



УДК 681.3

© 2019 г. **И.А. Кривошеев**, д-р техн. наук
(Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск),

Н.Д. Поваров

(Дальневосточный государственный институт путей сообщения, Хабаровск)

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Предложен способ с его технической реализацией для определения динамических характеристик сейсмоакустических преобразователей. Приведены аналитические выражения и алгоритмы вычисления. Численным моделированием показана работоспособность способа при различных исходных данных.

Ключевые слова: сейсмоакустический преобразователь, динамические характеристики, время отклика, численное моделирование, импульсное воздействие.

DOI: 10.22250/isu.2019.61.112-117

Введение

Практически любая система мониторинга базируется на каких-либо датчиках, обеспечивающих преобразование наблюдаемого параметра в электрический сигнал с последующей обработкой. Не исключением являются и различного рода сейсмоакустические информационные системы, позволяющие в реальном времени отслеживать изменение контролируемого параметра для выделения прогнозных характеристик, а впоследствии – прогнозировать поведение наблюдаемого объекта. Для сопоставления результатов различных информационных систем необходимо знать передаточные характеристики каждого звена, входящего в информационную систему. Различные электронные схемы, используемые в таких системах, хорошо описаны в отечественной и зарубежной литературе. Особое значение имеют первичные преобразователи, или в нашем случае *сейсмоакустические преобразователи* (САП), характеристики которых многие исследователи определяют самосто-

ательно, имея в своем арсенале разработанную аппаратуру [1 – 5]. Нельзя сказать, что достоверность проводимых в этом случае измерений высока, так как все измерения косвенные. Более того, в большинстве случаев не учитывается ряд особенностей, связанных с конструктивными решениями конкретных преобразователей, а также механических систем, участвующих при измерении [3, 4, 6, 7].

Способ и техническая реализация

Для устранения указанных недостатков, на наш взгляд, необходимо подойти к этому вопросу комплексно, оценив вклад как в погрешность, так и в достоверность каждого элемента, участвующего в измерениях и задействованного в технически реализованном решении. Первое, на что можно обратить внимание – это возможность замены косвенных измерений прямыми. САП имеют частотный диапазон 0,6 – 50,0КГц, поэтому конструкции таких САП весьма разнообразны и могут существенно различаться по размерам и массе. При разработке подобных устройств контроля необходимо учитывать способ получения информации об амплитуде смещения рабочей поверхности САП.

Можно использовать съем информации с малой части площади рабочей поверхности САП. В этом случае погрешность будет минимальной, а измерения более достоверными. Обычно выбранное отношение площадей общей рабочей поверхности САП к малой поверхности для съема информации всегда $\gg 500$. Общепринятый метод обычной двухлучевой интерферометрии [4, 6] в этом случае малоприменим ввиду существенной разницы плеч, и, как следствие, – слабая чувствительность и низкая достоверность полученных результатов. С меньшими проблемами здесь можно использовать интерферометры на оптическом волокне (волоконно-оптические лазерные интерферометры (ВОЛИ)) [8,10], так как они проще в изготовлении и настройке. Для размещения ВОЛИ потребуется малое отверстие в излучателе, на который устанавливается САП. Малое отверстие может быть диаметром один миллиметр, так как диаметр одномодового оптического волокна – около 8 мкм. В техническом решении может быть использован вариант, предложенный в [8], с некоторыми изменениями и дополнениями.

Более детально предложенное техническое решение отображает функциональная схема, приведенная на рис. 1. В этой схеме возбуждение САП 1 осуществляется генератором импульсов 12 с помощью излучателя 2, имеющего вид кольца с малым отверстием 4 в его середине.

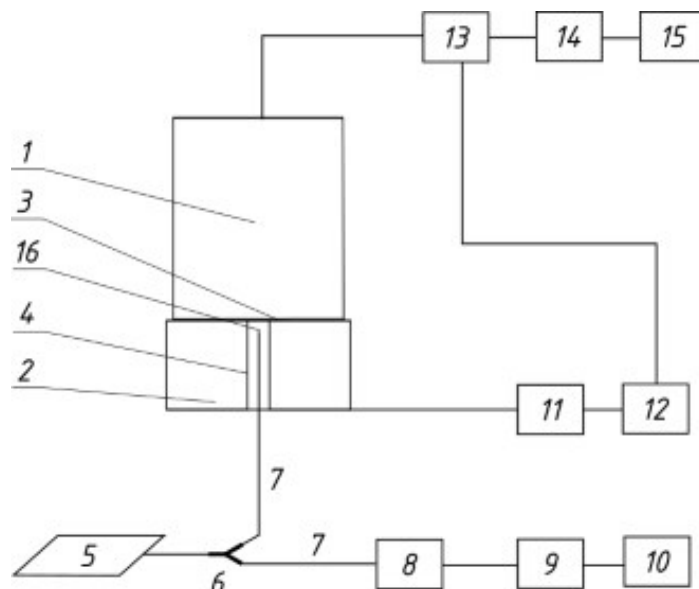


Рис. 1. Схема устройства.

Излучатель 2 непосредственно контактирует с рабочей поверхностью 3 САП. Механический импульс от излучателя 2 передается САП 1 непосредственно через его рабочую поверхность 3. Информацию о смещении этой поверхности получаем посредством головки 16 ВОЛИ, установленной в малом отверстии 4 излучателя 2. Головка 16 является частью ВОЛИ, в который входят оптически квантовый генератор 5, оптический разветвитель 6, оптическое волокно 7, фотоприемник 8, усилитель 9 и регистратор 10. Непосредственное смещение рабочей поверхности САП 1 фиксируется фотоприемником 8 и в электрическом виде через усилитель 9 поступает в регистратор 10. Отклик САП 1 на механическое воздействие излучателя 2 как электрический сигнал поступает через схему 13 селекции и усилитель 14 на регистратор 15. В качестве генератора 12 используется генератор прямоугольных импульсов, который через регулируемый усилитель 11 соединен с излучателем 2. В качестве схемы 13 селекции используется временной селектор [11 – 13], позволяющий выделять отклик САП во времени. В нем также могут применять различные способы [12,13] для повышения достоверности и точности измеряемых величин.

Алгоритм и численное моделирование

Алгоритм проведения измерений может быть следующий. Исследуемый САП необходимо механически возбудить ступенчатой функцией или прямоугольным импульсом. Теоретически это можно представить следующим образом. Если на рабочую поверхность САП подать механический сигнал в форме прямоугольного импульса, то, разложив этот сигнал в ряд Фурье, получим

$$U_{\text{вх}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(\omega) \exp(-i\omega t) \frac{d\omega}{2\pi}.$$

Спектр можно записать следующим образом:

$$S_{\text{вх}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{вх}}(t) \exp(i\omega t) dt = U_0 \frac{1}{i\omega} \{(i\omega\tau) - 1\},$$

где U_0 – амплитуда импульса; τ – длительность импульса, а для $|S_{\text{вх}}(\omega)|$ имеем

$$|S_{\text{вх}}(\omega)| = \frac{U_0}{\omega} |\exp(i\omega\tau) - 1|. \quad (1)$$

На выходе САП получаем не прямоугольный электрический сигнал, а искаженный сигнал (где передний и задний фронты импульса «затянуты», т.е. длительности их увеличены) в виде трапеции. По каждому отдельно принятому электрическому импульсу определяют его спектральную плотность

$$|S_{\text{вых}}(\omega)| = \frac{U_0}{k\tau\omega^2} |\exp(i\omega k\tau) - 1| |1 - \exp(i\omega\tau)|, \quad (2)$$

где $k = tg\alpha$; α – угол при вершине трапеции.

Точки обращения в нуль найдем следующим образом:

$$|S_{\text{вых}}(\omega)| = 0 \rightarrow \begin{cases} \sin(\omega\tau/2) = 0 \rightarrow \omega\tau/2 = \pi n \rightarrow \omega_n^{(1)} = \omega_0 n, \\ \sin(\omega k\tau/2) = 0 \rightarrow \omega k\tau/2 = \pi n \rightarrow \omega_n^{(2)} = \omega_0(n/k), \end{cases}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{\tau}, (n = 1, 2, \dots), \quad (3)$$

$$\{\alpha \in (0, \pi/4 \rightarrow k = tg\alpha \in (0, 1) \rightarrow k\tau \leq \tau \rightarrow 2\pi/\tau \leq 2\pi/k\tau)\}.$$

Далее определяем значение первого нуля функции огибающей спектра принятого электрического сигнала, по которому можно получить передаточную характеристику исследуемого САП на заданное механическое воздействие. Каждое такое значение однозначно пропорционально времени отклика САП на прямоугольное воздействие, так как зависит от k . По полученной серии таких значений путем статистической обработки можно получить для исследуемого САП усредненное значение времени отклика.

При этом необходимо заметить, что время отклика излучаемого элемента должно быть меньше времени отклика САП.

Численное моделирование проводилось по следующему алгоритму. Исходными значениями были выбраны значения параметров последовательности прямоугольных импульсов. Затем, изменяя длительность фронтов прямоугольных импульсов, определяют значение α по предложенным выше

аналитическим выражениям. Результаты расчетов приведены в таблице, где отмечено α (мкс) и значение первого нуля функции огибающей спектра F (МГц) принятого сигнала.

F , МГц	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36
α , мкс	157,080	78,540	52,360	39,270	31,416	26,180	22,440	19,635	17,453

F , МГц	0,4	0,44	0,48	0,52	0,56	0,6	0,64	0,68	0,72
α , мкс	15,708	14,280	13,090	12,083	11,220	10,472	9,817	9,240	8,727

Из таблицы видно, что теоретически у метода нет ограничений. Но реально на выходе излучателя, где в основном используется пьезокерамика, механический импульс искажен, что необходимо учитывать при построении схемы технической реализации. Для расчета все эти импульсы предварительно аппроксимируются с заданной точностью.

Заключение

Приведен способ контроля динамических характеристик сейсмоакустических преобразователей, отличающийся от известных тем, что в нем используются прямые измерения исследуемых характеристик. В этой связи можно предположить, что погрешности измерений будут меньше, а достоверность выше. К достоинствам способа можно отнести также снижение влияния человеческого фактора. Техническая реализация не претендует на оригинальность и оставляет исследователям обширное поле деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривошеев И.А.* Использование лазерного интерферометра для контроля характеристик сейсмоакустических преобразователей // Дефектоскопия. – 2002. – №9. – С.34-37.
2. *Кривошеев И.А., Кондратьев А.И.* Исследование работы емкостного преобразователя в низкочастотном диапазоне // Дефектоскопия. – 1989. – №7. – С.13-17.
3. Патент №2165092 РФ. Устройство контроля характеристик сейсмоакустических датчиков Способ контроля динамических характеристик сейсмоакустических преобразователей / И.А. Кривошеев. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2001. – №10.
4. *Желкобаев Ж., Календин В., Тодуа П.* Лазерная метрология акустических наносмещений // Фотоника. – 2009. – №5(17). – С.14-17.
5. Патент №2550761 РФ. Способ контроля динамических характеристик сейсмоакустических преобразователей / И.А. Кривошеев, М.И. Игнатьева. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2015. – №3.
6. Патент №2321849 РФ. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии и устройство для его реализации / Б.Г. Владимиров и др. – Официальный бюл.

- «Изобретения. Полезные модели». – 2008. – №10.
7. *Кривошеев И.А., Игнатъева М.И., Шамурина А.И.* Контроль динамических характеристик сейсмоакустических преобразователей информационных систем // Информатика и системы управления. – 2014. – №2. – С.168-172.
 8. Патент №2574218 РФ. Устройство для контроля характеристик сейсмоакустических датчиков / И.А. Кривошеев. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2015. – №4.
 9. Патент №2558651 РФ. Способ контроля динамических характеристик сейсмоакустических датчиков / И.А. Кривошеев, М.И. Игнатъева. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2015. – №22.
 10. Патент №2595688 РФ. Устройство для калибровки сейсмоакустических преобразователей / И.А. Кривошеев, М.И. Игнатъева. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – №24.
 11. *Кривошеев И.А., Игнатъева М.И., Шамурина А.И.* Увеличение отношения сигнал/шум при ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. – 2016. – №6. – С.11-16.
 12. Патент №2520959 РФ. Способ контроля изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород / И.А. Кривошеев, А.И. Шамурина. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2014. – №18.
 13. Патент №2539521 РФ. Устройство контроля изменения физико-механического состояния массива горных пород / И.А. Кривошеев, М.И. Игнатъева, А.И. Шамурина. – Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2015. – №2.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.И. Смагиным.

E-mail:

Кривошеев Игорь Александрович – igork@as.khb.ru;

Поваров Николай Дмитриевич – nd.povarov@gmail.com;