

УДК 681.518.5

А.И. Красильников, Т.А. Полобюк

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

КУМУЛЯНТНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ УТЕЧКИ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Получены общие выражения для нахождения одномерных кумулянтов и кумулянтных коэффициентов акустических сигналов утечки. Проанализировано влияние параметров модели сигналов утечки на значения кумулянтных коэффициентов. Установлено, что при экспоненциальной форме импульсов и показательном распределении их амплитуд сигналы утечки имеют гамма-распределение мгновенных значений.

Ключевые слова: обнаружение утечек в трубопроводе, акустическое контактное течение, акустический сигнал утечки, кумулянтные функции.

Введение

Нарушение герметичности работающих под давлением сосудов, баллонов, трубопроводов, запорной и регулирующей арматуры и т. д., может привести не только к потере транспортируемого вещества, но и к тяжелым аварийным ситуациям.

Среди различных методов и средств диагностики герметичности широкие возможности для обнаружения течи в трубопроводе без вывода его из эксплуатации имеет метод акустического контактного течения [1–5], который основан на анализе акустических колебаний, генерируемых течью.

Для обнаружения утечек жидкости в трубопроводах в современных системах акустического контактного течения, как правило, используются корреляционно-спектральные методы. Однако эти методы являются эффективными лишь при анализе сигналов, распределение мгновенных значений которых можно считать гауссовским.

Процесс генерации сигналов утечки и их свойства определяются гидродинамическими режимами утечки, среди которых основную роль для акустического контактного течения играет кавитационный режим течения. Распределение мгновенных значений кавитационного шума отличается от гауссовского, поэтому для его анализа представляется целесообразным использование более полных вероятностных характеристик сигналов утечки.

Целью работы является анализ кумулянтов акустических сигналов утечки жидкости в трубопроводе в зависимости от изменения параметров модели этих сигналов.

Исходные соотношения

Кавитация представляет собой процесс неустойчивого изменения размеров парогазовых пузырьков при знакопеременном давлении в жидкости, которые возникают, растут, нелинейно пульсируют и схлопываются с образованием ударных волн

и кумулятивных струй. Возникающие акустические сигналы утечки представляют собой результат наложения большого числа импульсов, которые возникают в случайные моменты времени.

В работе [6] обоснована возможность описания акустического сигнала утечки моделью Бунимовича – Райса:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{v(t)} \eta_k h(t - t_k), \quad (1)$$

где $v(t)$ – однородный процесс Пуассона с интенсивностью $\lambda > 0$; t_k – случайные моменты времени появления импульсов, являющиеся однородным пуассоновским потоком событий; η_k – случайные величины, характеризующие газосодержание в жидкости, одинаково распределенные, независимые между собой и с t_k ; $h(t)$ – детерминированная функция, описывающая форму элементарного звукового импульса.

Случайный процесс (1) является стационарным, его одномерные кумулянтные функции (далее кумулянты) не зависят от времени, $\kappa_s[\xi(t)] = \kappa_s$, и вычисляются по формуле [7]:

$$\kappa_s = \kappa_{s\eta} \int_{-\infty}^{\infty} h^s(t) dt, \quad (2)$$

где $\kappa_{s\eta} = \lambda \alpha_{s\eta}$, $\alpha_{s\eta} = \mathbf{M}[\eta_k^s]$ – s -ое начальные моменты амплитуд η_k ; $\kappa_1 = m$ – математическое ожидание процесса (1), $\kappa_2 = \sigma^2$ – его дисперсия.

Для анализа акустических сигналов утечки удобно использовать безразмерные кумулянтные коэффициенты γ_s ,

$$\gamma_s = \frac{\kappa_s}{\kappa_2^{s/2}}. \quad (3)$$

Отметим, что γ_3 – коэффициент асимметрии, γ_4 – коэффициент эксцесса.

Анализ кумулянтных коэффициентов

Следуя результатам работ [2, 8], зададим форму элементарного звукового импульса функцией:

$$h(t) = p_m \exp(-t/t_0) E(t), \quad (4)$$

где $p_m > 0$, $t_0 > 0$ – параметры импульса, $E(t)$ – единичная функция. Величина p_m пропорциональна статическому давлению, а постоянная времени t_0 принимает значения в пределах $10^{-8} \dots 10^{-5}$ с.

Используя выражения (2)–(4), получаем формулы для нахождения кумулянтов κ_s и кумулянтных коэффициентов γ_s процесса (1):

$$\kappa_s = \alpha_{s\eta} p_m^s \lambda \frac{t_0}{s}, \quad (5)$$

$$\gamma_s = B_s T_s(\lambda t_0) D_s, \quad (6)$$

где $B_s = \alpha_{s\eta} / \alpha_{2\eta}^{s/2}$, $T_s(t) = t^{1-s/2}$, $D_s = 2^{s/2} / s$. (7)

Из выражения (5) видно, что кумулянты акустического сигнала утечки жидкости очевидным образом зависят от начальных моментов $\alpha_{s\eta}$ амплитуд η_k , интенсивности λ и от параметров элементарных звуковых импульсов p_m , t_0 .

Из выражения (6) следует, что значения кумулянтных коэффициентов γ_s процессов (1) зависят не только от начальных моментов $\alpha_{s\eta}$, но и от свойств коэффициентов D_s , функций $T_s(t)$ и значений параметра λt_0 .

Проанализируем эти зависимости.

Будем считать, что распределение амплитуд является вырожденным, т. е. $P(\eta_k = 1) = 1$. В этом случае все начальные моменты $\alpha_{s\eta} = 1$, соответственно все коэффициенты $B_s = 1$, поэтому кумулянтные коэффициенты γ_s полностью определяются коэффициентами D_s и функциями $T_s(t)$.

1. Анализ зависимости коэффициентов γ_s от коэффициентов D_s . Найдем предел

$$\lim_{s \rightarrow \infty} D_s = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{2^{s/2}}{s} = \frac{1}{2} \ln 2 \lim_{s \rightarrow \infty} 2^{s/2} = \infty.$$

Из последнего соотношения следует, что коэффициенты γ_s возрастают с ростом s при любых фиксированных значениях начальных моментов $\alpha_{s\eta}$ и постоянной времени t_0 .

Оценим скорость возрастания коэффициентов γ_s в зависимости от порядка s . Из отношения

$$\frac{D_{s+1}}{D_s} = 2^{1/2} \frac{s}{s+1}$$

видно, что при больших значениях s коэффициенты γ_{s+1} больше коэффициентов γ_s в $\sqrt{2}$ раз при фиксированных значениях $\alpha_{s\eta}$ и t_0 .

2. Анализ зависимости коэффициентов γ_s от свойств функции $T_s(t)$.

Очевидно, что $T_s(t) = 1$, если $t = 1$; $T_s(t) < 1$, если $t > 1$; $T_s(t) > 1$, если $t < 1$. При этом

$$\lim_{s \rightarrow \infty} T_s(t) = \begin{cases} 0, & t > 1, \\ \infty, & t < 1. \end{cases}$$

Рассмотрим отношение

$$\frac{T_{s+1}(t)}{T_s(t)} = t^{-1/2}.$$

Очевидно, что

$$\frac{T_{s+1}(t)}{T_s(t)} > 1, \text{ если } t < 1;$$

$$\frac{T_{s+1}(t)}{T_s(t)} < 1, \text{ если } t > 1.$$

Таким образом, при фиксированных значениях начальных моментов $\alpha_{s\eta}$ кумулянтные коэффициенты γ_s возрастают с увеличением s , если $\lambda t_0 < 1$ и убывают, если $\lambda t_0 > 1$.

В табл. 1, 2 приведены значения кумулянт κ_s и кумулянтных коэффициентов γ_s , $s = \overline{3, 6}$, для различных значений параметра λt_0 , полученные по формулам (5) и (6) при значениях $p_m = 1$, $\alpha_{s\eta} = 1$.

Таблица 1

Значения кумулянт κ_s при различных λt_0

λt_0	0,5	1	5	10	100
κ_3	0,167	0,333	1,67	3,33	33,3
κ_4	0,125	0,25	0,125	2,5	25
κ_5	0,1	0,2	1	2	20
κ_6	0,083	0,167	0,833	1,67	16,7

Таблица 2

Значения коэффициентов γ_s при различных λt_0

λt_0	0,5	1	5	10	100
γ_3	1,333	0,943	0,421	0,298	0,094
γ_4	2	1	0,2	0,1	0,01
γ_5	3,199	1,131	0,10	0,036	0,001
γ_6	5,332	1,333	0,053	0,013	10^{-4}

Из данных табл. 1, 2 видно, что с ростом параметра λt_0 значения кумулянт любого порядка увеличиваются, а значения кумулянтных коэффициентов уменьшаются.

Гамма-распределение амплитуд η_k

Пусть амплитуды η_k имеют гамма-распределение, плотность вероятностей и начальные моменты которого определяется выражениями [9]:

$$p_{\eta}(x) = \frac{\beta^c}{\Gamma(c)} x^{c-1} e^{-\beta x} E(x), \quad (8)$$

$$\alpha_{s\eta} = \beta^{-c} \prod_{k=0}^{s-1} (c+k). \quad (9)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция, $c > 0$, $\beta > 0$ – параметры формы и масштаба.

Используя формулы (7) и (9), получаем выражение для нахождения коэффициентов B_s гамма-распределения амплитуд импульсов:

$$B_s = [c(c+1)]^{1-\frac{s}{2}} \prod_{k=2}^{s-1} (c+k). \quad (10)$$

В табл. 3 приведены рассчитанные по формуле (10) значения коэффициентов B_s при различных значениях параметра формы c распределения (8) амплитуд η_k .

Таблица 3

Значения коэффициентов B_s при различных c

c	0,5	1	2	5	10
B_3	2,887	2,121	1,633	1,278	1,144
B_4	11,667	6	3,333	1,867	1,418
B_5	60,622	21,213	8,165	3,067	1,893
B_6	385	90	23,333	5,6	2,707

Из табл. 3 видно, что значения коэффициентов B_s , а, следовательно, и кумулянтные коэффициенты γ_s убывают с увеличением параметра c при всех фиксированных s , и возрастают с ростом s при фиксированных значениях c .

Зададим в формуле (8) значение $c = 1$. В этом случае у сигнала утечки, описываемого моделью (1), амплитуды η_k распределены по показательному закону с параметром β .

Подставляя в выражение (5) момент $\alpha_{s\eta}$, определенный формулой (9) при значении $c = 1$, находим кумулянты κ_s процесса (1) для рассматриваемого случая:

$$\kappa_s = (s-1)! \lambda t_0 (p_m \beta^{-1})^s. \quad (11)$$

Непосредственно по формуле (3) с использованием выражения (11) получаем кумулянтные коэффициенты γ_s сигналов утечки:

$$\gamma_s = (s-1)! (\lambda t_0)^{1-s/2}. \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) совпадают с формулами для кумулянт и кумулянтных коэффициентов гамма-распределения [9] с параметром формы λt_0 и параметром масштаба $p_m \beta^{-1}$.

Из этого следует, что плотность вероятностей акустических сигналов утечки определяется выражением:

$$p(x) = \left(\frac{p_m}{\beta}\right)^{-\lambda t_0} \frac{1}{\Gamma(\lambda t_0)} x^{\lambda t_0-1} e^{-\frac{\beta}{p_m} x} E(x). \quad (13)$$

Отметим, что при $\lambda t_0 = 1$ сигнал утечки имеет показательное распределение.

На рис. 1 представлены графики плотности вероятностей (13) акустических сигналов утечки (1) с показательным распределением амплитуд для различных значений параметра λt_0 и при значениях $p_m = 1$, $\beta = 1$.

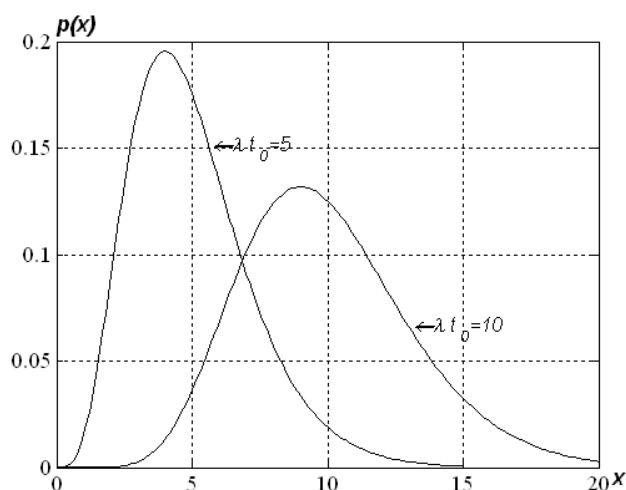


Рис. 1. Графики плотности вероятностей сигнала утечки

В табл. 4, 5 приведены рассчитанные по формулам (11) и (12) значения кумулянт κ_s и кумулянтных коэффициентов γ_s , $s = \overline{3,6}$, при различных значениях параметра λt_0 и при

$$\beta = 1, p_m = 1.$$

Таблица 4

Значения кумулянт κ_s при различных λt_0

λt_0	0,5	1	5	10	100
κ_3	1	2	10	20	200
κ_4	3	6	12	60	600
κ_5	12	24	120	240	2400
κ_6	60	120	600	1200	12000

Таблица 5

Значения коэффициентов γ_s при различных λt_0

λt_0	0,5	1	5	10	100
γ_3	2,828	2	0,894	0,632	0,2
γ_4	12	6	1,2	0,6	0,06
γ_5	67,892	24	2,147	0,759	0,024
γ_6	480	120	4,8	1,2	0,012

Из данных табл. 4, 5 следует, что значения кумулянт κ_s возрастают с увеличением параметра λt_0 , а значения кумулянтных коэффициентов γ_s всех порядков уменьшаются. При $\lambda t_0 = 100$ распределение мгновенных значений сигналов утечки можно считать гауссовским.

Выводы

1. Получены общие выражения для нахождения одномерных кумулянт и кумулянтных коэффициентов сигналов утечки жидкости в трубопроводе, и проанализировано влияние на их значения параметров модели.

2. Установлено, что при больших значениях s коэффициенты γ_{s+1} больше коэффициентов γ_s в $\sqrt{2}$ раз при фиксированных значениях $\alpha_{s\eta}$ и t_0 .

3. Показано, что при фиксированных значениях начальных моментов $\alpha_{s\eta}$ кумулянтные коэффициенты γ_s возрастают с увеличением s , если $\lambda t_0 < 1$ и убывают, если $\lambda t_0 > 1$.

4. Установлено, что при экспоненциальной форме импульсов и показательном распределении их амплитуд акустический сигнал утечки имеет гамма-распределение мгновенных значений.

5. Применение кумулянт и кумулянтных коэффициентов может повысить чувствительность систем акустического контактного течеискания и достоверность обнаружения утечек жидкости.

КУМУЛЯНТНИЙ АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ВИТОКІВ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ

О.І. Красильников, Т.А. Полобюк

Отримано загальні вирази для знаходження одновимірних кумулянтів і кумулянтних коефіцієнтів акустичних сигналів витoku. Проаналізовано вплив параметрів моделі сигналів витoku на значення кумулянтних коефіцієнтів. Встановлено, що при експоненціальній формі імпульсів і показниковому розподілі їх амплітуд сигнали витoku мають гамма-розподіл миттєвих значень.

Ключові слова: виявлення витоків в трубопроводі, акустичне контактне течеіскання, акустичний сигнал витoku, кумулянтні функції.

CUMULANT ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNALS OF FLUID LEAK IN THE PIPELINE

A.I. Krasil'nikov, T.A. Polobiuk

In article the general expressions for finding of one-dimensional cumulants and cumulant coefficients of acoustic leak signals are received. It is carried out the analysis of influence of parameters model of leak signals on values of cumulant coefficients. It is established that leak signals at an exponential form of impulses and exponential distribution of their amplitudes have gamma distribution of instant values.

Keywords: detection of leaks in the pipeline, acoustic contact leak detection, acoustic leak signal, cumulant functions.

Список литературы

1. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.2: В 2 кн. Кн. 1: Контроль герметичности / А.И. Евлампиев, Е.Д. Попов, С. Г. Сажин и др.; Кн. 2: Вихретоковый контроль / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 687 с.*
2. Дробот Ю.Б. Акустическое контактное течеискание / Ю.Б. Дробот, В.А. Грешников, В.Н. Бачегов. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
3. Потапов И.А. Акустические методы и средства неразрушающего контроля и дистанционной диагностики трубопроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.11 / Иван Анатольевич Потапов; Северо-Западный государственный заочный технический университет. – СПб., 2007. – 24 с.
4. Владимирский А.А. Уточнение диагностической модели трубопровода для повышения достоверности течеискания / А.А. Владимирский, И.А. Владимирский, Д.Н. Семенюк // Акустичний вісник. – 2005. – Т.8, № 3. – С. 3–16.
5. Бабак В.П. Локализация места положения сквозных дефектов по сигналам акустической эмиссии / В.П. Бабак, А.В. Пономаренко // ААЭКС. – 2007. – № 1(19). – С. 39–46.
6. Красильников А.И. Математические модели акустического сигнала утечки жидкости в трубопроводах / А.И. Красильников, Т.А. Полобюк // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2013): друга міжнародна наукова конференція, 29–30 жовтня 2013 р.: збірник тез доповідей. – Вінниця, 2013 р. – С. 243–244.
7. Марченко Б.Г. Линейные случайные процессы и их приложения / Б.Г. Марченко, Л.Н. Щербак. – К.: Наук. думка, 1975. – 143 с.
8. Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений / Ю.Л. Левковский. – Л.: Судостроение, 1978. – 224 с.
9. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.

Поступила в редколлегию 17.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Куц, Национальный авиационный университет, Киев.