

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНИХ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОАКСЕЛЕРОМЕТРА

© 2019 г. А. С. Борозенец<sup>а</sup>, Д. Ю. Гараев<sup>а</sup>, А. В. Проскурин<sup>а</sup>, В. В. Таусенев<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> РФЯЦ–ВНИИ технической физики  
Россия, 456770, Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

\*e-mail: niik@vniitf.ru

Поступила в редакцию 06.11.2018 г.

После доработки 17.03.2019 г.

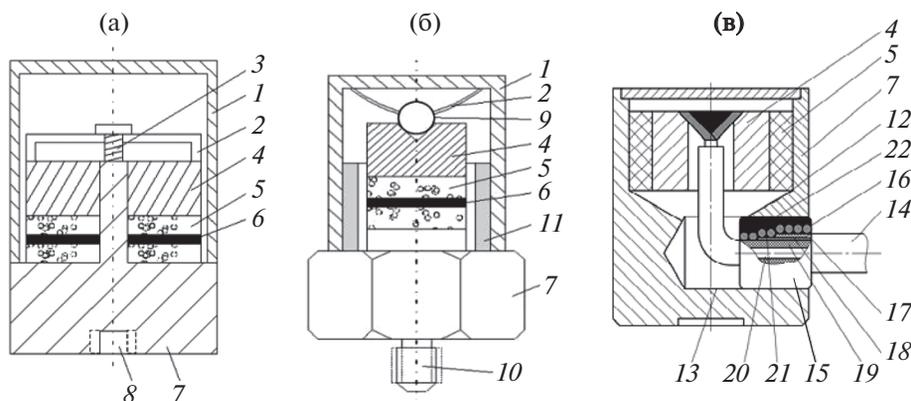
Принята к публикации 17.03.2019 г.

Для определения нижней собственной частоты пьезоакселерометра в закрепленном и незакрепленном состояниях использован тест “определение установочного резонанса” (Measure Resonance Test – MRT) усилителя NEXUS 2692, дополненный спектральным анализом отклика пьезоакселерометра на электрический импульс, проведенным методом быстрого преобразования Фурье. Определенная таким способом нижняя собственная частота закрепленного пьезоакселерометра позволяет подтвердить качество закрепления датчика на объекте испытаний и оценить достоверность получаемых результатов после нагружения.

DOI: 10.1134/S0032816219050069

При планировании измерений ускорений необходимо правильно выбирать пьезоакселерометр, учитывая, что нижняя собственная частота  $f_3$  закрепленного пьезоакселерометра должна быть много больше частоты измеряемого сигнала  $f$ . В общем виде эта задача решена в [1]. На практике для исключения искажения частоты измеряемого сигнала используют более простые соотношения, например  $f_3 \geq 12f$ .

В силу различных причин не всегда возможно установить пьезоакселерометр непосредственно на объект испытаний, в связи с чем для закрепления пьезоакселерометров могут применяться прокладки, кронштейны, клеи различной жесткости и т.д. В зависимости от способа закрепления пьезоакселерометра его нижняя собственная частота  $f_3$  может значительно изменяться (чаще всего снижаться), из-за чего измеренный сигнал



**Рис. 1.** Конструкции пьезоакселерометров: а – Briel&Kjer 4344; б – АП8 и АП11; в – АР77. 1 – крышка корпуса; 2 – тарельчатая пружина; 3 – винт; 4 – инерционный элемент; 5 – пьезокерамика; 6 – токовывод; 7 – корпус; 8 – резьбовое отверстие для съемной шпильки; 9 – шарик; 10 – несъемная шпилька (хвостовик); 11 – электроизоляционная втулка; 12 – коническая опора; 13 – отверстие для ввода кабеля; 14 – кабель; 15 – узел ввода кабеля; 16 – проволочный бандаж; 17 – внешняя изоляция; 18 – экран; 19 – внутренняя изоляция; 20 – жила; 21 – припой, скрепляющий бандаж; 22 – припой, закрепляющий узел ввода кабеля в корпусе.

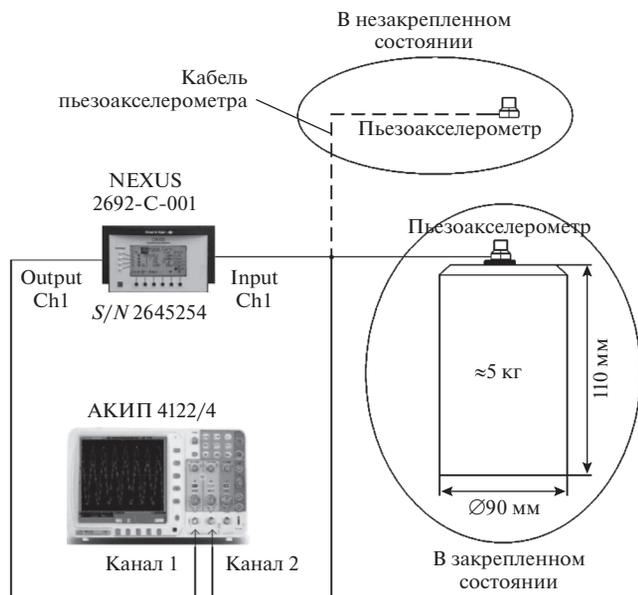


Рис. 2. Схема проведения MRT.

может быть недостоверным либо измерен с большой погрешностью [2–4]. Даже увеличение слоя клеевого соединения для одной и той же пары “датчик–объект испытаний” приводит к снижению нижней собственной частоты пьезоакселерометра. Например, нижняя собственная частота пьезоакселерометра АП7(АП11), установленного на герметик ВГО-1 с толщиной клеевого слоя 0.15–0.2 мм, составляет  $\geq 15$  кГц, а при толщине клеевого слоя 0.7 мм – не более 8 кГц [4].

При закреплении на объекте испытаний нескольких пьезоакселерометров одним и тем же способом технологически сложно обеспечить одинаковую толщину клеевого слоя, а значит, и необходимую нижнюю собственную частоту пьезоакселерометров, которая будет различаться иногда существенно. На практике оперативно проконтролировать толщину клеевого слоя и качество клеевого соединения датчика с объектом испытаний, особенно если датчик установлен внутри объекта испытаний, не представляется возможным. Поэтому определение нижней собственной частоты пьезоакселерометра после его установки на объект испытаний, по мнению авторов, является актуальной задачей.

Электрический способ определения нижней собственной частоты пьезоакселерометра в закрепленном состоянии предлагает фирма “Briel & Kjaer” (www.bksv.ru). С использованием усилителя NEXUS 2692-C-001 (далее NEXUS) этой фирмы проводится тест “определение установочного резонанса” (Measure Resonance Test – MRT). Основные характеристики этого усилителя приведены ниже:

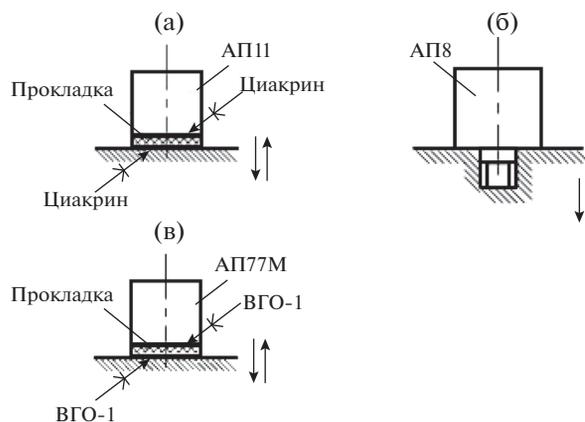


Рис. 3. Схемы закрепления пьезоакселерометров: а – АП11, закрепленного цианокрилатным клеем ТК-200 через текстолитовую прокладку толщиной 3 мм; б – АП8, закрепленного на резьбе; в – АР77М, закрепленного на ВГО-1 через текстолитовую прокладку толщиной 3 мм.

- номинальный предел преобразования зарядов  $10^5$  пКл;
- выходное напряжение  $\leq 10$  В;
- номинальные коэффициенты преобразования от  $10^{-5}$  до 10 В/пКл;
- верхние граничные частоты 0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30, 100 кГц.

MRT осуществляется следующим образом. На входе усилителя, к которому подключен пьезоакселерометр, формируется разнополярный прямоугольный импульс напряжения амплитудой 15 В со скважностью 2 установленной длительности (от 0.01 до 0.1 мкс), возбуждающий вибрацию чувствительного элемента пьезоакселерометра. Затем усилитель NEXUS переключается в режим измерения и в автоматическом режиме измеряет время  $T$ , затраченное на регистрацию  $N$  периодов сигнала отклика датчика ( $N$  задано алгоритмом теста). После проведения измерений рассчитывается измеренная частота  $F = N/T$ , которая высвечивается на экране усилителя. Необходимо отметить, что в отклике пьезоакселерометра, помимо собственной частоты колебаний закрепленного пьезоакселерометра, также содержатся частоты, вызванные колебаниями инерционной массы, входящей в состав пьезоакселерометра (собственная частота колебаний незакрепленного пьезоакселерометра).

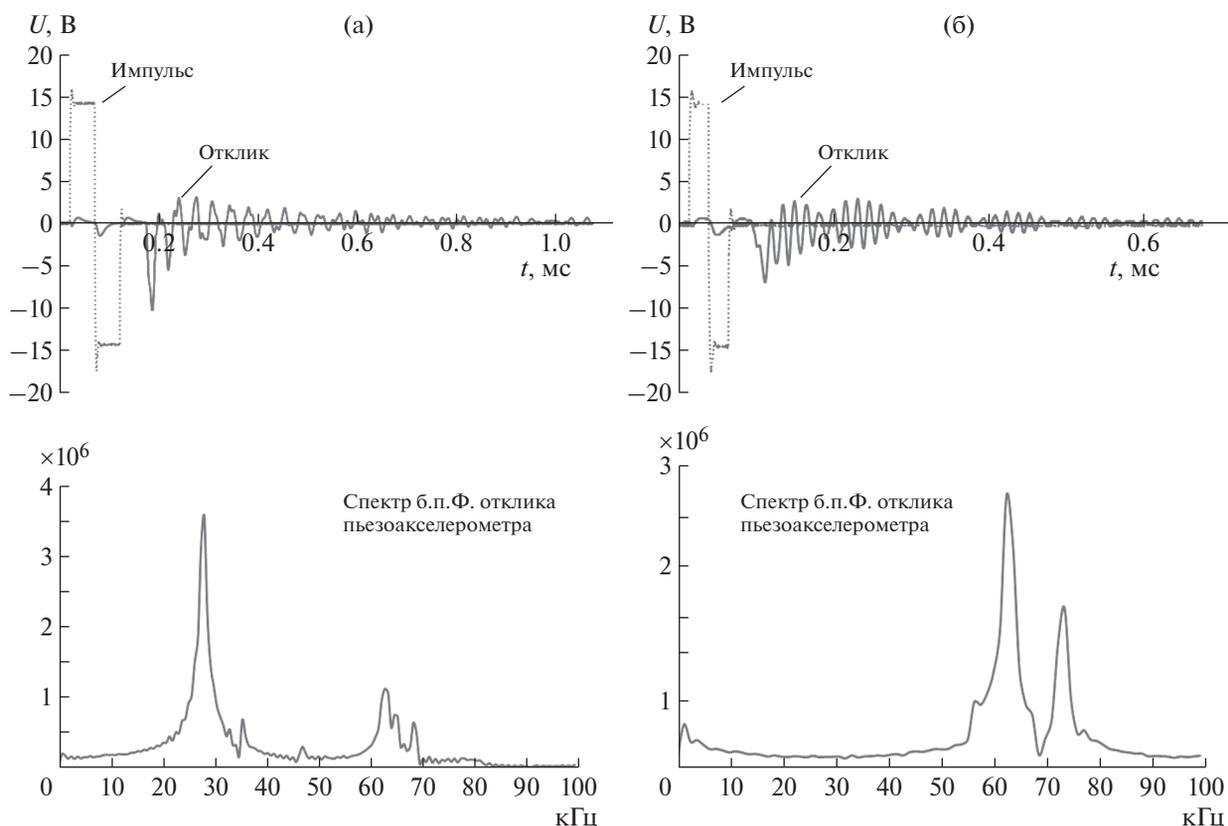
На практике попытка применить MRT к отечественным пьезоакселерометрам АР77М производства фирмы ООО “ГлобалТест” (г. Саров, www.globaltest.tu) и АП11, АП8 производства ФГУП “Уральский электромеханический завод”,

**Таблица 1.** Нижняя собственная частота пьезоакселерометров в закрепленном состоянии

| № эксперимента  | Частота, соответствующая длительности возбуждающего импульса, кГц | Нижняя собственная частота $f_3$ , кГц |           |
|---|---|--|-----------|
|   |   | MRT                                    | б.п.Ф.    |
| АП11, закрепленный цианокрилатным клеем ТК-200 через текстолитовую прокладку толщиной 3 мм ( $f_3 = 25-30$ кГц) |   |  |           |
| 1   | 10  | 55.4                                   | 28.0      |
| 2   | 20  | 63.2                                   | 28.0      |
| 3   | 25  | 14.5                                   | 28.0      |
| 4   | 35  | 35.7                                   | 28.0      |
| 5   | 55  | 67.1                                   | 28.0      |
| АР77М, закрепленный на ВГО-1 через текстолитовую прокладку толщиной 3 мм (согласно [2], $f_3 \geq 17$ кГц)      |   |  |           |
| 6   | 10  | 41.2                                   | 16.3      |
| 7   | 20  | 48.8                                   | 16.3      |
| 8   | 25  | 46.0                                   | 16.3      |
| 9   | 35  | 34.3                                   | 16.3      |
| 10  | 55  | 63.8                                   | 16.3      |
| АП8 закрепленный на резьбе ( $f_3 \geq 40$ кГц)   |   |  |           |
| 11  | 10  | 61.1                                   | $\geq 34$ |
| 12  | 20  | 60.6                                   | $\geq 34$ |
| 13  | 25  | 66.3                                   | $\geq 34$ |
| 14  | 35  | 44.5                                   | $\geq 34$ |
| 15  | 55  | 59.0                                   | $\geq 34$ |

**Таблица 2.** Нижняя собственная частота пьезоакселерометров в незакрепленном состоянии

| № эксперимента | Частота, соответствующая длительности возбуждающего импульса, кГц | Нижняя собственная частота незакрепленного пьезоакселерометра $f_{нз}$ , кГц |        | Нижняя собственная частота пьезоакселерометра по паспорту (ТУ), кГц |
|----------------|---|--|--------|---|
|                |   | MRT  | б.п.Ф. |   |
| АП11           |   |  |        |   |
| 16             | 10  | 55.4   | 72.0   | 80  |
| 17             | 20  | 63.2   | 63.0   |   |
| 18             | 25  | 14.5   | 63.0   |   |
| 19             | 35  | 35.7   | 63.0   |   |
| 20             | 55  | 67.1   | 63.0   |   |
| АР77М          |   |  |        |   |
| 21             | 10  | 41.2   | 32.0   | >35   |
| 22             | 20  | 48.8   | 64.0   |   |
| 23             | 25  | 46.0   | 32.0   |   |
| 24             | 35  | 34.3   | 32.0   |   |
| 25             | 55  | 63.8   | 32.0   |   |
| АП8            |   |  |        |   |
| 26             | 10  | 61.1   | 76.0   | 80  |
| 27             | 20  | 60.6   | 59.0   |   |
| 28             | 25  | 66.3   | 59.0   |   |
| 29             | 35  | 44.5   | 59.0   |   |
| 30             | 55  | 59.0   | 59.0   |   |



**Рис. 4.** Характерные примеры зарегистрированных сигналов: **а** – для пьезоакселерометра в закрепленном состоянии; **б** – для пьезоакселерометра в незакрепленном состоянии. Вверху – сигналы на входе регистратора: штриховая линия – возбуждающий импульс, сплошная линия – отклик пьезоакселерометра; внизу – спектр б.п.Ф. отклика пьезоакселерометра.

(г. Екатеринбург, [www.uemz.ru](http://www.uemz.ru)), закрепленным на объекте испытаний, положительного результата не дала: результаты теста имели случайный характер и не соответствовали значениям нижней собственной частоты пьезоакселерометра, приведенным в [2, 4]. Возможной причиной этого было отличие конструкций датчиков АП11, АР77М, АП8 от датчиков фирмы Briel & Kjer (для сравнения был взят датчик типа 4344). Датчики АП11 АП8 и Briel&Kjer 4344 (рис. 1а, 1б) построены по компрессионной схеме, однако поджатие пьезоэлемента в АП11 и АП8 обеспечивается верхней крышкой датчика, а в датчике Briel & Kjer 4344 – с помощью винта, закручиваемого в основание датчика [2]. Датчик АР77М построен по сдвиговой схеме (рис. 1в).

Нами было предложено дополнить MRT спектральным анализом отклика пьезоакселерометра, регистрируемого по схеме, представленной на рис. 2. При проведении MRT регистрация отклика пьезоакселерометра проводилась первым каналом осциллографа АКИП 4122/4, а вторым каналом регистрировался возбуждающий импульс напряжения, формируемый усилителем NEXUS S/N 2645254. После регистрации вычислялся

спектр быстрого преобразования Фурье (б.п.Ф.) отклика пьезоакселерометра. Экстремум на спектре б.п.Ф. определял нижнюю собственную частоту пьезоакселерометра.

В ходе исследований было проведено 30 экспериментов с пьезоакселерометрами типа АП11, АР77М, АП8, закрепленными различными способами (рис. 3). При определении собственных частот незакрепленного пьезоакселерометра последний подвешивался за собственный кабель.

Значения полученных нижних собственных частот пьезоакселерометров в закрепленном и незакрепленном состояниях приведены в табл. 1, 2. Характерные примеры зарегистрированных сигналов представлены на рис. 4. Согласно графикам спектра б.п.Ф., приведенным также на рис. 4, экстремум спектра на нижней собственной частоте пьезоакселерометров в закрепленном и незакрепленном состояниях хорошо различим. Амплитуда этого пика увеличивается с приближением частоты возбуждающего электрического импульса, генерируемого усилителем NEXUS, к частоте собственных колебаний чувствительного элемента пьезоакселерометра.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Использование MRT усилителя NEXUS для определения нижней собственной частоты отечественных пьезоакселерометров АП11, АР77М, АП8, установленных на объект испытаний с помощью клеевого соединения, показало, что полученные результаты носят случайный характер.

2. Дополнение MRT усилителя NEXUS спектральным анализом отклика пьезоакселерометра на возбуждающий импульс напряжения позволяет получить корректные значения нижних собственных частот колебаний пьезоакселерометров в закрепленном и незакрепленном состояниях, которые согласуются с данными работы [4] и с паспортными данными (ТУ) на датчик.

3. Использование MRT усилителя NEXUS в сочетании со спектральным анализом отклика пьезоакселерометра позволяет перед испытаниями достаточно оперативно определять нижнюю собственную частоту установленного на объект пьезоакселерометра. Проверенное таким образом качество закрепления пьезоакселерометра на

объекте испытаний снижает риск получения недостоверной измерительной информации.

4. Метод спектрального анализа отклика пьезоакселерометра на возбуждающий импульс не привязан к предложенной измерительной системе, его можно реализовать с другими измерительными системами и пьезоакселерометрами или создать на его базе прибор для оценки качества закрепления пьезоакселерометров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крылов А.Н.* Избранные труды. Изд-во АН СССР, 1958. С. 315–360.
2. *Соболев М.Д., Логинов П.М., Ивашин Н.А.* Защита датчиков ударных ускорений от неизмеряемых механических воздействий. Монография. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2018. ISBN 978-5-902278-85-6.
3. *Авиационные приборы. Лекции по АВ и ИВК/Лекции/08.Вибродиагностика.doc.* Уфимский государственный авиационный технический университет.
4. *Колесникова Л.А., Мальгун М.М., Скрыпникова Л.Ф., Соболев М.Д.* // Измер. техника. 1990. № 2. С. 35.