

## СОГЛАСОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Азин<sup>1</sup>, С.А. Кузнецов<sup>2</sup>, С.В. Рикконен<sup>2</sup>

Научный руководитель: старший научный сотрудник, д.ф.-м.н. С.В. Пономарев

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»,  
Россия, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 52, 662972

E-mail: azinanton@niipmm.tsu.ru

## HARMONIZATION OF DISTRIBUTED VIBRATIONAL SYSTEMS OF PIEZOELECTRIC MOTORS

A.V. Azin<sup>1</sup>, S.A. Kuznetsov<sup>2</sup>, S.V. Rikkonen<sup>2</sup>

Scientific Supervisor: Senior Research Officer, Dr. S.V. Ponomarev

<sup>1</sup>Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

<sup>2</sup>Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems,  
Russia, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Lenin str., 52, 662972

E-mail: azinanton@niipmm.tsu.ru

**Abstract.** *The article is devoted to the issues of matching the distributed oscillatory systems of piezoelectric motors (OS PM). The authors proposed to use a method for matching the impedance of the generator and the load to determine the working resonance frequencies of distributed OS PM. This method allows, in a simplified form, to analyze the characteristics of distributed OS PM. In work, the method is tested for various types of load PM: inertial, elastic, mixed.*

**Введение.** Линейные пьезодвигатели представляют собой колебательные системы (КС) с характерными для данных систем свойствами. Для эффективного преобразования электрической энергии в механическую работу исполнительных элементов необходимо выбирать оптимальные, с этой точки зрения, режимы работы КС. Режимы работы КС зависят от параметров системы, от линейности системы, от величины и частоты силы воздействия [1]. Для конструкции пьезодвигателя (ПД), основанного на пьезоактуаторе пакетного типа, процесс выбора режима работы затрудняется наличием двух колебательных процессов преобразования энергии. При низких частотах система работает по «кинетическому» (вибрационному) принципу, при высоких частотах системы – преобладает «акустический» принцип. В частотном диапазоне ПД одновременно присутствуют оба принципа преобразования (рис.1а) [2–4].

Механическая система, ПД-нагрузка, является распределенной КС и поэтому, для передачи энергии от генератора в нагрузку необходимо согласовывать внутренние и внешние сопротивления, т.е. проводить согласование параметров источника энергии и потребителя. Это позволит работать системе с максимальными коэффициентами преобразования электрической энергии в механическую.

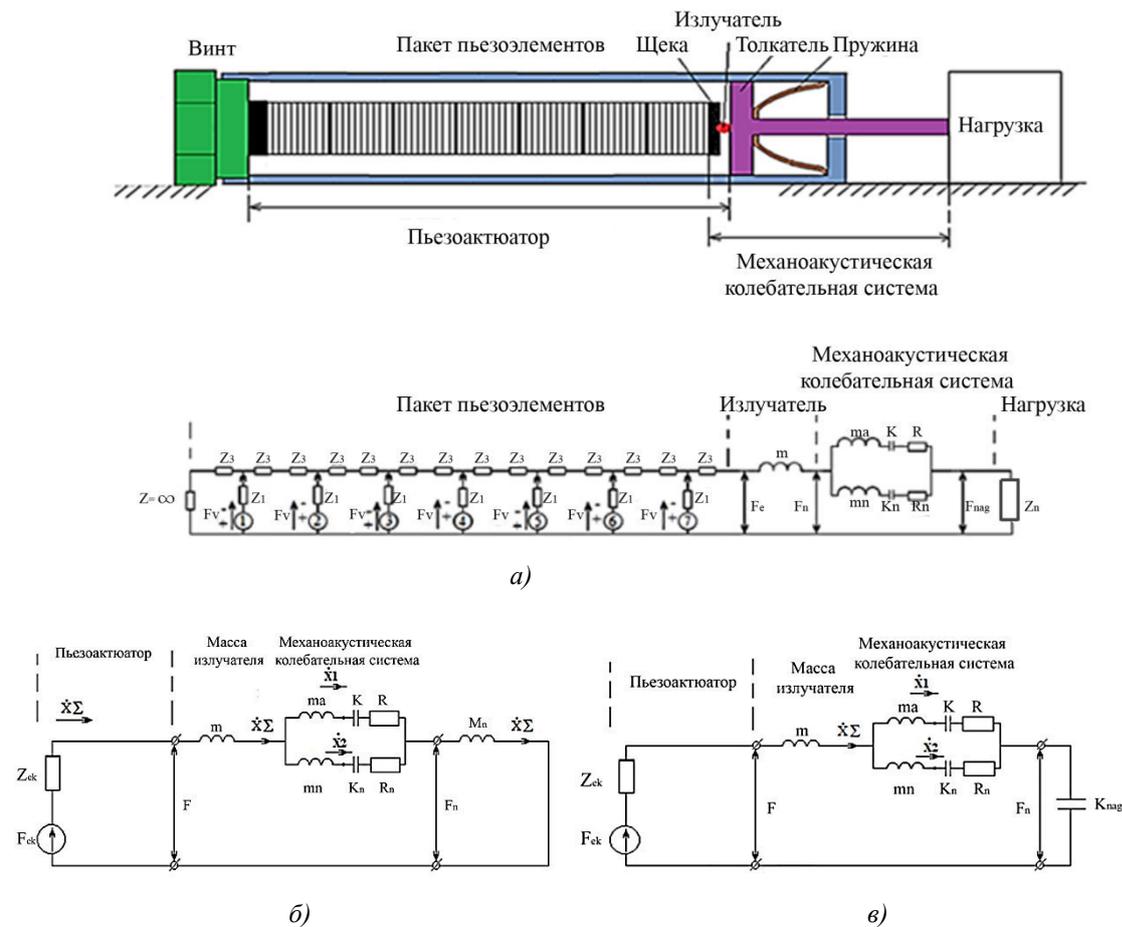


Рис. 1. Схема линейного ПД: а) ПД с пьезоактуатором АПМ-2-7, состоящим из 7-и пьезоэлементов, и его электрическая схема замещения с учетом инерционных масс пьезоэлементов и с учетом механоакустической КС нагрузки; б) электрическая схема замещения механоакустической системы, работающей на инерционную нагрузку; в) электрическая схема замещения механоакустической системы, работающей на упругую нагрузку

Активный двухполюсник – это любой источник электрической энергии, а пассивный – её потребитель, который чаще всего именуют нагрузкой. Максимальная мощность в нагрузку передаётся при равенстве выходного сопротивления активного двухполюсника и сопротивления нагрузки. В этом случае говорят, что сопротивление нагрузки согласовано с выходным сопротивлением источника электрической энергии или с выходным сопротивлением источника сигнала [5].

Для согласования распределенной КС ПД целесообразно говорить о равенстве импеданса выходного активного источника ПД  $Z_{ek}$  и импеданса КС  $Z_{ks}$ , который включает в себя: инерционное сопротивление излучателя, импеданс механоакустической системы и импеданс нагрузки. Рассмотрим три случая согласования КС при разных типах нагрузки.

**Материалы и методы исследования.** Согласование КС при инерционной нагрузке (Рис.1б). Рассмотрим механоакустическую колебательную систему со следующими параметрами: радиус излучателя  $R_{iz} = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м, скорость продольной волны в материале  $V_p = 2500$  м/с, плотность материала  $\rho = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, масса излучателя  $m = 8 \cdot 10^{-3}$  кг, масса толкателя  $ma = 1,791 \cdot 10^{-3}$  кг, жесткость пружины предварительного натяжения  $K = 1 \cdot 10^4$  Н/м, вибрационный коэффициент диссипации  $R_{ir} = 0,764$  кг/с, присоединенная масса  $m_n = 8,736 \cdot 10^{-8}$  кг, акустическая жесткость  $K_n = 1,789 \cdot 10^7$  Н/м, акустический

коэффициент диссипации  $R_n = 0,764$  кг/с. Получение частотных характеристик распределенной колебательной системы пьезодвигателя проводится символическим методом в среде Mathcad.

Точкой устойчивого согласования распределенной колебательной системы можно считать точку пересечения импедансов, при которой выполняется следующие требования [6]:

$$\begin{cases} \frac{dZ_{кк}}{df} > 0, \\ \frac{dZ_{эк}}{df} < 0. \end{cases} \text{ или } \begin{cases} \frac{dZ_{кк}}{df} < 0, \\ \frac{dZ_{эк}}{df} > 0. \end{cases}$$

Для определения согласованной работы распределенной КС ПД необходимо сравнивать значение электрической энергии, сообщенной в систему и значение механической энергии, полученной на нагрузке. По результатам расчетов определено, что при инерционной массе равной 480 гр. в КС ПД есть единственный резонанс при частоте  $f = 5,8 \cdot 10^3$  Гц с коэффициентом преобразования энергии близким к 1.

Согласование КС при упругой нагрузке (Рис.1в). Рассмотрим КС, имеющую аналогичные параметры системы, но с упругой нагрузкой при коэффициенте жесткости  $K_{наг} = 8,5 \cdot 10^8$  Н/м. Резонансы системы смещаются в область высоких частот  $f_1 = 1,4 \cdot 10^5$  Гц и  $f_2 = 3,5 \cdot 10^5$  Гц. При этом коэффициент преобразования энергии близок к 1.

Согласование КС при смешанной нагрузке. Рассмотрим КС, имеющую аналогичные параметры системы, но со смешанной нагрузкой: коэффициент жесткости  $K_{наг} = 8,5 \cdot 10^8$  Н/м, масса нагрузки  $M_{наг} = 480$  гр. По результатам расчетов определено, что КС имеет одну точку пересечения импедансов и один явно выраженный резонанс  $f = 0,7 \cdot 10^4$  Гц с коэффициентом преобразования энергии равным – 0,913.

**Выводы.** В работе продемонстрировано, что для предварительных расчетов распределенных КС ПД целесообразно применять математическое моделирование, основанное на аналоговых электрических схемах замещения пьезоактюатора с учетом массы пьезоэлементов и механических потерь движения пьезоэлементов.

Для определения рабочих резонансных частот распределенных КС ПД целесообразно использовать способ согласования импеданса генератора и нагрузки. Данный способ позволяет в упрощенной форме проанализировать характеристики распределенных КС ПД. В работе способ проверен на разнообразных типах нагрузки ПД: инерционной, упругой и смешанной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0257.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. – М.: Наука, 1982. – 424 с.
2. Пономарев С.В., Рикконен С.В., Азин А.В. Исследование электромеханических процессов в пьезоэлектрической системе // Известия высших учебных заведений. Физика.– 2014. – Т. 57. – № 8/2. – С. 196-202.
3. Пономарев С.В., Рикконен С.В., Азин А.В. Моделирование колебательных процессов пьезоэлектрического преобразователя // Вестник Томского государственного университета. Механика и математика. – 2015. – № 2. – С. 86–95.
4. Azin A.V., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V., Khramtsov A.M. Mathematical modeling of piezo motor operation modes//Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika. – 2016. – 6(44). – pp. 45–53. – DOI: 10.17223/19988621/44/4.
5. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Негушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.:«Энергия», 1975. – 752 с.
6. Абрамов О.В., Абрамов В.О., Муллакаев М.С., Артемьев В.В. Анализ эффективности передачи ультразвуковых колебаний в нагрузку// Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 6. – С. 828–844.