



**И.И. Попов<sup>1</sup>, В.А. Раков<sup>2</sup>**  
<sup>1</sup>Курганский государственный университет,  
<sup>2</sup>Вологодский государственный университет

## РЕАКТИВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С УПРУГОЙ НАГРУЗКОЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

В работе рассматривается влияние реактивной составляющей на свойства пьезоэлектрического преобразователя. Показано, что упругая нагрузка пьезоэлектрического преобразователя может быть представлена в виде емкостного сопротивления в его цепи питания, что дает возможность учитывать это сопротивление при разработке активных систем с элементами противоположной реактивности для подавления вибраций и шумов путем создания контуров электрической компенсации колебаний. Предложено использовать данные результаты в транспортных машинах.

Пьезоэлектрический преобразователь, емкостное сопротивление, упругая емкость, вибрации, активное гашение колебаний.

В механических системах, работающих в условиях частых повторно-переменных нагрузок, вибрации нежелательны, т.к. постепенно приводят к усталости материалов, появлению разрушающих трещин, резонансу и шуму. Наибольшие сложности борьба с резонансом вызывает в автомобильном транспорте. Постоянная вибрация от дорожного покрытия воздействует на кузов, платы электронных блоков, пластиковые панели. На дорожные вибрации накладываются колебания от двигателя и трансмиссии. Любая из тысяч деталей может войти в резонансные колебания на определенном режиме. На режимы работы также накладывается деформация и изменение свойств деталей при перепаде температур от  $-30$  до  $+50$  °С и постепенное старение материалов. Все это делает появление вибраций и шумов в салоне автомобиля с течением времени почти неизбежным. Наряду с механическими способами устранения вибрации предлагается использовать активные электромеханические преобразователи [1]. За счет внутренних свойств упругости они способны поглощать принимаемую вибрацию с заданными характеристиками. Установление взаимосвязи между механическими колебаниями и свойствами пьезоэлектрического преобразователя позволят расширить возможности виброзвукопоглощения в механических системах.

Описание работы и применения искусственных упругостей было представлено ранее [2–3]. Механическая нагрузка может быть представлена в виде реактивного сопротивления в цепях питания электромеханических преобразователей [4–5]. В индуктивных преобразователях инертная нагрузка создает емкостное сопротивление, а упругая – индуктивное. Для преобразования механических колебаний в электрические и наоборот в настоящее время используются

пьезокерамические электромеханические преобразователи.

Актуальной задачей является выявление характера реактивного сопротивления (их цепей питания), в виде которого представлена механическая упругая нагрузка [6].

Упругая механическая нагрузка может быть представлена в виде реактивного сопротивления в цепи питания пьезоэлектрического преобразователя.

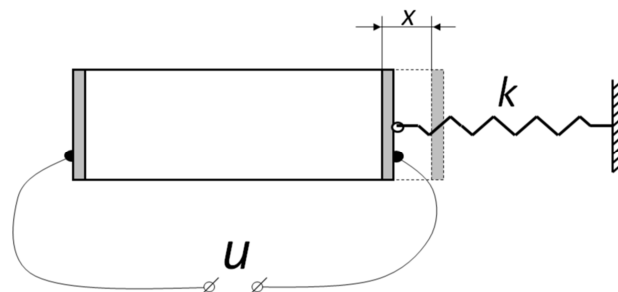


Рис. Пьезоэлектрический преобразователь с упругой нагрузкой

На рисунке изображен пьезоэлектрический преобразователь с упругой нагрузкой с коэффициентом упругости  $k$ . Работа преобразователя основана на прямом и обратном пьезоэффектах. Прямой пьезоэффект проявляется в том, что на обкладках пьезоэлемента при его деформации  $x$  появляется электрический заряд  $q$ :

$$q = d_1 x, \quad (1)$$

где  $d_1$  – пьезомодуль. При подаче на обкладки напряжения  $u$  пьезоэлемент деформируется и развивает усилие  $F$ . В этом заключается обратный пьезоэффект:

$$F = d_2 u. \quad (2)$$

Для выявления характера реактивного сопротивления цепи питания преобразователя, в виде которого представлена упругая нагрузка, целесообразно абстрагироваться от собственных емкости, индуктивности, массы и упругости пьезоэлемента, потерь на трение и активного сопротивления.

Пусть на обкладку пьезоэлемента подается напряжение  $u$ . В соответствии с третьим законом Ньютона, законом Гука, а также с учетом (2):

$$F = d_2 u = kx. \quad (3)$$

Производная выражения (1):

$$\frac{dq}{dt} = i = d_1 \frac{dx}{dt}. \quad (4)$$

Производная выражения (3) с учетом последнего соотношения:

$$d_2 \frac{du}{dt} = k \frac{dx}{dt} = \frac{k}{d_1} i.$$

Отсюда:

$$i = \frac{d_1 d_2}{k} \frac{du}{dt}.$$

Пусть для компактности:

$$d_1 d_2 = z. \quad (5)$$

Сравнение выражения для тока с током в конденсаторе

$$i = C \frac{du}{dt}$$

Дает:

$$C_k = \frac{z}{k},$$

где  $C_k$  – упругая емкость.

Таким образом, упругая нагрузка пьезоэлектрического преобразователя может быть представлена в виде емкостного сопротивления в его цепи питания, что дает возможность учитывать это сопротивление при проектировании систем активного гашения колебаний, в частности принимать меры к их электрической компенсации [7–9] путем создания контуров с элементами противоположной реактивности. Эти ме-

ры позволяют снизить вибрации и шум, исходящие от дорожного покрытия в транспортных машинах.

### Литература

1. Федотов, А. В. Применимость упрощенных моделей пьезоэлементов в задаче активного гашения колебаний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 2. – С. 126–132.

2. Павлов, В. Д. Управляемая искусственная упругость в мехатронных системах / И. П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. – 2022 – № 1 (25). – С. 20–22.

3. Попов, И. П. Искусственная упругость для систем автоматизации / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2023. – № 4(22). – С. 78–81.

4. Попов, И. П. Сглаживание нагрузки маневрового тепловоза / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2(4). – С. 19–21.

5. Попов, И. П. Использование реактивного момента электромагнитного маховика для изменения положения объектов в пространстве / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3(5). – С. 75–77.

6. Патент № 2530474 Российская Федерация, МПК G01H 1/08. Способ экспериментально-теоретического определения собственных сил демпфирования в упругом элементе: № 2013121089/28: заявл. 07.05.2013, опублик. 10.10.2014, бюл. № 28 / Александров И. К., Раков В. А.

7. Попов, И. П. Применение искусственной массы для балансировки механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 1(11). – С. 19–21.

8. Попов, И. П. Маятник с искусственной массой / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2023. – № 2(20). – С. 55–57.

9. Патент № 127690 Российская Федерация, МПК B60H 1/18. Система автоматического управления экономайзером отработавших газов: № 2012152765/11: заявл. 06.12.2012, опублик. 10.05.2013, бюл. № 13 / Раков В. А., Сеницын А. А., Верхоруков В. В.

*I.P. Popov<sup>1</sup>, V.A. Rakov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kurgan State University, <sup>2</sup>Vologda State University

### REACTIVE COMPONENT IN PIEZOELECTRIC CONVERTER WITH ELASTIC LOAD FOR TRANSPORT MACHINES

The work examines the influence of the reactive component on the properties of a piezoelectric transducer. It is shown that the elastic load of a piezoelectric transducer can be represented in the form of capacitance in its power circuit, which makes it possible to take this resistance into account when developing active systems with elements of opposite reactivity to suppress vibration and noise by creating electrical vibration compensation circuits. It is proposed to use these results in transport vehicles.

Piezoelectric transducer, capacitance, elastic capacitance, vibration, active vibration damping.