

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ КОГЕРЕНТНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

В.А. Фаерман

Научный руководитель: Аврамчук В.С.
Томский Политехнический Университет
fcsevladfaerman@gmail.com

В последние годы наблюдается интенсивное развитие и повсеместное распространение методов и средств неразрушающего контроля. Внедрение в производственную и эксплуатационную практику подобных средств приводит к уменьшению издержек и повышению экономической эффективности предприятий [1]. В частности, примером широкого применения средств неразрушающего контроля, могут служить предприятия жилищно-коммунального хозяйства, обслуживающие тепло- и водопроводные сети.

Как было отмечено выше, использование современных методов неразрушающего контроля и диагностики, способствует повышению эффективности работы коммунальных служб [2]. В частности, применение дефектоскопов позволяет производить объективную оценку состояния трубопроводов [1], прогнозировать остаточный ресурс и на основании приобретенных сведений оптимизировать стратегию проведения ремонтных работ [3]. Наряду с дефектоскопией, предварительная оценка состояния трубопроводов может производиться с применением корреляторов [3]. Однако стоит отметить, что обнаружение утонений стенок трубопроводов затруднительно и накладывает существенные ограничения как на максимальную протяженность обследуемого участка, так и на минимальную глубину повреждения.

В основу работы корреляторов положен математический аппарат корреляционного анализа: местоположение утонений или отверстий в трубопроводе определяется по пикам взаимной корреляционной функции сигналов, снимаемых пьезоэлектрическими датчиками в двух точках трубопровода, ограничивающих обследуемый линейный участок [4]. В практических задачах, вследствие низкой интенсивности сигнала акустической эмиссии производимого дефектом, а также наличия шумов, обусловленных взаимодействием потока жидкости со стенками трубопроводов, прямое применение корреляционного анализа оказывается невозможным [5]. В связи с этим применяются, различные подходы к предварительной обработки сигналов, предполагающие, как правило, определение частотной локализации полезной составляющей и фильтрацию в соответствующей полосе. В связи с высокой степенью зашумленности сигналов, наиболее широкое применение находят анализ функции когерентности и анализ вида взаимного фазового спектра [4]. Метод анализа функции когерентности принято считать тра-

диционным [4, 5]. Его применимость и сравнительная эффективность обуславливается относительно неизменным во времени спектральным составом сигнала акустической эмиссии. Тем не менее, учитывая влияние на сигнал акустической эмиссии технологических параметров транспортировки жидкости, в частности давления и расхода, полагать спектр сигнала неизменным в течение продолжительного интервала времени не корректно.

Согласно [6], функция когерентности отображает степень линейной взаимосвязи между сигналами на различных частотах, то есть является как бы аналогом функции корреляции в частотной области. Стоит отметить, что проводя параллель между функцией когерентности и функцией корреляции подразумевают их применимость для выявления степени взаимосвязанности сигналов, а не подчеркивают их математическое соответствие. С точки зрения взаимного соответствия более корректным является сопоставление квадрата функции когерентности и квадрата нормированной функции корреляции.

В практике спектрального анализа более широкое распространение получил квадрат функции когерентности ($\gamma^2(k)$) определяемый формулой [7]

$$\gamma^2(k) = \frac{|E(P_{AB}(k))|^2}{E(P_{AA}(k))E(P_{BB}(k))}. \quad (1)$$

где $E(\cdot)$ – оператор усреднения; $P_{AB}(k)$, $P_{AA}(k)$, $P_{BB}(k)$ – соответственно взаимный мгновенный спектр и собственные мгновенные спектры сигналов, которые могут быть получены по формулам приведенным далее:

$$P_{AB}(k) = F_D^*(s_B(i)) \cdot F_D(s_A(i)), \quad (2)$$

$$P_{AA, BB}(k) = \left| F_D(s_{A, B}(i)) \right|^2. \quad (3)$$

В (2) и (3) использованы следующие обозначения: $F_D(\cdot)$ – дискретное преобразование Фурье; $F_D^*(\cdot)$ – комплексно-сопряженное представление результата дискретного преобразования Фурье; $s_A(i)$, $s_B(i)$, где $i = 0, 1, \dots, N - 1$ оцифрованные с интервалом дискретизации Δt сигналы датчиков.

Из (1) видно, что для каждого k -ого частотного отсчета, получение значений в числителе и знаменателе дроби предполагает усреднение мгновенных спектров, вычисляемых для различных, равных по продолжительности временных отрезков анализируемых сигналов [6]. В связи с тем, что для получения мгновенных спектров сигнала используется оконное преобразование Фурье, весь объём имеющейся выборки оцифрованных сигнала-

лов удобно представлять следующим образом

$$Q \cdot N_0 \leq N,$$

где N – число отсчетов содержащееся в полной выборке; N_0 – ширина окна (заданная в отсчетах) преобразования Фурье; Q – количество отдельных временных интервалов, выделяемых в выборке. С учетом введенных выше обозначений, (1) может быть представлено как

$$\gamma^2(k) = \frac{\left| \sum_{q=0}^{Q-1} P_{ABq}(k) \right|^2}{\sum_{q=0}^{Q-1} P_{AAq}(k) \sum_{q=0}^{Q-1} P_{BBq}(k)}. \quad (4)$$

Определение частотной полосы локализации информативного сигнала осуществляется путем выделения областей высоких значений (4) [6, 7]. Таким образом, в качестве параметра характеризующего информативность функции когерентности, может быть выбрано отношение среднеквадратичного значения (4) в полосе частот информативного сигнала, к среднеквадратичному значению на всем остальном диапазоне частот:

$$G = \frac{G_n}{G_d}, \quad (5)$$

$$G_n = \sqrt{\frac{1}{k_1 - k_0} \cdot \sum_{k=k_0}^{k_1} \gamma^2(k)},$$

$$G_d = \sqrt{\frac{1}{N/2 - k_1 + k_0} \left(\sum_{k=0}^{k_0-1} \gamma^2(k) + \sum_{k=k_1+1}^{N/2-1} \gamma^2(k) \right)},$$

где $[k_0..k_1]$ – интервал отсчетов, описывающий частотный диапазон на котором присутствует информативный сигнал. В связи с тем, что применение (5) требует априорного знания границ частотного интервала, содержащего полезный сигнал, данная оценка является применимой только в тестовых задачах, предполагающих работу с известным или специально сгенерированным сигналом. Примерный вид (4), а также некоторые графические пояснения (насыщенным цветом выделена частотная полоса, содержащая неслучайный сигнал) к (5) представлены на рисунке.

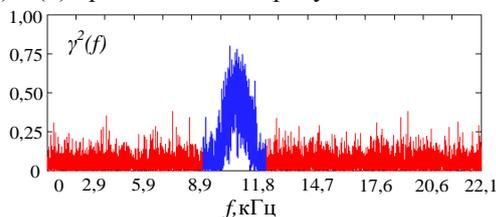


Рис. 1. График функции когерентности

Для оценки влияния на вид и информативность функции когерентности таких параметров как отношение сигнал/шум в анализируемой смеси сигналов, объема исходной выборки и временного сдвига между сигналами датчиков, производилась генерация тестовых сигналов и их представление в формате wav – файлов. Некоторые результаты исследования, приведены в таблицах далее. Параметры тестовых сигналов: спектр полезного сигнала – 9750..11250 Гц; спектр шума

(равномерный) – 0..22050 Гц; задержка между каналами – 0 мс (таблица 1); количество временных интервалов – 4 (таблица 2); отношение сигнал/шум – 0,067.

Таблица 1. Зависимость $G(Q)$

Q	2	4	7	10
G	1,297	2,036	3,869	6,217

Таблица 2. Зависимость $G(\tau)$

τ , мс	0	10	25	50
G	2,036	2,106	1,972	1,854

Согласно данным таблиц, можно сделать следующие выводы: увеличение временного сдвига между сигналами каналов негативно сказывается на информативности, в то время как увеличение объема выборки, содержащей отсчеты исследуемых сигналов увеличивает информативность.

Таким образом, применение функции когерентности при анализе сигналов, полученных при обследовании трубопроводов, позволяет определить границы спектра информативной составляющей и упростить дальнейший корреляционный анализ. Однако вследствие неизбежного присутствия шумовой составляющей в смеси и наличия временного сдвига между сигналами каналов [4], для получения информативной функции когерентности может потребоваться значительная выборка, и, следовательно, продолжительное измерение сигналов, что не всегда возможно в силу изменчивости параметров процесса транспортировки жидкости [3].

Список использованных источников

1. Каневский И. Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. Пособие / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2007 – 243 с.
2. Фаерман В.А., Аврамчук В.С. Обзор современных корреляционных теческателей // МСИТ 2012: Труды X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск: ТПУ, 2012. – С. 256-258.
3. Патент на изобретение РФ №2138037. Способ обнаружения коррозионных дефектов в трубопроводах водоснабжения.
4. Фирсов А. А., Терентьев Д. А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном теческании, основанный на анализе функции фазы взаимного спектра // Контроль. Диагностика. – 2014. - № 8. – С.23-27.
5. Аврамчук В.С., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. –Т. 315. – № 5. – С. 112–115.
6. Кулаичев А.П. Об информативности когерентного анализа // Журнал высшей нервной деятельности. – 2009. – Т. 59 - № 6 - С. 766-775.
7. Рандалл Р.Б. Частотный анализ. - Копенгаген:
8. Брюль и Къер, 1989. - 389 с.