

Аналітичне дослідження впливу конструкції ультразвукового пакетного п'єзокерамічного перетворювача на амплітуду коливань

А. В. Мовчанюк • О. Ф. Луговський • В. П. Фесіч

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 05 September 2019 / Accepted: 24 November 2019

Анотація. В роботі розглянуті питання, пов'язані з розрахунком геометричних розмірів пакетних перетворювачів на основі п'єзокераміки. Отримані співвідношення для розрахунку геометричних розмірів пакету в залежності від робочої частоти, матеріалу накладок та товщини пакету п'єзокераміки. Отримано аналітичний вираз для розрахунку амплітуди коливальної швидкості на робочій поверхні перетворювача в режимі холостого ходу. Проведено порівняльний аналіз розрахунків резонансної частоти для отриманих аналітичних виразів та результатів, отриманих розрахунками методом кінцевих елементів. Показано, що розбіжність результатів не перевищує 10%. В результаті аналітичного дослідження показано, що асиметричний перетворювач дає більшу амплітуду коливань у порівнянні з симетричним незалежно від матеріалу накладок. Збільшення амплітуди коливальної швидкості можна досягти збільшенням товщини пакету або виконанням робочої накладки з матеріалу, що має менший хвильовий опір.

Ключові слова: ультразвуковий перетворювач, п'єзокераміка, пакетний п'єзоперетворювач, резонансна частота, амплітуда коливань

Вступ

Ультразвукові коливання великої інтенсивності знаходять широке використання в різноманітних технологічних процесах [1], що пов'язані з обробкою рідин [2], обробкою металів та сплавів [3] та ін. При цьому основним аспектом, що впливає на ефективність технологічного впливу є інтенсивність ультразвукових коливань, що, в свою чергу, пов'язана з амплітудою механічних коливань на робочій поверхні перетворювача [4–6]. На сьогоднішній день основним джерелом отримання механічних коливань ультразвукового діапазону частот є електромеханічні перетворювачі на основі п'єзокераміки [7]. В зв'язку з тим, що п'єзокераміка має низьку міцність на розтягування, перетворювачі виконують складеними у вигляді пакету, що містить п'єзоелементи, доповнені частотознижуючими накладками та стягнуті болтом чи шпилькою в єдину конструкцію [8]. Для підвищення амплітуди коливань до перетворювача під'єднують трансформатор коливальної швидкості, який одночасно узгоджує механічний імпеданс перетворювача з навантаженням [9]. Зазвичай пакетний п'єзоперетворювач складається з парної кількості п'єзоелементів, а частотознижуючі накладки можуть виконуватись з різних конструкційних матеріалів (рис. 1). При розрахунку та конструюванні такого перетворювача треба враховувати багато факторів, починаючи від характеристик матеріалів накладок та закінчуючи обранням необхідної кількості п'єзоелементів в пакеті. Для цього необхідно отримати співвідношення, що пов'язують величину електричної напруги, що підведена до електродів п'єзоелементів та амплітуду коливальної швидкості (або амплітуду механічних коливань) на робочій поверхні перетворювача.

Метою дослідження є отримання виразу для розрахунку амплітуди коливальної швидкості на робочій поверхні пакетного п'єзоперетворювача та дослідження впливу конструкційних матеріалів, кількості п'єзоелементів та конструкції пакетного перетворювача на амплітуду коливальної швидкості на робочій поверхні перетворювача.

Основна частина

Для моделювання поведінки ультразвукових перетворювачів зручно застосовувати систему електромеханічних аналогій [10]. При цьому елементи перетворювача можуть бути представлені

еквівалентними відрізками електричних довгих ліній [11]. Відрізки довгих ліній можуть бути представлені у вигляді еквівалентних чотирьохполосників, які в свою чергу можуть розглядатися як еквівалентні Т-подібні схеми, на входи яких діють сили та швидкості (рис. 2). Тому для тильної та робочої накладок перетворювача можуть бути використані схеми заміщення, отримані в [11].

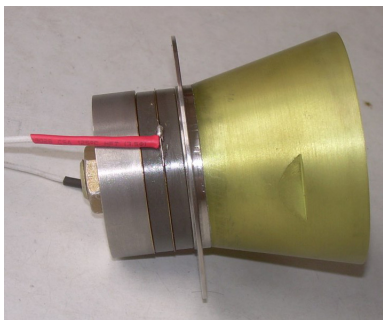


Рис. 1. Складений п'єзокерамічний перетворювач з накладками, що понижують частоту

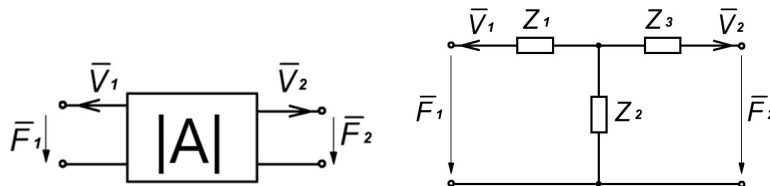


Рис. 2. Еквівалентний чотирьохполосник та його Т-подібна схема заміщення

П'єзоелемент при коливаннях по товщині можна представити у вигляді Т-подібної схеми заміщення з електромеханічним трансформатором (рис. 3а) з коефіцієнтом трансформації:

$$N = \frac{d_{33} \cdot S_K}{l_K} \cdot Y_{33K}^E,$$

де d_{33} – п'єзоелектричний модуль, l_K – товщина п'єзоелемента, S_K – площа п'єзоелемента, Y_{33K}^E – модуль Юнга.

Введемо поняття кутової довжини п'єзоелемента, що дорівнює

$$\alpha_K = \frac{\omega}{c_K} \cdot l_K,$$

де ω – кутова частота, $c_K = \sqrt{\frac{Y_{K33}^E}{\rho_K}}$ – швидкість звуку в матеріалі п'єзокераміки, ρ_K – щільність п'єзокераміки.

Хвильовий опір п'єзокераміки складе

$$Z_K = \rho_K \cdot c_K \cdot S_K.$$

Перерахуємо джерело електричної напруги через електромеханічний трансформатор. В результаті схема (рис. 3 а) дещо спроститься (рис. 3 б).

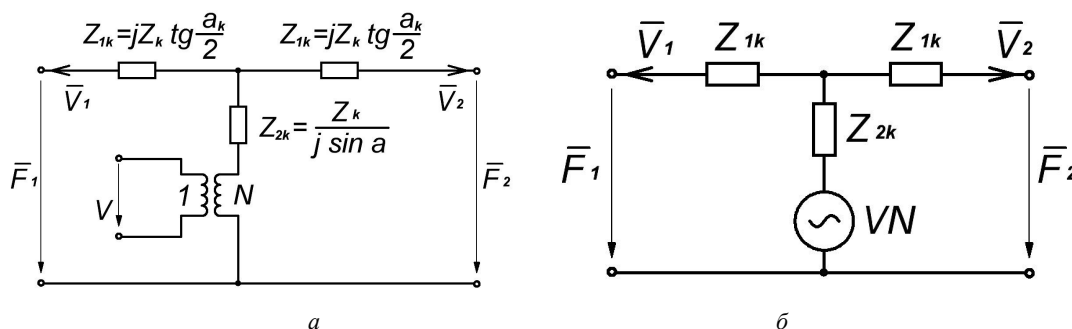


Рис. 3. Т – подібна схема заміщення п'єзоелемента з електромеханічним трансформатором до (а) та після перетворення

Схему заміщення п'єзоелемента з накладками, що понижують частоту, отримаємо для режиму холостого ходу. Накладки, що понижують частоту (тильна та робоча), можуть бути замінені еквівалентними імпедансами, що під'єднані до відповідних електричних входів еквівалентної схеми п'єзоелемента (рис. 4). Тильна накладка під'єднана до лівої групи входів, а робоча – до правої.

На холостому ході імпеданс тильної накладки можна виразити як:

$$Z_{TH} = j \cdot Z_T \cdot \operatorname{tg}(\alpha_T), \quad (1)$$

де $Z_T = \rho_T \cdot c_T \cdot S_T$; $\alpha_T = (\omega/c_T) \cdot l_T$, – відповідні параметри матеріалу та геометрії тильної накладки.

На холостому ході імпеданс робочої накладки можна виразити як:

$$Z_{PH} = j \cdot Z_P \cdot \operatorname{tg}(\alpha_P), \quad (2)$$

де $Z_P = \rho_P \cdot c_P \cdot S_P$; $\alpha_P = (\omega/c_P) \cdot l_P$, – відповідні параметри матеріалу та геометрії робочої накладки.

Вхідний імпеданс схеми зі сторони електричного джерела з урахуванням (1) і (2) складе:

$$Z_{BX} = Z_{2K} + \frac{(Z_{1K} + Z_{TH}) \cdot (Z_{1K} + Z_{PH})}{(Z_{1K} + Z_{TH}) + (Z_{1K} + Z_{PH})}$$

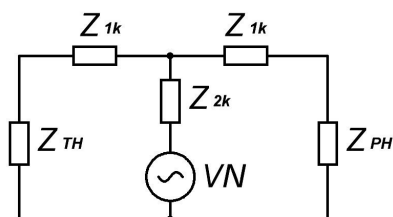


Рис. 4. Схема заміщення пакетного перетворювача з накладками, що понижують частоту

На частоті механічного резонансу уявну частину вхідного імпедансу можна прирівняти нулю (а без врахування втрат весь імпеданс):

$$Z_{2K} + \frac{(Z_{1K} + Z_{TH}) \cdot (Z_{1K} + Z_{PH})}{(Z_{1K} + Z_{TH}) + (Z_{1K} + Z_{PH})} = 0.$$

В результаті можна отримати співвідношення для імпедансів накладок на частоті механічного резонансу:

$$Z_{TH} = - \left[Z_{1K} + \frac{Z_{2K} \cdot (Z_{1K} + Z_{PH})}{Z_{2K} + Z_{1K} + Z_{PH}} \right];$$

$$Z_{PH} = - \left[Z_{1K} + \frac{Z_{2K} \cdot (Z_{1K} + Z_{TH})}{Z_{2K} + Z_{1K} + Z_{TH}} \right].$$

Отримані вирази дозволяють розрахувати кутову довжину однієї з накладок по заданим кутовим довжинам п'єзоелемента та другої накладки:

$$\alpha_T = \arctan \left[\frac{Z_K}{Z_T} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right) + \frac{Z_P}{Z_K} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_P)}{\sin(\alpha_K) \cdot \left[\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right) + \frac{Z_P}{Z_K} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_P) \right] - 1} - \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right) \right) \right]; \quad (3)$$

$$\alpha_P = \arctan \left[\frac{Z_K}{Z_P} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right) + \frac{Z_T}{Z_K} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_T)}{\sin(\alpha_K) \cdot \left[\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right) + \frac{Z_T}{Z_K} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_T) \right] - 1} - \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_K}{2}\right) \right) \right].$$

При розрахунку кутової довжини накладки треба враховувати, що довжина накладки може змінюватись від 0 до максимального значення, коли кутова довжина другої накладки дорівнює 0:

$$\alpha_{T\max} = \arctan \left[- \frac{Z_K}{Z_T} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_K) \right];$$

$$\alpha_{P\max} = \arctan \left[- \frac{Z_K}{Z_P} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_K) \right].$$

Отримані співвідношення дозволяють розрахувати довжину тильної або робочої накладки при відомій частоті, товщині п'єзоелемента та заданому розмірі однієї з накладок.

Виведемо розрахункові співвідношення для розрахунку амплітуди коливальної швидкості на робочій площині робочої накладки для режиму холостого ходу:

$$V_P = \frac{V_2}{\cos(\alpha_P)}.$$

Проведемо заміну змінних для п'єзоелемента, а саме $\alpha_K = \gamma_K \cdot l_K$. При цьому тригонометричні функції змінюються на гіперболічні:

$$Z_{1K} = \frac{Z_K}{\text{sh}(\gamma_K \cdot l_K)}; \quad Z_{2K} = Z_K \cdot \text{th}\left(\frac{\gamma_K \cdot l_K}{2}\right),$$

де $\gamma_K \approx \frac{0,5 \cdot \omega}{Q_M \cdot c_K} + j \cdot \frac{\omega}{c_K}$ – стала розповсюдження акустичних хвиль в матеріалі п'єзоелемента з врахуванням втрат, Q_M – механічна добротність матеріалу п'єзокераміки.

В результаті отримуємо:

$$\gamma_K \cdot l_K = \frac{0,5 \cdot \alpha_K}{Q_M} + j \cdot \alpha_K.$$

Амплітуда коливальної швидкості на робочій площині робочої накладки складе:

$$V_P = \frac{U \cdot N}{\cos(\alpha_P)} \cdot \frac{1}{\frac{Z_K}{\text{sh}(\gamma_K \cdot l_K)} \cdot \left[1 + \frac{Z_{PK}}{j \cdot Z_T \cdot \text{tg}(\alpha_T) + Z_K \cdot \text{th}\left(\frac{\gamma_K \cdot l_K}{2}\right)} \right] + Z_{PK}}; \quad (4)$$

$$Z_{PK} = j \cdot Z_P \cdot \text{tg}(\alpha_P) + Z_K \cdot \text{th}\left(\frac{\gamma_K \cdot l_K}{2}\right).$$

Вхідний імпеданс перетворювача, перерахований до електричних контактів, можна представити як:

$$Z_{BX} = \frac{1}{N^2} \cdot \left[\frac{\frac{Z_K}{\text{sh}(\gamma_K \cdot l_K)} + \dots}{\left(Z_K \cdot \text{th}\left(\frac{\gamma_K \cdot l_K}{2}\right) + j \cdot Z_P \cdot \text{tg}(\alpha_P) \right) \cdot \left(Z_K \cdot \text{th}\left(\frac{\gamma_K \cdot l_K}{2}\right) + j \cdot Z_T \cdot \text{tg}(\alpha_T) \right)} + \dots \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot Z_K \cdot \text{th}\left(\frac{\gamma_K \cdot l_K}{2}\right) + j \cdot Z_P \cdot \text{tg}(\alpha_P) + j \cdot Z_T \cdot \text{tg}(\alpha_T)}$$

З врахуванням статичної ємності п'єзоелемента C_0 , отримуємо:

$$Z_{BX} = \frac{Z_{BX}}{1 + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot Z_{BX}}.$$

Отримані вирази дозволяють розрахувати геометричні розміри перетворювача, обрахувати величину навантаження для ультразвукового генератора та оцінити величину амплітуди коливальної швидкості на робочому торці перетворювача.

В ультразвукових перетворювачах технологічного призначення найчастіше використовується сегнетожорстка п'єзокераміка складу цирконаттитонат свинцю. П'єзокераміка такого складу випускається багатьма фірмами-виробниками. Фактично основна різниця між зразками різних виробників полягає в різних значеннях механічної добротності, що лежить в межах від 500 до 1300. За міжнародною класифікацією вони відносяться до класу NAVY III, наприклад PZT-8, NCE41, APC-841. Найбільш цікавою є кераміка APC-841 фірми American Piezoceramic Company (USA). При достатньо великому п'єзомодулі вона має велику механічну добротність. Для перетворювачів з великою інтенсивністю ультразвуку найбільш доцільним є використання

п'єзоелементів у вигляді шайб типорозміру 50×20×6. Саме для цього типорозміру і буде проводитись подальше моделювання. При цьому будуть розглядатися пакетні перетворювачі з двома та чотирма шайбами в пакеті.

В якості матеріалів для виготовлення накладок, що знижують частоту, найбільше використання знайшли сталеві сплави для тильної накладки, та сталеві сплави, титанові сплави та дюралюміній для робочої накладки. Характеристики матеріалів, що будуть використані для моделювання (табл.1), є осередненими та типовими для більшості конструкційних матеріалів.

Таблиця 1

Характеристики матеріалів для моделювання

Марка матеріалу	аналог USA	щільність, кг/м ³	швидкість звуку, м/с
12X18H9T	AISI321	7700	5200
Д-16Т	2024-T4	2600	5120
BT-6	Grade5 (6Al-4V)	4450	5039

Моделювання доцільно проводити на частоті 22кГц, яка найбільш поширена в технологічному обладнанні.

Дослідимо вплив матеріалу, робочої частоти та кількості п'єзоелементів в пакеті на резонансні розміри. В результаті розрахунків за рівнянням (3) було отримано цілком очікуваний результат (рис. 5 рис. 7): найменшу сумарну довжину має перетворювач з 12X18H9T, а найбільшу – з робочою накладкою зі сплаву Д16Т.

З метою перевірки отриманих результатів було розроблено моделі перетворювачів, власні частоти коливальних яких можна розрахувати методом кінцевих елементів. Результати обрахунків для перетворювача з накладками із 12X18H9T для частоти 22кГц та п'єзокераміки APC-841 50х20х6 (рис. 9), показали, що відносне відхилення частоти власних коливальних склало не більше 10% (рис. 8). Більш детальний аналіз результатів показує, що спостерігається суттєве відхилення фронту хвилі від плоскої форми (рис.9), тому розбіжності результатів між обрахунками та результатами моделювання повинні мати місце. З іншого боку, підвищення точності обрахунків за рахунок розгляду задачі як тривимірної не має особливого сенсу. Параметри матеріалів мають достатньо суттєвий розбіг, що пов'язано з розкидом параметрів технологічного процесу виготовлення металів та сплавів, зміною властивостей після термообробки та ін. Тому можна зробити припущення, що при малих кутових довжинах накладок, коли їх поперечний розмір співрозмірний з їх довжиною, враховувати поправку Релея на швидкість звуку не доречно.

З аналізу виразу (4) можна зробити висновок, що товщина пакету, вибір матеріалу накладок та розташування п'єзоелементів може впливати на амплітуду коливальної швидкості перетворювача. Результати аналітичних досліджень нормованої амплітуди коливальної швидкості для різних товщин пакетів та матеріалів накладок показують (рис.10–рис.12), що максимуму амплітуди коливальної швидкості відповідає асиметричне виконання перетворювача. Під час проведення обрахунків вважалося, що механічна добротність п'єзокераміки не змінюється.

Проведемо аналіз виразу (4) з урахуванням (3) для оцінки впливу довжин накладок та матеріалу накладок на амплітуду коливальної швидкості. В результаті аналізу графічних залежностей можна зробити висновок, що асиметричний пакетний перетворювач дає більшу амплітуду коливальної швидкості у порівнянні з симетричним не залежно від матеріалу накладок. Використання для робочої накладки матеріалу з малим хвильовим опором дає суттєвий вииграш у випадках, коли довжина робочої накладки співрозмірна з товщиною п'єзокерамічного пакету, а саме, на частоті 22кГц при двох кільцях у пакеті незалежно від їх діаметру (рис.14, рис.15). Для кожного набору матеріалів є найбільш раціональна комбінація розмірів, яка забезпечує найбільшу амплітуду коливальної швидкості. Збільшення товщини пакету призводить до збільшення амплітуди коливальної швидкості на робочому торці.

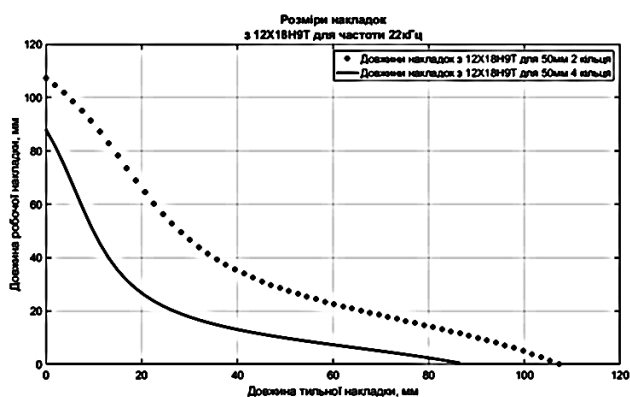


Рис. 5. Розміри накладок перетворювача, що виконані зі сталі 12X18H9T

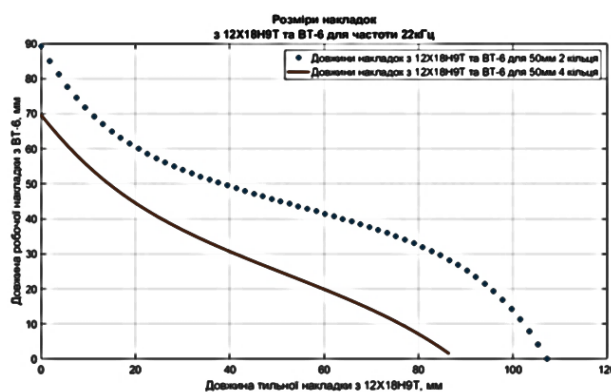


Рис. 6. Розміри накладок перетворювача – тильна накладка 12X18H9T, робоча накладка титановий сплав BT-6

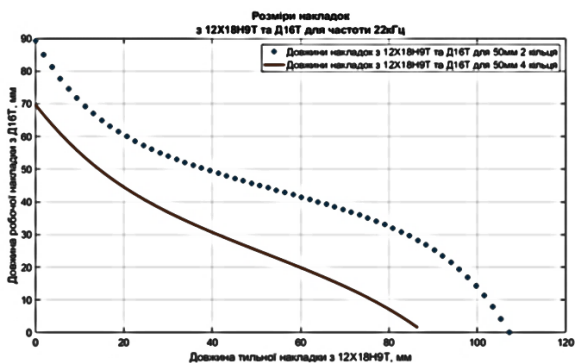


Рис. 7. Розміри накладок перетворювача – тильна накладка 12X18Н9Т, робоча накладка сплав алюмінію Д16Т

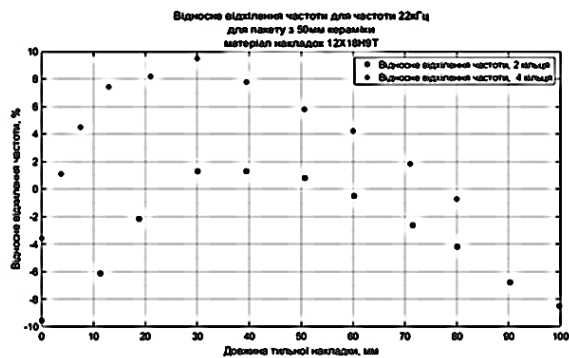
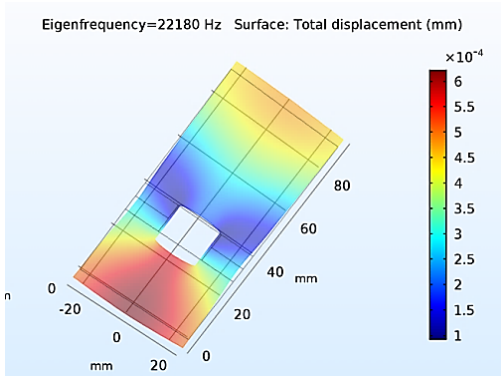
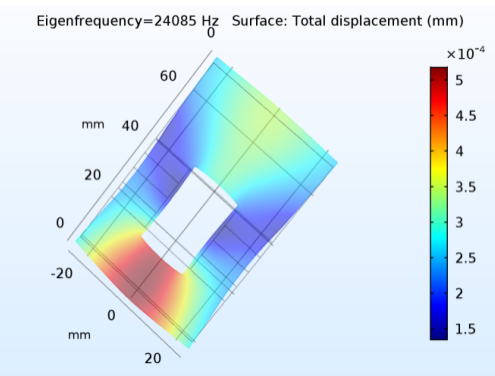


Рис. 8. Відносне відхилення частоти власних коливань пакету від 22ГГц з п'єзокераміки APC-841 з розмірами кільця 50x20x6 мм та накладками з 12X18Н9Т



а



б

Рис. 9. Розподіл амплітуди коливань в перерізі перетворювача з п'єзокераміки APC-841 з розмірами кільця 50x20x6 мм та накладками з 12X18Н9Т на частоті основного резонансу (а – два кільця; б – чотири кільця)

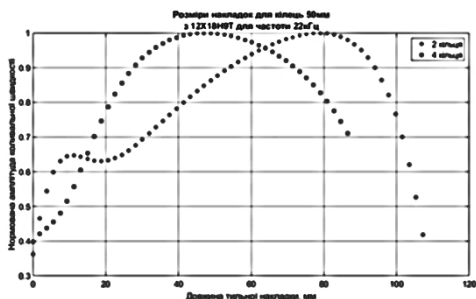


Рис. 10. Залежність нормованої амплітуди коливань від довжини тильної накладки для частоти 22ГГц та пакету з п'єзокераміки APC-841 з розмірами кільця 50x20x6 мм, матеріал накладок 12X18Н9Т

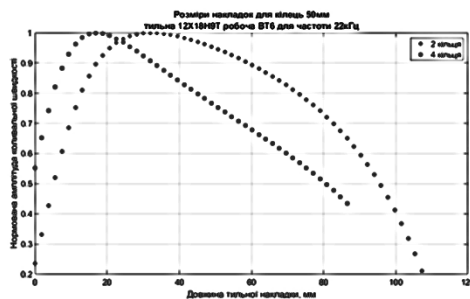


Рис. 11. Залежність нормованої амплітуди коливань від довжини тильної накладки для частоти 22ГГц та пакету з п'єзокераміки APC-841 з розмірами кільця 50x20x6 мм, матеріал тильної накладки 12X18Н9Т, робочої – титан ВТ6

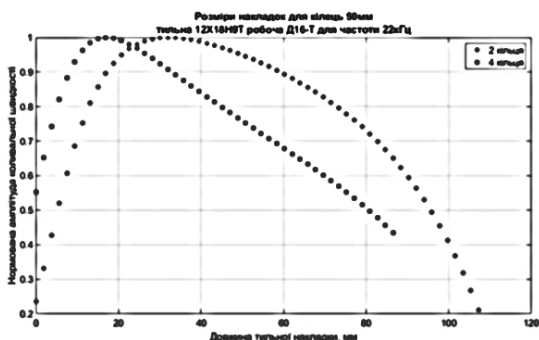


Рис. 12. Залежність нормованої амплітуди коливань від довжини тильної накладки для частоти 22ГГц та пакету з п'єзокераміки APC-841 з розмірами кільця 50x20x6 мм, матеріал тильної накладки 12X18Н9Т, робочої – Д16-Т

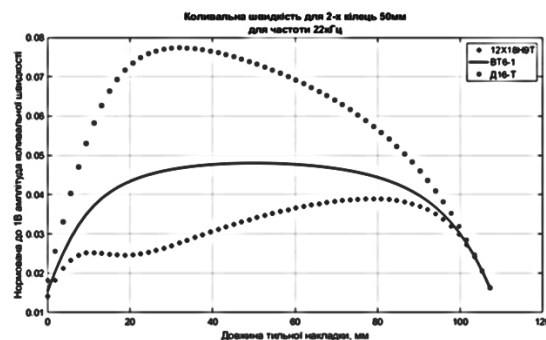


Рис. 13. Залежність нормованої до 1В амплітуди коливної швидкості на частоті 22ГГц при різних матеріалах робочої накладки та пакету з 2-х кільць п'єзокераміки APC-841 з розмірами кільця 50x20x6 мм

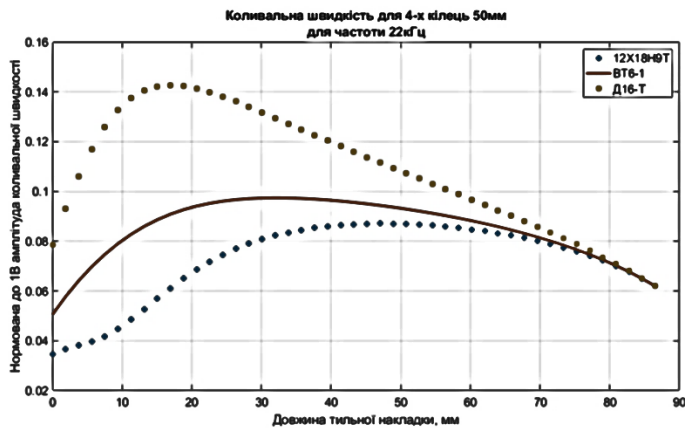


Рис. 14. Залежність нормованої до 1В амплітуди коливальної швидкості на частоті 22кГц при різних матеріалах робочої накладки та пакету з 4-х кілець п'єзокераміки АРС-841 з розмірами кільця 50×20×6 мм

Висновки

В результаті застосування системи електромеханічних аналогій було отримано вирази, що дозволяють обрахувати геометричні параметри пакетного п'єзоперетворювача. Вихідними даними для розрахунків є робоча частота, параметри п'єзокераміки та матеріал накладок. В результаті обрахунків можна отримати довжину однієї з накладок, якщо відома довжина другої. В результаті аналітичного дослідження встановлено, що для обраних діаметрів накладок та п'єзоелементів похибка розрахунків складає не більше 10 %. Розбіжності в розрахунках можна пояснити відхиленням фронту акустичної хвилі від плоскої. Було отримано аналітичні вирази для розрахунку амплітуди коливальної швидкості на робочому торці перетворювача. В результаті аналітичного дослідження встановлено, що асиметричний перетворювач, коли робоча та тильні накладки мають різні кутові довжини, дає більшу амплітуду коливань у порівнянні з симетричним незалежно від матеріалу робочої накладки. Для збільшення амплітуди коливань робочу накладку потрібно виконувати з матеріалу з меншим хвильовим опором або збільшувати товщину пакету п'єзокераміки.

References

1. Gallego-Juárez, J.A. Graff. K.F. Power Ultrasonic. Applications of High-Intensity Ultrasound, Woodhead Publishing, 2015.
2. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 244 с.
3. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Пер. с яп. Л.Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
4. Yang, Guohai, et al. Handbook of ultrasonics and sonochemistry. Springer, Singapore, 2016.
5. Feng H., Barbosa-Cánovas G.V., Weiss J. and dr. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing / Food Engineering Series. – Springer Science+Business Media, 2011. – 665 p.
6. Gao S., Lewis G.D., Ashokkumar M., Hemar Y. "Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: 2. A simple model for the inactivation mechanism", Ultrason. Sonochem. – 2014. – vol. 21, P. 454–460.
7. Arnau A. Riezoelectric transducers and applications, Springer, Berlin, 2008.
8. Radmanović, M., and D. Mančić. "Design and modeling of the power ultrasonic transducers". MPI, Le Locle, Switzerland. 2004.
9. Lin J., Lin S., Xu J. Analysis and experimental validation of longitudinally composite ultrasonic transducers // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2019. – Vol. 145. – no. 1. – P. 263–271.
10. Wei X. and dr. PSpice modeling of a sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in longitudinal vibration // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – no. 10. – C. 2253.
11. Luhovskyi O., Movchanyuk A., Fesich V. To the question about the calculation of the ultrasonic step-up transformer of vibrating speed with the developed radiance surface // Mechanics and Advanced Technologies. – 2019. – Vol. 85. – no. 1. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164346>

Аналитическое исследование влияния конструкции ультразвукового пакетного пьезокерамического преобразователя на амплитуду колебаний

А. В. Мовчанюк, А. Ф. Луговской, В. П. Фесич

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы, связанные с расчетом геометрических размеров пакетных преобразователей на основе пьезокерамики. Получены соотношения для расчета геометрических размеров пакета в зависимости от рабочей частоты, материала накладок и толщины пакета пьезокерамики. Получено аналитическое выражение для расчета

амплитуды колебательной скорости на рабочей поверхности преобразователя в режиме холостого хода. Проведен сравнительный анализ расчетов резонансной частоты для полученных аналитических выражений с расчетами методом конечных элементов. Показано, что расхождение результатов не превышает 10 %. В результате аналитического исследования показано, что асимметричный преобразователь дает большую амплитуду колебаний по сравнению с симметричным, в независимости от материала накладок. Увеличения амплитуды колебательной скорости можно достичь увеличением толщины пакета или выполнением рабочей накладки из материала, имеющего меньший волновое сопротивление.

Ключевые слова: ультразвуковой преобразователь; пьезокерамика; пакетный пьезопреобразователь; резонансная частота; амплитуда колебаний.

Analytical modeling of the influence of the construction of the ultrasonic piezoceramic sandwich type transducer on the amplitude

A. Movchanyuk, O. Luhovskyi, V. Fesich

Abstract. The issues related to the calculation of the sandwich converters geometric dimensions based on piezoceramics are presented in this paper. The equations for the package geometric dimensions are obtained depending on the operating frequency, the material of the pads and the thickness of the piezoceramic package. An analytical expression is obtained to calculate the oscillatory velocity amplitude on the working surface of the transducer in the idle mode. The comparative analysis of the calculated resonance frequency by analytical expressions and the calculated value by finite element method is carried out. It is shown that the discrepancy does not exceed ten percent. As a result of the analytical study, it is shown that the asymmetric transducer gives a greater amplitude of oscillations compared to the symmetric one, independent of the lining material. Increasing the amplitude of the oscillatory velocity can be achieved by increasing the thickness of the packet or by performing a working lining of a material having a lower wave resistance.

Keywords: ultrasonic transducer; piezoceramics; sandwich piezoelectric transducer; resonant frequency; oscillation amplitude.

References

- Gallego-Juárez, J.A. and Graff, K.F. (2015), *Moshchnost' Ul'trazvukovaya. Primeneniya ul'trazvuka vysokoy intensivnosti* [Power Ultrasonic. Applications of High-Intensity Ultrasound], Woodhead Publishing.
- Lugovskoy, A.F. and Chukhrayev, N.V. (2007), *Ul'trazvukovaya kavitatsiya v sovremennykh tekhnologiyakh* [Ultrasonic cavitation in modern technology], Vidavnichno – poligrafichniy tsentr “Kiyevskiy universitet”, Kiev, Ukraine.
- Kumabe, D. (1985), *Vibratsionnoye rezaniye* [Vibration cutting], Translated by Japanese, Maslennikova, L., in: Portnova, I.I. and Belova, V.V. (ed), *Mashinostroyeniye*, Moscow, Russia.
- Yang, Guohai, and dr. (2016), *Spravochnik po ul'trazvuku i sonokhimii* [Handbook of ultrasonics and sonochemistry], Springer, Singapore, Asia.
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G.V. and Weiss, J. and dr. (2011), “Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing”, *Food Engineering Series. Springer Science+Business Media*.
- Gao, S., Lewis, G.D., Ashokkumar, M. and Hemar, Y. (2014), “Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: 2. A simple model for the inactivation mechanism,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 21, pp. 454–460.
- Arnau, A. (2008), *Riezolelectric transducers and applications*, Springer, Berlin.
- Radmanović, M., and D. Mančić. (2004), “Design and modeling of the power ultrasonic transducers”, *MPI, Le Locle, Switzerland*.
- Lin J., Lin S., Xu J. (2019), “Analysis and experimental validation of longitudinally composite ultrasonic transducers”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 145. no. 1. pp. 263–271.
- Wei X. et al. (2017), “PSPICE modeling of a sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in longitudinal vibration Sensors”, vol. 17. no. 10. pp. 2253.
- Luhovskyi, O., Movchanyuk, A., Fesich, V. (2019), “To the question about the calculation of the ultrasonic step-up transformer of vibrating speed with the developed radiance surface”, *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 85. no. 1. doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164346>