

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В.А. Комаров (ОмГУПС), Л.А. Денисова (ОмГТУ)

Представлен аналитико-имитационный метод оценки влияния внешних факторов на обнаружение дефектов трубопроводов системами виброакустического контроля. Предложена математическая модель с автоматическим подбором параметров автокорреляционных функций случайных возмущений, позволяющая учитывать влияние природных и техногенных шумов на процесс обнаружения. Исходные данные для моделирования получены при натурном эксперименте на действующем трубопроводе. Реализован программный комплекс и выполнены модельные исследования идентификационного тестера, позволяющие оценить влияние шумов на точность обнаружения и распознавания дефектов трубопроводов¹.

Ключевые слова: программный комплекс, математическая модель, случайный процесс, виброакустический контроль, дефект трубопровода.

Введение

В настоящее время трубопроводный транспорт является одним из самых надежных и экономичных средств непрерывной транспортировки потока перекачиваемых продуктов на большие расстояния. Однако статистика чрезвычайных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствует о наличии проблем при транспортировке нефти, нефтепродуктов и т. д. По мере старения трубопроводы выходят из строя, появляются утечки. Наряду с традиционными причинами аварийных ситуаций, такими как коррозия (вызванная природными воздействиями) и ошибки обслуживающего персонала, существенное влияние на состояние трубопроводов оказывают несанкционированные воздействия [1, 2].

Существующая проблема обнаружения несанкционированных воздействий и дефектов на трубопроводах решается с помощью специализированных систем контроля и диагностики, например, реализующих метод активного виброакустического контроля [2, 3]. Данный метод основывается на тестировании трубопровода периодическими упругими колебаниями, вызванными ударным воздействием на стенку трубы. При этом основным источником информации об объекте контроля является гармонический сигнал, который имеет тенденцию к затуханию при распространении по стенке трубопровода. Вследствие этого системы подвержены влиянию виброакустических шумов. Шумоподавление в таких системах может обеспечиваться с помощью накопления и определения характеристик случайного сигнала. В настоящее время предлагаются подходы к определению дефектов на основе анализа упругих колебаний с использованием существующих методик шумоподавления [3, 4]. Отметим, что предлагаемые решения нуждаются в оценке эффективности обнаружения и идентификации дефектов трубопровода в условиях действия шумов различного рода.

В работе предлагается аналитико-имитационный метод, позволяющий оценить влияние внешних шумовых факторов на точность обнаружения и распознавания дефектов трубопровода. Представлен

реализующий этот метод программный комплекс, предназначенный для модельных исследований различных подходов к обнаружению дефектов с целью создания эффективной системы виброакустического контроля.

Аналитико-имитационный метод оценки влияния внешних факторов на обнаружение дефектов

Предлагаемый аналитико-имитационный метод включает аналитическую обработку экспериментальных данных о стохастических виброакустических возмущениях и модельные исследования для оценки их влияния на работу системы контроля состояния объекта. Изложим кратко сущность метода.

1. На основе статистической обработки данных натурного эксперимента на реальном трубопроводе получаем оценки автокорреляционных функций (АКФ) рассматриваемых случайных процессов.

2. Проводим автоматический подбор параметров аппроксимации АКФ аналитическими выражениями. Выполняем синтез формирующего фильтра, предназначенного для реализации случайного процесса с требуемой автокорреляционной функцией.

3. Программно формируем тестовый сигнал для проверяемой системы контроля. Для этого на периодический сигнал дефекта (из базы эталонных сигналов) накладываем сигнал помехи.

4. Проводим модельный эксперимент: модель системы контроля вычисляет характеристики тестового зашумленного сигнала и сравнивает их с характеристиками эталонного сигнала дефекта.

5. Оцениваем точность обнаружения дефектов трубопровода проверяемой системой виброакустического контроля.

Для реализации метода создан программный комплекс, предназначенный для моделирования процесса обнаружения и распознавания дефектов трубопровода системой виброакустического контроля. На рис. 1 приведена функциональная структура программного комплекса, реализованного на языке программирования C# с использованием технологии Windows Forms.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-08-01560).



Рис. 1. Структура программного комплекса для исследования систем виброакустического контроля

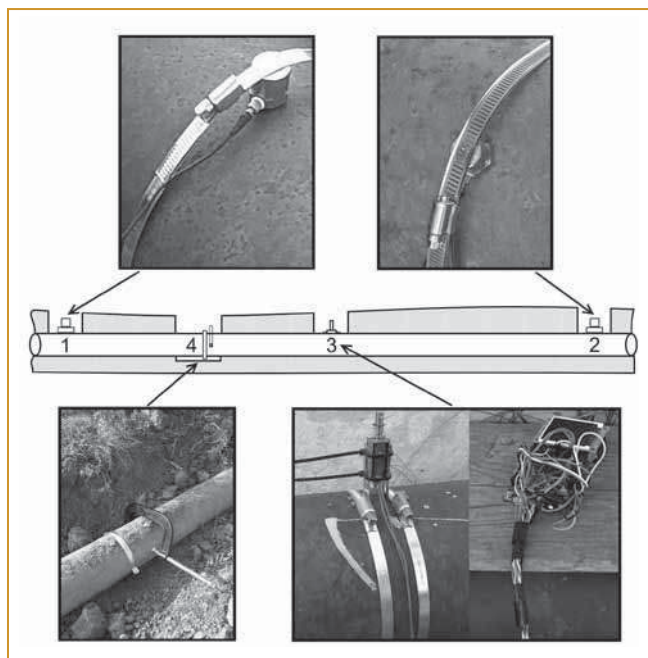


Рис. 2. Проведение натурального эксперимента на трубопроводе

Основой программного комплекса является математическая модель случайных возмущений, которая позволяет провести оценку влияния шумов раз-

личного рода (техногенного, природного) на работу систем контроля и диагностики состояния объекта, основанных на обработке случайных сигналов.

Для автоматического подбора параметров АКФ акустических возмущений модели служат соответствующие программные модули. Также специальные программные модули, выполняющие подготовку тестового сигнала, на сигнал дефекта аддитивно накладывают помеху, полученную в результате формирования случайного процесса математической моделью.

Модель проверяемой системы виброакустического контроля, выполняющей обнаружение и идентификацию периодического сигнала в смеси со случайным шумом, реализует алгоритм обнаружения дефекта на основе когерентного накопления амплитуд сигнала и статистической обработки данных. Результаты работы модели системы виброакустического контроля обрабатываются модулями вычисления ошибок обнаружения дефекта для оценки эффективности системы.

С целью контроля процесса моделирования и наглядного представления информации созданы программные модули визуализации, выполняющие отображение результатов подбора параметров АКФ акустических шумов, построение графиков и вывод численных значений результатов моделирования, включая ошибки обнаружения сигнала дефекта в виде CSV-таблицы (от англ. *Comma-Separated Values* — значения, разделенные запятыми — формат для представления табличных данных).

Построение математической модели трубопроводной системы

Рассмотрим этапы формирования математической модели, положенной в основу программного комплекса.

На первом этапе выполнялся сбор исходных данных. С целью получения исходных данных для построения модели проводился натурный эксперимент, заключающийся в получении цифровых записей случайных флуктуаций на реально действующей трубопроводной системе [4]. Рис. 2 иллюстрирует проведение эксперимента. Для осуществления синхронной записи (на накопитель ноутбука) колебаний заглубленного в грунт трубопровода использовались вибропреобразователи (1 и 2) модели AP99–1000 совместно с аналого-цифровым преобразователем АКМ АК5385. Производилось воздействие на поверхность трубы соленоидом (3) с частотой 1 Гц под управлением микроконтроллера на базе процессора Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Расстояние между чув-

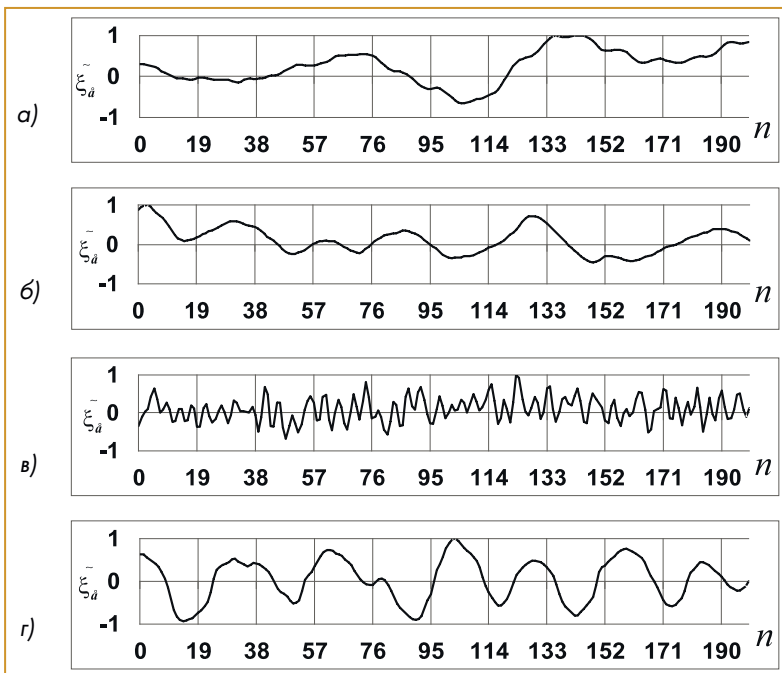


Рис. 3. Реализации случайных процессов акустических шумов, полученные в результате натурального эксперимента: а) шума ветра; б) шума перекачиваемой жидкости; в) шума дождя; г) шума автодороги

ствительными элементами (1 и 2) составляло 20 метров. В результате были получены серии импульсов при различных воздействиях на трубопровод. Имитировались состояния «норма» и «шурф с имитатором врезки». Выкопанный шурф и имитатор врезки в виде металлического хомута на поверхности трубы изображены под номером 4.

В результате эксперимента получены реализации случайных возмущений, характеризующих наиболее распространенные внешние воздействия, влияющие на работу трубопроводных магистралей. Это случайные процессы акустических шумов четырех видов: шум ветра, шум перекачиваемой жидкости в трубопроводе, шум дождя, шум автомобильной дороги (рис. 3), а также сигнал отклика на возбуждающее воздействие при имитации дефекта «врезка».

На *втором этапе* на основе статистической обработки экспериментальных данных получены оценки автокорреляционных функций рассматриваемых случайных процессов. При анализе вида АКФ полученных реализаций была выдвинута гипотеза о достаточности их аппроксимации аналитическим выражением вида:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\tilde{\alpha}|\tau|} \cos \tilde{\beta}\tau, \quad (1)$$

где $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$ — параметры, характеризующие затухание АКФ и частоту периодической составляющей процесса соответственно; σ — среднее квадратичное отклонение сигнала; τ — временной лаг. Флуктуации сигнала с АКФ вида (1) соответствуют стационарному случайному сигналу с полосовым частотным спектром, что делает возможным формировать помехи в требуемой полосе частот, изменяя параметры $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$.

При выборе подхода к математическому моделированию случайных процессов (акустических шумов с заданной АКФ) рассматривались различные методы [5, 6]. В результате выполненного анализа сделан вывод, что часто используемый метод, основанный на рандомизации частотного спектра флуктуаций [5], обладает высокой вычислительной сложностью, что приводит к трудностям при его программной реализации. Подход, основанный на методе спектрального разложения для получения передаточной функции формирующего дискретного фильтра [6], обладает достаточной гибкостью и низкой вычислительной сложностью алгоритма моделирования. Поэтому для исследования влияния внешних факторов на точность обнаружения дефектов трубопровода принят этот подход.

В связи с этим на *третьем этапе* проводился синтез формирующего фильтра, предназначенного для моделирования акустических шумов с требуемой автокорреляционной функцией. В основе моделирующего алгоритма лежит линейное преобразование стационарной последовательности $\xi(n)$ некоррелированных нормально распределенных случайных чисел (дискретный белый шум с математическим ожиданием $M_\xi = 0$ и дисперсией $\sigma_\xi^2 = 1$) в последовательность случайных чисел $\tilde{\xi}(n)$, коррелированных по заданному закону.

Так как экспериментально полученные АКФ непрерывных сигналов приближенно аппроксимируются выражением (1), то нормированная автокорреляционная функция соответствующего дискретного процесса имеет вид:

$$R(n) = e^{-\alpha n} \cos \beta n, \quad (2)$$

где $\alpha = \tilde{\alpha}t_0$; $\beta = \tilde{\beta}t_0$; t_0 — интервал дискретизации по времени; $n = \tau / t_0$.

Дискретная передаточная функция формирующего фильтра для реализации случайного процесса с автокорреляционной функцией (2) имеет вид:

$$H(z^{-1}) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}, \quad (3)$$

где $a_0 = -\sigma v_1 \sqrt{\rho}$; $a_1 = \sigma \sqrt{\rho}$; $b_1 = -2\gamma \cos \beta$; $b_2 = \gamma^2$; $\gamma = e^{-\alpha}$; $v_1 = v_0 + \sqrt{v_0^2 - 1}$; $v_0 = \frac{1 + \gamma}{2\gamma \cos \beta}$; $\rho = \frac{(1 - \gamma^2)\gamma \cos \beta}{v_1}$; z^{-1} —

оператор обратного сдвига по времени.

Для реализации модели случайного сигнала формирующий фильтр представлен рекуррентной зависимостью:

$$\tilde{\xi}(n) = a_0 \xi(n) + a_1 \xi(n-1) - b_1 \tilde{\xi}(n-1) - b_2 \tilde{\xi}(n-2), \quad (4)$$

где ξ , $\tilde{\xi}$ — входной и выходной сигналы формирующего фильтра соответственно; a_0 , a_1 , b_1 , b_2 — пара-

метры формирующего фильтра, зависящие от α и β , определяемые по выражениям в соответствии с (3).

На четвертом этапе с использованием соответствующих программных модулей проводился автоматический подбор параметров α и β для реализации формирующего фильтра. Сначала на основе полученных при натурном эксперименте реализаций случайных шумов ξ_e строятся АКФ

$$R_e(n) = \frac{1}{\sigma^2(N-k)} \sum_{n=1}^{N-k} (\xi_e^n - M_{\xi})(\xi_e^{n+k} - M_{\xi}), \text{ где математическое ожидание } M_{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi_e^n; N - \text{объем выборки.}$$

Полученные на основе экспериментальных данных АКФ принимаются за эталонные.

Далее подбирались в соответствии с выражением (2) автокорреляционные функции $R_m(n) = R(\alpha, \beta)$, которые наиболее точно аппроксимируют эталонные АКФ $R_e(n)$. Процедура автоматического подбора выполнялась программными модулями, реализующими перебор параметров α и β с целью минимизации принятого показателя $L(\alpha, \beta)$. В качестве показателя точности аппроксимации принималась сумма квадратов отклонений между аппроксимирующей $R_m(n)$ и эмпирической (эталонной)

$$R_e(n) \text{ АКФ: } L(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^N [R_m^n(\alpha, \beta) - R_e^n]^2 \rightarrow \min.$$

Результаты автоматического подбора параметров аппроксимирующих АКФ $R_m(n) = R(\alpha, \beta) = e^{-\alpha n} \cos \beta n$ для акустических шумов, полученных на основе обработки реализаций натурного эксперимента (при наилучшей точности аппроксимации), приведены в таблице. Для найденных параметров АКФ шумов на рис. 4 приведены экспериментально полученные АКФ $R_e(n)$ и их аппроксимирующие АКФ $R_m(n)$, а также соответствующие реализации шумов, полученные при использовании формирующего фильтра (в соответствии с (3)).

Визуально подтверждается адекватность найденных параметров — графики АКФ практически совпадают, что обусловлено хорошей точностью подбора параметров аппроксимирующей функции $R_m(n)$ на основе минимизации суммы квадратов отклонений между ней и эмпирической АКФ. Кроме того, можно видеть, что реализации флуктуаций шумов с использованием формирующего фильтра (на рис. 4 а-г справа) идентичны соответствующим графикам случайных процессов акустических шумов, полученным в результате натурного эксперимента (сравнить с рис. 3 а-г).

Таблица. Параметры АКФ шумов при наилучшей точности аппроксимации

Вид случайного процесса	Параметры автокорреляционной функции		Показатель точности аппроксимации $L_{\min}(\alpha, \beta)$
	Параметр затухания α	Частота периодической составляющей β	
Шум ветра	0,015	0,087	10,91
Шум перекачиваемой жидкости	0,048	0,111	9,54
Шум дождя	0,251	1,371	11,52
Шум автодороги	0,034	0,205	8,4

Модельные исследования влияния внешних факторов на обнаружение дефектов трубопровода

Заключительным этапом исследования влияния внешних факторов на обнаружение дефектов трубопровода является моделирование с целью оценивания эффективности тестируемой системы виброакустического контроля: получения ошибок обнаружения дефектов при различных типах возмущений.

В качестве модели тестируемой системы контроля рассмотрим модель виртуального устройства, предназначенного для обнаружения, выделения и классификации периодических сигналов при воздействии на них случайных шумов, позволяющего оценить состояние контролируемого участка протяженного объекта [3].

Проверяемый прибор (называемый идентификационным S — тестером) позволяет распознать дефектное и бездефектное состояние объекта контроля и при этом показывает устойчивые к шуму результаты. Сущность алгоритма его работы состоит в следующем: обнаружение и классификация случайного сигнала реализуются с помощью накопления сигнала и определения его характеристик. При этом сигнал после каждой итерации измеряется, и его параметры идентифицируются: определяется принадлежность импульса к определенному классу сигналов (по идентификационному параметру S) с использованием имеющейся шкалы преобразования. Идентификационный параметр S определяется на основе измерения средней крутизны центрального участка ранжированной функции сигнала, которая логически связана с видом (формой) сигнала. Имеющаяся шкала преобразования связывает числовые параметры сигналов с качественными характеристиками видов распределений случайных сигналов (равномерного, нормального, двумодального и т.д.). С каждой итерацией накопления влияние шумовой компоненты уменьшается, а регулярная компонента, определяющая значение параметра S , возрастает. Полученные оценки идентификационного параметра сравниваются с заданным пороговым значением, при достижении которого итерации прекращаются.

Рассмотрим алгоритм проверки функционирования виброакустической системы диагностики трубопровода на основе идентификационного S — тестера (по ее программной модели). С помощью разработанного программного комплекса выполняются следующие действия.

1. Вводятся исходные данные. Пользователь выбирает сигнал дефекта (из базы эталонных сигналов дефектов), который необходимо обнаружить с помощью системы виброакустического контроля. Кроме того, пользователь вводит параметры АКФ помехи (акустического шума) с учетом желаемого отношения сигнал — шум k_{sn} . Следует учитывать, что чем меньше отношение сигнал — шум, тем сложнее получить малое значение ошибки обнаружения дефекта.

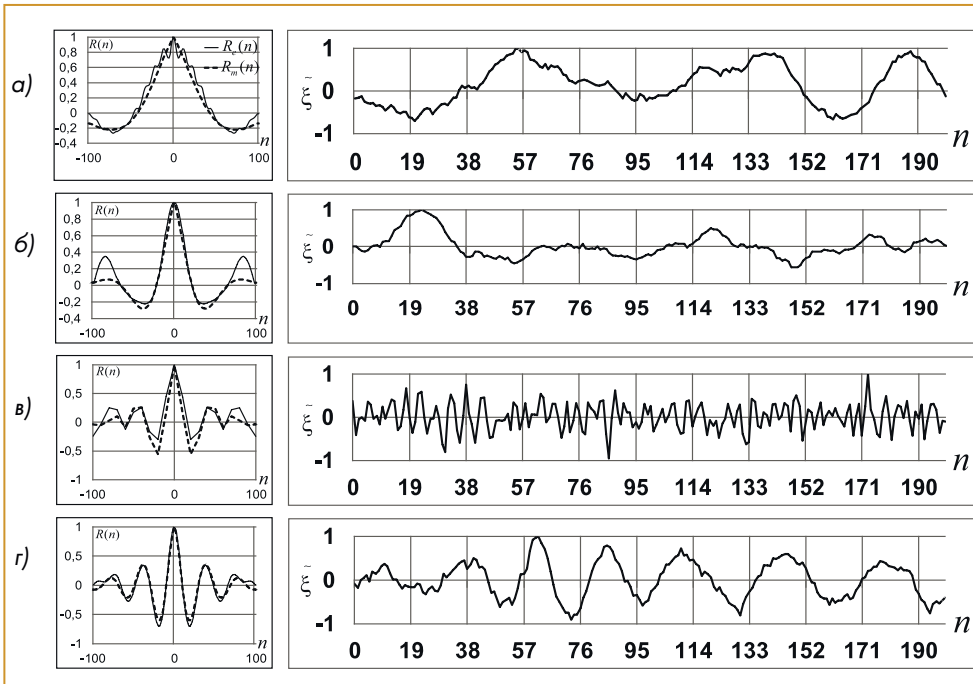


Рис. 4. Для акустических шумов: реальные АКФ $R_e(n)$ и аппроксимирующие АКФ $R_m(n)$ (слева) и соответствующие реализации, полученные при использовании формирующего фильтра (справа). Показаны флуктуации: а) шума ветра; б) шума перекачиваемой жидкости; в) шума дождя; г) шума автодороги

2. Начинается тестирование системы. Программный модуль, реализующий алгоритм формирующего фильтра (4) с требуемой АКФ помехи вычисляет реализации случайного процесса помехи. При этом выполняющий вычисление тестового сигнала программный модуль формирует случайные величины путем суммирования амплитуд периодического сигнала дефекта (выбранного на шаге 1) и случайного значения помехи.

3. Выполняется циклическая работа программного комплекса. Программный модуль модели виброакустической системы контроля накапливает амплитуды тестового случайного процесса, формируя сигналы для их обработки S — тестером. Далее системой контроля производится сортировка амплитуд тестового сигнала и отдельно амплитуд сигнала дефекта по возрастанию с получением функций сортированных амплитуд.

На каждом цикле работы модель виброакустической системы контроля вычисляет идентификационные параметры, характеризующие среднюю крутизну центрального участка ранжированной функции амплитуд для тестового сигнала S_i и для сигнала дефекта S_e .

4. После завершения тестирования системы производится оценивание ее эффективности. На основе вычисленных идентификационных параметров S_i и S_e определяется ошибка обнаружения сиг-

нала дефекта по формуле $\varepsilon = |(S_i - S_e) / S_e| 100\%$. После этого вычисляются средние ошибки $\bar{\varepsilon}$ обнаружения сигнала дефекта по серии из нескольких опытов.

Результаты проведенного модельного эксперимента представлены на рис. 5 и рис. 6. Для различных шумовых факторов было проведено 30 опытов по обнаружению сигнала дефекта трубопровода. На основе модели виброакустической системы контроля выполнялся анализ тестового сигнала, представляющего собой накопленные собственные колебания трубы и шума, создаваемого окружающей средой и транспортируемой жидкостью.

На рис. 5 представлены результаты накопления амплитуд тестового случайного процесса для обработки S тестером. Выполнено 60 когерентных накоплений гармонического сигнала имитации дефекта «врезка» с наложением помехи (шума дождя) в каждом опыте (при отношении сигнал — шум $k_{sn}=0,5$).

Когерентное накопление полученного процесса позволяет уменьшить исходную дисперсию шума σ_ξ^2 [2, 7].

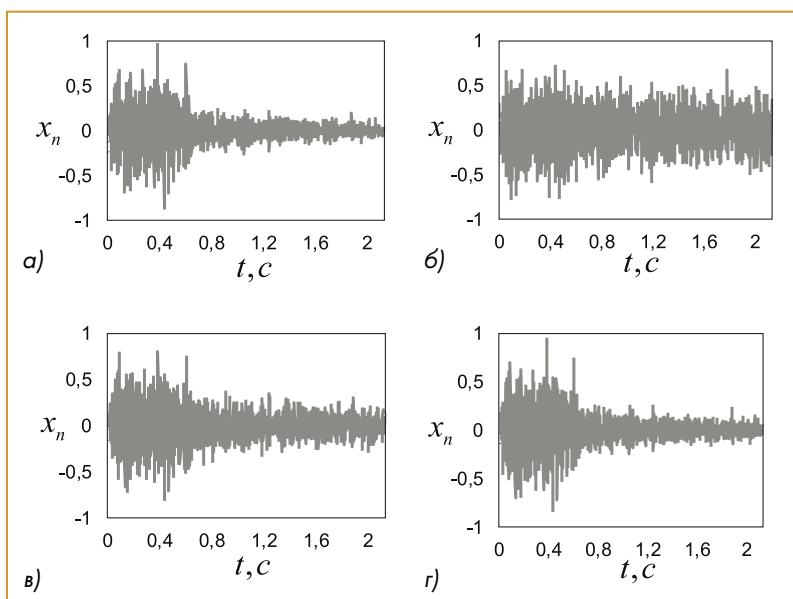


Рис. 5. Моделирование накопления сигнала имитации дефекта «врезка»: а) без помехи, без накопления; б) при шуме дождя, без накопления; в) при шуме дождя и накоплении импульсов $N_{im}=30$; г) при шуме дождя и накоплении импульсов $N_{im}=1000$

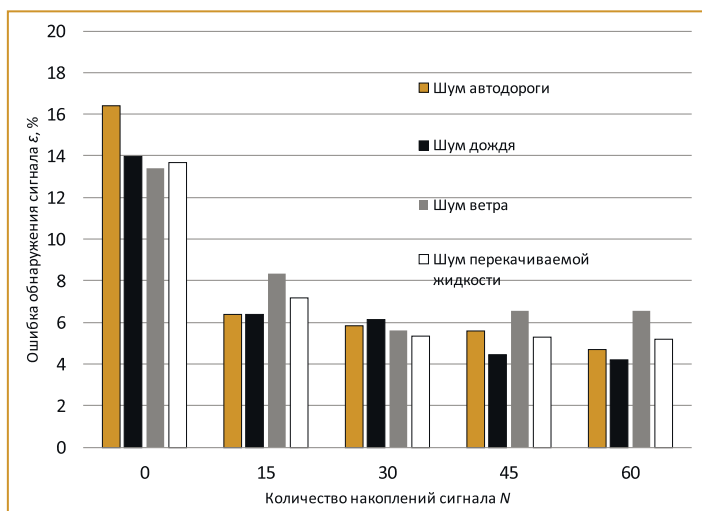


Рис. 6. Зависимость средней ошибки обнаружения $\bar{\varepsilon}$ от числа накоплений N_{im} сигнала имитации дефекта «врезка» при использовании S -тестера (отношение сигнал - шум $k_{sn}=0,5$)

При этом общая формула процесса накопления имеет

вид [2]: $x_N(k) = \frac{1}{N_{im}} \sum_{n=1}^{N_{im}} x_n(k)$, где $x_N(k)$ — усредненная ам-

плитуда накопленных отсчетов сигнала; $x_n(k)$ — амплитуда отсчета гармонического сигнала из серии сигналов; k — номер отсчета для усреднения; N_{im} — число накоплений. Как можно видеть на рис. 5, при накоплении реализаций уменьшается дисперсия шума, которая зависит от числа накоплений: $\sigma_N^2 = \frac{1}{N_{im}} \sigma_\xi^2$.

По результатам серии из 30 опытов произведено вычисление оценок средних ошибок $\bar{\varepsilon}$ обнаружения сигнала дефекта «врезка» для шумов различного рода при отношении сигнал — шум $k_{sn}=0,5$. Рис. 6 иллюстрирует влияние внешних факторов на точность обнаружения сигнала дефекта. Шум любого рода вносит значительную погрешность при обнаружении сигнала без шумоподавления (число накоплений $N_{im}=0$). При этом ошибка обнаружения высока и составляет 13...16%. При накоплении импульсов, например, при $N_{im}=30$ ошибка обнаружения уменьшается до 4...6%, а при накоплении $N_{im}=1000$ ошибка практически отсутствует (сравнить с рис. 5 в, г).

Заключение

Применение систем виброакустического контроля обеспечивает повышение надежности и безопасности трубопроводной транспортировки перекачиваемых продуктов. Представленный аналитико-имитационный метод позволяет оценить влияние внешних факторов на точность обнаружения и распознавания дефектов трубопровода. Раз-

Комаров Владимир Александрович — аспирант каф. «Автоматика и системы управления»

Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),

Денисова Людмила Альбертовна — д-р техн. наук, проф. Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Контактный телефон: (381-2) 65-20-84

E-mail: reallkom@gmail.com, denisova@asoju.com

работанный программный комплекс предназначен для модельных исследований, тестирования и отладки программных средств, реализующих различные подходы к обнаружению дефектов, с целью создания эффективной системы виброакустического контроля.

Преимуществом предлагаемой математической модели (в составе программного комплекса) является возможность автоматического подбора параметров формирующего фильтра случайных возмущений, позволяющая проводить оценки влияния различных факторов на процесс обнаружения дефектов объекта контроля. Результаты оценивания влияния изменяющихся условий среды на процесс мониторинга состояния трубопроводов (и других протяженных конструкций) расширяют информационные ресурсы при разработке и совершенствовании систем контроля и диагностики.

Список литературы

1. Комаров В.А., Семенова З.В., Бронников Д.А., Нигрей А.А. О структуре системы физической защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т.19, №1.
2. Федотов А.А., Ахмеджанов Р.А. О помехоустойчивости активного виброакустического способа контроля состояния магистрального трубопровода // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158).
3. Пат. 2687177 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/44 (2006.01). Способ обнаружения и классификации сигнала в системах контроля / Комаров В.А., Кликушин Ю.Н., Федотов А.А., Шилер А.В. № 2018126439; заявл. 17.07.18; опубл. 07.05.19, Бюл. № 13.
4. Пат. 2626583 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ обнаружения и классификации изменений параметров оболочки трубопровода и окружающей его среды / Епифанцев Б.Н., Комаров В.А., Нигрей Н.Н., Ишак Е.Р. № 2016135127; заявл. 29.08.16; опубл. 28.07.17, Бюл. № 22.
5. Комаров В.А., Федотов А.А., Денисова Л.А. Обнаружение дефектов магистральных трубопроводов системами виброакустического контроля // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166).
6. Ахмеджанов Р.А., Федотов А.А., Комаров В.А., Кабанов С.В. Идентификация несанкционированных воздействий на трубопровод // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. №6.
7. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005.
8. Denisova L.A., Meshcheryakov V.A. Control Systems Design: the Technology of Stochastic Perturbations Simulation // Journal of Physics Conference Series. 2018. P. 012020.
9. Рожожников Е.В., Великанова Е.П., Шибельгут А.А. Повышение дальности действия пассивных радиолокационных систем, использующих сигналы телекоммуникационных источников // Известия МГТУ. 2014. №3 (21).