

05;12;08

Влияние поперечных колебаний на вибрационное транспортирование пьезоэлемента по струне

© В.А. Александров, Г.М. Михеев

Институт прикладной механики УО РАН, Ижевск
E-mail: gmmikheev@udmnet.ru

Поступило в Редакцию 22 декабря 2003 г.

Исследованы условия возникновения эффекта транспортирования подвешенного на струне пьезоэлемента при возбуждении в нем низкочастотных колебаний. Обнаружено, что транспортирование возникает только на определенных участках струны в зависимости от частоты колебаний пьезоэлемента. Положение участков транспортирования соответствует положению узлов стоячих поперечных волн в струне и определяется частотой колебаний пьезоэлемента и частотой собственных поперечных колебаний струны. Показано, что положением пьезоэлемента на струне можно управлять плавным изменением частоты подаваемого на него напряжения.

Введение. Вибрационное волновое транспортирование используется для перемещения грузов по поверхностям, представляющим собой упругие резонаторы, в которых колебания вызываются ударом или кинематическим воздействием [1]. Известно также, что волновой принцип движения может применяться для распыления жидкости [2] и перемещения микрочастиц по поверхности пластин [3]. Вибрационное перемещение частиц при этом происходит за счет возбуждения волн на несущей поверхности независимым источником. В работе [4] описан эффект транспортирования подвешенного на струне пьезоэлемента, указывающий на возможность вибрационного перемещения источника колебаний, скорость движения которого значительно превышает скорость движения частиц, находящихся вдали от источника на этой же поверхности. Было сделано предположение, что это явление вызвано высокочастотным отталкиванием от гребня упругой волны, возбуждаемой в струне самим же источником колебаний. В связи с этим представляет интерес исследование влияния распространяющихся в виде

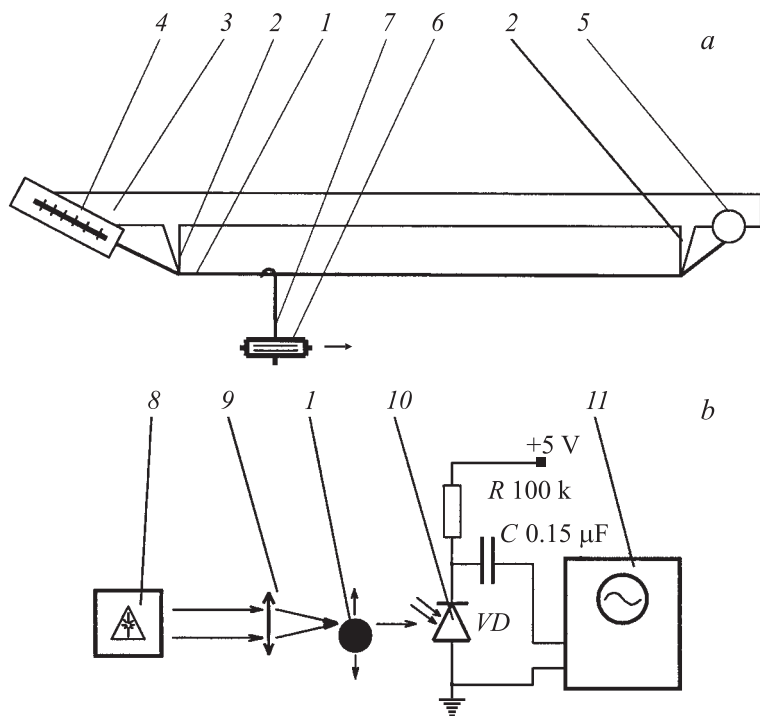


Рис. 1. Схема эксперимента: *a* — механическая, *b* — оптическая (1 — струна, 2 — выступы, 3 — корпус устройства, 4 — динамометр, 5 — регулятор натяжения, 6 — пьезоэлемент, 7 — подвеска, 8 — полупроводниковый лазер, 9 — фокусирующая линза, 10 — фотодиод, 11 — осциллограф).

упругих волн колебаний струны на вибрационное движение источника с подвеской, что является целью настоящей работы.

Схема эксперимента. Эксперименты проводились на устройстве со струной из нихрома 20X80Н плотностью $\rho = 7.72 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, диаметром $\varnothing = 0.62 \text{ mm}$. Горизонтально расположенная рабочая часть струны 1 опиралась на выступы 2 в корпусе устройства 3 (рис. 1, *a*). Расстояние между выступами определяло длину резонатора и составляло 0.6 м. Устройство оснащено динамометром 4 с погрешностью измерения $\pm 2\%$ и позволяет плавно изменять натяжение струны регулятором

натяжения 5. Источник колебаний представлял собой пьезоэлемент 6, спаянный для увеличения амплитуды колебаний из двух элементов типа ЗП-4 общей массой $6 \cdot 10^{-3}$ kg, и устанавливался свободно на струне с помощью припаянной к нему одним концом и загнутым другим концом подвески 7 длиной 45 mm из материала струны. На него от генератора звуковой частоты через усилитель мощности с помощью гибких проводов подавалось синусоидальное электрическое напряжение амплитудой 25 V. Частота подаваемого напряжения контролировалась цифровым частотомером, а его амплитуда — двухканальным осциллографом. Возбуждение пьезоэлемента осуществлялось в диапазоне низких частот (0.1–2) kHz при натяжениях струны $F = 50$ N, 75 N, 80 N, 90 N и 100 N.

Колебания в различных участках струны фиксировались оптическим (теньвым) методом (рис. 1, b). Для этого перпендикулярно плоскости колебаний на поверхность края струны фокусировался луч полупроводникового лазера 8 линзой 9. При колебаниях струны лазер освещал светочувствительную поверхность установленного за струной фотодиода 10, сигнал от которого подавался на второй канал осциллографа 11 для сравнения с колебаниями пьезоэлемента. Такая схема позволяла измерять амплитуду поперечных колебаний чувствительностью $1 \mu\text{m}$. В экспериментах максимальная амплитуда поперечных колебаний струны достигала 0.5 mm.

Основные соотношения для расчетов определялись из условия, что поперечные колебания распространяются по струне в виде упругих волн, скорость v_{η} которых зависит от натяжения F , плотности материала ρ и площади поперечного сечения струны S так, что $v_{\eta} = (F/\rho S)^{1/2}$.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Было обнаружено, что вибрационное движение пьезоэлемента с подвеской по струне с небольшой скоростью (1–2 mm/s) наблюдается при его возбуждении на низких частотах только на отдельных участках струны не более 20 mm. При фиксированных частотах колебаний пьезоэлемента существует несколько участков вибрационного движения, координаты центров которых располагаются на струне симметрично относительно ее центра (рис. 2, a). С изменением частоты участки вибрационного движения на струне смещаются, однако вблизи концов струны движение наблюдается при любых частотах. Это позволяет управлять положением пьезоэлемента на струне плавным изменением частоты его колебаний.

Экспериментально показано, что в условиях вибрационного движения источника колебаний максимальная амплитуда поперечных колеба-

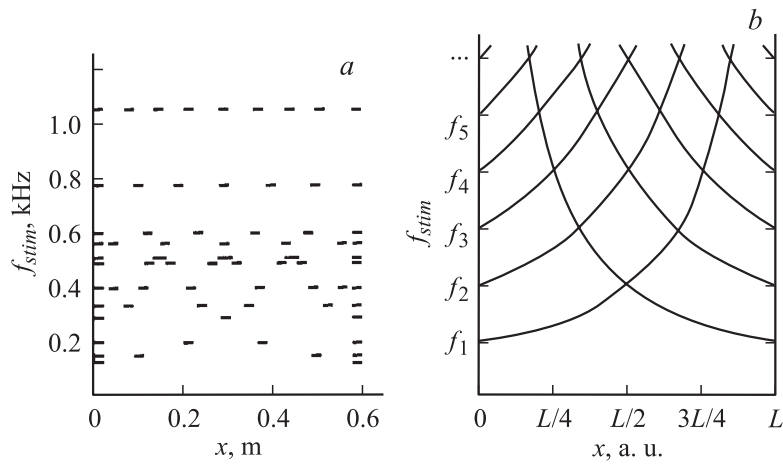


Рис. 2. *a* — экспериментально определенные участки x вибрационного движения пьезоэлемента по струне длиной $L = 0.6$ м при натяжении $F = 50$ Н при различных частотах f_{stim} возбуждения пьезоэлемента; *b* — зависимости $f_{stim}(x)$ в условиях вибрационного движения источника колебаний по струне (f_1 – f_5 — частоты собственных поперечных колебаний струны).

ний струны наблюдается на ее участках между источником и концами струны. При этом различные участки струны могут колебаться на двух разных частотах f_{stim} и nf_{stim} , где f_{stim} — частота колебаний источника, $n = 2, 3, 4, \dots$.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить ударным взаимодействием источника колебаний и струны. В точке касания подвески со струной на поверхности последней возбуждаются одновременно поперечные и продольные упругие волны. Амплитуда этих волн может быть достаточно большой в том случае, когда источник совершает колебания относительно неподвижной части струны или когда колебания участка струны в месте воздействия источника отсутствуют.

На концах струна закреплена, и поперечные колебания вблизи концов струны невозможны. Тогда колебания источника относительно струны вблизи ее концов оказываются достаточными для возбуждения упругих волн при ударном воздействии на поверхность струны. Распространяющиеся вдоль струны упругие волны при определенных

частотах их возбуждения вызывают описываемые в виде стоячей волны резонансные поперечные колебания струны. Длина стоячей поперечной волны λ_{st} равна расстоянию между узлами, которое составляет половину длины обычной поперечной волны. При собственных колебаниях струны на ее длине укладывается целое число стоячих волн, длина которых может быть выражена через параметры струны и частоту собственных колебаний f_{own} :

$$\lambda_{st} = (F/\rho S)^{1/2}/2f_{own}. \quad (1)$$

Частоты собственных колебаний струны длиной L составляют гармонический ряд $f_{Nown} = Nf_{1own}$, где $N = 1, 2, 3, 4, \dots$ и

$$f_{1own} = (F/\rho S)^{1/2}/2L. \quad (2)$$

Возбуждение стоячих поперечных волн в струне возможно и в том случае, когда источник колебаний находится на других участках струны, находящихся на некотором расстоянии x от одного из концов струны. При этом частота колебаний источника f_{stim} и его положение на струне x определяется семейством кривых (рис. 2, *b*), удовлетворяющих уравнениям

$$f_{stim} = Nv_{\eta}/2x \quad \text{для } (0 < x \leq L) \quad \text{и} \quad (3)$$

$$f_{stim} = Nv_{\eta}/2(L-x) \quad \text{для } (0 \leq x < L). \quad (4)$$

Из рисунка видно, что точки пересечения указанных кривых приходятся на частоты колебаний источника, равные частотам собственных колебаний струны $f_{stim} = f_{own}$. В то же время эти точки соответствуют узлам стоячих волн при собственных колебаниях струны. Колебания всех участков струны при этом происходят с одинаковой частотой, и на всей ее длине укладывается целое число длин стоячих волн. В том случае когда $f_{stim} \neq f_{own}$, т.е. когда координаты точки (x, f_{stim}) (рис. 2, *b*) не находятся на пересечении показанных кривых, но лежат на одной из них, колебания различных участков струны, как показывают эксперименты, могут происходить с разными частотами f_{stim} и nf_{stim} . При этом на различных участках струны возбуждаются стоячие волны разной длины $\lambda_{stim} = v_{\eta}/2f_{stim}$ и $\lambda_{1stim} = v_{\eta}/2nf_{stim}$, для которых выполняется следующее соотношение:

$$l\lambda_{stim} + m\lambda_{1stim} \approx L, \quad (5)$$

где l и m — целые числа.

Проведенный анализ и расчеты для всех значений натяжения струны в экспериментах показали, что зарегистрированные координаты центров участков вибрационного движения источника колебаний по струне с погрешностью не более 0.5% совпадают с кривыми, построенными в соответствии с уравнениями (3) и (4). Отсюда можно сделать вывод, что вибрационное движение источника колебаний по струне происходит на ее участках, где поперечные колебания отсутствуют. Эти участки на струне находятся вблизи концов струны и узлов стоячих волн, возбуждаемых источником в струне. При нахождении источника вне этих участков колебания струны могут демпфировать удар и амплитуда колебаний источника относительно струны уменьшается, что приводит к прекращению вибрационного движения источника по струне. Все это указывает на иной механизм вибрационного перемещения источника колебаний в эффекте транспортирования по струне в отличие от волнового транспортирования частиц, находящихся вдали от источника волн [1,2].

Выводы. Таким образом, возбуждаемые при эффекте транспортирования по струне поперечные колебания струны оказывают демпфирующее действие на колебания источника так, что вибрационное движение наблюдается только вблизи концов струны и узлов возбуждаемых источником стоячих поперечных волн в струне, т. е. на участках струны, где поперечные колебания отсутствуют. Это позволяет сделать вывод о том, что механизм вибрационного транспортирования источника колебаний по струне в отличие от волнового транспортирования частиц вдали от источника не связан с колебаниями струны. Однако в условиях возбуждения поперечных колебаний возможно осуществление транспортирования пьезоэлемента по струне плавным изменением частоты подаваемого на него синусоидального напряжения.

Список литературы

- [1] *Вибрации в технике: Справочник*. Т. 4. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
- [2] Александров В.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 28. В. 17. С. 80.
- [3] Горб А.Н., Коротченко О.А. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 17. С. 67.
- [4] Александров В.А. // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 35–36.