

УДК 681.518.5+519.25

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КУМУЛЯНТНОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ УТЕЧКИ

Берегун В.С.¹, канд. техн. наук, Красильников А.И.², канд. физ.-мат. наук, Полобюк Т.А.², канд. техн. наук

¹Национальный технический университет Украины «КПИ имени Игоря Сикорского», ул. Политехническая, 16, Киев, 03057, Украина

²Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

Проведено експериментальне дослідження відношення кумулянтів акустичних сигналів витіку рідини в трубопроводі та завади. Показано, що застосування смугової фільтрації збільшує відношення кумулянтів на порядки.

Проведено експериментальное исследование отношения кумулянтов акустических сигналов утечки жидкости в трубопроводе и помехи. Показано, что применение полосовой фильтрации увеличивает отношение кумулянтов на порядки.

An experimental study of the ratio of cumulants of acoustic signals of fluid leakage in a pipeline and interference is carried out. It is shown that the use of bandpass filtering increases the ratio of cumulants by orders of magnitude.

Библ. 15, табл. 5, рис. 3.

Ключевые слова: акустическое контактное течеискание, обнаружение сигнала утечки жидкости, акустические шумовые сигналы, кумулянтный анализ.

Введение

Одной из задач обеспечения надежной работы системы теплоснабжения является контроль нарушения герметичности трубопроводов [1, 2]. Для решения задачи обнаружения утечек жидкости в трубопроводе в процессе его эксплуатации широкие возможности имеют методы акустического контактного течеискания [2–7]. Акустический сигнал утечки искажается шумами, создаваемыми движущимся потоком жидкости, поэтому задача обнаружения утечек в трубопроводах сводится к задаче обнаружения шумового сигнала утечки на фоне шумовой помехи. В настоящее время решение этой задачи базируется, как правило, на методах корреляционно-спектрального анализа, которые являются исчерпывающими, если считать, что сигнал и помеха имеют гауссовское распределение мгновенных значений.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [8–11] показали, однако, что акустические сигналы утечки являются негауссовскими случайными процессами, поэтому для их обнаружения наряду с корреляционно-спектральными методами целесообразно применять методы, основанные на вероятностном анализе негауссовских процессов [12]. В работе [13] предложен кумулянтный метод обнаружения утечек жидкости в трубопроводе, для практической проверки которого необходимо проведение экспериментальных исследований.

Целью данной работы является анализ чувствительности кумулянтного метода обнаружения утечек на основе статистической обработки акустического сигнала утечки и помехи, создаваемой движущимся потоком жидкости.

Кумулянтный метод обнаружения утечек

Рассмотрим модель формирования и вероятностные характеристики акустического сигнала при образова-

нии течи в трубопроводе [11]. Если в некоторой точке x_0 трубы возникла течь, то в результате перепада давлений из трубы происходит утечка жидкости, которая возбуждает механические колебания, являющиеся источником акустического сигнала утечки $\xi_{\text{ут}}(t)$. Сигнал утечки искажается аддитивной акустической шумовой помехой $\xi_{\text{п}}(t)$, создаваемой движущимся потоком жидкости, поэтому сигнал $\xi(t)$ на входе электроакустического преобразователя, установленного вблизи точки x_0 , имеет следующий вид:

$$\xi(t) = \xi_{\text{ут}}(t) + \xi_{\text{п}}(t). \quad (1)$$

Сделаем следующие предположения относительно свойств сигнала $\xi_{\text{ут}}(t)$ и помехи $\xi_{\text{п}}(t)$. В общем случае $\xi_{\text{ут}}(t)$ и $\xi_{\text{п}}(t)$ являются негауссовскими нестационарными случайными процессами, однако на коротких промежутках времени (несколько минут), необходимых для регистрации и обработки, эти сигналы можно считать стационарными. Исходя из физических соображений, можно предположить, что сигнал $\xi_{\text{ут}}(t)$ и помеха $\xi_{\text{п}}(t)$ являются независимыми случайными процессами.

Простыми, но достаточно информативными характеристиками негауссовских процессов являются одномерные кумулянты [12] κ_s порядка $s = 1, 2, \dots$, которые для сигнала (1) равны

$$\kappa_s = \kappa_{s,\text{ут}} + \kappa_{s,\text{п}}, \quad (2)$$

где $\kappa_{s,\text{ут}}$, $\kappa_{s,\text{п}}$ – кумулянты s -го порядка сигнала утечки и помехи.

Принцип обнаружения сигнала утечки $\xi_{\text{ут}}(t)$ на основе кумулянтного анализа заключается в следующем. Если утечка в контролируемом трубопроводе отсутствует, то $\kappa_{s,\text{ут}} = 0$ и все кумулянты $\kappa_s = \kappa_{s,\text{п}}$, а при наличии утечки $\kappa_{s,\text{ут}} \neq \kappa_{s,\text{п}}$. В частном случае, когда помеха $\xi_{\text{п}}(t)$ имеет гауссовский закон распределения, ее кумулянты

$\kappa_{s,n} = 0, s \geq 3$. Тогда принимается решение об отсутствии утечки, если при $s \geq 3 \kappa_s = 0$, и о наличии утечки, если $\kappa_s \neq 0$.

Для анализа возможностей кумулянтного метода обнаружения утечек необходимо располагать конкретными значениями кумулянтов реальных сигналов утечки и помех, которые можно получить в результате проведения натурального эксперимента.

Условия проведения экспериментальных исследований

Основная проблема обеспечения достоверности результатов экспериментальных исследований состоит в том, что на реальных объектах невозможно получить сигнал утечки в трубопроводе с известным размером и формой течи при заданном постоянном давлении в трубе и при отсутствии акустических помех.

Поэтому для формирования сигнала утечки использована разработанная и изготовленная в отделе теплотехники, диагностики и оптимизации в энергетике ИТТФ НАНУ установка (рис. 1, а), позволяющая осуществлять физическое моделирование утечки жидкости в трубе в стоячей воде [14]. Для имитации течи в трубе использована насадка с медными стенками и сквозным цилиндрическим отверстием диаметром 1 мм, а для получения утечек в трубе поддерживалось давление 6 атм.

В качестве помехи использован шум, создаваемый движущимся потоком жидкости в трубопроводе теплового пункта в корпусе № 7 ИТТФ НАНУ (рис. 1, б). Помеха регистрировалась на трубопроводе распределительной сети при давлении 7 атм, объемный расход теплоносителя в среднем составлял более 1000 л/час, что обеспечивало скорость потока более 0,567 м/с, при которой режим его движения можно считать турбулентным.

Для сбора, регистрации и обработки акустических сигналов использована мобильная система [11], в состав которой входят акселерометр KD 39 (рабочий диапазон частот до 13 кГц, чувствительность по напряжению 5 мВ/(м/с²)), усилитель заряда (коэффициент усиления по напряжению 24 дБ), усилитель-фильтр РУ2-11, модуль АЦП ADA-1406 (разрядность 14 бит, частота дискретизации до 350 кГц), ноутбук с разработанными программами статистической обработки.

Для получения сигнала утечки акселерометр крепился с помощью цементирующей шпильки на шлифо-

ванную поверхность трубы вблизи течи (на расстоянии 0,05 м от нее). Помеха регистрировалась с помощью акселерометра на трубопроводе распределительной сети в точке 1.

Запись сигналов на жесткий диск ноутбука осуществлялась с помощью АЦП и программного обеспечения «PowerGraph» с частотой дискретизации 150 кГц в течение 10...15 с. Для устранения трибоэлектрических помех, вызванных низкочастотными вибрациями трубопровода, сигналы при регистрации подвергались высокочастотной фильтрации усилителем-фильтром РУ2-11 с частотой среза 10 Гц.

Алгоритмы статистического анализа

Оценки кумулянтов $\hat{\kappa}_s, s = 2, 6$, получены на основе метода моментов и связаны с оценками центральных моментов следующим образом [15]:

$$\begin{cases} \hat{\kappa}_2 = \hat{\mu}_2, \\ \hat{\kappa}_3 = \hat{\mu}_3, \\ \hat{\kappa}_4 = \hat{\mu}_4 - 3\hat{\mu}_2^2, \\ \hat{\kappa}_5 = \hat{\mu}_5 - 10\hat{\mu}_3\hat{\mu}_2, \\ \hat{\kappa}_6 = \hat{\mu}_6 - 15\hat{\mu}_4\hat{\mu}_2 - 10\hat{\mu}_3^2 + 30\hat{\mu}_2^3. \end{cases} \quad (3)$$

Получение оценок кумулянтов и разброса этих оценок осуществлялось в такой последовательности. Для исследования из полученных ансамблей реализаций сигналов утечки и помех были отобраны реализации длительностью 7 с, что соответствует объему выборки $N = 10^6$ отсчетов.

Реализации разбивались на $L = 7$ неперекрывающихся интервалов длительностью 1 с, что соответствует объему выборки $n = N/L \approx 143000$ отсчетов. Для каждого интервала $l = \overline{1, L}$ по выборке $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ вначале находились оценки центральных моментов

$$\hat{\mu}_s(l) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\xi_k - \hat{m}_l)^s, \quad (4)$$

где \hat{m}_l – оценка математического ожидания исследуемого процесса на соответствующем интервале

$$\hat{m}_l = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_k,$$

а затем по формулам (3) вычислялись оценки кумулян-



а)



б)

Рис. 1.

тов $\hat{\kappa}_s(l)$.

Оценки кумулянтов $\hat{\kappa}_s$ по всей реализации находилась как среднее арифметическое оценок по каждому интервалу:

$$\hat{\kappa}_s = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{\kappa}_s(l).$$

Разброс $\sigma(\hat{\kappa}_s)$ оценок $\hat{\kappa}_s$ вычислялся по формуле

$$\sigma(\hat{\kappa}_s) = \frac{\sigma[\hat{\kappa}_s(l)]}{\sqrt{L}} \approx 0,378 \sigma[\hat{\kappa}_s(l)],$$

где $\sigma[\hat{\kappa}_s(l)]$ – разброс оценки $\hat{\kappa}_s(l)$, который равен

$$\sigma[\hat{\kappa}_s(l)] = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (\hat{\kappa}_s(l) - \hat{\kappa}_s)^2}.$$

Таким образом, результаты оценивания можно представить в таком виде $\hat{\kappa}_s = \kappa_s \pm 2\sigma(\hat{\kappa}_s)$, что соответствует доверительной вероятности $p \approx 0,95$ в предположении о нормальном распределении оценок $\hat{\kappa}_s$.

Результаты анализа отношения сигнал/помеха

Классические методы обнаружения шумовых сигналов на фоне шумовой помехи базируются на критерии отношения сигнал/помеха, который определяется как отношение средних квадратических отклонений, т. е. $\sigma_{ут}/\sigma_{п} = (\kappa_{2,ут}/\kappa_{2,п})^{1/2}$. В табл. 1 приведены значения оценок средних квадратических отклонений помехи $\sigma_{п}$ и сигнала утечки $\sigma_{ут}$, а также их отношение $\hat{\sigma}_{ут}/\hat{\sigma}_{п}$.

Табл. 1

| $\sigma_{п}$ | $\sigma_{ут}$ | $\hat{\sigma}_{ут}/\hat{\sigma}_{п}$ |
|---------------|---------------|--------------------------------------|
| 0,0448±0,0008 | 1,0407±0,0375 | 23 |

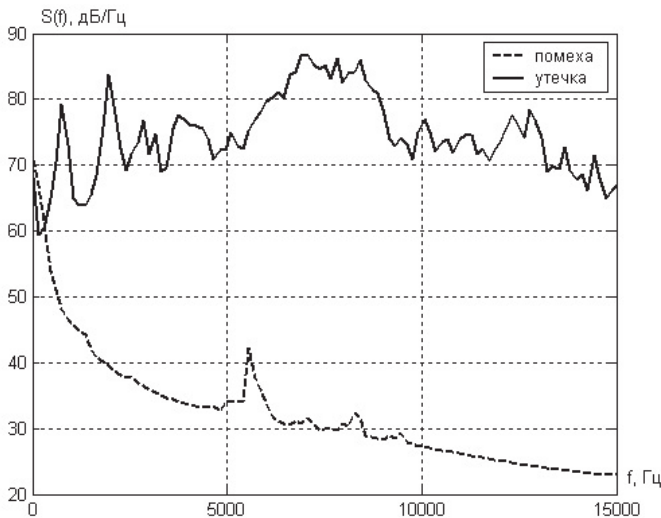


Рис. 2.

Дисперсии $\kappa_{2,ут}$ и $\kappa_{2,п}$ сигнала утечки и помехи характеризуют среднюю мощность исследуемых процессов во всем частотном диапазоне. Для решения задачи повышения отношения сигнал/помеха необходимо исследовать спектральные плотности сигналов утечки и помехи, которые показывают распределение дисперсий исследуемых процессов по частоте.

На рис. 2 приведены оценки спектральных плотностей сигналов утечки и помехи относительно опорного уровня ускорения $a_0 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$, которые получены с применением быстрого преобразования Фурье на основе модифицированной периодограммной оценки [15] при перекрытии соседних сегментов 50 %. Размер прямоугольного окна данных составлял 1024 отсчета, что обеспечило разрешающую способность по частоте $\Delta f \approx 150,2 \text{ Гц}$. Спектральная плотность шума измерительного тракта практически постоянна во всем рабочем частотном диапазоне и равна 24 дБ/Гц.

По рис. 2 видно, что основная мощность помехи сосредоточена в полосе 0...5 кГц, а у сигнала утечки можно выделить три характерных диапазона частот: 1 – 0...5 кГц, 2 – 5...10 кГц, 3 – 10...15 кГц, причем основная мощность сигнала сосредоточена в полосе 5...10 кГц.

Рассмотрим возможность улучшения отношения $\hat{\sigma}_{ут}/\hat{\sigma}_{п}$ за счет применения цифровой фильтрации [15]. Исходные реализации сигнала утечки и помехи подвергались фильтрации в трех отмеченных характерных диапазонах частот с помощью фильтров Баттерворта с указанными ниже видами, полосами пропускания и порядками фильтров:

- 1 – фильтр нижних частот, 0...5 кГц, 15 порядок;
- 2 – полосовой фильтр, 5...10 кГц, 8 порядок;
- 3 – полосовой фильтр, 10...15 кГц, 8 порядок.

Амплитудно-частотные характеристики фильтров приведены на рис. 3, а, на рис. 3, б – оценки спектральных плотностей сигнала утечки после проведения фильтрации в трех диапазонах частот.

В табл. 2 приведены значения оценок средних квадратических отклонений помехи $\sigma_{п}$ и сигнала утечки $\sigma_{ут}$, а также их отношение $\hat{\sigma}_{ут}/\hat{\sigma}_{п}$ без применения фильтрации и с фильтрацией.

Из данных табл. 2 следует, что с применением фильтрации отношение $\hat{\sigma}_{ут}/\hat{\sigma}_{п}$ увеличилось более чем в 15 раз для полосы 5...10 кГц и более чем в 19 раз для полосы 10...15 кГц по сравнению с отсутствием фильтрации.

Результаты анализа чувствительности кумулянтов

Проанализируем влияние фильтрации на чувствительность кумулянтов исследуемых процессов. В табл. 3 приведены значения оценок кумулянтов помехи $\kappa_{s,п}$, в табл. 4 – значения оценок кумулянтов сигнала утечки без применения фильтрации и с фильтрацией.

Анализ данных табл. 3 показал, что с применением фильтрации в полосе частот 0...5 кГц значения кумулянтов помехи практически не изменились, а в остальных полосах они уменьшились в десятки тысяч раз.

Как видно из данных табл. 3 и 4 кумулянты сигнала утечки во всех случаях существенно превышают

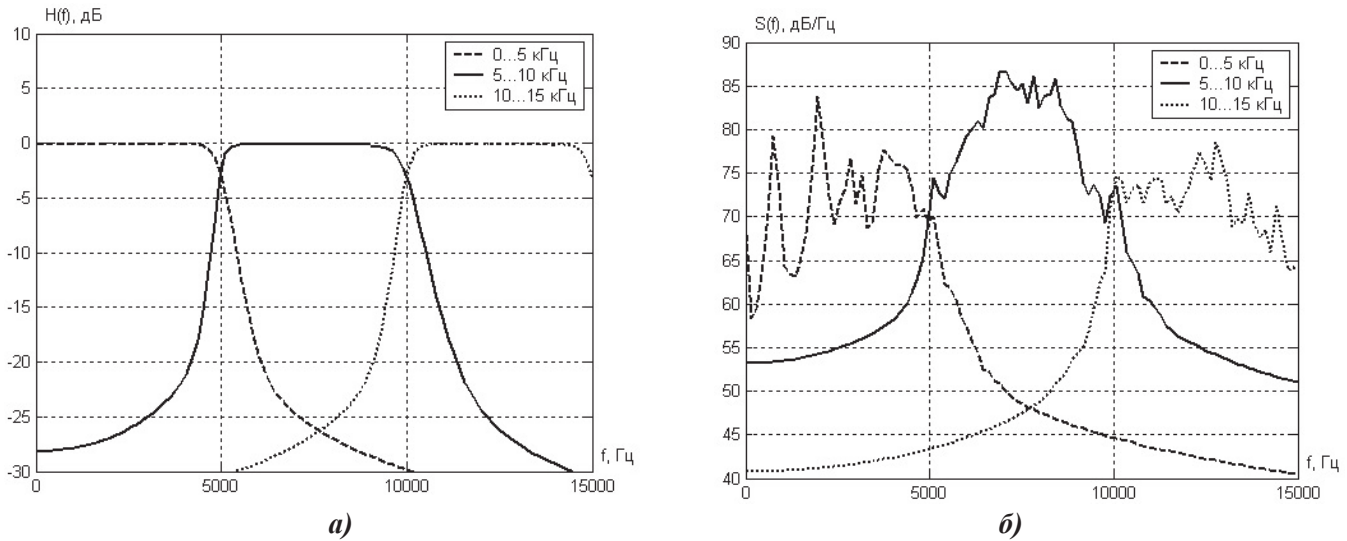


Рис. 3.

Табл. 2

| Полоса фильтрации | σ_n | $\sigma_{ут}$ | $\hat{\sigma}_{ут}/\hat{\sigma}_n$ |
|-------------------|------------------------------|---------------|------------------------------------|
| Без фильтра | 0,0448±0,0008 | 1,0407±0,0375 | 23 |
| 0...5 кГц | 0,0447±0,0008 | 0,3909±0,0192 | 9 |
| 5...10 кГц | 0,0025±2,45·10 ⁻⁵ | 0,8975±0,0278 | 365 |
| 10...15 кГц | 0,0007±3,73·10 ⁻⁶ | 0,3255±0,0259 | 451 |

Табл. 3

| Полоса фильтрации | $K_{2,л}$ | $K_{3,л}$ | $K_{4,л}$ | $K_{5,л}$ | $K_{6,л}$ |
|-------------------|--|---|---|---|--|
| Без фильтра | 0,0020 ±7,15·10 ⁻⁵ | 3,58·10 ⁻⁷ ±4,21·10 ⁻⁶ | -1,20·10 ⁻⁶ ±4,83·10 ⁻⁷ | 5,38·10 ⁻⁹ ±4,46·10 ⁻⁸ | 6,09·10 ⁻⁹ ±4,44·10 ⁻⁹ |
| 0...5 кГц | 0,0020 ±7,15·10 ⁻⁵ | 3,36·10 ⁻⁷ ±4,20·10 ⁻⁶ | -1,21·10 ⁻⁶ ±4,83·10 ⁻⁷ | 5,45·10 ⁻⁹ ±4,46·10 ⁻⁸ | 6,11·10 ⁻⁹ ±4,46·10 ⁻⁹ |
| 5...10 кГц | 6,05·10 ⁻⁶ ±1,20·10 ⁻⁷ | -2,28·10 ⁻¹² ±5,25·10 ⁻¹² | -4,11·10 ⁻¹³ ±1,13·10 ⁻¹² | 6,09·10 ⁻¹⁶ ±2,54·10 ⁻¹⁵ | 1,31·10 ⁻¹⁷ ±3,29·10 ⁻¹⁷ |
| 10...15 кГц | 5,22·10 ⁻⁷ ±5,41·10 ⁻⁹ | 7,88·10 ⁻¹⁶ ±6,09·10 ⁻¹⁵ | -1,25·10 ⁻¹⁶ ±2,95·10 ⁻¹⁵ | -7,46·10 ⁻²⁰ ±1,55·10 ⁻¹⁹ | 1,09·10 ⁻²⁰ ±1,65·10 ⁻²⁰ |

Табл. 4

| Полоса фильтрации | $K_{2,ут}$ | $K_{3,ут}$ | $K_{4,ут}$ | $K_{5,ут}$ | $K_{6,ут}$ |
|-------------------|-----------------|--|-----------------|---|-----------------|
| Без фильтра | 1,0852 ± 0,0782 | -0,0027 ± 0,0087 | 0,3846 ± 0,1435 | 0,0064 ± 0,0791 | 0,7237 ± 0,6370 |
| 0...5 кГц | 0,1533 ± 0,0153 | -0,0008 ± 0,0012 | 0,0039 ± 0,0034 | 0,0007 ± 0,0012 | 0,0010 ± 0,0018 |
| 5...10 кГц | 0,8067 ± 0,0497 | 5,10·10 ⁻⁵ ± 7,11·10 ⁻⁵ | 0,1941 ± 0,0642 | 0,0011 ± 0,0025 | 0,0741 ± 0,1175 |
| 10...15 кГц | 0,1070 ± 0,0174 | -1,74·10 ⁻⁷ ± 4,78·10 ⁻⁷ | 0,0204 ± 0,0163 | 3,35·10 ⁻⁷ ± 2,26·10 ⁻⁶ | 0,0603 ± 0,0968 |

кумулянты помехи, а значит, кумулянты смеси сигнала утечки и помехи будут определяться в основном кумулянтами сигнала утечки. В табл. 5 приведены отношения абсолютных значений кумулянтов сигнала утечки к ку-

мулянтам помехи $\kappa_{s,ут}/\kappa_{s,л} = |\hat{\kappa}_{s,ут}|/|\hat{\kappa}_{s,л}|$ без применения фильтрации и с фильтрацией.

Как видно из данных табл. 5, отношение кумулянтов $\kappa_{s,ут}/\kappa_{s,л}$ порядков $s > 2$ намного больше отношения дис-

Табл. 5

| Полоса фильтрации | $\kappa_{2,ут}/\kappa_{2,п}$ | $\kappa_{3,ут}/\kappa_{3,п}$ | $\kappa_{4,ут}/\kappa_{4,п}$ | $\kappa_{5,ут}/\kappa_{5,п}$ | $\kappa_{6,ут}/\kappa_{6,п}$ |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Без фильтра | 539,9 | 7450,8 | $3,20 \cdot 10^5$ | $1,20 \cdot 10^6$ | $1,19 \cdot 10^8$ |
| 0...5 кГц | 76,603 | 2307,7 | 3223,5 | $1,35 \cdot 10^5$ | $1,57 \cdot 10^5$ |
| 5...10 кГц | $1,33 \cdot 10^5$ | $2,24 \cdot 10^7$ | $4,73 \cdot 10^{11}$ | $1,85 \cdot 10^{12}$ | $5,67 \cdot 10^{15}$ |
| 10...15 кГц | $2,05 \cdot 10^5$ | $2,21 \cdot 10^8$ | $1,63 \cdot 10^{14}$ | $4,48 \cdot 10^{12}$ | $5,55 \cdot 10^{18}$ |

персий $\kappa_{s,ут}/\kappa_{s,п}$, особенно в полосах 5...10 кГц и 10...15 кГц. Кроме того, отношение $\kappa_{s,ут}/\kappa_{s,п}$ существенно возрастает с увеличением порядка s , что подтверждает чувствительность кумулянтов высоких порядков к наличию утечки.

Выводы

1. Основная мощность помех сосредоточена в полосе 0...5 кГц, а сигнала утечки – в полосе 5...10 кГц. Отношение средних квадратов отклонений сигнала утечки и помехи с применением фильтрации увеличилось более чем в 15 раз для полосы 5...10 кГц и более чем в 19 раз для полосы 10...15 кГц по сравнению с отсутствием фильтрации.

2. При фильтрации значения кумулянтов помехи в полосе 0...5 кГц практически не изменяются, а в полосах 5...10 кГц и 10...15 кГц уменьшаются на несколько порядков. Отношение кумулянтов $\kappa_{s,ут}/\kappa_{s,п}$ порядков $s > 2$ намного больше отношения дисперсий $\kappa_{2,ут}/\kappa_{2,п}$, особенно в полосах 5...10 кГц и 10...15 кГц, причем отношение кумулянтов существенно возрастает с увеличением порядка s , что подтверждает чувствительность кумулянтов высоких порядков к наличию утечки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса* / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.

2. *Зиганин Ш.Г., Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В. Контроль технического состояния трубопроводов акустическими методами: Монография.* – Казань: Изд-во Казан. федер. ун-та, 2015. – 156 с.

3. *Дробот Ю.Б., Грешников В.А., Бачегов В.Н. Акустическое контактное течеискание.* – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.

4. *Кузнецов Н.С., Тарасюк П.С. Использование теории гидродинамического шума для поиска утечек жидкости в подземных трубопроводах // Контроль. Диагностика.* – 2000. – № 6. – С. 6–14.

5. *Самойлов Е.В., Тужилкин Ю.И. Эффективность применения корреляционных течеискателей для определения мест утечек из трубопроводов теплоснабжения // Новости теплоснабжения.* – 2001. – № 7 (11). – С. 24–27. – Режим доступа: www.nts.ru.

6. *Владимирский А.А., Владимирский И.А., Семенов Д.Н. Уточнение диагностической модели трубопровода для повышения достоверности течеискания // Акустичний вісник.* – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 3–16.

7. *Monitoring Acoustic Noise in Steel Pipelines* / Dieter Meinert, Michael Gorny, Ansgar Pollmann, Jie-Wei Chen and Andrea Garbi // 7th International Pipeline Conference, Volume 1, Calgary, Alberta, Canada, September 29 – October 3, 2008. – ASME. – P. 509–516. – Режим доступа: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleID=1640343>

8. *Строганов В.А., Хоролит В.Н. Экспериментальное исследование сигналов утечек подземных трубопроводов // Вісник СевНТУ. Вип. 101: Інформатика, електроніка, зв'язок: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во Сев-НТУ, 2010. – С. 29–32.*

9. *Красильников А.И., Берегун В.С., Полобюк Т.А. Статистический анализ физических моделей акустических сигналов утечки жидкости в трубопроводе // «КОН-СОНАНС-2015», акустичний симпозіум, 29–30 вересня 2015 р.: Збірник праць.* – К.: Інститут гідромеханіки НАН України, 2015. – С. 116–121.

10. *Берегун В.С., Красильников О.И., Полобюк Т.А. Статистичний аналіз акустичних сигналів витоків рідини в трубопроводах // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції, Київ, 22–24 листопада 2016 р., Київ, УТ НКТД, 2016. – С. 168–173.*

11. *Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: Монографія / В.П. Бабака та ін.; за ред. В.П. Бабака.* – К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с.

12. *Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований.* – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.

13. *Пат. 112139 Україна, МПК F17D 5/02; G01N29/14; G01M 3/04; G01M 3/24 (2006.01). Спосіб виявлення витоків рідини в трубопроводах / В.П. Бабака, О.І. Красильников, Т.А. Полобюк; заявник та власник Інститут технічної теплофізики НАН України.* – № а 2015 05917: заявл. 15.06.2015; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.

14. *Красильников А.И., Полобюк Т.А. Установка для физического моделирования и экспериментального исследования утечек в трубопроводе // Метрологія та прилади.* – 2014. – № 1; II (45). – С. 147–150.

15. *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія / В.П. Бабака та ін.; за ред. В.П. Бабака.* – К.: Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015. – 512 с.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF
FILTRATION ON THE SENSITIVITY OF THE
CUMULANT METHOD OF DETECTING THE
ACOUSTIC SIGNALS OF LEAKAGE

Beregun V.S.¹, Krasilnikov A.I.², Polobyuk T.A.²

¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 16, Politekhnichna str., Kyiv, 03057, Ukraine

² Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

The purpose of the article is to analyze the sensitivity of the cumulant method of detecting fluid leaks in a pipeline based on the statistical processing of the acoustic leakage signal and interference generated by the moving fluid flow. To analyze the possibilities of a cumulant leak detection method, it is necessary to have specific values of cumulants of real leakage signals and interference, which can be obtained as a result of a full-scale experiment.

To generate a leakage signal, an installation is used that allows physical modeling of the leakage of liquid in the pipe in standing water. To simulate a leak in a pipe, a nozzle with copper walls and a through hole with a diameter of 1 mm was used, and a pressure of 6 atmospheres was maintained to produce leakages in the pipe. As an interference, noise generated by a moving fluid flow in the pipeline is used. The interference was recorded on the pipeline of the distribution network at a pressure of 7 atmospheres, the volume flow of the coolant averaged more than 1000 liters per hour, which ensured the flow rate of the fluid at which its motion can be considered turbulent.

The results of experimental studies of acoustic signals of fluid leakage in the pipeline and interference showed that the main interference power is concentrated in the 0...5 kHz band, and the leakage signal is in the band 5...10 kHz. With the use of bandpass filtering, the ratio of the mean square deviation of the leakage signals and interference increased by more than an order of magnitude for the frequency bands 5...10 kHz and 10...15 kHz, as compared with the absence of filtering. In this case, the ratio of the absolute values of the cumulants of the leakage signal and the interference is much greater than the ratio of the variances, and the ratio of cumulants increases substantially with increasing order. This confirms the sensitivity of high-order cumulants to the presence of a leak.

References 15, tables 5, figures 3.

Key words: acoustic contact leak test, detection of a leakage signal, acoustic noise signals, cumulant analysis.

1. *Acoustic diagnostics and control at enterprises of the fuel and energy complex* / V.M. Baranov, A.I. Gritsenko, A.M. Karasevich i dr. – Moscow: Nauka, 1998. 304 p. (Rus.)

2. *Ziganshin Sh.G., Vankov Iu.V., Izmailova E.V. Monitoring of technical condition of pipelines by acoustic methods: Monografiia.* – Kazan: Izd-vo Kazan. feder. un-ta, 2015. 156 p. (Rus.)

3. *Drobot Iu.B., Greshnikov V.A., Bachegov V.N. Acoustic contact leak test.* – Moscow: Mashinostroenie, 1989.

120 p. (Rus.)

4. *Kuznetsov N.S., Tarasiuk P.S. Using the theory of hydrodynamic noise to search for fluid leaks in underground pipelines* // *Kontrol. Diagnostika.* 2000. № 6. P. 6–14. (Rus.)

5. *Samoilov E.V., Tuzhilkin Iu.I. Effectiveness of the use of correlation leak detectors for the determination of leaks from heat supply pipelines* // *Novosti teplosnabzheniia.* 2001. № 7 (11). P. 24–27. Rezhim dostupa: www.ntsnu.ru. (Rus.)

6. *Vladimirskii A.A., Vladimirskii I.A., Semeniuk D.N. Refinement of the diagnostic model of the pipeline to increase the reliability of leak test* // *Akustychnyi visnik.* 2005. Vol. 8, № 3. P. 3–16. (Rus.)

7. *Monitoring Acoustic Noise in Steel Pipelines* / Dieter Meinert, Michael Gorny, Ansgar Pollmann, Jie-Wei Chen and Andrea Garbi // *7th International Pipeline Conference, Volume 1, Calgary, Alberta, Canada, September 29 – October 3, 2008.* – ASME. – P. 509–516. – Rezhim dostupa: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleID=1640343> (Eng.)

8. *Stroganov V.A., Khorolich V.N. Experimental investigation of leakage signals of underground pipelines* // *Visnyk SevNTU. Vyp. 101: Informatyka, elektronika, zviazok: zb. nauk. pr. – Sevastopol: Vyd-vo SevNTU, 2010. P. 29–32.* (Rus.)

9. *Krasilnikov A.I., Beregun V.S., Polobyuk T.A. Statistical analysis of physical models of acoustic signals of fluid leakage in a pipeline* // «KONSONANS–2015», *akustychnyi sympozium, 29–30 veresnia 2015 r.:* Zbirnyk prats. – Kyiv: Instytut hidromekhaniky NAN Ukrainy, 2015. P. 116–121. (Rus.)

10. *Beregun V.S., Krasilnikov A.I., Polobyuk T.A. Statistical analysis of acoustic signals of fluid leaks in pipelines* // *Neruinivnyi kontrol ta tekhnichna diahnostyka: materialy 8-yi Natsionalnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, Kyiv, 22–24 lystopada 2016 r., Kyiv, UT NKTD, 2016. P. 168–173.* (Rus.)

11. *Hardware and software for monitoring the objects of generation, transportation and consumption of thermal energy: Monografiia* / V.P. Babak ta in.; za red. V.P. Babaka. – Kyiv: In-t tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy, 2016. 298 p. (Ukr.)

12. *Malakhov A.N. Cumulant Analysis of Random Non-Gaussian Processes and their Transformations.* – Moscow: Sov. radio, 1978. 376 p. (Rus.)

13. *Pat. 112139 Ukraina, MPK F17D 5/02; G01N29/14; G01M 3/04; G01M 3/24 (2006.01).* Sposib vyivlennia vytohu ridyny v truboprovodakh / V.P. Babak, A.I. Krasilnikov, T.A. Polobyuk; zaiavnyk ta vlasnyk Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. – № a 2015 05917: zaiavl. 15.06.2015; opubl. 25.07.2016, Biul. № 14. (Ukr.)

14. *Krasilnikov A.I., Polobyuk T.A. Installation for physical modeling and experimental study of leaks in the pipeline* // *Metrolohiia ta pryklady.* 2014. № 1; II (45). P. 147–150. (Rus.)

15. *Informatsiine zabezpechennia monitorynhu obiektiv teploenerhetyky: Monografiia* / V.P. Babak ta in.; za red. V.P. Babaka. Kyiv: In-t tekhn. teplofizyky NAN Ukrainy, 2015. 512 p. (Ukr.)

Отримано 10.04.2018

Received 10.04.2018