

## КРИТЕРИЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов

## A CRITERION FOR THE QUANTITATIVE ESTIMATION OF THE SIGNAL SPECTRUM CHANGE AT A PRESSURE PIEZOCONVERTER

O.Y. Bushuev, A.S. Semenov

Рассматривается критерий количественной оценки изменения спектра, основанный на коэффициенте корреляции между двумя числовыми последовательностями. С помощью модели выходного сигнала тензопреобразователя давления показана применимость данного критерия для обнаружения изменения спектра его выходного сигнала и локализации этих изменений.

*Ключевые слова:* спектр сигнала, количественная оценка изменения спектра, сигнал тензопреобразователя давления.

A criterion for the quantitative estimation of the signal spectrum change is analyzed. The model of pressure piezoconverter output signal shows the applicability of this criterion to detect the output signal spectrum change and to localize such changes.

*Keywords:* signal spectrum, quantitative estimation of signal spectrum change, pressure piezoconverter signal.

### Введение

При исследовании возможности диагностики технического состояния преобразователя давления по спектру его выходного сигнала возникает задача выбора критерия для обнаружения тех или иных отклонений от нормального состояния. Частотный спектр является индивидуальной характеристикой преобразователя давления, следовательно, можно ожидать, что какие-либо нарушения в конструкции сенсора приведут к изменениям спектра, которые можно зафиксировать с помощью спектрального анализа выходного сигнала преобразователя.

Предварительное моделирование дефектов конструкции сенсора методом конечных элементов [1] подтвердило изменение спектра при возникновении дефектов. На практике, ввиду наличия шума и принципиальных ограничений используемых методов спектрального анализа, определение изменения спектра представляет собой сложную

задачу. В связи с этим требуется разработка некоторого количественного критерия, позволяющего определить, произошло ли изменение спектра сигнала ввиду возможных неисправностей или нарушений в работе сенсора. В случае отклонения спектра от исходного требуется определить зону этих отклонений.

В данной работе исследуется один из возможных критериев – так называемый «критерий зонной корреляции», предложенный в работе [2]. Данный критерий основан на простых математических соображениях теории линейных систем, в соответствии с которыми коэффициент корреляции  $R$  определяет количественную оценку линейной зависимости между двумя процессами. При этом его можно использовать для поиска частотных зон в спектре выходного сигнала преобразователя, которые несут информацию о произошедших в системе изменениях.

---

**Бушуев Олег Юрьевич** – аспирант, младший научный сотрудник кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; bushuev@init.susu.ac.ru

**Семенов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, ведущий инженер кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет; 560101@rambler.ru

---

**Bushuev Oleg Yurievich** – post-graduate student, Junior Research Fellow of Information and Measurement Technology Department, South Ural State University; bushuev@init.susu.ac.ru

**Semenov Alexander Sergeevich** – Candidate of Science (Engineering), Lead Engineer of Information and Measurement Technology Department, South Ural State University; 560101@rambler.ru

Подобный критерий используется, например, в [3] для количественной оценки изменчивости спектра сейсмических сигналов. Под количественной оценкой изменения спектра в данном исследовании подразумевается получение численного выражения изменения спектра сигнала в каждом исследуемом диапазоне частот.

### 1. Построение критерия

При построении критерия были использованы требования, естественно вытекающие из задач, для решения которых данный критерий предназначен:

- генерация численной оценки схожести эталонного и исследуемого спектра в диапазоне частот;
- возможность локализации изменений спектра;
- возможность выделения зон с достоверной работой критерия;
- высокая чувствительность критерия к отклонениям формы спектра от эталонной, вызванным дефектами конструкции.

Корреляция является численным выражением «сходства» процессов, поэтому в качестве основы критерия были выбраны именно корреляционные отношения между эталонным и исследуемым сигналом. Критерий работает следующим образом: выбирается «ширина зоны» – параметр, отвечающий за частотный диапазон, в рамках которого будет определен коэффициент корреляции (КК), затем для каждого номера отсчета исследуемых спектров рассчитывается коэффициент корреляции на отрезке, равном ширине зоны и начинающемся в данном отсчете. Так получают зависимость коэффициента корреляции на отрезке от номера начала отрезка. Эта зависимость характеризует взаимосвязь спектров и позволяет выделить те диапазоны частот, в которых изменения между спектрами наиболее сильны.

С практической точки зрения важными являются те зоны, на которых коэффициент корреляции  $R_n$  между различными реализациями спектра сигнала при нормальном состоянии преобразователя является максимальным, что означает наличие в этих зонах полезной информации неслучайного характера. Эти зоны должны определяться при гарантированно исправном преобразователе.

При условии, если в этих же зонах коэффициент корреляции  $R_{nch}$  между спектрами сигнала в нормальном и измененном состоянии уменьшится, это различие может служить критерием наличия изменения в этом частотном диапазоне. В качестве количественного критерия может быть выбрана разность коэффициентов корреляции  $R_n$  и  $R_{nch}$  в области значений  $R_n$ , близких к единице:

$$dR = R_n - R_{nch}.$$

Для исключения влияния случайных искажений спектра коэффициенты корреляции между спектрами различных реализаций выходного сигнала усреднялись. Таким образом, при наличии  $N$  реализаций выходного сигнала при нормальном состоянии сенсора и  $L$  реализаций выходного сигнала при измененном состоянии число усредняемых коэффициентов корреляции для получения среднего значения  $R_n$  составит  $N(N-1)/2$ , а для получения среднего  $R_{nch}$  необходимо вычислить и усреднить  $N \times L$  коэффициентов корреляции. В этом случае для получения оценки достаточно воспользоваться критерием  $dR$ , в котором вместо  $R_n$  и  $R_{nch}$  используются их усредненные значения.

### 2. Исследование критерия при помощи модели выходного сигнала

Для исследования данного критерия была разработана модель выходного сигнала тензопреобразователя давления, которая представляет собой сумму затухающих синусоид, частоты и амплитуды которых подбираются так, чтобы максимально соответствовать экспериментальным данным. На рис. 1 показан спектр одной из смоделированных реализаций, состоящий из девяти затухающих синусоид и нормально распределенного случайного шума. Модель позволяет регулировать уровень соотношения сигнал/шум.

Сначала исследовалось, позволяет ли критерий определить изменение значения одной из частот при разном отношении сигнал/шум. Под отношением сигнал/шум понимается отношение энергии полезного сигнала к энергии шума.

В модели, содержащей 9 затухающих синусоид при уровне сигнал/шум  $SNR = 1$  (рис. 1), изменили значения двух частот:  $f_1 = 13\,853$  Гц и  $f_2 = 27\,600$  Гц на  $f_1' = 15\,553$  Гц и  $f_2' = 28\,500$  Гц соответственно. Было получено по 10 реализаций каж-

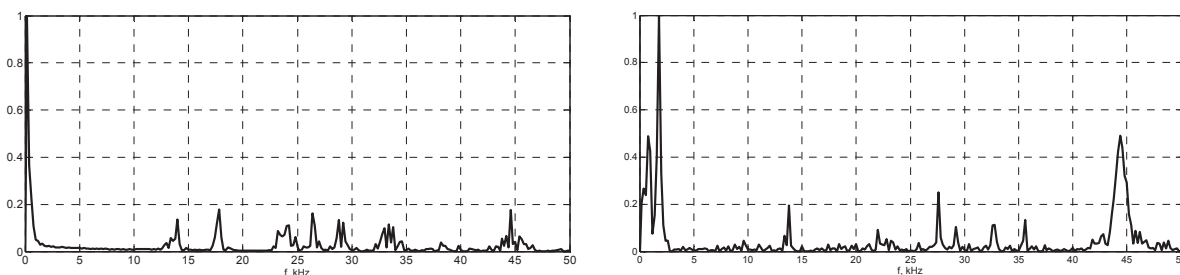


Рис. 1. Спектр реального (слева) и смоделированного (справа) сигнала

дого состояния, затем между всеми реализациями был рассчитан зонный коэффициент корреляции, ширина зоны – 1000 Гц. Получилось 45 коэффициентов корреляции  $Rn$  между спектрами, соответствующими нормальному состоянию, и 100 коэффициентов корреляции  $Rnch$  между спектрами, соответствующими нормальному и измененному состоянию. Затем эти значения коэффициентов корреляции усреднили и вычислили значение критерия  $dR = \langle Rn \rangle - \langle Rnch \rangle$ . Как показано на рис. 2, критерий позволяет определить изменение спектра сигнала в области частот 13,8 кГц и 27,6 кГц. При увеличении отношения сигнал/шум получаем схожие результаты.

Далее исследовалось, позволяет ли критерий определить изменение амплитуды на определенной частоте в спектре сигнала. Для этого в той же модели, содержащей 9 затухающих синусоид при уровне сигнал/шум  $SNR = 1$  (рис. 1), изменили в два раза амплитуду на частоте  $f1 = 13\,853$  Гц и значение частоты  $f2 = 27\,600$  Гц на  $f2' = 28\,500$  Гц.

Было получено по 10 реализаций каждого состояния, затем между всеми реализациями был рассчитан зонный коэффициент корреляции, ширина зоны – 1000 Гц, после чего эти значения коэффициентов корреляции усреднили и вычислили значение критерия  $dR$ . Результат представлен на рис. 3.

На рис. 3 показано, что при изменении амплитуды одной частоты и значения другой критерий также позволяет четко определить, что спектр сигнала изменился в области частот 13,8 кГц и 27,6 кГц.

На указанных графиках изображено, что изменения спектра произошли в области частот 12,6–15 кГц и 27,4–28,8 кГц. Для сужения области, в которой произошли изменения, применяется следующая методика. Используя полученные данные, можно объединить множества частот, в которых коэффициент корреляции максимален, и вычесть те области, в которых он минимален. Наглядно это можно сделать следующим образом: сдвинуть критерий на величину ширины зоны.

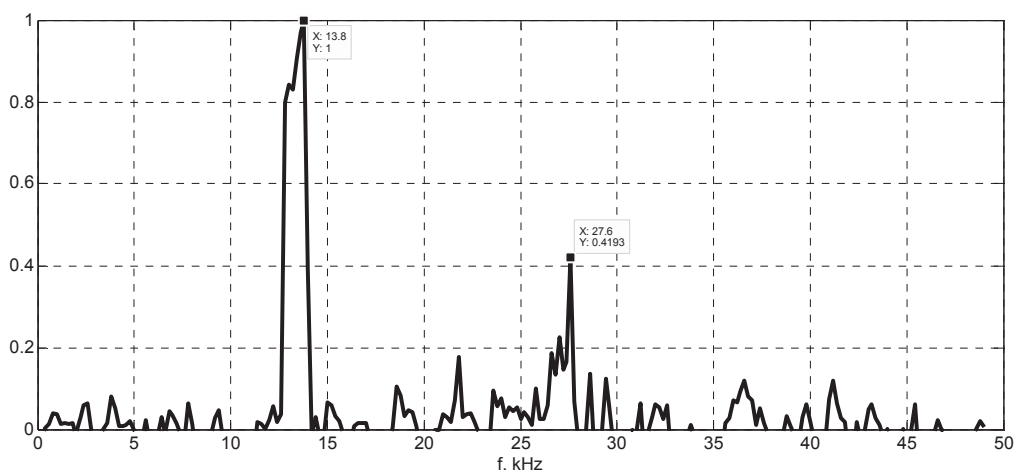


Рис. 2. График критерия  $dR$  для смоделированного сигнала при изменении значений двух частот из девяти

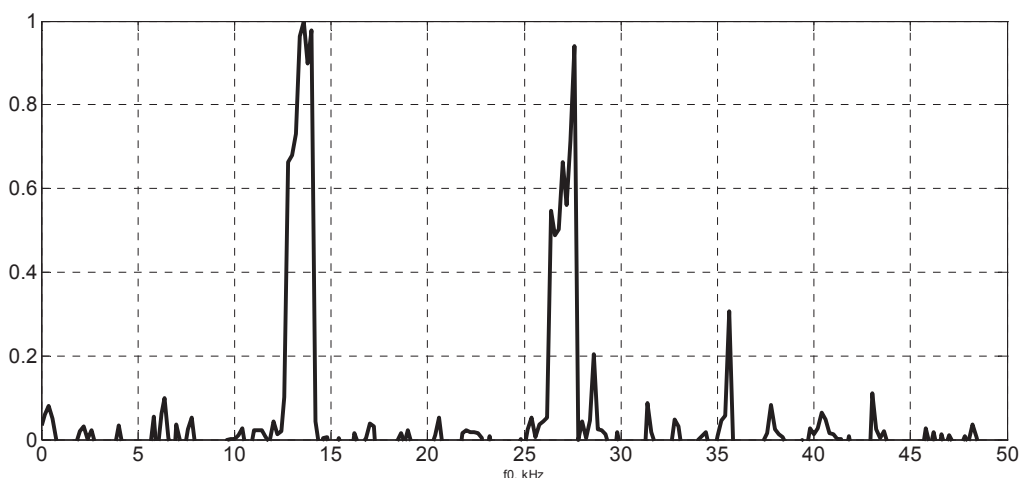


Рис. 3. График критерия  $\langle dR \rangle$  для смоделированного сигнала при изменении амплитуды одной частоты и значения другой

Области, оказавшиеся между сдвинутым и несдвинутым графиком критерия, будут считаться теми, в которых изменился спектр сигнала. Значение максимума в этой области будет являться количественной мерой данного изменения.

Таким образом, данная методика позволяет четко определить, что изменения спектра произошли именно на частотах 13,6–13,8 кГц и 28,4–28,6 кГц. В дальнейшем исследовании критерия необходимо рассмотреть возможность его оптимизации с точки зрения минимизации вероятности пропуска изменения спектра при заданной вероятности правильной диагностики исправного состояния. Кроме того, необходимо исследовать влияние ширины зоны корреляции на качество работы критерия, что позволит обеспечить наилучшее применение критерия для решения практических задач.

#### **Литература**

1. Бушуев, О.Ю. Исследование динамической характеристики тензопреобразователя давления с целью диагностики его состояния / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов, А.О. Чернявский // Датчики и системы. – 2011. – № 4. – С. 21–24.
2. Бушуев, О.Ю. Критерий для количественной оценки постоянства спектра выходного сигнала тензопреобразователя давления // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых (Новосибирск, 1–4 дек.). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 86–90.
3. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона / В.Э. Асминг, Е.О. Кременецкая, Ю.А. Виноградов, З.А. Евтюгина // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13, № 4/2. – С. 998–1007.

**Поступила в редакцию 1 февраля 2012 г.**