

## ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ТА СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТУ КОАНДА

*В роботі отримані функціональні і схемотехнічні моделі біморфних п'єзоелементів, які використовуються для визначення ефекту Коанда. Досліджено їх амплітудночасотні, фазочастотні та перехідні характеристики, а також розглянуті реакції на впливи спеціальної форми (згасаючий по експоненті гармонійний сигнал, а також імпульс з крутим переднім і спадаючим по експоненті заднім фронтом).*

**Ключевые слова:** біморфний п'єзоелектричний перетворювач; функціональні та схемотехнічні моделі; амплітудно- та фазочастотні характеристики.

### Вступ.

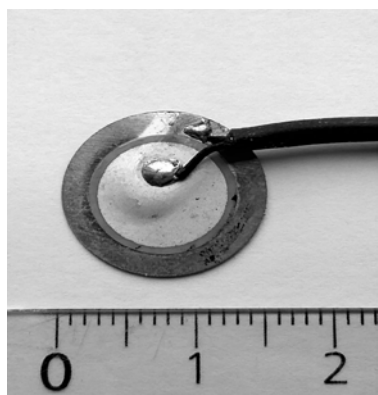
Азимутальна гвинто-рульова колонка, що застосовується з середини минулого століття, дозволила збільшити маневреність судна і знизити втрати енергії за рахунок зміни напрямку упору гвинта щодо поздовжньої вісі судна на 360 [1]. Однак на відміну від звичайних традиційних схем розташування гвинтів в кормі експлуатація АВРК при певних кутах повороту стала супроводжуватися проявом ефекту Коанда, коли потік від гвинта прилипає до днища судна [2]. Це призводить до втрати упору гвинта до 15 %. В результаті втрачається керованість судна або бурової платформи, що призводить до виникнення аварійної ситуації [3]. Тому дослідження, що спрямовані на визначення і попередження виникнення ефекту Коанда є актуальними.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.**

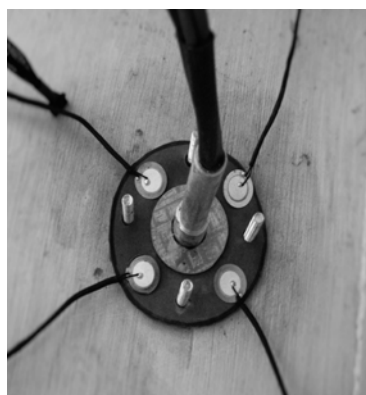
В цьому напрямку проведено ряд робіт [4, 5] компанією «ABB Group» і вченими Maciel P., Коор А.,

Vaz G. Результатом впливу даного ефекту є нерівномірний знос дейдвудного та інших підшипників. Діагностика, планове обслуговування і ремонт даних пристроїв утруднений у зв'язку з конструктивною особливістю знаходження всієї конструкції нижче ватерлінії під днищем судна. У разі несвоєчасного виявлення даних несправностей можливий вихід всього пристрою з ладу, пожежа, втрата керованості і руйнація.

Автором був запропонований метод фіксації відхилення суднового валопроводу під дією зовнішньої сили, яка фіксується за допомогою п'єзодатчика [6–8]. Основна ідея полягає в тому, що при виникненні ефекту Коанда валопровід, що зміщується, сприяє нерівномірного зносу і передчасному виходу з ладу дейдвудного та інших підшипників. Проведений аналіз показав, що з усіх типів датчиків для фіксації сили найкраще підходить п'єзоперетворювач (рис. 1) [9].



а)



б)

**Рис. 1.** П'єзоелемент фірми Cerо Electronics типу MFT (а), та монтаж п'єзоелементів на натурній моделі

В даному випадку важливим питанням постає оптимальний вибір п'єзоелектричного елемента, який задовольнить вимоги по чутливості, надійності та іншим показникам. Дослідження такого вибору п'єзоелементу та режимів його підключення здійснено автором в роботі [9]. Однак проведення натурних експериментів для перевірки гіпотези є дуже коштовним і не завжди дозволяє отримати бажаний результат. Рішенням є комп'ютерне моделювання п'єзоперетворювача для визначення ефекта Коанда.

Отже, метою даної роботи є розробка зручних та ефективних моделей п'єзоелектричних перетворювачів для визначення ефекту Коанда.

**Результати досліджень.**

Для дослідження моделей перетворювачів необхідно враховувати реальні впливи на чутливі елемен-

ти. Найбільш типові впливи, які зустрічаються на практиці при вимірі тиску на п'єзоелемент, – є гармонійні та ударні впливи, а також імпульси з крутим переднім за затухаючим по експоненті заднім фронтом. Слід зазначити, що більшість природних сигналів можна промодельовувати за допомогою зазначених вище сигналів. Гармонійний сигнал може бути промодельований за допомогою джерела синусоїдальної напруги (Sine source) (рис. 2, а), імпульсний – за допомогою незалежного джерела напруги складної форми (EXP) з сигналом експоненційної форми (рис. 2, б).

Деякі форми сигналів, які утворюються при генерації за допомогою генераторів сигналів по рис. 2 показані на рис. 3.

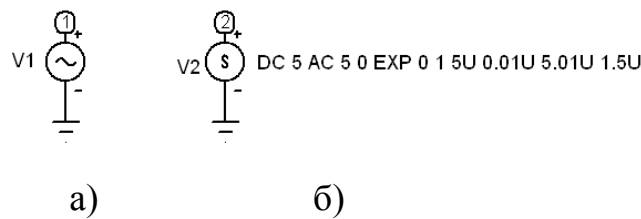


Рис. 2. Генератори сигналів: а – гармонійного, б – імпульсного

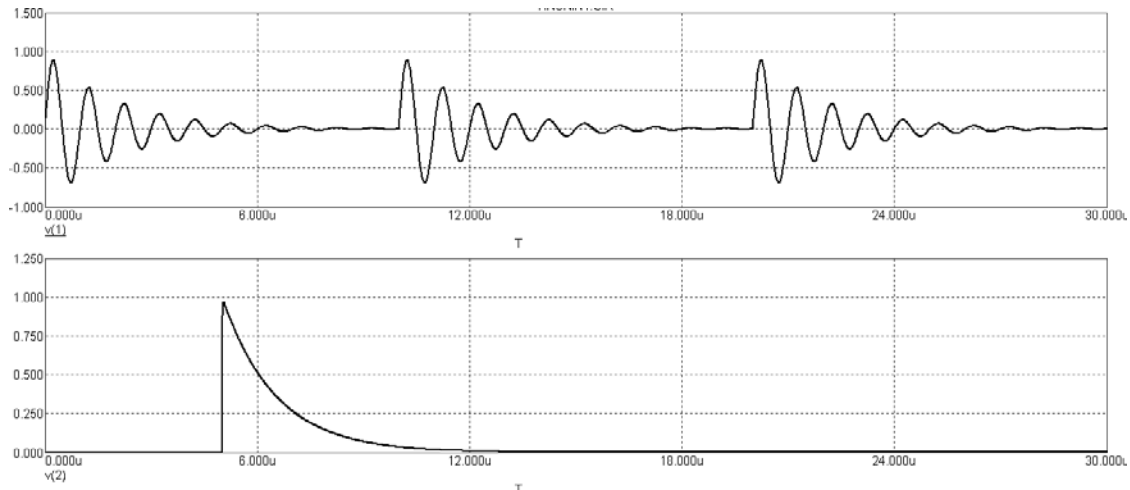


Рис. 3. Форми сигналів, що утворюються при генерації за допомогою генераторів сигналів по рис. 2

Для проведення моделювання необхідно врахувати еквівалентну електричну схему біморфного п'єзоелементу [10], яка показана на рис. 4.

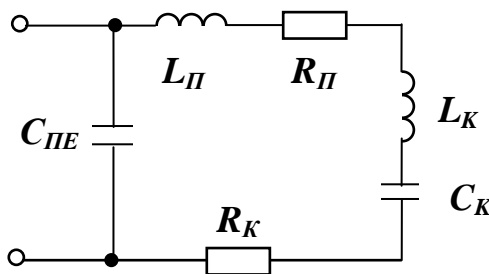


Рис. 4. Еквівалентна схема біморфного п'єзоелемента

На рис. 4  $C_{ПЕ}$  – міжелектродна ємність;  $C_K, L_K, R_K$  – динамічна ємність, індуктивність та опір;  $L_{П}, R_{П}$  – параметри, що описують властивості пластини

Для отримання функціональної моделі розглянемо процеси, які відбуваються у п'єзоелементі під впливом тиску, тобто перетворення сили, що діє на п'єзоелемент, в електричну напругу на електродах

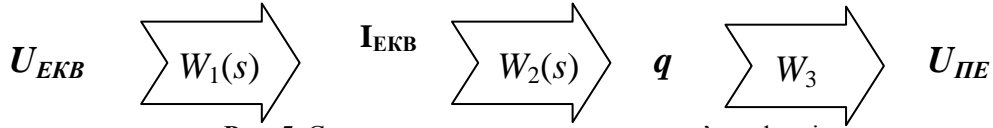


Рис. 5. Схема перетворень при прямому п'єзоєфекті

Перше перетворення описується виразом, що відповідає провідності елемента [11]:

$$Y = j\omega C_{iE} + \frac{\omega^2 C_K^2 R_K + j(1 - \omega^2 C_K L_K)\omega C_K}{(1 - \omega^2 C_K L_K)^2 + \omega^2 C_K^2 R_K^2}$$

Для отримання передаточної функції другого перетворення необхідно врахувати модуль Юнга ( $E$ ) та оператор диференціювання  $s$ , оскільки значення струму отримується диференціюванням значення заряду. Отримуємо:

$$W_2(s) = \frac{q}{I_{\hat{A}\hat{E}\hat{A}}} E = \frac{E}{s}$$

де  $s$  – оператор Лапласа.

Перетворення заряду  $q$  в напругу на електродах п'єзоелемента  $U_{PE}$  може бути описано виразом:

$$W_3 = \frac{U_{iE}}{q} = \frac{1}{C_{iE}}$$

Загальна передаточна функція має вираз:

Функціональна модель п'єзоелемента, що отримана з використанням середовища пакета СхСАПР, зображена на рис. 6.

п'єзоелемента. Для цього скористаємося методом електромеханічних аналогій, при якому еквівалентом сили є електрична напруга  $U_{EKB}$ , а еквівалентом механічної деформації – електричний заряд. Тоді процес перетворення сили в напругу буде мати вигляд, показаний на рис. 5 [11].

$$W(s) = W_1 W_2(s) W_3$$

Для розрахунків врахуємо електричні параметри п'єзоелемента фірми Керо Electronics типу MFT (рис. 1, а) на основі кераміки TiBaO3 з наступними характеристиками [9]:

- робочий діапазон температур - 20 ... + 50 ° С;
- резонансна частота  $4,0 \pm 0,5$  kHz;
- резонансний опір 500 W;
- електрична ємність  $34$  nF  $\pm 30\%$ ;
- діаметр латунної підкладки 15 мм;
- діаметр п'єзоелемента 12 мм;
- товщина п'єзоелемента 0,21 мм;
- питома вага  $7 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>;
- коефіцієнт внутрішнього тертя 0,07 Н·с / м;
- модуль Юнга  $4 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;
- напруженість електричного поля  $2 \cdot 10^6$  В/м.

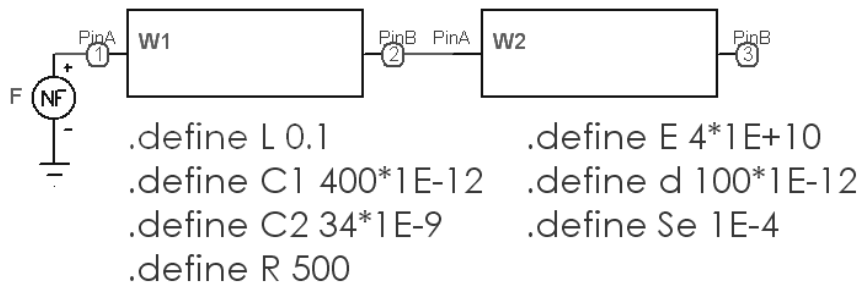
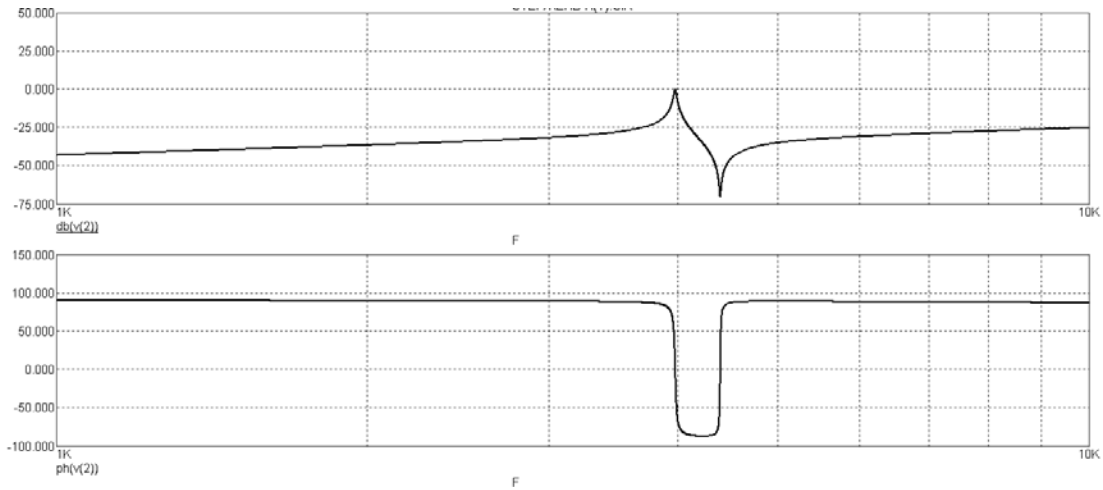


Рис. 6. Функціональна модель п'єзоелемента

Функціональний генератор F імітує механічний вплив, який описується в даному випадку генератором V1.

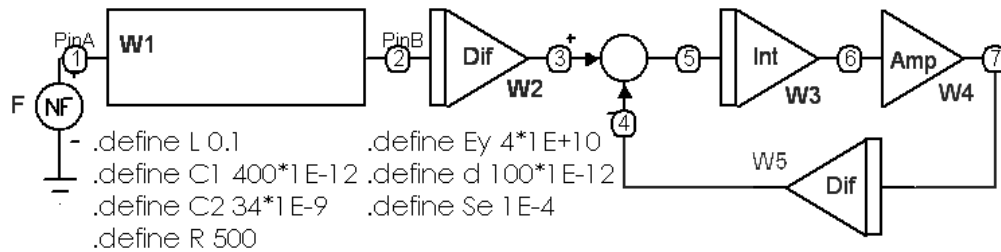
Амплітудночастотна та фазочастотна характеристики функціональної моделі показані на рис. 7.



**Рис. 7.** Амплітудно- (а) та фазочастотна (б) характеристики функціональної моделі біморфного п'єзоелемента

Більш складна функціональна модель біморфного п'єзоелемента з підсилювачем заряду [11], що отри-

мана з використанням середовища СхСАПР, зображена на рис. 8.



**Рис. 8.** Функціональна модель біморфного п'єзоелемента з підсилювачем заряду

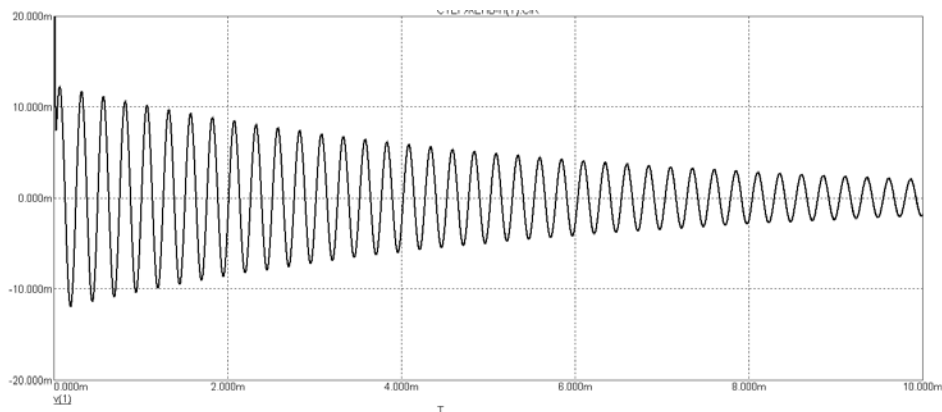
Для спрощення моделі ланка  $W_1$  відповідає загальній передавальній функції двох ланок по рис. 5 –  $W_1$  та  $W_2$ .

Детальний опис ланок підсилювача заряду наведено в роботі [11].

Передавальна функція всієї системи набуде вигляду:

$$W_{\Sigma}(s) = \frac{W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4}{1 + W_3(s)W_4W_5(s)}$$

Амплітудно- та фазочастотні характеристики відповідної моделі суттєво наближені до значень, що показані на рис. 6. Перехідна характеристика функціональної моделі показана на рис. 9.



**Рис. 9.** Перехідна характеристика характеристики функціональної моделі п'єзоелемента з підсилювачем заряду

Розглянемо схемотехнічну модель досліджуваного перетворювача з використанням середовища SxCAPR. Для цього в модель, що зображена на рис. 5, необхід-

но додати  $RLC$  елементи, які показані на рис. 4. Схемотехнічна модель отриманого біморфного п'єзоелемента показана на рис. 10.

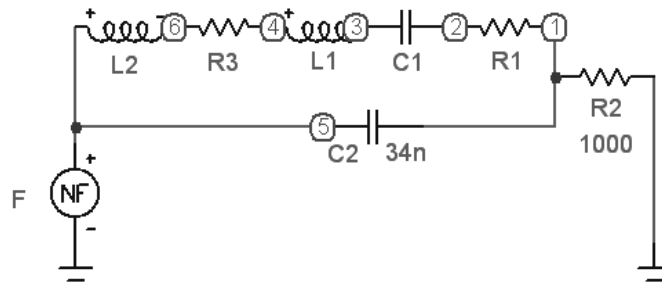


Рис. 10. Схемотехнічна модель біморфного п'єзоелемента

Частотні характеристики схемотехнічної моделі такого перетворювача наведені на рис. 11.

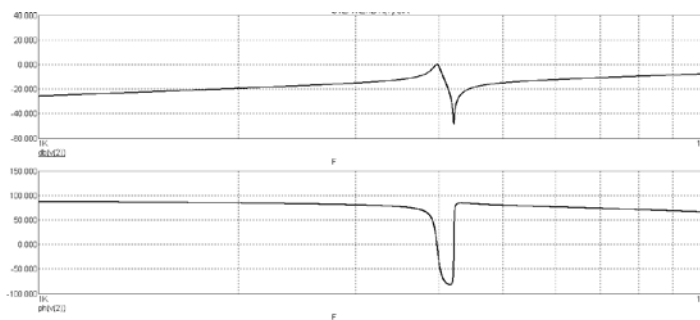


Рис. 11. Амплітудно- (а) та фазочастотна (б) характеристики схемо технічної моделі біморфного п'єзоелемента

Як видно з рис. 7 та рис.11, характеристики обох моделей досить схожі, що підтверджує адекватність отриманих функціональних та схемотехнічних моделей.

12, реакція на гармонійний сигнал з затуханням не має змін. Імпульсний сигнал переданий з деяким викривленням.

Реакція біморфного п'єзоелемента на сигнали спеціальної форми показані на рис. 12. Як видно з рис.

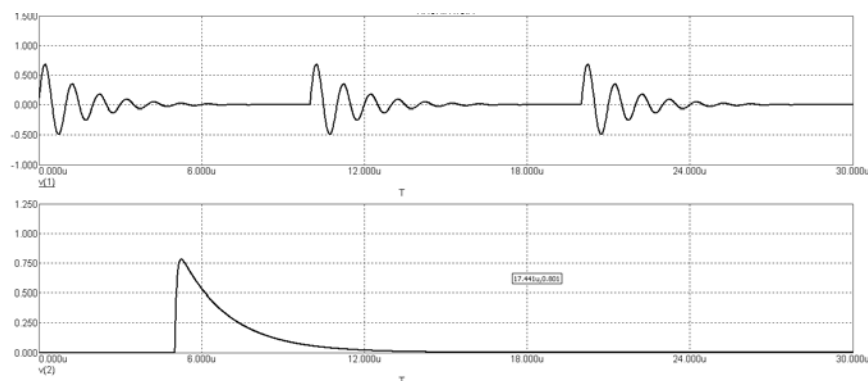


Рис. 12. Реакція біморфного п'єзоелемента на сигнали спеціальної форми

**Висновки.**

В роботі отримані функціональні і схемотехнічні моделі біморфних п'єзоелементів, які використовуються для визначення ефекту Коанда. Вивчено амплітудночастотні, фазочастотні та перехідні характеристики, а також розглянуті реакції на впливи спеціаль-

ної форми (згасаючий по експоненті гармонійний сигнал, а також імпульс з крутим переднім і спадаючим по експоненті заднім фронтом). Відповідність характеристик функціональних і схемотехнічних моделей підтверджує адекватність отриманих моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. The SCHOTTEL Rudderpropeller. From brilliant invention to global classic [Електронний ресурс]. – <http://www.schottel.de/marine-propulsion/srp-rudderpropeller/>.
2. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., Mitescu C. D. Physical Hydrodynamics. – Oxford University Press, – 2001. – 505 p.
3. Peter Lehner, Bob Deans In Deep Water: The Anatomy of a Disaster, the Fate of the Gulf, and How to End Our Oil Addiction. – New York : «OR Books», – 2010. – 173 p.
4. Представление движителей Azipod® серии VI [Електронний ресурс]. – [http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb000f6546300c12577e5004191aa/\\$file/azipod\\_vi\\_project\\_guide\\_ru.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/908eb000f6546300c12577e5004191aa/$file/azipod_vi_project_guide_ru.pdf).
5. Maciel P., Koop A., Vaz G. Modelling Thruster-Hull Interaction with CFD // Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – OMAE2013. – June 9 – 14, 2013.
6. Будашко В. В., Никольский В. В., Хнюнин С. Г., Накул Ю. А. Система мониторинга состояния винторулевой колонки для предупреждения эффекта Коанда // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса : ОНМА. – С. 22–28.
7. Пат. 100819 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В. В. Будашко, В. В. Нікольський, С. Г. Хнюнін. – № u201501854; заявл. 02.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
8. Пат. 107006 Україна, МПК G01L 9/08, 5/12, 1/16. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / В. В. Будашко, В. В. Нікольський, С. Г. Хнюнін. – № u201512962; заявл. 28.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.
9. Хнюнин С. Г. Создание системы регистрации возникновения эффекта отклонения потока жидкости / С. Г. Хнюнин // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Вип. 271. – Т. 283. – Миколаїв, 2016.
10. Пьезоэлектрические преобразователи / В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ю. Ю. Бондаренко, Т. Ю. Кисиль, М. П. Мусиенко, С. В. Роттэ, И. Б. Чудаева – Черкассы : ЧГТУ, 2004. – 435 с.
11. Мусиенко М. П. Теоретические основы, методы и средства структурно-энергосилового преобразования на основе полиэлектродных пьезокерамических элементов для систем управления: Диссертация д-ра техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2006. – 495 с.

С. Г. Хнюнин,

Национальный университет «Одесская морская академия»,  
г. Одесса, Украина

## ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТА КОАНДА

*В работе получены функциональные и схемотехнические модели биморфных пьезоэлементов, которые используются для определения эффекта Коанда. Исследованы их амплитудно-частотные, фазочастотные и переходные характеристики, а также рассмотрены реакции на воздействия специальной формы (угасающий по экспоненте гармонический сигнал, а также импульс с крутым передним и ниспадающей по экспоненте задним фронтом).*

**Ключевые слова:** биморфный пьезоэлектрический преобразователь; функциональные и схемотехнические модели; амплитудно- и фазочастотных характеристики.

S. H. Khniunin,

National University «Odessa Maritime Academy»,  
Odessa, Ukraine

## FUNCTIONAL AND SCHEMOTECHNICAL MODELING OF PIEZOTRANSDUSERS FOR THE DETERMINATION OF THE EFFECT OF THE KOAND

*In the article obtained functional and circuit-based models of bimorph piezoelements which are used to determine the Coand effect. Their amplitude-frequency, phase-frequency, and transient characteristics are investigated, and reactions to the effects of a special shape (extinctionally exponential harmonic signal, as well as a pulse with a steep leading and exponentially falling edge) are considered.*

**Key words:** bimorph piezoelectrical transducer; functional and circuitry models; amplitude and phase characteristics.

**Рецензенти:** д. т. н., проф. М. П. Мусієнко;  
к. т. н., доц. І. М. Журавська.

© Хнюнін С. Г., 2016

Дата надходження статті до редколегії 27.10.16