

УДК 681.518.3

DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.006

Экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопроводов

Коробова Людмила Анатольевна, Матыцина Ирина Александровна,

Калугин Виталий Александрович

Воронежский государственный университет инженерных технологий,

Россия, Воронеж, *irina210390@mail.ru*

Аннотация. При исследовании функционирования технологических объектов невозможно создать реальную аварийную ситуацию, которая даст информацию о наличии дефекта. С этой целью применено физическое моделирование воздухопроводной системы. Физическая модель представлена в виде экспериментального стенда. В статье приведено описание установки, которая позволяет проводить наблюдения за функционированием замкнутой системы воздухопровода при различных внешних воздействиях: при изменении динамических характеристик рабочей среды; при появлении различного вида дефектов и т.д. Также установка дает возможность выбора способа записи этих изменений. Функционально экспериментальный стенд создан максимально приближенным к реальным условиям. Чтобы выявить повреждение контура воздухопровода, выполнена интеграция технических наработок с методом множественной классификации сигнала (MUSIC). Разработанный стенд открывает возможности для проведения практических опытов и непосредственного получения экспериментальных данных для выявления дефектов воздухопровода.

Ключевые слова: физическое моделирование, экспериментальный стенд, трубопроводная система, воздухопровод, дефект, акустическая эмиссия

Цитирование: Коробова Л.А. Экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопроводов / Л.А. Коробова, И.А. Матыцина, В.А. Калугин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 64-72. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.006.

Введение. В век развития производственных процессов на современных химических перерабатывающих предприятиях требуется диагностика всех этапов производственного процесса, а именно контроль состояния трубопроводов (технологических и магистральных). В качестве объекта исследования взят промышленный воздухопровод воронежского завода Синтезкаучук. Необходимость осуществления разработки данного стенда обосновывается потребностью в проведении ряда практических опытов, целью которых является наблюдение за изменением динамических характеристик среды при проявлении различного вида дефектов. Одним из способов диагностики трубопровода является акустическая эмиссия. Цель ее применения – выявление различных дефектов трубопроводов. При этом главный плюс проведения акустической эмиссии – нахождение не статических, а развивающихся дефектов. Именно они представляют опасность, т.к. их развитие повлечет за собой негативные последствия. Таким образом, первостепенной задачей является именно обнаружение дефекта и неважно какой причиной он вызван или к какому классу относится.

Дефекты трубопровода можно классифицировать по трем признакам:

1) технологического происхождения (вмятина, включение (загрязнение), окалина (окислы металла), трещина (узкий разрыв металла), пузырь (вздутие), раскатанный пузырь (тонкое прямолинейное нарушение), плена (отслаивание металла), расслоение несплошности в слоях внутри проката, закат (расслоение, выходящее на поверхность листа), вкат (единичное включение в металл трубы), сегрегация (скопление неметаллических включений), царапины, риска (предельная канавка), подрез (продольный порез металла);

2) механического происхождения: царапины на внешней поверхности, задиры (то же, что и царапины, но с зазубринами), забоины (повреждение с острыми краями от удара), вмятины (то же, что и забоины, но без острых краев), эрозионные повреждения внутренней поверхности трубопровода;

3) коррозионного происхождения: сплошная коррозия (коррозия, охватывающая большую поверхность металла), местная коррозия (охватывающая отдельные участки поверхности металла), линейная коррозия (коррозионные язвы, расположенные по одной линии на малом расстоянии), межкристаллическая коррозия (распространяющаяся по границам кристаллов металла).

Причины дефектов и повреждений:

- амортизационный износ конструкций;
- хрупкость металла при низких температурах;
- наличие дефектов в сварных соединениях (непровары и пр.), являющихся концентраторами напряжений;
- скопление большого числа сварных швов в отдельных узлах резервуара;
- нарушение технологии монтажа и сварки;
- неравномерные осадки (просадки) песчаных оснований;
- коррозия металла, возникающая вследствие хранения в резервуарах сернистой нефти или нефтепродуктов с повышенным содержанием серы;
- нарушение правил технической эксплуатации резервуаров из-за превышения уровня наполнения, избыточного давления или недопустимого вакуума резервуара, а также частичной вибрации стенки при закачке нефтепродуктов.

Ввиду отсутствия возможности проведения тестовых измерений непосредственно в условиях реального технологического процесса, разработка и последующее использование подобного стенда являются актуальными. Новизной исследования является функционирование экспериментального стенда, приближенного к реальным условиям, и позволяющего добиться практического решения данной проблемы. Разработанный стенд позволяет воспроизводить и исследовать процессы, протекающие в реальных промышленных воздухопроводах, вплоть до аварийных ситуаций. При этом в опытах, проводимых на стенде, по сравнению с промышленными условиями появляется возможность изменять материалы воздухопровода, давление и температуру в нем, масштаб стенда, но при этом физическая сущность исследуемого процесса остается неизменной [1].

Практическая эффективность разработанного экспериментального стенда заключается в том, что на практике место повреждения воздухопроводного контура довольно сложно локализовать, а проведение практических экспериментов на стенде позволит симитировать этот процесс и сделать его доступным. Это достигается путем интеграции технических работ с программным алгоритмом метода множественной классификации сигнала (MUSIC) в среде MathLab. Необходимость проведения исследования при помощи стенда возникла в ходе разработки системы обнаружения дефектов. Система должна быть универсальной и гибкой, для этого следует учесть такую особенность, как неоднородность материалов воздухопровода. Использование разработанного стенда позволит провести анализ разницы показателей для магистралей, изготовленных из разных материалов. Выявление дефектов функционирующих воздухопроводов и трубопроводов, в общем, связано со сложностью получения информации об их повреждении. Для решения такого рода проблем необходим экспериментальный стенд для их обнаружения [2].

1. Описание экспериментального стенда. Основные элементы стенда (рис. 1): компрессор, ресивер, датчики (микрофоны) и их соединения, магистраль гибкой проводки, две основные жесткие под/надземные коммуникации с наличием и отсутствием дефектов, гибкая проводка (магистраль) подачи ресурса потребителю, а также сменное соединение основных магистралей с ресивером. Разработанный компактный экспериментальный стенд (рис. 2) представляет собой уменьшенную копию контура промышленного воздухопровода.

Стенд предусматривает две параллельных магистрали, одна из которых предназначена для наблюдений и опытов при отсутствии дефектов, а другая при наличии разнообразных и множественных повреждений магистралей [2].

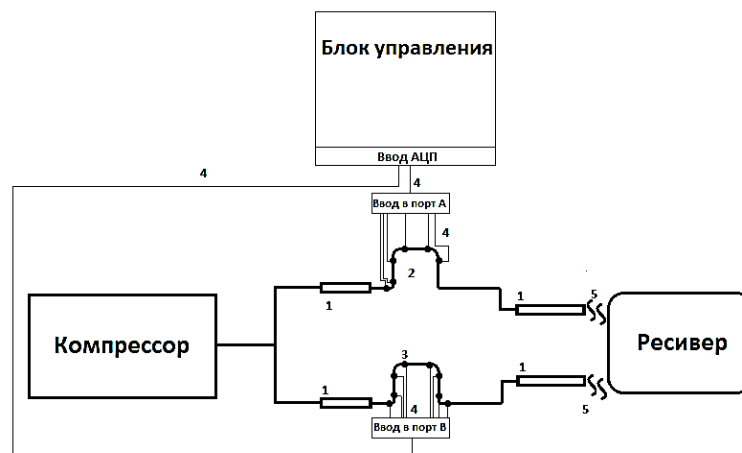


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – гибкое соединение, 2 – основная магистраль, 3 – основная магистраль с дефектом, 4 – соединения датчиков, 5 – сменное соединение, • - места установки датчиков

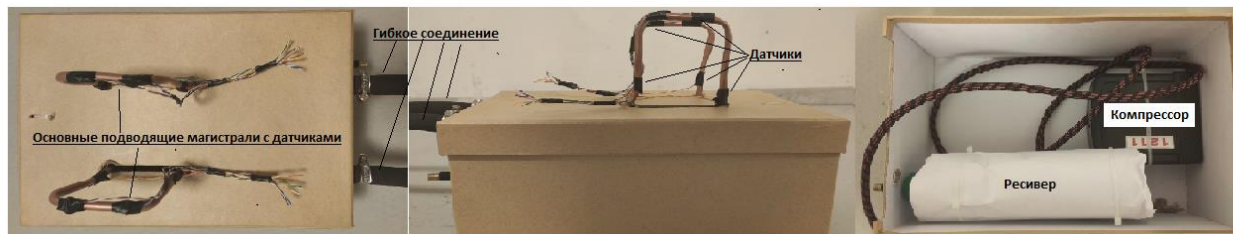


Рис. 2. Фото экспериментального стенда

Для обнаружения дефектов в системе трубопроводов могут быть использованы три способа фиксации изменений исходного сигнала:

- первый способ основан на использовании микрофонов, закрепляемых на участках трубопровода; микрофоны будут осуществлять снятие шума работы установки в постоянном режиме;
- второй способ основан на использовании вибродатчика, типа передатчик-приемник; в данном случае датчики будут генерировать ультразвуковой сигнал, и фиксировать скорость его распространения до следующего участка по трубопроводу;
- третий способ основан на методе отраженной волны; датчики, генерирующие ультразвуковой сигнал, погружены в трубопровод и передают сигнал по участку непосредственно через среду, т.е. анализируют скорость прохождения сигнала [3].

После анализа достоинств и недостатков вышеописанных способов обнаружения дефекта принято решение применить в эксперименте первый способ фиксации отклонений, т.е. метод акустической эмиссии. Основанием для выбора этого способа послужила его относительно низкая техническая сложность, а также стоимость компонентов. Применение второго или третьего способов требуют значительного увеличения размеров экспериментального стенда и повышения стоимости его разработки, а также излишнего усложнения системы, что является нецелесообразным.

Смоделированные участки магистралей технологической системы герметичны и предусматривают возможность замены элементов или незначительное изменение конструкции путем добавления новых сегментов магистралей, в том числе из различных материалов, а также объединение этих магистралей в единую систему.

Сигнал снимается методом постоянного опроса уровней напряжения датчиков (микрофонов), установленных непосредственно на участок магистрали (рисунок 1). Далее, методом проводной или беспроводной связи сигнал передается на блок управления. На следующем шаге осуществляется преобразование внутренним (или внешним) аналого-цифровым преобразователем (АЦП), после чего сигнал обрабатывается на основе метода множественной классификации сигнала (MUSIC). В результате при отклонении уровня сигнала от заданных пределов система в течение трех секунд повторяет опрос датчика с наибольшим отклонением уровня сигнала, после чего, в случае равенства уровня или увеличения его отклонения от предела, система сигнализирует о наличии дефекта [4].

Процесс фиксации динамических характеристик осуществляется посредством нескольких микрофонов, закрепленных на различных участках металлических трубок. Изгибы воздухопровода являются проблемными местами, где велика вероятность образования искажений звуковых волн, а также их наложения, при множественном проявлении дефектов [5].

Изменение давления вещества (воздуха) в системе по расчетам допускается в строгих рамках – от 3,5 атмосфер до необходимого максимум. При пониженном давлении (менее 1,5 атмосфер), ввиду изменения скорости воздушного потока, будет иметь место высокая вероятность формирования звуковых волн низкой частоты, что будет вызывать сложности в осуществлении процесса распознавания дефекта [6].

Микрофоны осуществляют снятие шума работы установки в постоянном режиме. Предварительно осуществляется калибровка, где фиксируются нормальный уровень шума и допустимые отклонения. Любые отклонения от нормы будут определяться, как дефект, а затворы на границах участка будут закрыты, отрезав проблемный участок воздухопровода. Немаловажный плюс данной установки состоит в том, что не требуются большие производственные и промышленные усилия для проведения непрерывного анализа всех участков трубопровода.

При этом спектрограмма, изображенная на рисунке 3(А), получена на прямолинейном участке воздухопровода, не имеющем в своей структуре изгибов. Спектрограмма на рисунке 3(Б) получена при расположении микрофона непосредственно в месте сгиба сегмента трубы.

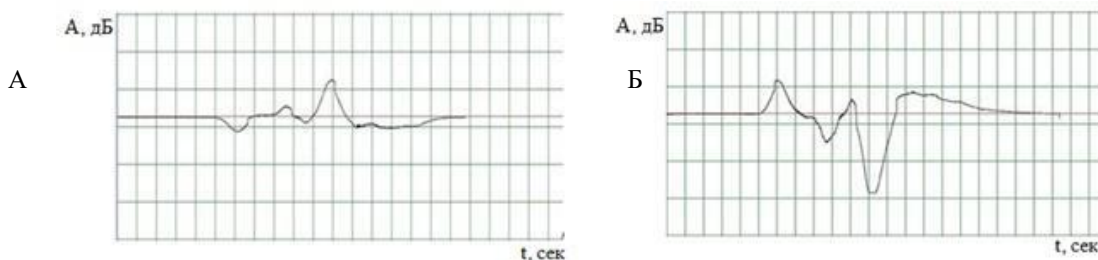


Рис. 3. Спектрограмма участка воздухопровода с дефектом
А – прямолинейный; Б – на изгибе

В процессе эксперимента выявлено, что прохождение воздушного потока через пластиковый сегмент проводит звуковые колебания с минимальной амплитудой, из-за особенностей полимерной кристаллической решетки, которая при направлении волны высокой амплитуды гасит ее на узловых точках кристаллической решетки.

Наиболее благоприятный и чистый сигнал, удобный для последующего анализа, получен при исследовании среды с металлическим сегментом. При этом, чем толще труба, тем лучше среда сопротивляется наличию фонового шума. На рисунках 4(А) и 4(Б) видно, шум компрессора все же оказывает некоторое незначительное воздействие на среду даже при отсутствии дефектов [5].

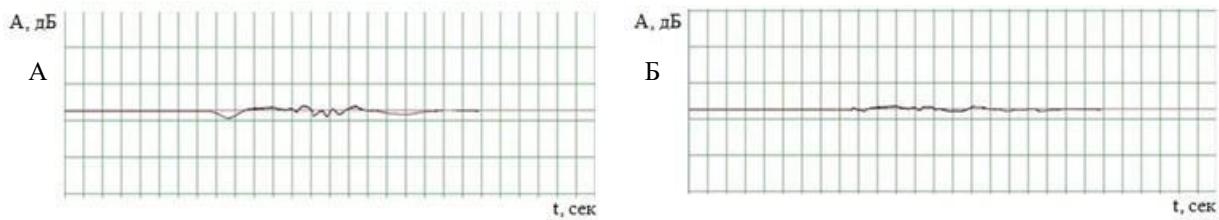


Рис. 4. Спектрограмма воздухопровода без дефекта: А – из металла; Б – из полимера

2. Математическое описание. Расчет проведен с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений – MathLab. Он позволил обработать полученные частотные характеристики от источников и провести анализ с использованием встроенной функции MUSIC. Реализация математической части функционирования модели методом множественной классификации сигнала (MUSIC) основывается на анализе собственных векторов [4]. Первостепенная задача состоит в том, чтобы найти оптимальный вектор весовых коэффициентов \mathbf{W}_{optim} , элементы которого задаются посредством функции P и матрицы \mathbf{R} [1, 2]

$$\mathbf{W}_{optim} = \mathbf{R}^{-1}P, \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^T], \quad (2)$$

$$P = E[M\mathbf{X}], \quad (3)$$

где \mathbf{R} – ковариационная матрица входных сигналов, в которой диагональные элементы будут равны среднеквадратичным значениям компонент входящего сигнала \mathbf{X} , P – взаимокорреляционная функция полезного отклика и входного сигнала, E – среднеквадратичная ошибка, M – количество источников сигнала.

Разработанный стенд является прообразом системы снабжения промышленных установок сжатым воздухом. На сегменте подобной технологической системы должно быть установлено строго определенное количество датчиков (микрофонов), которые будут осуществлять фиксацию частотных характеристик среды. Количество датчиков определяется расстоянием [3, 7] $\Delta = \lambda/2$, где λ – длина звуковой волны, генерируемой проходящим веществом по воздухопроводу. Предполагается, что каждая пара датчиков, установленная через расстояние Δ , позволит точно определить место возникновения дефекта, ввиду равномерности распространения звуковой волны во всех направлениях.

Принятый или входящий сигнал может быть представлен следующим образом [8]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S} + \mathbf{N}, \quad (4)$$

где \mathbf{S} – матрица полезного сигнала, \mathbf{N} – матрица аддитивных шумов, $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1) \cdot \exp(-j\mu n_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_i) \cdot \exp(-j\mu n_i), \dots, \mathbf{a}(\theta_M) \cdot \exp(-j\mu n_M)]$ – матрица направлений, $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_M\}$ – угол направлений прихода звуковой волны, n_i – номер датчика, $i = 1 \dots M$, M – количество датчиков (установленных микрофонов) на участке воздухопровода, μ – пространственная частота, j – мнимая единица [9].

Зафиксированные принимающими устройствами сигналы, характеризующие параметры среды, представляют собой набор разнообразных шумов и не дают явной информации о факте наличия и расположения дефектов [10]. Информацию о наличии дефектов можно получить, проведя расчеты по ковариационной матрице параметров среды [11, 12]

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{X}\mathbf{X}^H = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_{nn}, \quad (5)$$

где \mathbf{R}_{xx} – ковариационная матрица параметров среды, \mathbf{A} – матрица направлений подпространства полезного сигнала, а \mathbf{A}^H – матрица направлений подпространства шума соответственно, при этом \mathbf{R}_{ss} – есть ковариационная матрица исходных сигналов, \mathbf{R}_{nn} – ковариационная матрица посторонних шумов [9, 13].

Далее необходимо из полученной матрицы \mathbf{R}_{xx} выделить собственные вектора [2, 9]:

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U}\mathbf{U}^H, \quad (6)$$

где \mathbf{U} – единичная матрица, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ – диагональная матрица с положительными собственными значениями матрицы \mathbf{R}_{xx} , которые определяются как $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_M > 0$, [2, 9].

Следующий шаг – нахождение псевдоспектра MUSIC \mathbf{P}_{MU} :

$$\mathbf{P}_{\text{MU}}(e^{j\omega}) = 1(\sum_{i=d+1}^M |\mathbf{a}^H \mathbf{u}_i|^2)^{-1}, \quad (7)$$

где \mathbf{a} – вектор экспонент, лежащий в заданном диапазоне частоты μ , $\mathbf{a} = [1, \exp(-j\mu n_1), \dots, \exp(-j\mu n_i), \dots, \exp(-j\mu n_M)]^T$, \mathbf{u}_i – собственный вектор, который принадлежит ковариационной матрице \mathbf{R}_{xx} (6), i – индекс, начинающийся с $(d+1)$, d – ранг матрицы \mathbf{R}_{xx} (6).

Для начала необходимо из формулы 5 выделить ковариационную матрицу исходного сигнала \mathbf{R}_{xx} , а затем определить диапазон нулевого подпространства \mathbf{U}_0 :

$$\mathbf{R}_{ss} = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_0 \mathbf{\Lambda}_0 \mathbf{U}_0^H, \quad (8)$$

где $\mathbf{\Lambda}_0 = \sigma^2 \mathbf{I}$, матрица $\mathbf{\Lambda}_s$, в данном случае, будет содержать M наибольших собственных значений матрицы \mathbf{R}_{ss} .

Ввиду того, что все собственные вектора шума будут являться ортогональными к \mathbf{A} , считаем, что столбцы \mathbf{U}_s – будут охватывать пространство \mathbf{A} , то есть подпространства сигнала, а \mathbf{U}_0 – будут охватывать диапазон нулевого пространства \mathbf{A}^H , то есть подпространства шума.

Далее можно переходить к вычислению непосредственно псевдоспектра [14]

$$\mathbf{P}_{\text{MU}}(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta) / \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_0 \mathbf{U}_0^H \mathbf{a}(\theta), \quad (9)$$

Предварительно определив диапазон поиска

$$\mathbf{a}(\mu) = \begin{bmatrix} e^{-j\mu_1 n_{i-1}} & \dots & e^{-j\mu_Q n_{i-1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ e^{-j\mu_1 n_{M-1}} & \dots & e^{-j\mu_Q n_{M-1}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $\mu = 2\pi F(c) \cdot (c^{-1}) \cdot \Delta \sin \theta = 2\pi \cdot (\lambda^{-1}) \Delta \sin \theta$.

Процесс приема через массивы можно сравнить с осуществлением процесса классической дискретизации. Иными словами, принимая сигнал с определенной задержкой, каждое считывающее устройство (микрофон) будет осуществлять, по сути, функции дискретизирующего дельта импульса. Соответственно при этом количество временных отрезков будет эквивалентно значению общего числа экспериментов, в то же время, каждому источнику, в случае появления дефекта, будет соответствовать свой волновой фронт, который при спектральном анализе будет представлять определенное количество уникальных синусоид сигнала [15].

Важно заметить, что в процессе вычисления собственных векторов вектора $\mathbf{a}(\theta_i)$, принадлежащих матрице направлений \mathbf{A} , где $i = 1, 2, \dots, M$ собственные вектора будут являться ортогональными по отношению к подпространству шума ковариационной матрицы.

В итоге получим следующую систему уравнений:

$$\mathbf{a}(\theta_i)^T \mathbf{U}_0 = \mathbf{0}^T, \quad (11)$$

Решение системы уравнений 11 позволит определить корни, которые в итоге и будут являться собственными векторами. Подобный подход дает нам возможность получить не приближенные, а точные значения [16].

Заключение. Разработан экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопровода. Для выявления дефектов применен метод акустической эмиссии, в качестве датчиков использованы микрофоны. Представлено математическое описание обработки полученных сигналов.

Разработанный макет стенда открывает возможности для проведения практических опытов и непосредственного получения экспериментальных данных. Полученные данные с

датчиков (микрофонов) в виде звуковых волн раскладываются по формуле 4 на матрицу полезных сигналов и матрицу аддитивных шумов. Затем полезный сигнал обрабатывается по методу MUSIC [2, 6]. Учет данных позволит значительно продвинуть разработку системы обнаружения дефектов.

В перспективе исследования планируется преобразовать экспериментальный стенд (рисунк 1) в 3D-модель. Она позволит смоделировать различные ситуации обнаружения дефектов трубопроводных и магистральных сетей с учетом основных особенностей динамических характеристик технологической среды.

Список источников

1. Korobova L.A., Matytsina I.A., Kalugin V.A., Tolstova I.S., Mironova M.S. Description of the development of an experimental stand for the detection of defects in pipelines. Journal of Physics: Conference Series. III International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III 2022), С. 082012.
2. Калугин В.А. Моделирование процесса анализа шума при помощи метода MUSIC / В.А. Калугин, Л.А. Коробова, И.А. Матыцина // Моделирование энергоинформационных процессов. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2020. – С. 93-101. – EDN DQNISR.
3. Калугин В.А. Методика обнаружения дефектов в технологических трубопроводах / В.А. Калугин, Л.А. Коробова // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2019. – С. 161-167. – EDN ZGJOMQ.
4. Калугин В.А. Анализ технологических данных при использовании частотных методов / В.А. Калугин, Л.А. Коробова // Проблемы и инновационные решения в химической технологии (ПИРХТ-2019). – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. – С. 33-34. – EDN TCZZKA.
5. Глазунов В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В.А. Глазунов. – М.: Наука, 1991. – 94 с.
6. Сухов И.А. Метод повышения разрешающей способности пеленгатора с кольцевой антенной решёткой при использовании алгоритма MUSIC / И.А. Сухов, В.П. Акимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2013. – № 3 (174). – С. 19-25.
7. Петров В.П. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решетках / В.П. Петров, А.К. Шауэрман // Вестник СибГУТИ, 2011. – №2. – С. 53-62.
8. Ермолаев В.Т. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман // Учебное пособие. Нижний Новгород, 2007. – 98с.
9. Моделируем алгоритм Music для задач определения направления прихода электромагнитной волны. Хабр. Сообщество IT-специалистов. – URL: <https://habr.com/ru/post/446674/> (дата обращения: 27.02.2022)
10. Петров В.П. Алгоритмы оценки пространственного спектра в адаптивных цифровых антенных решетках / В.П. Петров. Вестник СибГУТИ, 2014, – № 4 (28). – С. 60-70.
11. Корниенко В.В. Спектральные характеристики дифференциально-операторных уравнений / В.В. Корниенко Д.В. Корниенко. – ФЛИНТА, 2021. – С. 135.
12. Шевченко М.Е. Алгоритмы совместного обнаружения и пеленгования на основе методов сигнальных подпространств / М.Е. Шевченко. – СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. –159 с.
13. Марукович Е.И. Эмиссионный спектральный анализ / Е.И. Марукович, А.Г. Непокойчицкий // Издательский дом «Белорусская наука», 2014. – С. 309.
14. Третьяков И.А. Спектральный анализ радиосигналов в реальном времени на основе применения эхо-эффекта /И.А. Третьяков, В.В. Данилов. Вестник Астраханского государственного технического университета. Управление, вычислительная техника и информатика, 2022. – №. 1. – С. 53-59. – DOI:10.24143/2072-9502-2022-1-53-59.
15. Моделирование объектов с распределенными параметрами (спектральный метод) / Ю.А. Клевцов: Монография // КноРус, 2019. – С. 144.
16. Нестеров М.М. Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов / М.М Нестеров, И.В. Плешаков, Я.А. Фофанов // Науч. Приборостроение, 2006. - № 16 (2). – С. 3-21.

Коробова Людмила Анатольевна. К.т.н., доцент Воронежского государственного университета инженерных технологий, AuthorID: 351658, SPIN: 1098-6488, ORCID: 0000-0003-1349-732X, Lyudmila_korobova@mail.ru, Россия, Воронеж, пр. Революции, 19.

Матыцина Ирина Александровна. К.т.н., преподаватель Воронежского государственного университета инженерных технологий, AuthorID: 2166-2639, SPIN: 2166-2639, ORCID: 0000-0001-9236-9654, irina210390@mail.ru, Россия, Воронеж, пр. Революции, 19.

Калугин Виталий Александрович. Магистр Воронежского государственного университета инженерных технологий, AuthorID: 11006847, SPIN: 7214-5606, kaluginvit@mail.ru, Россия, Воронеж, пр. Революции, 19.

UDC 681.518.3

DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.006

Experimental stand for detecting defects in air ducts

Lyudmila A. Korobova, Irina A. Matytsina, Vitaly A. Kalugin

Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russia, Voronezh, *irina210390@mail.ru*

Abstract. When studying the functioning of technological objects, it is impossible to create a real emergency situation that provides information about the presence of a defect. For this purpose, physical modeling of the air duct system was applied. The physical model is presented in the form of an experimental stand. The article provides a description of the installation, which allows you to monitor the functioning of a closed air duct system under various external influences: when changing the dynamic characteristics of the working environment; when various types of defects appear, etc. The installation also allows you to choose how these changes are recorded. Functionally, the experimental stand was created as close as possible to real conditions. To detect damage to the air circuit, integration of technical developments with the method of multiple signal classification (MUSIC) was performed. The developed stand opens up opportunities for practical experiments and direct obtaining of experimental data to identify defects in the air duct.

Keywords: physical modeling, experimental stand, piping system, air duct, defect, acoustic emission

References

1. Description of the development of an experimental stand for the detection of defects in pipelines Korobova L.A., Matytsina I.A., Kalugin V.A., Tolstova I.S., Mironova M.S. Journal of Physics: Conference Series. III International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III 2022), 082012 p.
2. Kalugin V.A., Korobova L.A., Matytsina I.A. Modelirovaniye protsessa analiza shuma pri pomoshchi metoda MUSIC [Modeling the noise analysis process using the MUSIC method]. Modelirovaniye energoinformatsionnykh protsessov [Modeling of energy information processes], Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies, 2020, pp. 93-101, EDN DQNISR.
3. Kalugin V.A., Korobova L.A. Metodika obnaruzheniya defektov v tekhnologicheskikh truboprovodakh [Method for detecting defects in technological pipelines]. Optimizatsiya i modelirovaniye v avtomatizirovannykh sistemakh: Trudy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy shkoly. [Optimization and modeling in automated systems: Proceedings of the International Youth Scientific School], Voronezh, Voronezh State Technical University, 2019, pp. 161-167, EDN ZGJOMQ.
4. Kalugin V.A., Korobova L.A., Analiz tekhnologicheskikh dannykh pri ispol'zovanii chastotnykh metodov [Analysis of technological data using frequency methods]. Problemy i innovatsionnyye resheniya v khimicheskoy tekhnologii [Problems and innovative solutions in chemical technology] Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019, pp. 33-34, EDN TCZZKA.
5. Glazunov, V.A. Prostranstvennyye mekhanizmy parallelnoy struktury [Spatial mechanisms of parallel structure]. M.: Nauka, 1991, 94 p.
6. Sukhov I.A., Akimov V.P. Metod povysheniya razreshayushchey sposobnosti pelengatora s kol'tsevoy antennoy reshotkoy pri ispol'zovanii algoritma MUSIC [Method for increasing the resolution of a direction finder with a ring antenna array using the MUSIC]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal Computer science. Telecommunications. Control.], 2013, no. 3 (174), pp. 19-25.
7. Petrov V.P., Shauerman A.K. Spektral'nyye sposoby otsenki napravleniya istochnikov signalov v adaptivnykh antennoykh reshetkakh [Spectral methods for estimating the direction of signal sources in adaptive antenna arrays]. Vestnik SibGUTI [Bulletin of SibGUTI], 2011, no. 2, pp. 53-62.
8. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. Metody otsenivaniya parametrov istochnikov signalov i pomekh, primimayemykh antennoy reshetkoy [Methods for estimating the parameters of signal sources and interference received by an antenna array]. Uchebnoye posobiye [Textbook], Nizhny Novgorod, 2007, 98 p.
9. Modeliruyem algoritm Music dlya zadach opredeleniya napravleniya prikhoda elektromagnitnoy volny [Modeling the Music algorithm for the tasks of determining the direction of arrival of an electromagnetic wave]. Khabr Soobshchestvo IT-spetsialistov [Habr Community of IT specialists], available at: <https://habr.com/ru/post/446674/> (accessed: 02/27/2022).
10. Petrov V.P. Algoritmy otsenki prostranstvennogo spektra v adaptivnykh tsifrovyykh antennoykh reshetkakh [Algorithms for estimating the spatial spectrum in adaptive digital antenna arrays]. Vestnik SibGUTI [Bulletin of SibGUTI], 2014, no. 4 (28), pp. 60-70.

11. Kornienko V.V., Kornienko D.V. Spektral'nyye kharakteristiki differentsial'no-operatornykh uravneniy [Spectral characteristics of differential-operator equations]. Izd-vo: FLINTA [Publishing house FLINTA], 2021, 135 p.
12. Shevchenko M.E. Algoritmy sovmestnogo obnaruzheniya i pelengovaniya na osnove metodov signal'nykh podprostranstv [Algorithms for joint detection and direction finding based on signal subspace methods]. St. Petersburg: St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2013, 159p.
13. Marukovich E.I., Nepokoychitskiy A.G. Emissionnyy spektral'nyy analiz [Emission spectral analysis]. Izdatel'skiy dom «Belorusskaya nauka». Izdatel'skiy dom "Belorusskaya nauka" [Publishing House "Belarusian Science"], 2014, 309 p.
14. Tretyakov I.A., Danilov V.V. Spektral'nyy analiz radiosignalov v real'nom vremeni na osnove primeneniya ekho-effekta [Spectral analysis of radio signals in real time based on the use of the echo effect]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and informatics], 2022, no. 1, pp. 53-59, DOI: <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-53-59>.
15. Klevtsov Yu.A. Modelirovaniye ob'yektov s raspredelennymi parametrami (spektral'nyy metod) [Modeling of objects with distributed parameters (spectral method)]. Monograph. Publishing house: KnoRus, 2019, 144 p.
16. Nesterov M. M., Pleshakov I. V., Fofanov Ya. A. Informatsionno-fizicheskiye svoystva nestatsionarnykh otklikov v sistemakh obrabotki impul'snykh signalov [Information-physical properties of nonstationary responses in impulse signal processing systems], Nauch. Priborostroyeniye [Nauch. Instrumentation], 2006, no. 16 (2), pp. 3-21.

Korobova Lyudmila Anatolyevna. Ph.D., Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, AuthorID: 351658, SPIN: 1098-6488, ORCID: 0000-0003-1349-732X, Lyudmila_korobova@mail.ru, Russia, Voronezh, Revolution Ave., 19.

Matytsina Irina Alexandrovna. Ph.D., Lecturer, Voronezh State University of Engineering Technologies, AuthorID: 2166-2639, SPIN: 2166 -2639, ORCID: 0000-0001-9236-9654, irina210390@mail.ru, Russia, Voronezh, Revolution Ave., 19.

Kalugin Vitaly Alexandrovich. Master of the Voronezh State University of Engineering Technologies, AuthorID: 11006847, SPIN: 7214-5606, kaluginvit@mail.ru, Russia, Voronezh, Revolution Ave., 19.

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 10/18/2022; approved after reviewing 03/06/2023; accepted for publication 03/20/2023.