптимального акустичного погодження їх з середовищем (в яке вони випромінюють), електричного демпфування, застосування корегуючих R, L, C-ланцюгів тощо.

2. Застосування спеціальних електронних схем збудження півхвильових п'єзоелементів та схем увімкнення їх у режимі прийому УЗ коливань.

3. Застосування п'єзоелементів спеціальної форми, спеціального складу п'єзокераміки і спеціальної технології обробки п'єзоелементів; використання нерезонансно-збуджуваних («товстих») п'єзоелементів.

П'єзоперетворювачі третьої групи до сих пір у якості медичних не використовувалися. Розглянемо таку можливість у даній роботі.

### Товсті п'єзоперетворювачі

Вивчення перехідних та імпульсних характеристик п'єзоелементів, як пристроїв із розподіленими параметрами, призвело до появи так званих товстих п'єзоелементів, які відкривають нові можливості підвищення широкосмуговості перетворювачів. Робота такого перетворювача базується на тому, що акустичні сигнали виникають на поверхнях, що містять електроди [4].

Якщо п'єзоелемент 1 (рис.1) товщиною  $d$  збуджується коротким електричним імпульсом тривалістю  $\tau_{\text{імп}} \ll d/c$  ( $c$  – швидкість розпо-

всюдження УЗ коливаль), то він буде випромінювати послідовність таких же коротких різнополярних акустичних імпульсів, що слідує через інтервал часу  $d/c$ . Зазначимо, що перший УЗ імпульс, що випромінюється у навантаження п'єзоелементом, з огляду на лінійність п'єзоефекту, повністю повторює збуджуючий електричний імпульс за формою та тривалістю. Всі решта УЗ імпульси будуть спотворені, у зв'язку з частотнозалежним затуханням у процесі їх розповсюдження по об'єму п'єзоелемента. Аналогічна картина має місце при прийомі п'єзоелементом короткого акустичного імпульсу ( $\tau_{\text{імп}} \ll d/c$ ), при цьому електричний сигнал, що знімається з п'єзоелемента, є послідовність таких же коротких різнополярних електричних імпульсів, що слідує через інтервал часу  $d/c$ .

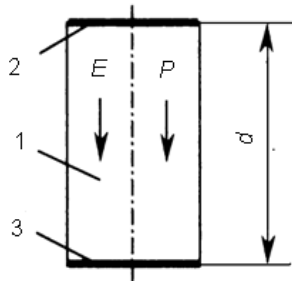


Рис. 1. Товстий п'єзоперетворювач товщиною  $d$

П'єзоелементи, що працюють у такому режимі, називають товстими, оскільки час розповсюдження УЗ імпульсу по п'єзоелементу (тобто час  $d/c$ ) багато більше тривалості імпульсу  $\tau_{\text{імп}}$ .

За допомогою товстих п'єзоперетворювачів можна випромінювати акустичні імпульси нано- та пікосекундної тривалості. Швидкодія товстих п'єзоперетворювачів принципово обмежується лише часом встановлення іонної поляризації в п'єзокераміці, який за оцінкою різних авторів [2, 6] знаходиться в межах 10-10 – 10-13 с. На практиці мінімальна тривалість акустичних імпульсів, випромінюваних товстими п'єзоперетворювачами, складає одиниці наносекунд і обмежується технічними можливостями створення електронних схем генераторів наносекундної тривалості та чистотою обробки випромінюючої поверхні п'єзоелемента. Для отримання більш коротких акустичних імпульсів необхідно мати п'єзоелемент з оптично чистою випромінюючою поверхнею.

При роботі в режимі прийому з електродів товстих п'єзоперетворювачів можна знімати електричні сигнали, форма та тривалість яких з високою точністю повторюють форму та

тривалість акустичних імпульсів, які приймаються. Під дією короткого однополярного акустичного імпульсу на електрично навантажений товстий п'єзоелемент на електродах з'являється різниця потенціалів, яка нагадує одиничний ступінчатий імпульс. Це пояснюється тим, що вихідна різниця потенціалів на електрично навантаженому товстому п'єзоелементі в режимі прийому є інтеграл по часу від вхідного імпульсу акустичного тиску. Повна різниця потенціалів, що виникає на електродах товстого п'єзоелемента в результаті впливу на нього короткого однополярного акустичного імпульсу і багаторазових відбиттів останнього в об'ємі п'єзоелемента, становить функцію типу меандра, продиференціювавши яку, можна отримати імпульси напруги або струму, що повторюють по формі акустичний імпульс, який приймає п'єзоелемент.

Основним недоліком звичайних товстих п'єзоелементів є те, що з ними не можливо отримати одиночні акустичні імпульси, оскільки у відповідь на одиночний електричний імпульс вони завжди відкликаються періодичною послідовністю акустичних імпульсів. Ці обставини обмежують максимальні глибини сканування об'єкту дослідження.

Проте, в [2] сформульовані дві основні умови, за яких принципово можливо створення широкосмугового аперіодичного п'єзоперетворювача повздожніх УЗ хвиль. По-перше, у об'ємі п'єзоелемента повинен бути лише один переріз (зокрема він може співпадати з його поверхнею), у цьому перерізі відбувається різка зміна або напруженості збуджуючого електричного поля, або значення п'єзомодуля  $d_{33}$ , або і те і інше одночасно. По-друге, п'єзоелемент повинен мати такі форми або розміри, які унеможливають виникнення у ньому стоячих хвиль, що генеруються у його робочому перерізі або на його робочій поверхні.

Ці два принципи забезпечують широкосмуговість та аперіодичність п'єзоперетворювача в режимах випромінювання та прийому. Але окрім них існує ще один принцип, який необхідно враховувати в режимі прийому. Тільки імпульси вихідного електричного току (а не напруги), повторюють по формі і тривалості імпульси акустичного тиску, що діють на перетворювач. Відтак, при роботі з широкосмуговим п'єзоприймачем необхідно використовувати підсилювач току з малим вхідним опором. Такий підсилювач практично забезпечує режим короткого замикання перетворювача при прийомі УЗ імпульсів, у результаті, з перетворювача знімаються імпульси току, що повторю-

ють по формі акустичні сигнали які надходять, у той час як імпульси електричної напруги відповідають інтегралу по часу від імпульсів УЗ тиску [4].

Під час роботи п'єзоелемента в режимах випромінювання і прийому електромеханічне перетворення відбувається переважно у тонкому шарі п'єзоречовини. Об'єм п'єзоелемента за цих умов, значною мірою пасивний і є хвилеводом – середовищем, в якому розповсюджуються УЗ хвилі.

### Нерівномірно поляризовані товсті п'єзоперетворювачі

Розглянемо нерівномірно поляризовані товсті п'єзоперетворювачі (НПТП) які відносять [2,3] до ширококутових аперіодичних перетворювачів УЗ коливань. НПТП відрізняються від звичайних товстих п'єзоперетворювачів тим, що рівень поляризації плавно знижується у їх об'ємі від максимального значення біля поверхні, яка випромінює в корисне акустичне навантаження, до нуля біля протилежної поверхні.

Електромеханічне перетворення в них відбувається переважно на одній поверхні п'єзоелемента. Крім того, для запобігання багаторазового відбиття УЗ хвиль, що збуджуються біля випромінювальної поверхні, до протилежної поверхні НПТП приєднується матеріал (у формі акустичної пастки, наприклад, конуса), що має характеристичний імпеданс близький до імпедансу п'єзоелемента. Певна форма приєднуваного матеріалу забезпечує поглинання і розсіювання у вигляді тепла тієї частини енергії УЗ хвиль, що виникли на випромінюючій поверхні і розповсюджується всередину об'єму НПТП та без перешкоди (без відбиття у протилежній поверхні) проходить в акустичну пастку.

Нерівномірна поляризація в НПТП досягається частковою деполяризацією стандартних рівномірно поляризованих п'єзоелементів у результаті короткочасного нагрівання частини їх об'єму до температури, яка перевищує верхню точку Кюрі п'єзокераміки.

Важливою особливістю НПТП є те, що їх ширококутовість досягається у випадку збереження можливості збуджувати ці п'єзоперетворювачі однорідним електричним полем. Завдяки цьому НПТП генерують у безпосередній близькості від своєї випромінюючої поверхні синфазні УЗ хвилі з рівномірним розподілом акустичного тиску по їх фронті.

Для УЗ контролю цікавим є НПТП з твердотільною ультразвуковою лінією затримки (УЛЗ) 1 (рис. 2, а) між передньою поверхнею п'єзоелемента і досліджуванним середовищем, в яке він випромінює УЗ хвилі.

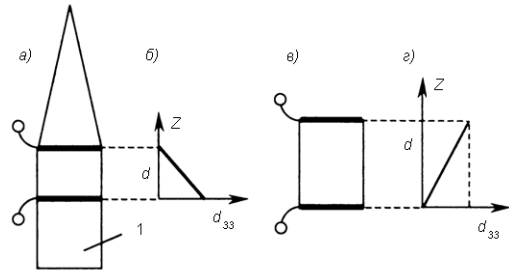


Рис. 2. Різні типи НПТП:

а – НПТП з УЛЗ (1); б – графік зміни у ньому ступеня поляризації; в – НПТП в якому УЛЗ є тіло п'єзоелемента; г – графік зміни у ньому ступеня поляризації.

Конструкція НПТП, що зображена на рис. 2, а, значно складніша за конструкцію на рис. 2, в. Проте друга конструкція, де УЛЗ є саме тіло п'єзоелемента, яке поляризовано так, як показано на рис. 2, г, практично придатна лише у тих випадках, коли потрібен невеликий (1 – 2 мкс) час затримки. Це пояснюється тим, що для збільшення часу затримки УЗ хвиль, що розповсюджуються по об'єму п'єзоелемента, необхідно збільшити товщину п'єзоелемента, а це призводить до зменшення коефіцієнту електромеханічного перетворення.

Один з варіантів [3] монолітного НПТП, що вигідно відрізняється від попередніх відсутністю деполяризованих ділянок, показано на рис. 3. Конструкція цього перетворювача представлена у вигляді монолітного блоку із п'єзокераміки. Його форма така, що навпроти випаленого срібного електрода 1, що розміщений на його передній (випромінюючій у корисне навантаження) поверхні, є акустична пастка 3 у вигляді конуса. Другий електрод 2 розміщено на тильній (не випромінюючій у корисне навантаження) поверхні.

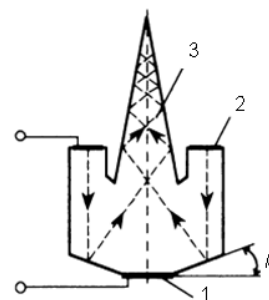


Рис. 3. Монолітний п'єзоперетворювач без деполяризації

За умови збудження перетворювача по електродах 1 та 2 (рис. 3), біля них виникають повздовжні УЗ хвилі. Частина енергії УЗ хвиль, що виникла біля електрода 1, йде в корисне акустичне навантаження перетворювача, інша частина енергії (яка розповсюджується всередину перетворювача), відбившись від похилого краю навколо електрода 1, йде в акустичну пастку, не потрапляючи таким чином на передню поверхню п'єзоелемента.

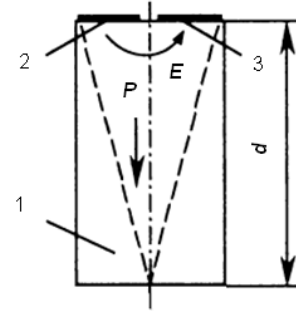


Рис. 4. Поверхнево збуджуваний товстий п'єзоперетворювач.

### Поверхнево збуджувані товсті п'єзоперетворювачі

До широкосмугових аперіодичних УЗ перетворювачів відносять [2] також п'єзоелектричні перетворювачі, у яких п'єзоелемент збуджується неоднорідним електричним полем, створеним, наприклад, компланарними електродами, що розміщуються на одній з його поверхонь, у якій п'єзоелектричні властивості зазнають розриву. В такому різновиді товстих п'єзоперетворювачів УЗ хвилі у режимі випромінювання збуджуються переважно біля однієї поверхні. З цієї ж поверхні за допомогою розміщених на ній електродів знімаються електричні заряди максимальної величини, що генеруються на ній у режимі прийому УЗ хвиль. Цей тип перетворювачів називають поверхнево збуджуваними товстими п'єзоперетворювачами (ПЗТП).

Розглянемо докладніше роботу ПЗТП у порівнянні зі звичайним товстим п'єзоперетворювачем таких же розмірів. Якщо товстий п'єзоперетворювач (рис. 1) збуджувати по електродах 2, 3 коротким електричним імпульсом, то на кожній з його поверхонь виникнуть короткі УЗ імпульси. Вони будуть розповсюджуватися в об'ємі між основами п'єзоперетворювача по черзі відбиваючись від них і поступово згасаючи по амплітуді.

Якщо електроди розташувати на одній поверхні п'єзоелемента, як показано на рис.4, і подати короткий електричний імпульс на пару електродів, то зникнуть непарні імпульси і залишаться лише парні, тобто ті, які виникли на верхній основі п'єзоперетворювача, що є найпростішим варіантом ПЗТП.

Коли поверхня ПЗТП яка містить електроди контактує з повітрям, а протилежна – з досліджуваним об'єктом, то п'єзоелемент 1 (рис. 4) є ніщо інше, як УЛЗ між «нескінченно тонким» п'єзоперетворювачем та об'єктом дослідження.

### Висновки

Використання нерезонансно-збуджувальних п'єзоелементів дозволяє значно розширити частотну смугу пропускання п'єзоперетворювачів. Оскільки нерівномірно поляризовані та поверхнево збуджувані товсті п'єзоперетворювачі є аперіодичними з широкою смугою робочих частот, а отже, можуть випромінювати короткі УЗ імпульси, доцільно використовувати їх в УЗ імпульсній апаратурі, зокрема, в медичній діагностиці.

### Література

1. *Найда С.А., Коржик А.В., Желяскова Т.Н.* Статистические методы оптимизации параметров широкополосного пьезопреобразователя для медицинской диагностики // Системы обработки информации. – 2012. – 2(100). – С. 241-245.
2. *Королев М.В., Карпельсон А.Е.* Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. – М.: Машиностроение, 1982. – 157 с.
3. *Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В.* Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
4. *Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля.* Под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
5. *Домаркас В.И.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В.И. Домаркас, Р.И.-Ю. Кажис – Вильнюс: Минтис, 1975. – 255 с.
6. *Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б.* Пьезоэлектрическая керамика. – М.: Сов.радио, 1971. – 199 с.