

## О ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРУБОПРОВОД АКТИВНЫМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ КОНТРОЛЯ

Научным сообществом разработано множество способов обеспечения безопасности транспортировки нефтепродуктов автоматизированными средствами. Актуальной задачей является повышение эффективности идентификации вида несанкционированного воздействия на трубопровод и оценка вероятностей ошибок обнаружения нарушений. В работе представлены результаты экспериментальной оценки вероятностных характеристик обнаружителя на основе ранее предложенного активного виброакустического способа контроля. Получены значения информативных признаков в виброакустических сигналах в зависимости от размера локальной неоднородности и отношения сигнал/шум. Определена вероятность ошибки распознавания и необходимое количество накапливаемых сигналов для работы системы в дальней зоне. Сделан вывод о состоятельности предложенного алгоритма идентификации вида несанкционированного воздействия.

**Ключевые слова:** врезка в трубопровод, обнаружение нарушений на трубопроводах, вероятность ошибки идентификации, виброакустический способ контроля.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-08-01560).*

**Введение.** В работах [1–4] представлены модификации активного виброакустического способа обнаружения и идентификации несанкционированного воздействия на трубопровод. Характер амплитудно-частотных зависимостей колебаний трубопровода при различных имитированных состояниях указывает на перспективность их использования для идентификации его текущего состояния.

Возможными состояниями трубопровода может быть «штатное» — функционирование системы без нарушений; «шурф» — попытка раскапывания грунта вокруг трубопровода с последующим оголением его поверхности; «шурф с врезкой» — подключение дополнительной трубки к существующему трубопроводу для перекачки продукта.

В основе способа заложен принцип зондирования протяженного объекта упругими колебаниями с их приемом на удаленном конце вибропреобразователем (либо несколькими) и программной обработкой для выявления отклонений в сигналах, свидетельствующих об изменении состояния. Идентификация вида воздействия базируется на выполнении этапов:

1. Установка аппаратного обеспечения на трубопровод: вибропреобразователи, приемники, линия связи.

2. Генерация серий виброакустических импульсов с их приемом на удаленном конце трубопровода

и внедрение имитаторов нарушений, схожих с несанкционированными воздействиями злоумышленника, которые впоследствии предполагается обнаруживать.

3. Обработка серий импульсов, привязанных к каждому имитатору для обучения системы идентификации (получение классификатора воздействий).

4. Запуск периодического зондирования трубопровода со сравнением принимаемых сигналов с имеющимися в постоянной памяти устройства — ввод системы в эксплуатацию.

Ошибочное принятие решения системы о состоянии трубопровода может быть принято в двух случаях:

1. Обнаружено изменение функционирования трубопровода, но на самом деле оно не произошло (ложная тревога, или ошибка первого рода).

2. Нарушение не зафиксировано, однако изменение произошло (пропуск цели, или ошибка второго рода).

Получение обучающей выборки зондирующих сигналов введением имитаторов нарушений в трубопровод позволяет оценить диапазоны, в которых могут находиться амплитуды частот, чувствительные к соответствующим несанкционированным изменениям.

Работа трубопроводной системы сопровождается естественными помехами окружающей среды [5]

и ее собственными. Амплитуда зондирующего сигнала является случайной величиной, поэтому необходимо получить ее статистические характеристики для оценки работы системы идентификации в зашумленной среде.

В [1] описан алгоритм идентификации на основе проверки условия попадания амплитуд информативных частот принимаемого накопленного импульса [6] в доверительные границы  $S_1, S_2$  по обучающим выборкам, определяемые на основе выражений:

$$S_1 = M_n - \frac{t \cdot \sigma_n}{\sqrt{N}};$$

$$S_2 = M_n + \frac{t \cdot \sigma_n}{\sqrt{N}},$$

где  $M_n, \sigma_n$  — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение амплитуды частоты соответственно;  $t$  — коэффициент, определяемый по матрице таблицы Стьюдента в памяти микроконтроллера;  $N$  — число накапливаемых сигналов.

Независимо от выбора информативного показателя нарушения и его пороговых значений, на основе которых принимается решение о классификации поступающего сигнала, при их использовании необходимо оценивать вероятности ошибок первого и второго рода [7].

Обнаружение отклонения состояния трубопровода с использованием информативного признака сводится к обоснованию используемого критерия и определению порога [8] для информативного признака, на основании которого принимается классификация.

Если обозначить через  $\omega(v/u_x)$  плотность распределения информативного признака при наличии нарушения, а  $\omega(v/0)$  — при штатном функционировании трубопровода, то вероятность ложной тревоги определяется следующим выражением [7]:

$$P_{ЛТ} = \int_X^\infty \omega(v/0) dv,$$

тогда вероятность пропуска цели:

$$P_{ПП} = \int_{-\infty}^X \omega(v/u_x) dv,$$

где  $X$  — значение порога информативного признака  $v$ , разделяющего его на два подпространства состояний «штатное» и «нарушение».

Коэффициент корреляции может использоваться для обнаружения изменений функционирования объекта контроля, но для идентификации вида такого изменения он не является информативным. Ранее [2] в качестве признака изменения трубопровода предлагалось использовать формы накопленных сигналов упругих колебаний, отличие которых фиксировалось отклонением коэффициента корреляции [9]:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})(x_k - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}},$$

где  $x_k$  — амплитуда эталонного импульса  $k$ ;  $\bar{x}$  — среднее значение амплитуды эталонного импульса;  $y_k$  — амплитуда регистрируемого импульса  $k$ ;  $\bar{y}$  — среднее значение амплитуд регистрируемого импульса;  $n$  — количество импульсов.

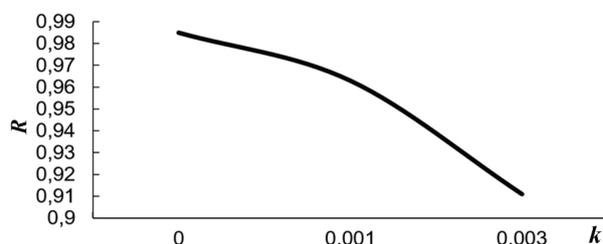


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции от отношения  $k$

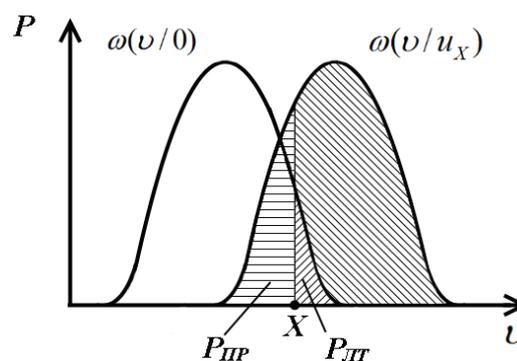


Рис. 2. Обнаружение ошибок первого и второго рода

На рис. 1 представлена зависимость  $R(k)$ , где  $k = \frac{S_{неодн}}{S_{общ}}$  — отношение площадей контактирующей с трубой локальной неоднородностью (шурф), полученное на лабораторном стенде.

Коэффициент снижается при увеличении размеров неоднородности (форма импульса — информативный признак), но классифицировать вид воздействия с удовлетворительной надежностью, установив пороговые значения корреляции, не представляется возможным.

Вероятности ошибок можно оценить геометрически, расположив плотности распределения значений информативного признака на одной оси (рис. 2).

Таким образом, вероятность ложной тревоги будет определяться формулой:

$$P_{ЛТ} = \int_X^\infty \frac{1}{v \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \left( \frac{\ln(v) - M}{\sigma} \right)^2} dv, \quad (1)$$

а пропуск цели:

$$P_{ПП} = \int_{-\infty}^X \frac{1}{v \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \left( \frac{\ln(v) - M}{\sigma} \right)^2} dv. \quad (2)$$

Площадь, описываемая интегралами (1, 2), определяет общую ошибку распознавания:

$$P_{Ош} = P_0 \int_X^\infty \omega(v/0) dv + P_c \int_{-\infty}^X \omega(v/u_x) dv.$$

Площадь под кривой  $\omega(v/0)$  справа от порогового значения  $X$  равна вероятности ложной тревоги, а площадь под  $\omega(v/u_x)$  слева от  $X$  — пропуска цели.

При наличии возможности экономически обосновать стоимость ошибок первого и второго рода,

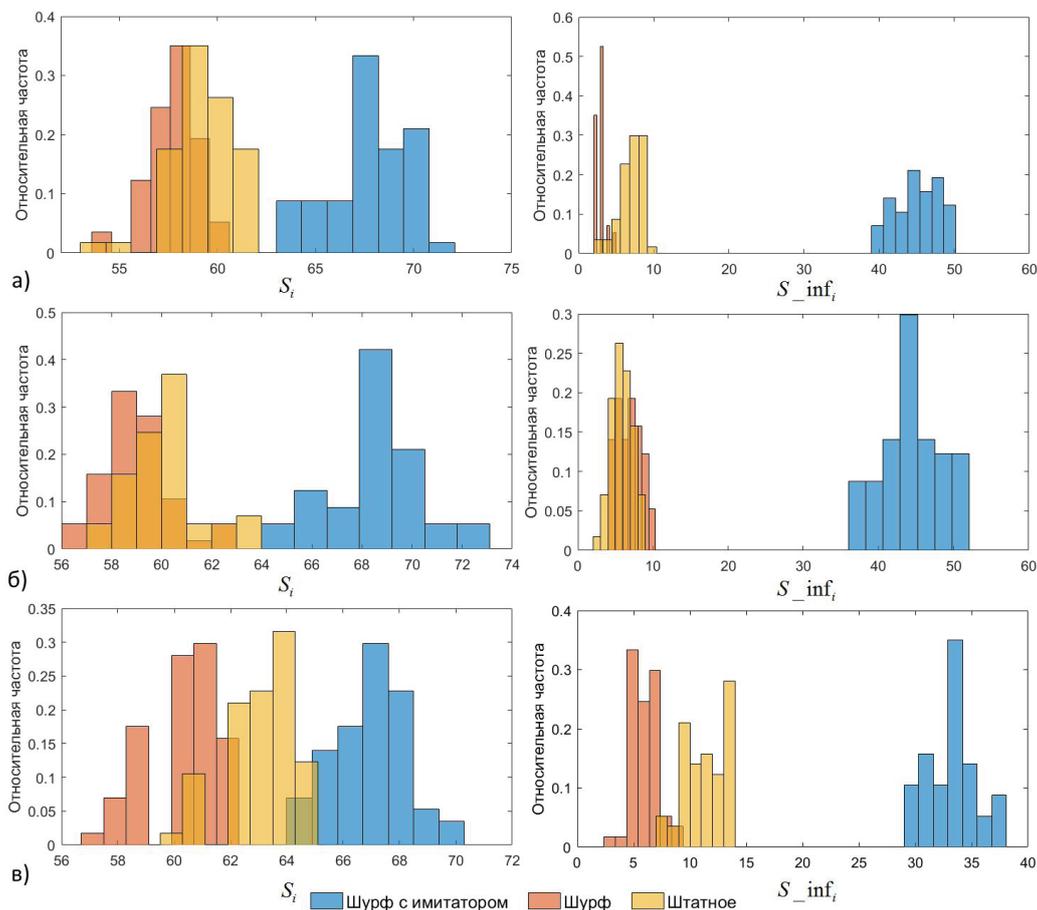


Рис. 3. Распределение значений показателей  $S_i$  и  $S_{inf_i}$  в зависимости от размера локальной неоднородности «шурф с имитатором»: а)  $k = 6,6 \cdot 10^{-3}$ ; б)  $k = 5 \cdot 10^{-3}$ ; в)  $k = 3,3 \cdot 10^{-3}$

располагая соответствующей достоверной информацией, следует использовать критерий минимума среднего риска [7]. Использование критерия Неймана–Пирсона при задании фиксированного значения вероятности ложной тревоги минимизирует пропуск цели [10], но при отсутствии достоверных данных о действительных затратах на ложный вызов бригады и пропуск нарушения, воспользуемся выражениями (1, 2). Использование порога  $X$  с координатой в точке пересечения кривых  $\omega(v/0)$  и  $\omega(v/u_x)$  соответствует критерию идеального наблюдателя. Его отличительной особенностью является минимизация суммарной ошибки распознавания для оценки общей помехоустойчивости системы контроля. При неизменности статистических характеристик вероятности ошибок первого и второго рода будут равными, но в реальных условиях возможны отклонения значений ввиду влияния факторов среды.

На практике интерес представляет расчет вероятностей общей ошибки распознавания в зависимости от дистанции контроля и размера неоднородности.

Для идентификации вида воздействия предлагается по показателям  $Sum_i$  и  $Sum_{inf_i}$ , определяемых как количество частот, попавших в доверительные интервалы, построенные на основе имитаторов нарушений, рассчитывать итоговые коэффициенты соответствия текущего полученного сигнала имеющимся эталонным состояниям [1]:

$$S_i = \frac{Sum_i}{b} \cdot 100;$$

$$S_{inf_i} = \frac{Sum_{inf_i}}{S_n} \cdot 100,$$

где  $Sum_i$  — идентификационный показатель без фильтра информативных частот,  $Sum_{inf_i}$  — идентификационный показатель с фильтром информативных частот;  $b$  — количество частот в окне преобразования Фурье;  $S_n$  — количество информативных частот.

Количество информативных частот в зависимости от размеров локальной неоднородности («шурф») представлено в табл. 1. С уменьшением контактной площади имитатора с трубопроводом количество информативных частот снижается.

Распределение значений идентификационных показателей  $S_i$  и  $S_{inf_i}$  на рис. 3 иллюстрирует переход состояния системы от штатного при возникновении локальной неоднородности, оцениваемой относительно площади всего контролируемого объекта коэффициентом  $k$ .

В эксперименте осуществлялось обнаружение действительного наличия имитатора врезки и шурфа на лабораторном стенде (стальная труба длиной 5 метров, диаметр 0,05 м). Все три состояния «шурф с имитатором», «шурф», «штатное» корректно определились во всех случаях безошибочно. «Шурф с имитатором» подразумевает извлечение грунта вокруг трубы и установку гильзы с хомутом, имитирующие приспособление для совершения врезки. Отношение сигнал/шум (SNR) при этом равнялось 50.

Распределения значений  $S_i$  строились без учета информативной составляющей в амплитудных спек-

Влияние локальной неоднородности на показатели информативности

	$S_{inf_i} (k = 3,3 \cdot 10^{-3})$	$S_{inf_i} (k = 5 \cdot 10^{-3})$	$S_{inf_i} (k = 6,6 \cdot 10^{-3})$
Шурф с имитатором	212	465	488
Шурф	88	242	386
Штатное	84	205	310
Общее количество информативных частот			
	384	912	1184

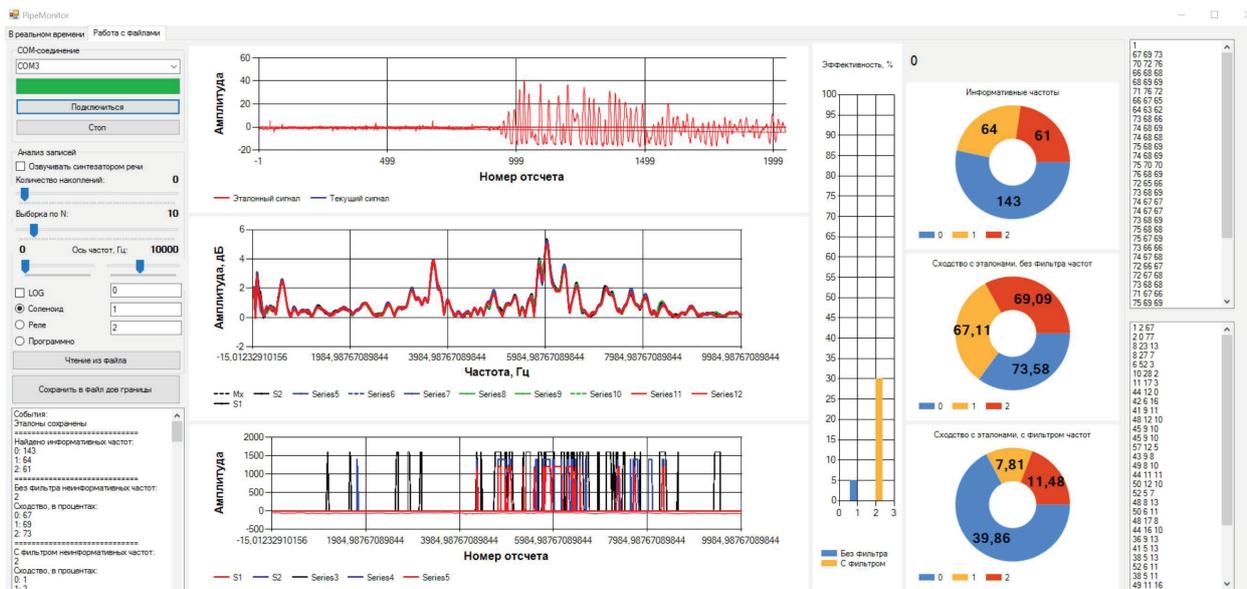


Рис. 4. Программное обеспечение идентификации вида воздействия

трах сигналов.  $S_{inf_i}$  определялись с учетом только информативных частот. Изображение программного комплекса по обнаружению информативных частот и реализации алгоритма идентификации вида воздействия в реальном времени представлено на рис. 4.

Значение  $k = 6,6 \cdot 10^{-3}$  соответствует шурфу протяженностью три метра для трубопровода 1 км,  $k = 5 \cdot 10^{-3}$  — шурфу протяженностью 2,5 м и  $k = 3,3 \cdot 10^{-3}$  — 1,65 м. Ошибки при всех комбинациях параметров зафиксированы не были.

Значение  $k = 3,3 \cdot 10^{-3}$ , полученное на лабораторном стенде, соответствует воздействию, схожему с появлением неоднородности протяженностью 1,65 м по всей окружности трубы при контроле 1 км трубопровода с помощью одного генератора и двух приемников. В ходе экспериментов на действующем надземном трубопроводе диаметром 400 мм с жидкостью зафиксировано такое же отношение  $SNR = 50$  на дистанции 200 м между парой «генератор-приемник». При этом коэффициент затухания, найденный эмпирически, равен  $\alpha = 0,007$ , что означает снижение амплитуды импульса вдвое на каждые 100 м трубопровода. Для подземного трубопровода получен коэффициент  $\alpha = 0,016$ .

На дистанции контроля 1000 м (рис. 5) отношение сигнал/шум в заглубленном трубопроводе снижается более чем в  $3,6 \cdot 10^5$  раз:

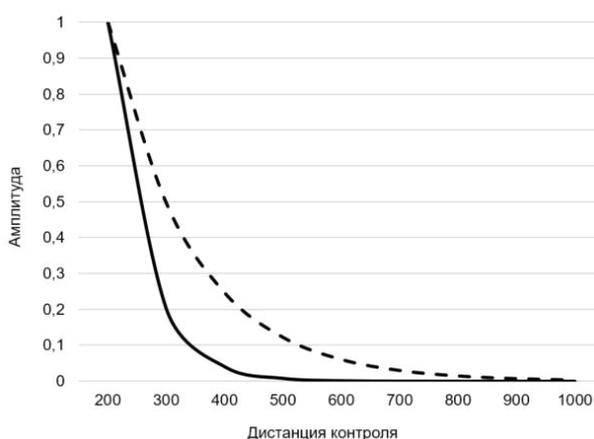


Рис. 5. Расчет затухания импульса с единичной амплитудой для заглубленного и надземного трубопровода

$$A_L = A_0 e^{\alpha L},$$

где  $A_L$  — амплитуда колебаний на дистанции  $L$  от источника с начальной амплитудой  $A_0$ .

Амплитуда импульса в готовом решении контроля может быть увеличена относительно использу-

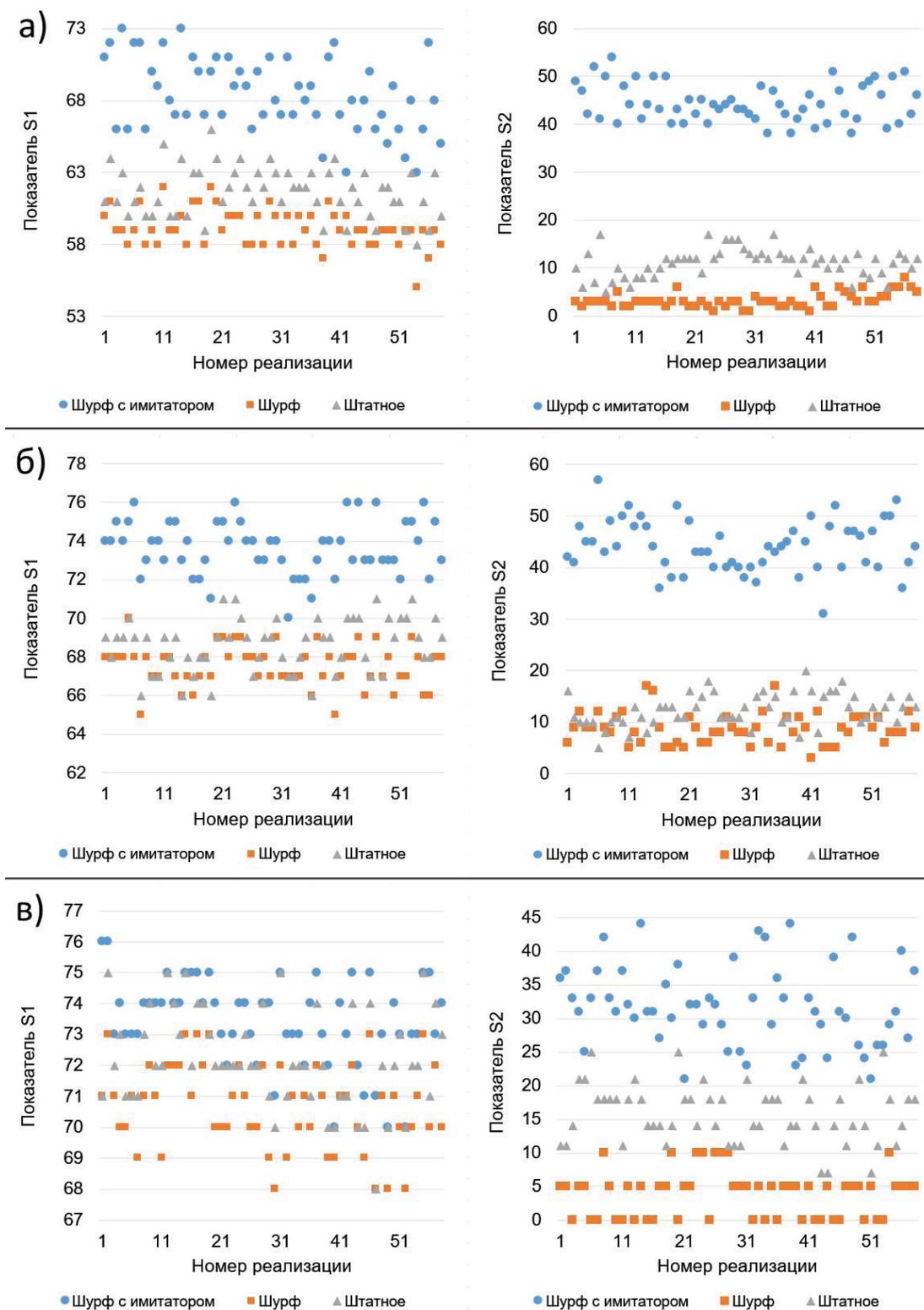


Рис. 6. Результат обнаружения воздействия «шурф с имитатором»: а)  $SNR = 21,67$ ; б)  $SNR = 10,83$ ; в)  $SNR = 5,4$

емого в текущем исследовании более чем в  $10^3$  раз [11]. Тогда коэффициент усиления позволит фиксировать сигнал с отношением сигнал/шум, равным 0,138. Применение когерентного накопления сигнала [12] этот показатель увеличит в  $\sqrt{N}$  раз, следовательно, накопление 1531 импульса даст отношение  $SNR = 5,4$ .

Так как известен коэффициент затухания и отношение сигнал/шум, то, аппроксимируя резуль-

таты работы системы распознавания [1] и снижая амплитуду зондирующих импульсов, становится возможным моделирование повышения дистанции контроля.

На рис. 6 представлен результат идентификации воздействия «шурф с имитатором» на лабораторном стенде в зависимости от отношения сигнал/шум. Без использования информативных частот (показатель  $S_1$ ) ошибка распознавания фиксирует-

ся даже при отношении  $SNR = 10,83$  и составила 0,24, что является неприемлемым результатом. При вдвое меньшем отношении  $SNR = 5,4$  вероятность ошибки достигла значения 0,57.

Напротив, использование лишь информативных частот (показатель  $S_{inf_i}$ ) привело к улучшению результатов. На графиках наблюдается разделение на независимые подпространства состояний. Ошибка распознавания вплоть до отношения  $SNR = 10,83$  на практике не фиксировалась при использовании выборки из 60 воздействий. Снижение до уровня  $SNR = 5,4$  привело к возникновению общей ошибки со значением 0,017.

Результаты испытаний без фильтра информативных частот приводят к выводу о несостоятельности алгоритма, не включающего в себя фильтрацию информативной составляющей. Выделение информативных диапазонов в амплитудно-частотном спектре с анализом их статистических характеристик и введением показателей информативности, полученных внедрением имитаторов, позволило не только обнаруживать, но и реализовать классификацию несанкционированных воздействий, что не было представлено ранее.

#### Библиографический список

1. Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А., Комаров В. А., Кабанов С. В. Идентификация несанкционированных воздействий на трубопровод // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 6 (116). С. 60–65.
2. Пат. 2463590 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения изменений параметров среды в окружении заглубленного магистрального продуктопровода / Епифанцев Б. Н., Федотов А. А. № 2011121858/28; заявл. 30.05.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 28.
3. Пат. 2626853 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения и классификации изменений параметров оболочки трубопровода и окружающей его среды / Нигрей Н. Н., Епифанцев Б. Н., Комаров В. А., Ищак Е. Р. № 2016135127; заявл. 29.08.16; опубл. 28.07.17, Бюл. № 22.
4. Пат. 2676386 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод / Ахмеджанов Р. А., Федотов А. А. № 2018102654; заявл. 23.01.18; опубл. 28.12.18; Бюл. № 1.
5. Епифанцев Б. Н., Пятков А. А., Федотов А. А. Концепция обеспечения безопасной работы магистральных трубопроводов в условиях внешних воздействий // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 12. С. 42–49.

6. Смирнов И. П., Калинина В. И., Хилько А. И. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. I. Решающие правила // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 1. С. 46–55. DOI: 10.7868/S0320791918010173.

7. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 653 с. ISBN 5-256-00264-3.

8. Максимов М. В., Бобнев М. П., Кривицкий Б. Х. [и др.]. Защита от радиопомех / под ред. М. В. Максимова. М.: Советское радио, 1976. 495 с.

9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1997. 479 с.

10. Филатов В. И., Борукаева А. О., Бердилов П. Г. Проект лазерного адаптивного приемного устройства работающего по критерию Неймана–Пирсона // Вестник науки и образования. 2018. Т. 2, № 7 (43). С. 6–15.

11. Патронов К. С. Контроль целостности магистральных продуктопроводов по акустическим колебаниям оболочки: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2007. 147 с.

12. Гаврилов К. Ю., Линников О. Н., Панявина Н. С., Трусков В. Н. Применение метода когерентного накопления сигналов со ступенчатой частотной модуляцией в радиолокационных системах с синтезированием апертуры // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14, № 1. С. 48–58.

**ФЕДОТОВ Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».

SPIN-код: 2511-2353

AuthorID (РИНЦ): 686080

Адрес для переписки: fedotov1609@gmail.com

**МАЛИНОВСКИЙ Юрий Геннадьевич**, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».

Адрес для переписки: malinomsk@yandex.ru

#### Для цитирования

Федотов А. А., Малиновский Ю. Г. О вероятности ошибки обнаружения несанкционированных воздействий на трубопровод активным виброакустическим способом контроля // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 100–105. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-100-105.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019 г.

© А. А. Федотов, Ю. Г. Малиновский