

ПРОГРАММНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО КОРРЕЛЯЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК

Обнаружение утечек в коммунальных и магистральных трубопроводах различного назначения является задачей, актуальность которой в настоящее время не вызывает сомнений [1]. В связи с этим, разработаны и находят применение значительное число методов обнаружения утечек в трубопроводах. В соответствии с принципом применения, существующие методы обнаружения утечек могут быть разделены на две группы: определяющие местоположение течи путём анализа динамики технологических параметров процесса перекачки, и использующие средства неразрушающего контроля [2].

Одним из наиболее распространенных и эффективных [2] является корреляционно-акустический метод обнаружения утечек. В основу метода положено определение разницы во времени регистрации сигнала утечки датчиками, расположенными на концах линейного участка трубопровода по обе стороны от неё. Для решения последней задачи широкое применение находит математический аппарат корреляционного анализа. Упрощённо процедура определения искомого времени запаздывания (τ_{AB}) может быть описана следующими выражениями:

$$r_{AB}(j) = \frac{1}{N_0} \cdot F_D^{-1} [F_D^*(s_A(i)) \cdot F_D(s_B(i))], \quad (1)$$

$$\tau_{AB} = \Delta \cdot j_0, \quad (2)$$

где $F_D(\cdot)$ – оконное дискретное преобразование Фурье (ДПФ); $F_D^*(\cdot)$ – комплексно-сопряжённое представление результатов оконного дискретного преобразования Фурье; N_0 – ширина окна преобразования; Δ – шаг дискретизации; j_0 – аргумент соответствующий наибольшему значению корреляционной функции $r_{AB}(j) < r_{AB}(j_0) \forall j$.

Не смотря на простоту реализации применение традиционной функции корреляции (в соответствии с (1)) связано с существенными ограничениями. В частности, присутствие разнородных шумов, вносимых средой и техническими средствами, делает возможными выбросы в корреляционной функции. Последнее делает невозможным определение запаздывания непосредственно по (2) и требует деталь-

ного анализа коррелограммы и дополнительных манипуляций для определения действительного местоположения пика [3].

В качестве одного из возможных решений было предложено вычисление частотно-временной корреляционной функции, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной: лучшей помехоустойчивостью [1], большей визуальной наглядностью графического представления [3].

Получение частотно-временной корреляционной функции, сводится к вычислению корреляционных функций для M различных частотных интервалов сигналов, что может быть упрощенно представлено в виде последовательности действий [4]:

$$\text{I: } P_{AB}(k) = X_B^*(k) \cdot X_A(k);$$

II: $B_k^m = P_{AB}(k) \cdot w_k^m$, где w_k^m – оконная функция, определенная следующим образом

$$w_k^m = \begin{cases} 1, & \frac{m}{M} < \frac{k}{K} \leq \frac{m+1}{M} \\ 0, & \frac{m}{M} \geq \frac{k}{K} > \frac{m+1}{M} \end{cases},$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, K$, $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, K – количество отсчетов в дискретном спектре сигнала, определяющееся шириной окна ДПФ (при использовании стандартных алгоритмов БПФ $K = 2^{n-1} + 1$);

$$\text{III: } Z^m(j) = \frac{1}{N_0} \cdot F^{-1}[B^m];$$

$$\text{IV: } r^{tf}(m, j) = Z^m(j).$$

Стоит отметить, что помимо вышеобозначенных преимуществ, частотно-временной корреляционный анализ обладает рядом недостатков. Основным из которых являются необходимость выполнения значительного количества дополнительных преобразований Фурье [3]. Кроме того, так как график частотно-временной корреляционной функции представляет собой поверхность простирающуюся над плоскостью, образованной осями времени и частоты, возникает необходимость в разработке и реализации качественного и быстродействующего модуля визуализации [2].

С учётом указанных особенностей математический аппарат частотно-временного корреляционного анализа был реализован программно. Для увеличения быстродействия был применён алгоритм Кули-Тьюки вычисления преобразований Фурье, обладающий высокой степенью параллелизма и позволяющий наиболее эффективно использовать такие возможности аппаратной составляющей как многоядерность и вычисления общего назначения на GPU [5].

На основе предложенного метода был разработан и создан прототип частотно-временного корреляционно-акустического комплекса обнаружения утечек структура которого показана на рисунке 1.

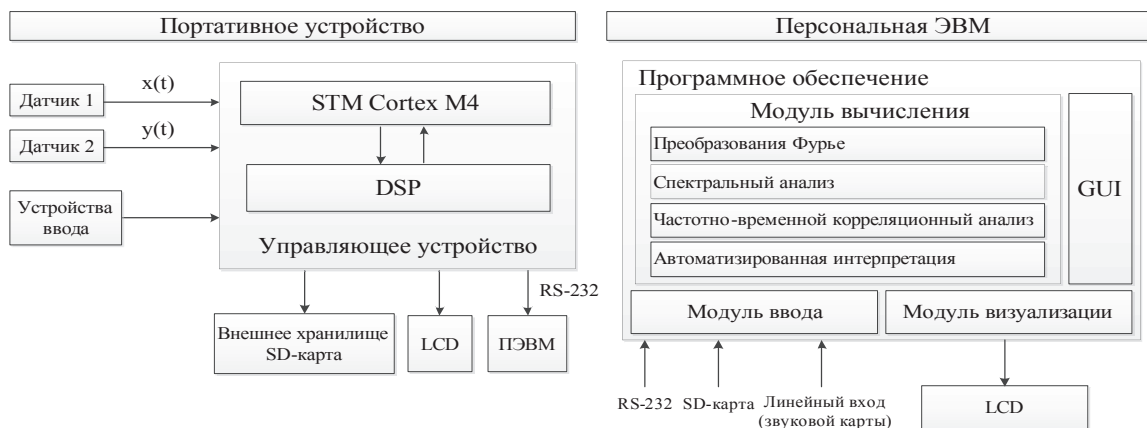


Рисунок 1 – Упрощенные функциональные схемы составляющих течепоискового комплекса

В соответствии со схемой на рисунке 1, для снятия сигналов используется портативное устройство на базе микроконтроллера STM32 Cortex M4, укомплектованное пьезоэлектрическими акселерометрами ДН-3 (см. рисунок 2). Обработка записей осуществляется персональной ЭВМ с предустановленным специализированным программным обеспечением, функционал которого не ограничивается вычислением частотно-временных корреляционных функций.



Рисунок 2 – Портативное устройство регистрации сигналов

Применение разработанного программно-аппаратного комплекса позволяет повысить точность и эффективность локации течей, за счёт принципиально лучшей помехоустойчивости предложенного метода [2] и сравнительным удобством работы с 3D изображением корреляционных функций [3] (см. рисунок 3).

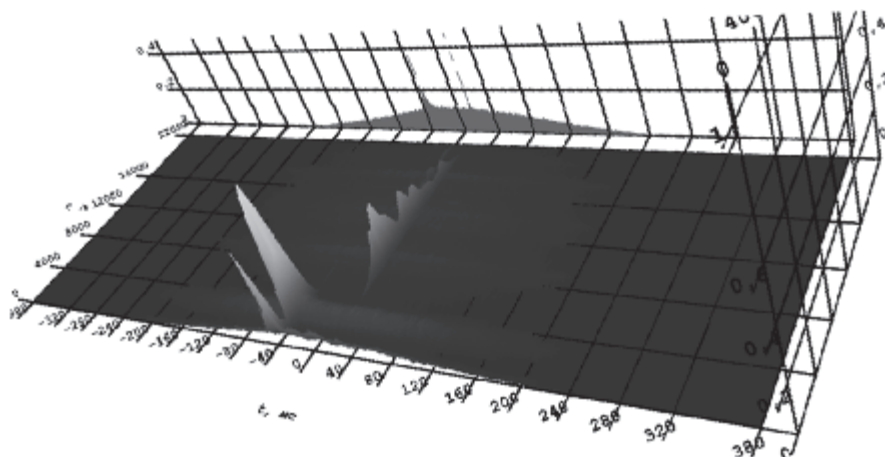


Рисунок 3 – Поверхность частотно-временной корреляционной функции сигнала утечки

Отдельно стоит отметить то, что в силу специфичности структуры выхода частотно-временного коррелятора представляется возможной автоматизированная интерпретация результата анализа. Соответствующая программная подсистема в настоящее время находится в разработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cataldo A., Cannazza G., De Benedetto E., Gianquinto N. A New Method for Detecting Leaks in Underground Water Pipelines // IEEE Sensors Journal. – 2012. – Vol. 12. – No. 6. – P. 1660-1667.
2. Faerman V. A. , Cheremnov A. G. , Avramchuk V. S. , Luneva E. E. Prospects of frequency-time correlation analysis for detecting pipeline leaks by acoustic emission method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – Vol. 21. – Issue 1. – Art. num. 12041.
3. Avramchuk V.S., Goncharov V.I. Time-frequency Correlation Method for Improving the Accuracy in detecting Leaks in Pipelines // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 650. – P. 443–446.
4. Аврамчук В.С., Чан В.Т. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 112–120.
5. Лунёва Е.Е., Черемнов А.Г., Аврамчук В.С. Оптимизация расчёта частотно-временной корреляционной функции на центральном процессоре // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 58-62.