

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ЛОКАЦИИ УТЕЧЕК КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Фаерман В.А., Марукян В.М.
Томский политехнический университет
vaf@tpu.ru, vano15.94@mail.ru

Введение

Трубопроводные системы различного назначения на протяжении длительного времени были критически важным элементом инфраструктуры и не утратили своего значения сейчас. Магистральные трубопроводы являются неотъемлемой частью нефте- и газотранспортных систем, в то время как сравнительно малые водопроводы – основой коммунальных сетей.

Эффективная эксплуатация трубопроводных систем является масштабной народохозяйственной задачей и её решение требует реализации целого ряда мероприятий: мониторинг состояния инфраструктуры, своевременная замена выработавших свой ресурс участков, оперативная ликвидация последствий аварий. В случае с магистральными транспортными трубопроводами – данную задачу можно считать в значительной степени решенной [1]. Однако, полная реализация описанного набора мероприятий по отношению к коммунальным сетям не представляется возможной в обозримом будущем. Последнее объясняется колоссальными масштабами задачи – суммарная протяжённость уличных коммунальных сетей в населённых пунктах составляет более 600 тыс. км [2], в то время как более 40% трубопроводов выработали свой ресурс [2].

Тем не менее снижение издержек при эксплуатации коммунальных сетей возможно за счёт снижения потерь, возникающих в результате аварий [3], в частности, за счёт обнаружения и устранения скрытых утечек. При этом, сроки устранения течи и сопутствующие затраты также имеют значение.

Корреляционно-акустический метод

Суть метода заключается в приёме акустических волн, возникающих при истечении через отверстие в трубе жидкости под давлением, парой акустических преобразователей и последующей оценке времени запаздывания между сигналами, поступающими по каждому из измерительных каналов [4]. Метод был разработан в 70-ые годы прошлого века и предназначался преимущественно для непрерывного мониторинга состояния технологических трубопроводов [5], однако в последующие годы получил более широкое распространение в портативных системах для оперативного контроля состояния водопроводных сетей [6].

Эффективность применения метода (точность и достоверность локации течей) определяется одновременно как аппаратными средствами, составляющими измерительные каналы, так и

программными решениями, реализующими алгоритмы обработки сигнала [6].

Оценка времени запаздывания

Основной задачей программной обработки сигналов является оценка времени запаздывания между сигналами измерительных каналов [7]. Краткое математическое описание задачи представлено далее.

П

$$y \quad s_A(\Delta t \cdot i) = s_0(\Delta t \cdot i) + N(\Delta t \cdot i), \\ c \quad s_B(\Delta t \cdot i) = s_0'(\Delta t \cdot i + \tau_0) + N(\Delta t \cdot i),$$

где $s_0(t_i), s_0'(t_i)$ – сигнал утечки (на каждом из датчиков), $N(t_i)$ – реализация случайного шума, τ_0 – время запаздывания, Δt – частота дискретизации. Тогда задача может быть описана следующим образом:

$$г \quad E(s_A(t_i), s_B(t_i)) = \tau_0,$$

где $E(\cdot)$ – метод оценки времени запаздывания.

а В соответствии с классификацией, представленной в [7] выделяют временные и спектральные группы методов. Однако, также можно выделить параметрические и частотно-временные методы [8, 9].

а Спектральный метод оценки времени

н Суть метода состоит в вычислении отсчётов взаимного фазового спектра принятых сигналов

$$о \quad \Theta_{AB}(f_k) = \arg S_{AB}(f_k),$$

где $S_{AB}(f_k)$ – отсчёты комплексного взаимного спектра сигналов $s_A(t_i), s_B(t_i)$. При этом, известно [8, 10], что функция $\Theta_{AB}(f_k)$ обладает следующим свойством

$$\Theta_{AB}(f_k) = 2\pi \left(\left\{ f_k \cdot \tau_0 + \frac{1}{2} \right\} - \frac{1}{2} \right),$$

если шумовыми составляющими $N(\Delta t \cdot i)$ можно пренебречь. Данное свойство может быть интерпретировано следующим образом: взаимный фазовый спектр представляет собой пилообразную функцию, причём крутизна наклона её линейных звеньев пропорциональна задержке τ_0 [10]. Данное свойство может быть потенциально использовано для определения величины τ_0 [7], однако практическая реализация подобных алгоритмов затруднительна [11].

Способ проверки корреляционного пика

Несмотря на то, что использование представленного выше метода непосредственно для решения задачи определения времени τ_0 затруднительно, он может быть использован для дополнительной оценки достоверности обнаружения утечек с помощью частотно-временного корреляционного анализа, описанного в [12]. Предложенный в [12] метод позволяет

оценить не только τ_0 , но и частотный диапазон $[f_l \dots f_r]$ в котором сосредоточен сигнал утечки.

Используя эту информацию может быть сгенерирована эталонная пилообразная функция $F(f_k)$ (для найденной оценки $\bar{\tau}_0$), представленная на рисунке 1 сверху. В дальнейшем, сравнение вида эталонной функции и взаимночастотной характеристики $\Theta_{AB}(f_k)$ сигналов, представленной на рисунке 1 снизу, позволит сделать вывод о корректности определения положения корреляционного пика.

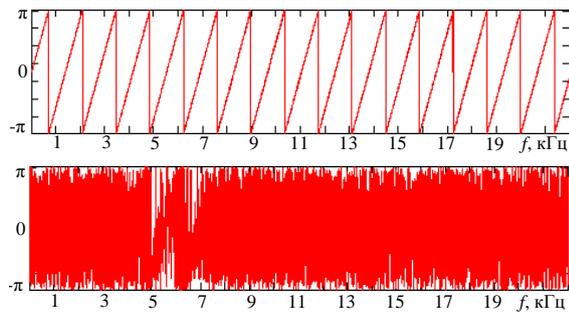


Рис.1. Фазочастотные характеристики

Сравнение осуществляется автоматически с применением аппарата корреляционного анализа. Для этого находится коэффициент корреляции между отсчетами эталонной функции и фазочастотной характеристики в диапазоне частот, в котором находится корреляционный пик $[\bar{f}_l \dots \bar{f}_r]$. Результат выполнения данного алгоритма с плавающим окном представлен на рисунке 2.

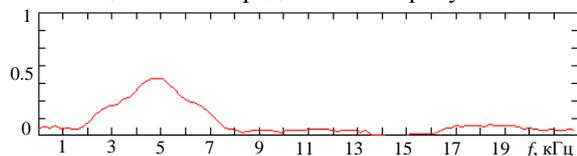


Рис. 2. Сходство между эталонной функцией и фазочастотной характеристикой

Заключение

Из рисунка 2 видно, что отличные от нуля значения сосредоточены близ частот, в которых присутствует корреляционный пик, что подтверждает достоверность его определения. Таким образом, предложенный в работе способ позволяет произвести проверку достоверности определения корреляционного пика, соответствующего сигналу утечки.

Список использованных источников

1. Канева М.А. Формирование системы мониторинга состояния нефтепромысловых трубопроводов в Ханты-Мансийском автономном округе – Юрге // Вестник недропользователя Ханты-Мансийского автономного округа. – 2007. – № 18. – С 25-30.
2. Жилищное хозяйство в России: статистический сборник / Федеральная служба государственной статистики; под ред. И.Д. Масаковой. – М.: Росстат, 2016. – 63 с.
3. Павленков М.Н., Кемайкин Н.К. Современное состояние и проблемы в сфере жилищно-

коммунального хозяйства города // Российское предпринимательство. – 2013. – № 19 (241). – С. 32-45.

4. Алексеев В.И. Корреляционно-экстремальный метод оценивания координат мест утечек нефти в магистральных нефтепроводах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. - № 2 (92). – С. 92-99.
5. Pat. 4083229 A US. Method and apparatus for detecting and locating fluid leaks / A. R. Anway (US). – US 05/727,359; заявл. 28.09.1976; опубл. 11.04.1978.
6. Fuchs H.V., R. Riehle. Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis // Applied Acoustics. – 1991. – Vol. 33. – pp. 1-19.
7. Gao Y., Brennan M.J., Joseph P.F. A Comparison of Time Delay Estimators for the Detection of Leak Noise Signals in Plastic Water Distribution Pipes // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 292. – Iss. 3-5. – pp. 552-570.
8. Wen J., Li P., Wen Yu. A new method for unbiased time-delay estimation in noisy environment // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2007. – Vol. 21. – pp. 623-634.
9. Лапшин Б.М. Опыт применения течеискателя ТАК-2005 в городском трубопроводном хозяйстве / Лапшин Б.М., Овчинников А.Л., А.С. Чекалин, А.С. Евсиков // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. - № 2. – С. 196.
10. Фирсов А.А., Терентьев Д.А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном течеискании, основанный на анализе функции взаимного спектра // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 23–27.
11. Gao Y., Brennan M.J., Joseph P.F. A Comparison of Time Delay Estimators for the Detection of Leak Noise Signals in Plastic Water Distribution Pipes // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 292. – Iss. 3-5. – pp. 552-570.
12. Чан В.Т. Частотно-временной корреляционный анализ в задачах определения координат утечек в трубопроводах / В.Т. Чан, В.С. Аврамчук, В.И. Гончаров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. - № 2. – Т. 317. – С. 70-73.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) проект 16-37-00049 «мол_а».