

УДК 681.586

БАЗІЛО К.В., СОТУЛА Ж.В., ТКАЧЕНКО О.С.

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

**Анотація.** Досліджено вплив додаткових індуктивності та ємності на амплітудно-частотні характеристики п'єзоелектричних перетворювачів. Визначено, що при різних варіантах підключення ємності разом з індуктивністю на вхід п'єзоелектричного перетворювача його амплітудно-частотна характеристика змінюється. Одержана експериментальна залежність амплітудно-частотної характеристики від зміни додаткової ємності.

**Ключові слова:** додаткові елементи, амплітудно-частотна характеристика, п'єзоелектричний перетворювач.

**Аннотация.** Исследовано влияние дополнительных индуктивности и емкости на амплитудно-частотные характеристики пьезоэлектрических преобразователей. Определено, что при различных вариантах подключения емкости вместе с индуктивностью на вход пьезоэлектрического преобразователя его амплитудно-частотная характеристика изменяется. Получена экспериментальная зависимость амплитудно-частотной характеристики от изменения дополнительной емкости.

**Ключевые слова:** дополнительные элементы, амплитудно-частотная характеристика, пьезоэлектрический преобразователь.

**Abstract.** The research of the influence of additional inductance and capacitance on the amplitude-frequency responses of piezoelectric transducers. It was determined that in different ways to connect capacitance with the inductance of the input of the piezoelectric transducer amplitude-frequency response varies. The experimental dependence of the amplitude-frequency responses from changes of additional capacity was obtained.

**Key words:** additional elements, amplitude-frequency response, piezoelectric transducer.

**Вступ**

П'єзоелектричні перетворювачі і датчики широко застосовуються в комп'ютерних системах, гідроакустиці, електроакустиці, в ультразвуковій, медичній, вимірювальній техніці, в скануючих зондових наномікроскопах, п'єзодвигунах і в інших галузях науки і техніки [1-3].

Як відомо, перетворювач – це пристрій, який перетворює одну фізичну величину або енергію в іншу фізичну величину або енергію, наприклад, теплову енергію – в електричну, силу – в переміщення, тиск – в електричну напругу або струм, електричну напругу одного рівня – в електричну напругу іншого рівня і т.д. [3].

**Актуальність**

В роботі [4] описані методи синтезу (створення, проектування) п'єзоелектричних перетворювачів.

Ці методи дозволяють не тільки розширити можливості технології проектування, але і створювати перетворювачі з необхідними характеристиками.

Серед описаних технологій особливий інтерес представляє технологія додаткових елементів, так як в цьому випадку не потрібно будь-яка зміна в структурі п'єзоелектрика, а зміна характеристик перетворювача здійснюється за рахунок зовнішніх для п'єзоелемента ланцюгів [4].

Суть описаної технології полягає в тому, що до п'єзоелемента приєднують додаткові елементи, які змінюють характеристики перетворювача. До п'єзоелемента механічно приєднується другий п'єзоелемент, металева пластина або ультразвуковий концентратор, або електричними ланцюгами приєднується ємність, індуктивність, опір, ще один п'єзоелемент або частина п'єзоелемента.

**Мета**

Метою даної роботи є вивчення впливу індуктивності та ємності, одночасно підключених до п'єзоелектричного перетворювача, на його характеристики.

**Задачі**

1. Розробити схеми підключення п'єзоелектричних перетворювачів з додатковими індуктивностями й ємностями.
2. Дослідити та проаналізувати амплітудно-частотні характеристики розроблених п'єзоелектричних перетворювачів.

**Розв'язання задач**

Як відомо [1, 3], п'єзоелемент (рис. 1) являє собою електромеханічну коливальну систему, еквівалентною електричною схемою якого являється послідовно-паралельний коливальний контур.

Якщо на вхід п'єзоелемента можна підключити індуктивність  $L_{доd}$  таким чином, щоб ця індуктивність і міжелектродна ємність  $C_n$  утворили послідовний коливальний контур, характеристики п'єзоелемента будуть змінені [6-8].

Експериментальну перевірку виконано в п'єзотрансформаторному режимі, для чого один з електродів розділено на три частини – два півкільця і диск на електроакустичному перетворювачі ЗП-19 виробництва ВАТ «Аврора» (Волгоград). Перетворювач складається із пластини сталі 40Х діаметром 32 і тов-

щиною 0,15 мм. До пластини приклеєний епоксидним компаундом п'єзоелемент Ø23 і товщиною 0,2 мм. Біморфний елемент закріплений в корпусі з ударостійкого полістиролу.

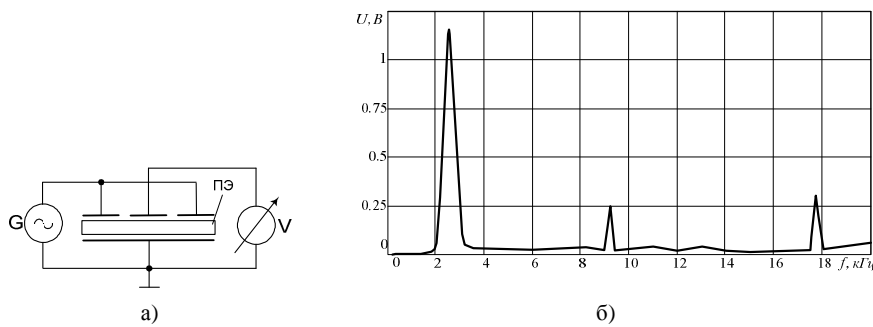


Рисунок 1 – Вимірювальна схема (а) та АЧХ п'єзоперетворювача ЗП-19 (б)

Міжелектродні ємності п'єзоелемента вимірювалися за допомогою цифрового мультиметра Voice kraft M890G. На вхід п'єзоелемента подавався синусоїдальний сигнал амплітудою 1В. Для вимірювань амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) використовувався генератор ГЗ-109 і мілівольтметр ВЗ-41.

На рис. 2 показана схема підключення п'єзоелектричного перетворювача з додатковою індуктивністю.

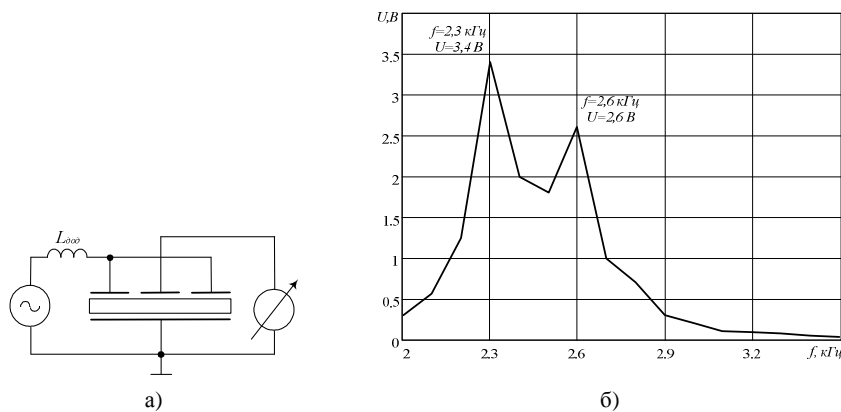


Рисунок 2 – Вимірювальна схема (а) та АЧХ п'єзоперетворювача ЗП-19 (б) при  $L_{доп} = 325$  мГн

Розглянемо вхідний ланцюг перетворювача, що містить додаткову індуктивність –  $L_{доп}$  і міжелектродну ємність –  $C_{ex}$ . Якщо вибрати  $L_{доп}$  зі співвідношення:

$$L_{доп} = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 C_{ex}} \quad (1)$$

де  $f_p$  – резонансна частота п'єзоелемента, тоді резонансна частота  $f_k$  послідовного коливального контуру  $L_{доп} C_{ex}$  буде дорівнює резонансній частоті п'єзоелемента, тобто  $f_p = f_k$ .

Як відомо [9], на резонансній частоті коефіцієнт передачі коливального контуру дорівнює добротності контура  $Q$ .

У цьому випадку напруга на вході п'єзоелемента (тобто ємності  $C_{ex}$ ) буде рівна:

$$U_C = U_{\text{вх}} \cdot Q, \quad (2)$$

де  $Q$  – добротність контуру  $L_{доп} C_{ex}$ ;  $U_{ген}$  – напруга, що створюється генератором.

Отже, можна очікувати збільшення вихідної потужності (звукового тиску) перетворювача або коефіцієнта трансформації п'єзотрансформатора.

Дослідимо вплив додаткової ємності, яка під'єднується до п'єзоелектричного перетворювача одночасно з додатковою індуктивністю, в цьому разі можливо як мінімум три варіанта підключення ємності:

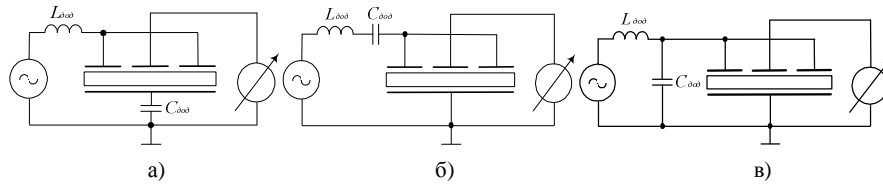
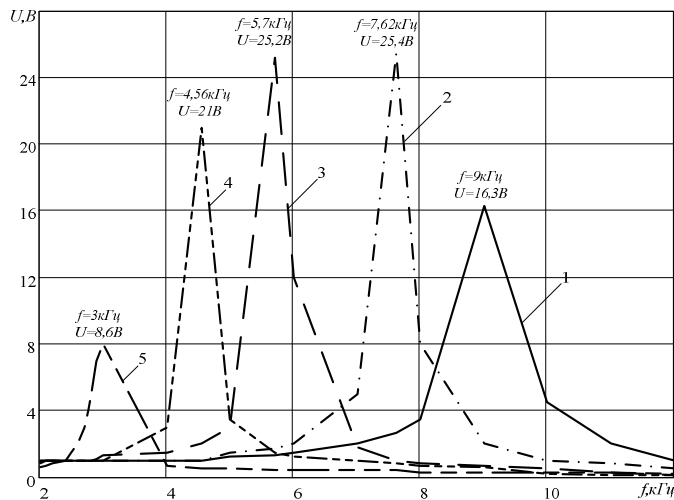


Рисунок 3 – Перетворювач ЗП-19 з додатковими індуктивністю і ємністю

В першому випадку (рис. 3, а), додаткова ємність  $C_{000}$  під'єднується між загальним проводом схеми і загальним проводом п'єзоелемента.

Як відомо, при послідовному з'єднанні конденсаторів на обкладинках окремих конденсаторів електричні заряди по величині рівні:  $Q_1=Q_2=Q$ .

У другому випадку (рис. 3, б) додаткова ємність  $C_{000}$  під'єднується послідовно  $L_{000}$  і вхідній ємності п'єзоелектричного перетворювача  $C_{ex}$ , та утворюється послідовний коливальний контур.

Рисунок 4 – АЧХ п'єзоелектричного перетворювача ЗП-19 показаного на рис. 3, а при  $L_{000} = const$ , 1 –  $C = 0,5 \text{ нФ}$ , 2 –  $C = 1 \text{ нФ}$ , 3 –  $C = 2 \text{ нФ}$ , 4 –  $C = 4 \text{ нФ}$ , 5 –  $C = 18 \text{ нФ}$ 

Розглянемо випадок (рис. 4), коли додаткова ємність  $C_{000}$  підключається між загальним проводом схеми і загальним проводом п'єзоелектричного перетворювача, в наслідок чого сумарна ємність коливального контуру –  $C_{заг} = Q/U = Q/(U_1 + U_2)$ , тобто при послідовному з'єднанні ємностей величина, обернено-пропорційна загальній ємності, дорівнює сумі обернено-пропорційних величин окремих ємностей.

Напруга між обкладками окремих ємностей при їх послідовному з'єднанні буде рівна:  $U_1 = Q/C_{000}$ ,  $U_2 = Q/C_{ex}$ , а загальна напруга рівна  $U_{заг} = U_1 + U_2$ , що пояснює зростання амплітуди на виході п'єзоелектричного перетворювача, а оскільки загальна ємність коливального контуру зменшилася, керуючись формулою (1), то відбувся зсув резонансу в область високих частот.

Створення додаткового коливального контуру на вході п'єзоелектричного перетворювача призвело до появи другого резонансного піку (рис. 5), а також до зростання амплітуди резонансу самого п'єзоелектричного перетворювача. Як і в першому випадку, ємності  $C_{000}$  та  $C_{ex}$  з'єднані послідовно, що пояснює зсув обох резонансних піків при зменшенні додаткової ємності  $C_{000}$  в область високих частот, керуючись формулою (1).

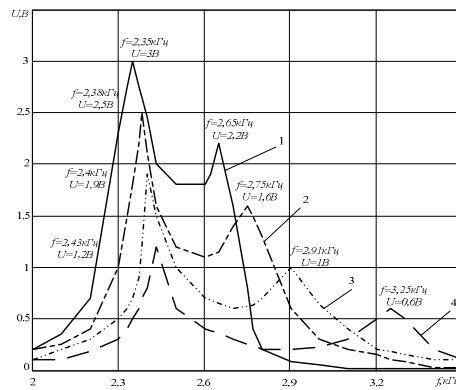


Рисунок 5 – АЧХ п'єзоелектричного перетворювача ЗП-19 показаного на рис. 3, б при:  $L_{доод} = const$ ,  
 1 –  $C = 60$  нФ, 2 –  $C = 33$  нФ, 3 –  $C = 22$  нФ, 4 –  $C = 14$  нФ

Нарешті, випадок коли ємність приєднана паралельно входу п'єзоелектричного перетворювача (рис. 3, в), додаткова ємність  $C_{доод}$  включається паралельно вхідній ємності п'єзоелектричного перетворювача  $C_{ex}$  та утворюється додатковий коливальний контур  $L_{доод}(C_{доод} + C_{ex})$ .

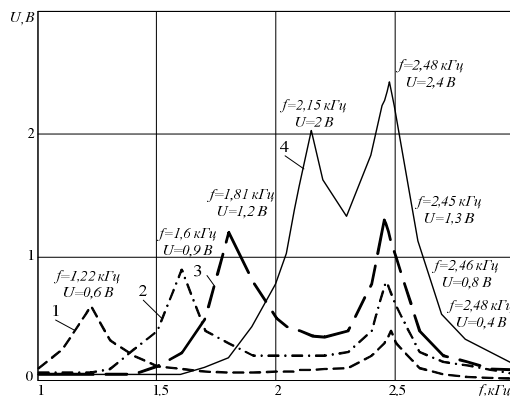


Рисунок 6 – АЧХ п'єзоелектричного перетворювача ЗП-19 показаного на рис. 3, в при:  $L_{доод} = const$ ,  
 1 –  $C = 33$  нФ, 2 –  $C = 14$  нФ, 3 –  $C = 7$  нФ, 4 –  $C = 1$  нФ

Створення додаткового коливального контуру  $L_{доод}(C_{доод} + C_{ex})$  на вході п'єзоелектричного перетворювача призвело до появи другого резонансного піку (рис. 6). При паралельному з'єднанні конденсатора та ємності п'єзоелектричного перетворювача напруги, що підводяться до них, однакові –  $U_1 = U_2 = U$ . Заряди, які виникають при цьому, дорівнюють  $Q_1 = C_{доод}U$ ,  $Q_2 = C_{ex}U$ , а загальний заряд, отриманий від джерела  $Q_{заг} = Q_1 + Q_2$ . Загальна ємність  $C_{заг}$  коливального контуру  $L_{доод}(C_{доод} + C_{ex})$  дорівнює сумі їхніх ємностей  $C_{заг} = Q/U = (Q_1 + Q_2)/U = C_1 + C_2$ , що і пояснює зменшення амплітуди на виході п'єзоелектричного перетворювача, а оскільки загальна ємність коливального контуру збільшилась, то керуючись формулою (1), відбувся зсув резонансів в область низьких частот.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на комп'ютерне моделювання еквівалентних електричних схем заміщення п'єзоелектричних перетворювачів та їхніх характеристик.

За матеріалами дослідження отримано патент на корисну модель [10].

### Висновки

1. При підключенні ємності між загальним проводом п'єзоелектричного перетворювача та загальним проводом схеми, досягнуто зростання вихідної напруги в 25 раз порівняно з п'єзоперетворювачем без додаткових елементів та в 7,5 рази порівняно з п'єзоперетворювачем з додатковою індуктивністю.

2. Експериментально отримано залежність амплітудно-частотної характеристики від зміни додаткової ємності для різних конструкцій п'єзоелектричного перетворювача, що може бути використано при проектуванні п'єзоелектричних перетворювачів.

#### Список літератури

1. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Sharapov V. Piezoceramic sensors / V. Sharapov. – Springer, 2011. – 498 p.
3. Шарапов В.М. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, К.В. Базило, Л.Г. Куницкая. – Черкасы: Вертикаль, 2010. – 278 с.
4. Шарапов В.М. Технологии синтеза пьезокерамических датчиков / В.М. Шарапов // Вісник ЧДТУ. – 2010. – №3.
5. Физика и техника мощного ультразвука. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 688 с.
6. Сотула Ж.В. Совершенствование пьезокерамических трансформаторов для датчиков механических величин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ж.В. Сотула. Черкасы, 2009. – 174 с.
7. Пат. 56930 Україна, МПК H04R 17/00. Спосіб створення акустичних коливачів за допомогою п'єзоелемента. / Шарапов В.М. – № 201012462 ; заявл. 22.10.10 ; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2.
8. Пат. 56932 Україна, МПК H04R 17/00. Електроакустичний перетворювач / Шарапов В.М., Сотула Ж.В., Чорноший І.В., Куницкая Л.Г., Базило К.В. – № 201012464 ; заявл. 22.10.10 ; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2.
9. Котельников В.А. Основы радиотехники / В.А. Котельников. – М.: Гостехиздат, 1950. – 372 с.
10. Пат. 62844 Україна, МПК H01F 30/00. П'єзоелектричний трансформатор / Шарапов В.М., Ткаченко О.С., Базило К.В., Сотула Ж.В. – № 201107543 ; заявл. 15.06.11 ; опубл. 12.09.11, Бюл. № 17.

#### Відомості про авторів

**Базіло Костянтин Вікторович** – к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні, тел.: 0472 730260, e-mail: [b\\_constantine@mail.ru](mailto:b_constantine@mail.ru), бул. Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси, Україна.

**Сотула Жанна Василівна** – к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні, бул. Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси, Україна, тел.: 093 5641505, e-mail: [janna-sotula@yandex.ru](mailto:janna-sotula@yandex.ru).

**Ткаченко Олександр Сергійович** – аспірант кафедри комп'ютеризованих та інформаційних технологій у приладобудуванні, тел.: 093 3592016, e-mail: [tkachenko.a.s@yandex.ru](mailto:tkachenko.a.s@yandex.ru), бул. Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси, Україна.