

ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА ОТСЛОИВШИМИСЯ АКТУАТОРАМИ

М.В. ГОЛУБ, А.Н. ШПАК

Институт математики, механики и информатики, КубГУ, Краснодар

e-mail: m_golub@inbox.ru; alisashpak7@gmail.com

В настоящее время пьезоактуаторы используются во многих системах мониторинга структур. Отказ некоторого числа актуаторов может привести к серьезным сбоям в работе, поэтому мониторинг самих актуаторов представляется важной задачей. Могут возникать частичные отслоения или сколы, при которых актуатор генерирует и регистрирует сигналы, но такие измерения могут давать недостоверные результаты. Для исследования динамики отслоившихся актуаторов, а также для определения методов обнаружения таких отслоений проведен эксперимент. В случае значительного отслоения обнаружены новые эффекты. С помощью вейвлет-анализа установлено, что скорости перемещений и несущие частоты зависят от формы отслоения, а размер отслоения влияет на амплитуды возбуждаемых сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Сложность внутренней структуры компонентов и объектов, используемых в промышленности и технике, растёт с каждым днём. В связи с этим технология проверки целостности приобретает все большую важность. Мониторинг состояния конструкций или Structural Health Monitoring (SHM) – новая быстро развивающаяся область, тесно связанная с неразрушающим контролем. Своевременно обнаружить дефекты и предотвратить разрушения можно с помощью систем мониторинга, которые оценивают целостность структуры объекта и обнаруживают зарождающиеся дефекты до отказа всей системы. Один из методов мониторинга заключается в использовании встроенных или приклеенных на поверхность пьезоэлектрических устройств, генерирующих колебания в структуре, которые затем анализируются, и по которым устанавливается отклик системы [1]. Сенсоры могут стать слабым звеном во всей системе мониторинга, особенно в долгосрочном периоде. Отказ пьезоактуаторов может привести к значительным проблемам и, очевидно, задача мониторинга распространяется не только на исследуемую структуру, но и на сами актуаторы и датчики [2]. В качестве пьезоэлектрических сенсоров в производстве широко используются круговые пьезоактуаторы с загнутым электродом (piezoelectric wafer active sensor – PWAS) ввиду своей дешевизны и малых размеров. Задача диагностики круговых пьезоактуаторов усложняется спецификой волнового поля, которое они создают: из-за сложной формы загнутого электрода эти актуаторы генерируют неосесимметричное волновое поле [3]. Цель настоящего исследования – накопление знаний о влиянии отклеенных круговых пьезоактуаторов с загнутым электродом на работу системы мониторинга. С помощью вейвлет-преобразования изучается динамика идеально прикрепленных и отслоившихся актуаторов, а также волновые поля, генерируемые при этом в структуре и обсуждаются методы определения степени и характера отслоения актуатора.

1 ЭКСПЕРИМЕНТ



Рис. 1. Экспериментальная установка: фронтальный вид (а). Обратная сторона алюминиевой пластины с актуатором: вид сбоку (б).

Для исследования динамики отслоившихся пьезоактуаторов, а также для сравнения волновых полей, генерируемых полностью и частично приклеенными сенсорами, был создан экспериментальный образец. Шестнадцать круговых пьезоактуаторов были приклеены на алюминиевую пластину толщиной $H = 2$ мм и размерами 500 мм на 550 мм с разной степенью контакта, рис. 1. Для уменьшения эффекта неосесимметричности волновых полей ориентация точек припоя на всех актуаторах неизменна (всегда 180°). Формы и ориентации областей непрочлепки представлены на рис. 2.

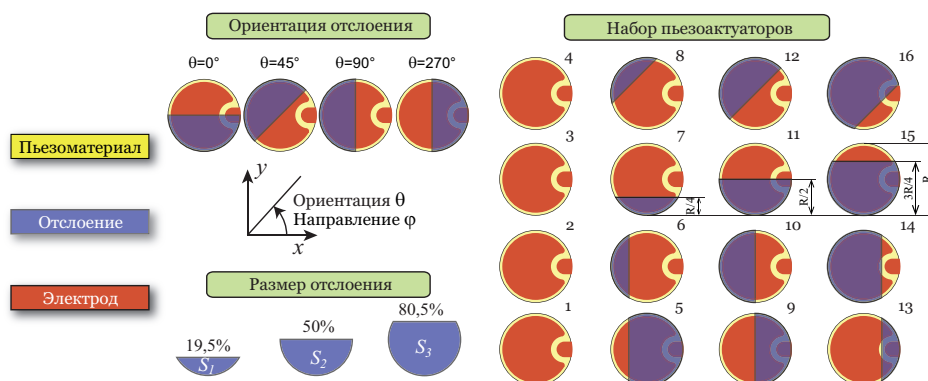


Рис. 2. Актуатор и области непрочлепки.

Для измерения скоростей перемещений пластины, генерируемых одним из актуаторов на пластине, использовалась установка с лазерным виброметром. На актуатор подается электрический сигнал, который, благодаря пьезоэлектрическим материалам, преобразуется в механические перемещения, которые измеряются с помощью лазерного виброметра с обратной стороны пластины $z = -H$ аналогично [3]. Измерения проводились для каждого актуатора на окружности радиуса 20 мм и центром, совпадающим с центром актуатора. В качестве входного электрического сигнала используются N циклов косинуса, сглаженных окном Ханна, на центральных частотах от 30 кГц до 180 кГц:

$$p(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi f_0 t) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi f_0 t}{N}\right) \right), 0 < t < \frac{N}{f_0}. \quad (1)$$

2 МОДЕЛЬ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ

Динамика пластины с актуатором описывается вектором перемещений $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющим уравнениям Ляме в декартовых координатах $\mathbf{x} = (x, y, z)$. Граничные условия на перемещения и скорости перемещений

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t < 0) = 0, \dot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t < 0) = \frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{x}, t < 0)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

означають, що пластина знаходиться в стані спокою до моменту часу $t = 0$, коли на верхній поверхні слоя починає діяти навантаження $\mathbf{q}(x, y)$, пов'язана з роботою актуатора. Нижня поверхня вільна від напружень

$$\boldsymbol{\tau}(x, y, z = 0, t) = \mathbf{q}(x, y) \cdot p(t), \boldsymbol{\tau}(x, y, z = -H, t) = 0. \quad (3)$$

В силу лінійності задачі рішення в часовій області $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ може бути представлено в вигляді інтегрального перетворення Лапласа від гармонічного рішення $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega)$ [4]

$$\frac{\partial \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -Re \int_0^{\infty} i f \mathbf{u}(\mathbf{x}, f) P(f) e^{-2\pi i f t} df \quad (4)$$

Здесь $P(f)$ - преобразование Фурье от функции входного импульса $p(t)$. Нагрузка на поверхность зависит от расположения актуатора и области контакта S со слоем. Граничные условия, накладываемые в области контакта S , приводят к интегральным уравнениям относительно неизвестной нагрузки $\mathbf{q}$. Резонансы системы пластина-актуатор можно определить как спектральные точки f_n соответствующих краевых задач. Так как резонансные частоты f_n могут отличаться от f_0 , то это может оказать значительное влияние на спектр регистрируемого сигнала [5].

Для анализа резонансных частот по возбуждаемому волновому полю используется частотно-временной анализ. Для этого подходит вейвлет-преобразование, которое позволяет проанализировать, в какой момент времени какая частота была зарегистрирована, и найти несущие частоты:

$$\mathcal{W}[u](\omega, t) = \sqrt{\frac{f}{f_0}} \int_{t_1}^{t_2} u(\xi) \psi_G \left(\frac{(\xi - t)f}{f_0} \right) d\xi. \quad (5)$$

Здесь $\psi(t)$ – ядро вейвлет-преобразования, $u(\xi)$ – сигнал, $\xi \in [t_1, t_2]$ и f_0 – центральная частота входного электрического сигнала. В качестве ядра вейвлет-преобразования был выбран вейвлет Габора при $G = 0.5$, так как его форма сходна с формой исходного сигнала

$$\psi_G = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{f_0}{\gamma}} \exp \left[-\frac{1}{2} G \left(\frac{f_0}{\gamma} \right)^2 t^2 + i 2\pi f_0 t \right], \gamma = \sqrt{\frac{1}{\ln 2}}. \quad (6)$$

Вейвлет-преобразование позволяет анализировать динамическое поведение пьезоактуаторов. Так, несущая частота зарегистрированного сигнала f_c определяется как максимум модуля вейвлет-преобразования $|\mathcal{W}[u](f, t)|$.

3 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Измерения проводились при $N = 5$, такой выбор является оптимальным для данного диапазона частот [3]. Примеры измеренных лазерным виброметром скоростей перемещений на центральных частотах $f_0 = 60$ кГц и $f_0 = 180$ кГц и с различными областями отслоения (S_1, S_2, S_3), а также полностью приклеенного пьезоактуатора, представлены на рисунке рис. 3.

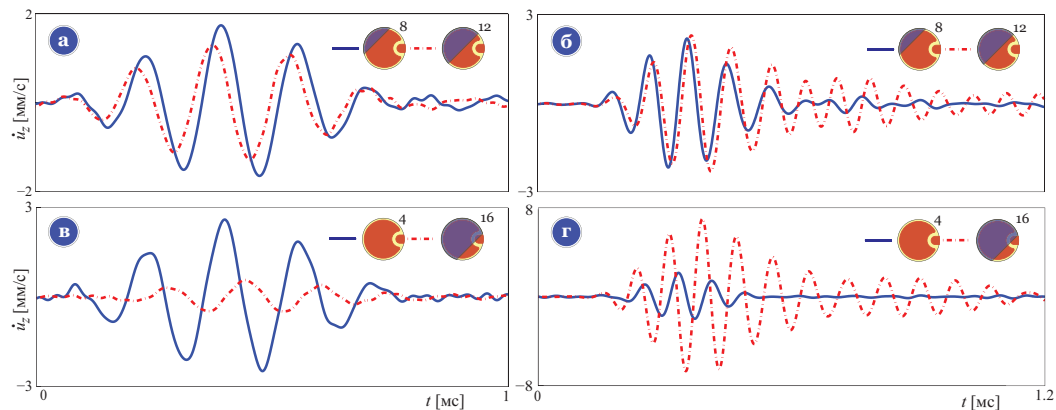


Рис. 3. Скорости вертикальных перемещений $\dot{u}_z(t)$ на центральной частоте $f_0 = 60$ кГц (а,в) и $f_0 = 180$ кГц (б,г), измеренные для направления $\phi = 130^\circ$.

Пьезоактуатор под действием электрического поля генерирует сигнал, который распространяется по пластине. Скорости перемещений, измеренные лазерным виброметром на её поверхности, представлены на рис. 3. В большинстве случаев амплитуда перемещений, вызванных отслоившимся актуатором значительно ниже аналогичных перемещений, вызванных полностью приклеенным актуатором, ввиду маленькой области контакта с пластиной. Однако амплитуда скоростей перемещений на центральной частоте $f_0 = 180$ кГц значительно выше для непроклеенного актуатора, по сравнению с полностью работоспособным, что видно на рис. 3(г). По-видимому, это может быть связано со стоячими волнами на частотах близких к резонансным f_n , когда сигнал “пойман в ловушку” внутри актуатора, как в случае с трещиной [6]. Стоячие волны также объясняют природу дополнительных волн в записанном сигнале после того, как все $N = 5$ циклов косинуса уже были зарегистрированы.

Для определения времени прихода основного сигнала и значения его несущей частоты, зарегистрированных с помощью лазерного виброметра, использовалось вейвлет-преобразование – результаты представлены на рис. 4 и 5. Наблюдается как сдвиг несущей частоты, так времени прихода сигнала. Рис. 5 показывает значения несущей частоты, рассчитанные для различной степени контакта и различных центральных частот f_0 . Наблюдается разница между центральной и несущей частотами для непроклеенных пьезоактуаторов, причем при увеличении размера отслоения значение несущей частоты, как правило, сильнее отличается от центральной и сдвигается в сторону резонансных частот f_n исследуемого актуатора. Разница между центральной и несущей частотами зависит также от ориентации актуатора и зоны отклейки.

Рис. 6 показывает время прихода пакета с несущей частотой в случае непроклеенных актуаторов с разной ориентацией области отслоения S_3 ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) в

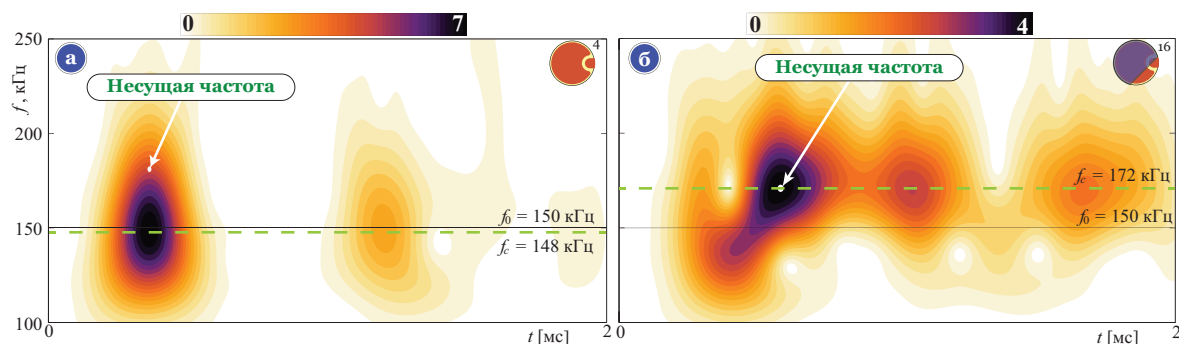


Рис. 4. Вейвлет-преобразование для идеально закрепленного актуатора (а) и сильно непроклеенного (б) на центральной частоте $f_0 = 150$ кГц для направления $\phi = 230^\circ$.

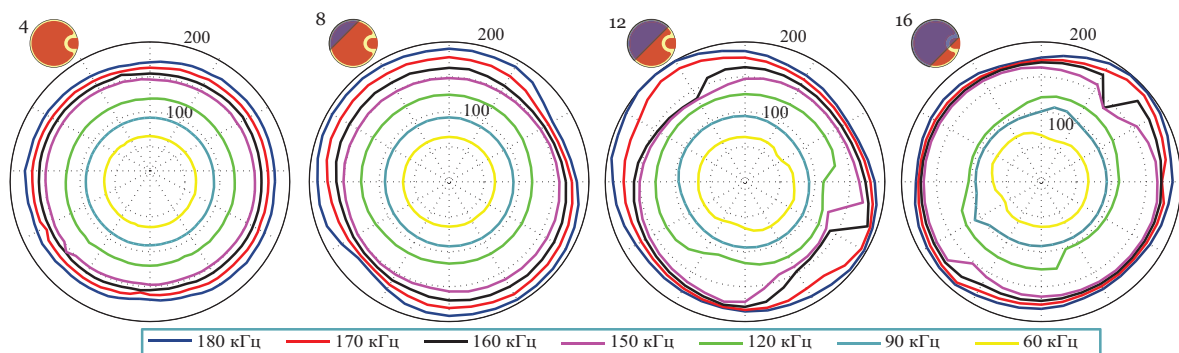


Рис. 5. Несущие частоты волнового поля, сгенерированного актуаторами №4, 8, 12 и 16, рассчитанные с помощью вейвлет-преобразования

сравнении с аналогичными измерениями для полностью работоспособного актуатора. При значительных отслоениях актуатора время прихода несущей частоты увеличивается с ростом центральной частоты, в то время как для полностью проклеенного актуатора наблюдается равномерное уменьшение времени прихода несущей частоты при увеличении центральной частоты.

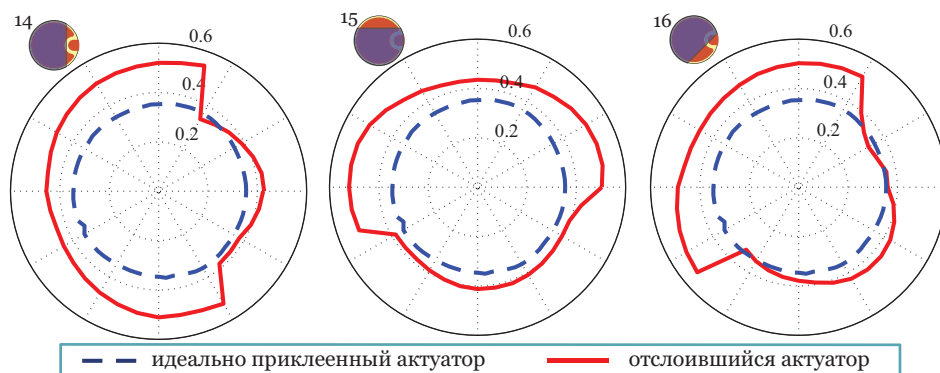


Рис. 6. Время прихода несущей частоты в случае непроклеенных актуаторов №14, 15 и 16 с ориентацией $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ области отслоения S_3 в сравнении с полностью приклеенным актуатором №4 на центральной частоте $f_c = 150$ кГц

Видно, что и время прихода, и значение несущей частоты зависит от формы отслоения, см. рис. 4–6. Авторы полагают, что информация о времени прихода, значении несущей частоты и резонансными частотами f_n , может использоваться для определения наличия, формы и местоположения отслоений между актуатором и структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования круговых пьезоактуаторов с разной степенью отслоения был спланирован и проведён эксперимент с последующим анализом полученных данных. С помощью непрерывного вейвлет-преобразования были рассчитаны несущие частоты записанных сигналов и время их прихода. Был проведен сравнительный анализ динамики пьезоактуаторов с разной степенью отслоения и установлены различия между центральной и несущей частотами, зависящие от формы отслоения. Также наблюдались некоторые изменения во времени прихода несущей частоты сигнала, сгенерированного недоклеенными пьезоактуаторами, также зависящие от формы отслоения. Полученные из эксперимента и вейвлет-анализа знания о динамике непроклеенных пьезоактуаторов могут быть полезны в задаче мониторинга работоспособности круговых пьезоактуаторов (PWAS).

Авторы выражают признательность профессорам Е. В. Глушкову и Н. В. Глушковой за плодотворное обсуждение проблемы, а также благодарят профессора К.-П. Фритцена и его группу (Университет г. Зиген, ФРГ) за экспериментальные данные.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №12-01-33011-мол_вед_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Giurgiutiu V.* Structural Health Monitoring with piezoelectric wafer active sensors.– E.: Academic Press, 2007.– 760 p.
2. *Lee S. J., Sohn H., Jung-Wuk H.* Time Reversal Based Piezoelectric Transducer Self-diagnosis under Varying Temperature // *Journal of Nondestructive Evaluation.*– 2010.– **29.**– P. 75-91.
3. *Moll J., Golub M. V., Glushkov E., Glushkova N., Fritzen C.-P.* Non-axisymmetric Lamb Wave Excitation by Piezoelectric Wafer Active Sensors // *Sensors and Actuators: A. Physical.*– 2012.– **174.**– P. 173-180.
4. *Бабешко В. А., Глушков Е. В., Зинченко Ж. Ф.* Динамика неоднородных линейно-упругих сред.– М.: Наука, 1989.– 344 с.
5. *Glushkov E., Glushkova N., Golub M., Eremín A.* Resonance blocking and passing effects in two-dimensional elastic waveguides with obstacles // *Journal of the Acoustical Society of America.*– 2011.– **130**, N 1.– P. 113-121.
6. *E. Glushkov, N. Glushkova, M. Golub, J. Moll, and C.-P. Fritzen* Wave energy trapping and localization in a plate with a delamination // *Smart Materials and Structures.*– 2012.– **21.**– P. 125001.