

05;08

## Природа движения по струне подвешенного пьезоэлектрического осциллятора

© В.А. Александров, Г.М. Михеев

Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

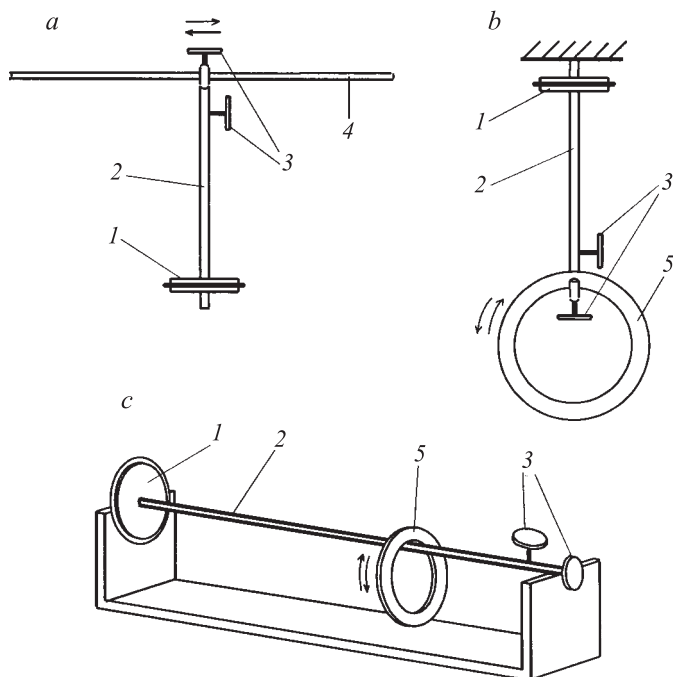
E-mail: gmmikhhev@udmnet.ru

Поступило в Редакцию 16 февраля 2005 г.

Показано, что движение пьезоэлектрического осциллятора, подвешенного на струне с помощью упругого стержня, вызвано одновременным возбуждением продольных и изгибных колебаний в стержне, имеющем остаточную кривизну. Созданы и исследованы устройства, состоящие из пьезоэлектрического осциллятора и стержневого волновода, представляющие собой макеты пьезоэлектрических двигателей нового типа с реверсивным движением.

**Введение.** В работе [1] сообщалось о наблюдении эффекта транспортирования по струне пьезоэлемента, возбуждаемого электрическими колебаниями звуковой и ультразвуковой частоты. При этом пьезоэлемент подвешивался на струну с помощью тонкого металлического стержня (подвески). Изменение скорости и направления движения пьезоэлемента осуществлялось подбором частоты возбуждающих колебаний. Наблюдаемое движение пьезоэлемента по струне объяснялось волновым транспортированием, связанным с колебаниями струны. Однако в [2] экспериментально показано, что резонансные поперечные колебания струны приводят к исчезновению движения пьезоэлемента с подвеской. Движение наблюдается только в тех местах струны, где ее колебания отсутствуют. В связи с этим представляет интерес дальнейшее исследование природы этого эффекта, что является целью данной работы.

**Схема экспериментов.** Для проведения экспериментов было собрано специальное устройство из стержневого волновода с закрепленным на его торце пьезоэлектрическим осциллятором. На другом конце стержня припаивались миниатюрные пьезоэлементы, расположенные взаимно перпендикулярно друг другу. При этом один из них позволял регистрировать продольные, а другой — изгибные колебания стержня.



**Рис. 1.** Устройство из стержневого волновода с закрепленным на его торце пьезоэлектрическим осциллятором: *a* — движение устройства по струне, *b* — вращение кольца на изогнутом конце устройства, *c* — вращение кольца на горизонтально установленном устройстве (*1* — осциллятор, *2* — стержневой волновод, *3* — пьезоэлементы, *4* — струна, *5* — кольцо).

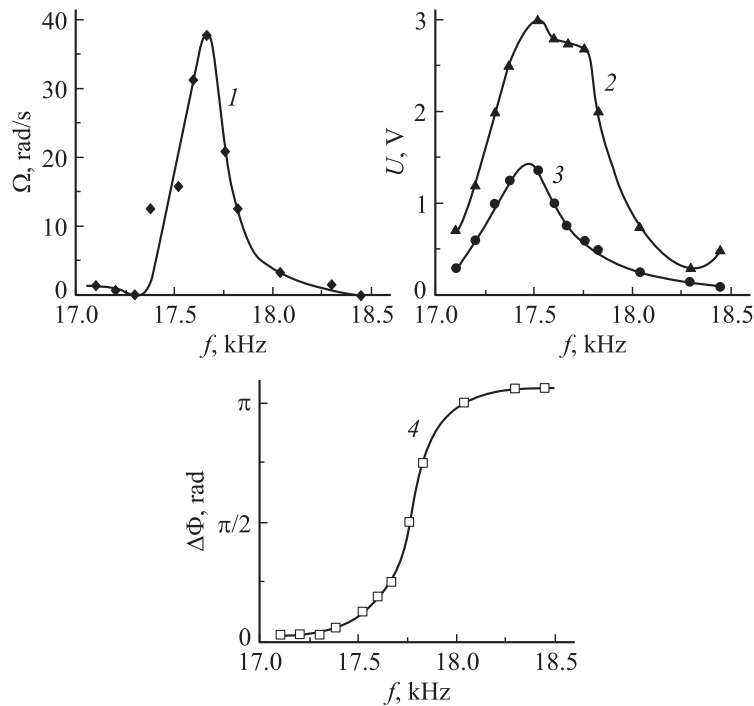
Эксперименты проводились по трем схемам, где основным элементом является изготовленное устройство. В первой схеме оно подвешивалось загнутым концом стержня на струну (рис. 1, *a*). Во второй схеме устройство закреплялось на опоре так, что загнутый конец стержня располагался внизу. При этом на загнутый конец подвешивалось медное кольцо (рис. 1, *b*). Устройство могло также устанавливаться горизонтально вместе с подвешенным на него кольцом, что показано на рис. 1, *c*. Сигналы от миниатюрных пьезоэлементов подавались на двухлучевой осциллограф. Для увеличения амплитуды колебаний пьезоэлектрический осциллятор был изготовлен из двух пьезоэлементов ЗП-4. Для возбуждения осциллятора на него от генератора звуко-

вой частоты подавалось синусоидальное напряжение амплитудой 25 В. В экспериментах стержневой волновод был изготовлен из упругой металлической проволоки диаметром  $d = 0.62 \text{ mm}$  и длиной  $L = 100 \text{ mm}$  (плотность  $\rho = 7.72 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , модуль Юнга  $E = 223 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ , модуль сдвига  $\mu = 87 \cdot 10^9 \text{ Pa}$  и коэффициент Пуассона  $\sigma = 0.28$ ). На рис. 1, *b* медное кольцо имеет толщину 0.5 mm, внутренний и внешний диаметры соответственно равны 16 и 22 mm; на рис. 1, *c* толщина медного кольца составляет 0.5 mm, а внутренний и внешний диаметры соответственно 7 и 11 mm.

По схемам, представленным на рис. 1, *a*, *b* и *c* соответственно, исследовалось возбуждение движения устройства по струне, вращения кольца на загнутом конце стержня и вращения кольца на горизонтально расположенном стержне.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Предварительные эксперименты показали, что движение колеблющегося пьезоэлемента, подвешенного на струне с помощью упругого стержня, не зависит от характеристик струны (длины, натяжения, материала), но существенно зависит от частоты колебаний. Дальнейшие эксперименты, проведенные по схемам, представленным на рис. 1, показали, что при определенных частотах  $f_i$  синусоидальных колебаний генератора амплитуды сигналов  $U$  от регистрирующих пьезоэлементов резко возрастают. Это указывает на резонансное возбуждение в стержне продольных и изгибных колебаний. При этом возникает движение устройства по струне, а также вращение установленных на нем колец. Вблизи частот  $f_i$  с изменением частоты  $f$  колебаний генератора (осциллятора) скорости движения  $V$  и вращения  $\Omega$  (рис. 2, кривая 1) колец существенно изменяются. Подбором  $f$  можно добиться максимального значения  $V_{\max}$  и  $\Omega_{\max}$ . Причем эксперименты показали, что значения  $V_{\max}$  и  $\Omega_{\max}$  возрастают с увеличением  $f_i$ . Примечательно, что направление движения устройства по струне или вращения кольца можно менять выбором резонансной частоты  $f_i$ . Необходимо отметить, что частоты сигналов миниатюрных пьезоэлектрических датчиков являются одинаковыми и равны частоте электрического напряжения, подаваемого на осциллятор.

На регистрируемые сигналы накладываются сигналы в виде шума, создаваемые из-за трения при движении и вращении колец. Временное удаление устройства со струны или кольца с конца стержня позволяет получить чистые синусоидальные сигналы с пьезодатчиков. Это дает возможность сравнивать амплитуды  $U$  (рис. 2, кривая 2, 3) и разности



**Рис. 2.** Скорость  $\Omega$  вращения (1) кольца, амплитуда сигнала  $U$  с пьезодатчиков, регистрирующих продольные (2) и изгибные (3) колебания стержня, а также разность фаз  $\Delta\Phi$  сигналов с пьезодатчиков (4) в зависимости от частоты  $f$  синусоидального напряжения, возбуждающего осциллятор.

фаз  $\Delta\Phi$  (рис. 2, кривая 4) продольных и изгибных колебаний стержня в зависимости от частоты колебаний осциллятора вблизи одной из любых частот  $f_i$  колебаний осциллятора. Из рисунка видно, что максимальное значение скорости вращения достигается при разности фаз изгибных и продольных колебаний стержня, равной  $\pi/4$ . Эксперименты показали, что пьезоэлемент с подвеской движется по струне при тех же частотах колебаний осциллятора, когда наблюдается вращение установленного на подвеске кольца. Исследования, выполненные на горизонтально установленном устройстве (рис. 1, с), позволили обнаружить, что на отдельных участках стержня, имеющих координату  $x_n$ , вращение кольца

отсутствует, где  $n = 0, 1, 2, \dots$ . При этом расстояние  $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$  для выбранного  $f_i$  не зависит от номера  $n$ . Кроме того, наблюдается уменьшение  $\Delta x_n$  при увеличении  $f_i$ . Также обнаружено, что при некоторых частотах возбуждения колебаний в стержне вращения кольца на разных участках стержня происходит в противоположных направлениях.

Совокупность экспериментальных результатов, представленных выше, однозначно показывает, что транспортирование пьезоэлемента по струне, а также вращение кольца на стержне обусловлено одновременным возбуждением взаимно перпендикулярных продольных и изгибных колебаний стержня (подвески) пьезоэлементом. Хорошо известно, что в стержнях могут одновременно возбуждаться продольные, крутильные и изгибные колебания в виде упругих волн. Однако из-за относительно высокой скорости продольных и крутильных волн такие колебания в прямых стержнях могут возбуждаться лишь при высоких частотах. Изгибные же волны имеют значительно меньшую скорость распространения, поэтому изгибные колебания могут возбуждаться в тонких стержнях при меньших частотах [3]. Кроме того, практически любой стержень имеет некоторую кривизну [4]. Вследствие этого, стержень, имеющий один свободный конец, приобретает дополнительную продольную жесткость, так что при продольном растяжении он выпрямляется, а при сжатии — изгибается. Таким образом, при возбуждении в нем продольных колебаний определенной частоты одновременно возбуждаются изгибные колебания. Эти колебания имеют одинаковую частоту, что наблюдается в наших экспериментах. Возбуждаемые таким образом продольные и изгибные колебания являются взаимно перпендикулярными и в зависимости от частоты возбуждения могут иметь различные фазы на различных участках стержня (рис. 2). В результате свободный конец стержня колеблется по эллиптической траектории, форма которой зависит от амплитуды и разности фаз колебаний.

Если этот свободный конец стержня подвешен на струну (рис. 1, а), то продольные колебания стержня направлены перпендикулярно к поверхности струны, а изгибные колебания — вдоль струны. В течение времени, когда свободный конец стержня движется вверх от струны, сила трения покоя уменьшается за счет уменьшения силы реакции опоры. С другой стороны, в течение времени, когда свободный конец стержня движется вниз к поверхности струны, сила трения покоя увеличивается за счет возрастания силы реакции опоры. Таким образом, сила трения покоя меняется в соответствии с продольными колебаниями. С учетом того, что изгибные колебания направлены вдоль струны, это приводит

к возбуждению движения стержня с пьезоэлементом по струне, т.е. происходит механическое выпрямление колебаний [5]. Легко показать, что направление движения зависит от знака разности фаз продольных и изгибных колебаний, а скорость движения прямо пропорциональна частоте колебаний и возрастает при увеличении амплитуды колебаний.

В случае, когда на свободный изогнутый конец стержня подвешено кольцо (рис. 1, *b*), наблюдается аналогичная картина. Отличие заключается в том, что если свободный конец стержня движется вверх, то сила трения покоя увеличивается, а когда движется вниз — она уменьшается. Аналогично направление вращения кольца зависит от знака разности фаз  $\Delta\Phi$  продольных и изгибных колебаний; скорость вращения максимальна при  $\Delta\Phi = \pm\pi/4$ , пропорциональна частоте и существенно зависит от амплитуды взаимно перпендикулярных колебаний, что подтверждается экспериментом (рис. 2).

Вращение кольца, подвешенного на горизонтально расположенном стержне (рис. 1, *c*), можно объяснить аналогично. Здесь небольшое отличие заключается в том, что движение кольца обусловлено возбуждением изгибных колебаний стержня, имеющих горизонтальную и вертикальную составляющие. Также необходимо отметить, что отсутствие вращения кольца на определенных участках стержня указывает на места образования узлов стоячих изгибных волн.

**Выводы.** Таким образом, транспортирование пьезоэлемента с подвеской по струне вызвано возбуждением взаимно перпендикулярных продольных и изгибных резонансных колебаний в подвеске из-за наличия в ней остаточной кривизны. Направление движения зависит от знака разности фаз этих колебаний, а максимальное значение скорости транспортирования достигается при значениях разности фаз  $\pm\pi/4$ . Аналогично объясняется вращение кольца, подвешенного на колеблющемся упругом стержне. Полученные результаты могут быть использованы для разработки пьезоэлектрических двигателей с реверсивным движением.

## Список литературы

- [1] Александров В.А. // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 35–36.
- [2] Александров В.А., Михеев Г.М. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 13. С. 71–76.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
- [4] Челомей В.Н. Избранные труды. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
- [5] Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневецкий В.С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 112 с.