

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК [621.039.5:621.646]:658.58
DOI: 10.25206 / 1813-8225-2023-188-117-124
EDN: VNPKUM

Е. А. АБИДОВА
В. И. РАТУШНЫЙ

Волгодонский инженерно-технический институт
филиал Национального
исследовательского ядерного
университета «МИФИ»,
г. Волгодонск

РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ КОНТРОЛЯ ПРОТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Статья посвящена проблеме идентификации негерметичности трубопроводной арматуры. Описывается измерительный комплекс контроля протечек. В отличие от принятого в практике органолептического подхода предлагается автоматическая обработка сигнала с последующим выводом о герметичности арматуры. В основу автоматической обработки положен алгоритм на основе анализа сингулярного спектра, обеспечивающего повышение чувствительности. Эффективность комплекса подтверждается результатами испытаний измерительного комплекса с использованием гидравлического стенда.

Ключевые слова: протечка арматуры, акустический сигнал, диапазон рабочих частот, анализ сингулярного спектра, проверка статистических гипотез, ошибки первого и второго рода.

Введение. Протечки арматуры представляют угрозу безопасности атомных станций. Одной из важнейших задач технической диагностики оборудования атомных электростанций (АЭС) является контроль протечек [1–3]. В настоящее время широкое распространение получили тепловизионный и ультразвуковой способ контроля внутренних и внешних протечек. Существуют также методы контроля герметичности с применением индикаторного газа, например, предлагаемые Pfeiffer Vacuum подразумевают создание давления в испытательном образце с помощью газовой смеси (содержащей гелий) и поэтому имеют существенные ограничения для применения на работающем оборудовании.

Проблемой использования тепловизионного подхода [4] является недоступность приборов с достаточной температурной чувствительностью и сложность подстройки уровня и диапазона. Внедрение устройств и приборов, реализующих ультразвуковой подход, перспективно за счет доступности и универсальности метода [5, 6].

В практике контроля протечек оборудования АЭС положительно зарекомендовали себя приборы типа Ultraprobe (США), SDT (Бельгия), Uniscope (Россия). Эксплуатируемые на АЭС течеискатели имеют ряд ограничений. Например, для настройки

Ultraprobe необходимо различить на слух наличие частотных составляющих в выбранной полосе частот [7]. Процесс настройки требует многократных измерений для поиска значимых частотных компонент. Встроенный в Ultraprobe спектральный анализатор выводит спектр подаваемого на наушники звукового сигнала и ограничен диапазоном до 5 кГц.

Кроме того, на рынке имеются ультразвуковые течеискатели LD 500/510, обеспечивающие обнаружение и расчет утечек, а также их фотофиксацию. Но подобные приборы существенно уступают вышеуказанным в чувствительности из-за слабой фильтрации посторонних шумов.

Постановка задачи. Имеющиеся подходы к поиску негерметичности и применяющиеся для этой цели приборы имеют ограничения, которые в ряде случаев приводят к неопределенности при локализации течи. Поэтому задачей исследования является обоснование аппаратной реализации регистрирующего прибора и объективных критериев диагностирования, обеспечивающих чувствительность при локализации течи.

Аппаратная реализация. В рамках договора между НИЯУ МИФИ и Концерном «РосэнергоАтом» нами был разработан измерительный комплекс контроля протечек (ИККП) [8]. ИККП, как показано на рис. 1, представляет собой переносной программно-технический комплекс, включающий технические средства:

- базовый модуль;
- датчик акустический контактный;
- высокочастотный микрофон свободного поля;
- планшетный ПК;
- специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнить: регистрацию и хранение акустических сигналов; обработку и анализ полученных акустических сигналов; формирование выводов по итогам измерения в заданном формате.

Стоимость ИККП в два-три раза ниже зарубежных аналогов (Ultraprobe, SDT). Используемый в ИККП акустический датчик GT400 (рис. 2а) имеет температурный диапазон до +150 °C, а теплопередача происходит через острие щупа, что приводит к медленному нагреву преобразователя и большему времени работы при высоких температурах объекта контроля. С точки зрения ширины диапазона рабочих температур ИККП лучше приспособлен для работы в условиях АЭС, чем Uniscope, включающий датчики GT200 и GT205 (рис. 2б).

Обзор известных методов обработки акустических сигналов при идентификации протечек

1) органолептическое восприятие оператором акустического шума, создаваемого турбулентным потоком жидкости или газа через несплошности. Подход в настоящее время всё ещё используется, но не всегда надежен из-за особенностей восприятия диагностом;

2) автоматическое сопоставление уровня акустического шума на герметичном оборудовании с зарегистрированным сигналом на том же оборудовании [3]. При реализации метода делается предположение о линейном характере зависимости между значением утечки и уровнем акустического сигнала. Линейный характер зависимости не всегда подтверждается экспериментально, что и приводит к ошибкам при локализации течи;

3) сопоставление спектров, основанное на эмпирически выявленной закономерности, заключающейся в том, что появление утечки приводит

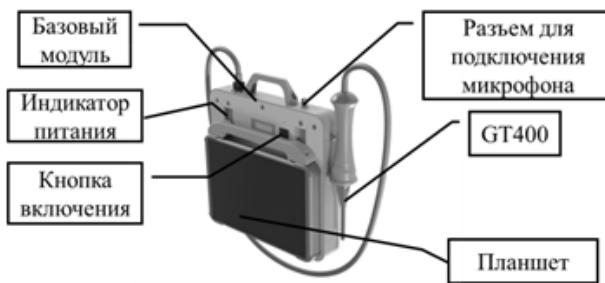


Рис. 1. Измерительный комплекс контроля протечек оборудования АЭС

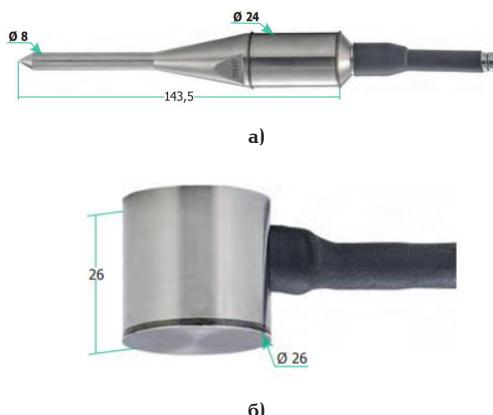


Рис. 2. Акустические датчики: а) GT400; б) GT205

к сужению Фурье-спектра сигнала и смещению в область низких частот [5]. Расширение базы экспериментов, показывает, что наблюдаемая закономерность является лишь частным случаем. Анализ акустических сигналов и соответствующих спектров герметичной и негерметичной арматуры демонстрирует, что потоки через несплошности приводят к практически непредсказуемым изменениям как амплитуды, так и частоты;

4) энтропийная параметризация акустических и звуковых сигналов [9], по результатам которой делается вывод о наличии и величине протечки. Метод имеет преимущества перед ранее описанными за счет инвариантности к нестационарным и хаотическим проявлениям. Широкое применение метода ограничено сложностью вычисления и необъективностью выбора параметров расчета (объем и частота выборки, длина окна);

5) метод сингулярного спектрального анализа (Singular spectrum analysis — SSA) предлагается в ряде работ для обработки диагностических сигналов [10, 11]. Преимуществом метода является возможность анализа нестационарных рядов. Метод позволяет оценить вклад линейных трендов, периодических и хаотических составляющих, т.е. выявить любые качественные и количественные изменения. В настоящей работе предлагается обеспечить чувствительность при выявлении протечек за счет применения SSA к сигналам, зарегистрированным ИККП.

Предлагаемый алгоритм обработки сигналов.

При контроле герметичности измеряют сигналы после запорной арматуры (рис. 3). Сигнал, зарегистрированный после герметичной арматуры при тех же условиях, используется в качестве эталон-

ного. Установление отклонений в работе оборудования базируется на сопоставлении характеристик его сигналов в исправном и неисправном состоянии, причем сопоставление характеристик исходных сигналов не обеспечивает явных признаков различия. Известно, что низкочастотная модулирующая составляющая несет в себе максимум диагностической информации [12]. В практике обработки диагностических сигналов выделения модулирующей составляющей на несущей частоте хорошо зарекомендовал себя метод получения огибающей путем вычисления скользящего среднеквадратичного значения (СКЗ) [13, 14]. Метод СКЗ — простой способ, обеспечивающий демодуляцию и одновременно фильтрацию случайной составляющей. При вычислении число точек усреднения I выбирается в соответствии с отношением частоты дискретизации и несущей частоты (при измерении с использованием датчика GT400 несущая — около 60 кГц). При использовании метода СКЗ по исходному дискретному сигналу, включающему L значений, рассчитываются отчеты огибающей от x_1 до x_{L+1-I} как средние квадратические значения. Окно выходного сигнала построено в соответствии с уравнением 1, содержит значения:

$$x_k = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I x_i^2}.$$

В соответствии с известным алгоритмом SSA для обработки диагностических сигналов предложена последовательность преобразований временных рядов. Амплитуды огибающей диагностического сигнала представляют собой последовательность вида:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\}.$$

Исходная последовательность значений преобразуется в ганкелеву матрицу:

$$[A] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_N \end{bmatrix}.$$

Матрица $[A]$ преобразуется в матрицу ковариации:

$$[C] = \begin{bmatrix} Var(x_1) & Cov(x_1 x_2) & \dots & Cov(x_1 x_n) \\ Cov(x_1 x_2) & Var(x_2) & \dots & Cov(x_2 x_{n+1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(x_{m-1} x_m) & Cov(x_m x_{m+1}) & \dots & Var(x_N) \end{bmatrix}.$$

Ковариационная матрица подвергается сингулярному разложению:

$$[C]_{m \times n} = [U]_{m \times n} [S]_{m \times n} [V]^T_{n \times n},$$

где $[U]_{m \times n}$ и $[V]_{n \times n}^T$ — две унитарные матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно, $[S]_{m \times n}$ — матрица с неотрицательными элементами, у которой элементы, лежащие на главной диагонали, — это сингулярные числа (а все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми). Сингулярные числа составляют сингулярный спектр, отражающий в порядке

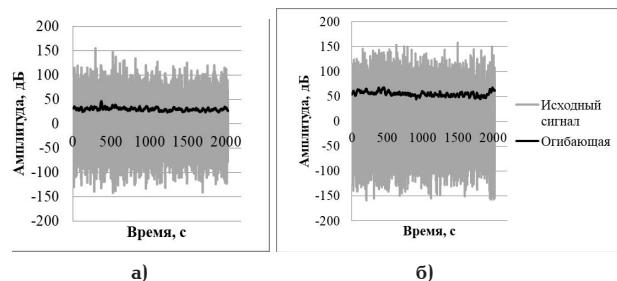


Рис. 3. Форма исходных акустических сигналов и их огибающие: а) зарегистрированный после герметичной арматуры (эталонный); б) зарегистрированный после герметичной арматуры

ке убывания вклад каждой из m компонент разложения. Спектр сигнала герметичной арматуры может быть достаточно точно описан минимумом своих составляющих. Спектр акустического сигнала, который формируется под действием шума от течи, в большинстве случаев является сложным, а его сингулярный спектр будет отличаться от спектра сигнала без течи [15].

В результате сингулярного разложения матрицы, соответствующей сигналу герметичной арматуры, получается эталонный базис. На данный базис производится проектирование матриц, соответствующих сигналам герметичной арматуры и анализируемой арматуры. Для того, чтобы проекции отражали качественные различия сигналов, производится умножение на траекторные матрицы. Таким образом, получаются отмасштабированные проекции сравниваемых сигналов на эталонный базис:

$$[\bar{A}_1] = [V][A_1][S_1]$$

$$[\bar{A}_2] = [V][A_2][S_2],$$

V — эталонный базис;

$[\bar{A}_1], [\bar{A}_2]$ — траекторные матрицы эталонного и анализируемого сигналов;

$[S_1], [S_2]$ — собственные значения траекторных матриц эталонного и анализируемого сигналов.

Об эффективности применения алгоритма для выявления негерметичности можно судить по проекциям на первую компоненту $[\bar{A}_1], [\bar{A}_2]$. Статистическое сопоставление гипотез (в данном случае арматура «герметичная» и «негерметичная») проводится путем вычисления ошибок первого и второго рода по функциям плотности распределения вероятности [16]. Задачу анализа чувствительности, соответствующей методам диагностики оборудования АЭС, мы рассматриваем в контексте проблемы оценки риска. В данном контексте чувствительность устанавливается в качестве меры определенности результата диагностирования и может характеризоваться высокой вероятностью верного обнаружения и, соответственно, низкой вероятностью ошибок. В идеале, когда функции плотности распределения вероятности параметров герметичной и негерметичной арматуры совсем не пересекаются, ошибки равны нулю.

Проведение экспериментов. Описанный алгоритм был первоначально опробован при обработке сигналов, зарегистрированных в лабораторных условиях. Для получения акустических сигналов использовался стенд, представляющий собой гидравлическую петлю, заполненную технической

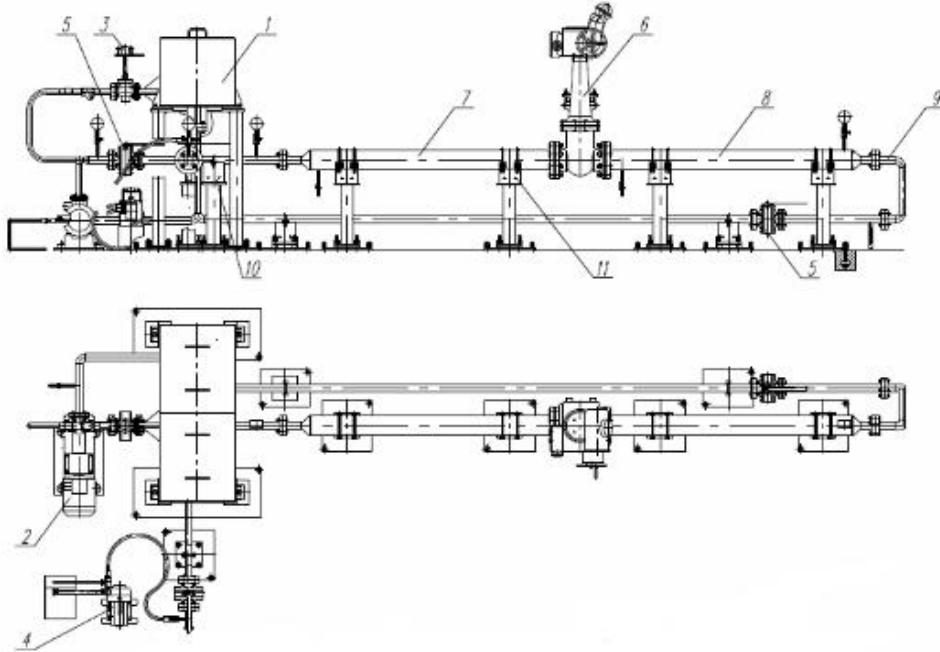


Рис. 4. Схема экспериментального стенда: 1 — блок; 2 — насос консольный; 3 — регулятор давления; 4 — опрессовочный насос; 5 — кран шаровой; 6 — арматура; 7, 8 — блок Dy50, Dy100, Dy150; 9 — отвод; 10 — опора неподвижная; 11 — опора подвижная

водой (рис. 4). Конструкция стенда позволяет повышать температуру до $+80^{\circ}\text{C}$ и давление среды до 2,5 МПа. Возможна установка запорных фланцевых клапанов типа 15с22нж различных диаметров Ду50, Ду100, Ду150. Объем течи в клапане моделируется при помощи проставок (рис. 5).

Табл. 1 (левая часть) описывает типы датчиков и условия проведения экспериментов. В рамках эксперимента задавалась температура $t=30^{\circ}$ и $t=80^{\circ}\text{C}$, поддерживалось давление 0,5 МПа, менялись проставки клапана Ду150. Сигнал регистрировался после арматуры с помощью акустических датчиков, которые различаются рабочими частотами: низкочастотный Gt205 (40–100 кГц), широкополосный Gt300 (100–800 кГц), полосовой Gt400 (50–250 кГц).

Для оценки ошибок диагностирования огибающие сигналов арматуры с проставками и без были представлены в виде функций плотности распределения вероятности. Примеры функций показаны на рис. 6.

При выборе граничного значения используется метод минимального числа ошибочных решений. Граница, относительно которой принимается решение о герметичности, из условия минимального значения суммы ошибок первого и второго рода определялась значением параметра, при котором обе гипотезы равновероятны (функции пересекаются).

Ошибка первого рода — признана негерметичной, но герметична — рассчитывалась путем суммирования вероятности параметров негерметичного состояния слева от границы. Ошибка второго рода — признана герметичной, но негерметична — рассчитывалась путем суммирования вероятности параметров негерметичного состояния справа от границы. Аналогично вероятности ошибок были оценены после применения к тем же сигналам алгоритма на основе SSA. Правая часть табл. 1 содержит результаты вычисления ошибок диагностирования в зависимости от условий эксперимента, типа датчика и метода обработки данных.



Рис. 5. Проставки: а) рисунок, б) фото

Обсуждение результатов. Результаты попарной обработки диагностических сигналов (табл. 1) показывают:

- сигналы, зарегистрированные датчиком Gt400 (серии экспериментов 4 и 5), демонстрируют чувствительность к состоянию оборудования и при этом, в отличие от датчика Gt205 (серии экспериментов 1 и 2), не реагируют на изменение температуры, поэтому выбор регистрирующего датчика в составе ИККП экспериментально обоснован;

- применение SSA к диагностическим сигналам позволяет снизить или исключить ошибки при определении состояния объекта, поэтому целесообразна программная реализация данного алгоритма в ИККП, поскольку значения ошибок после обработки снижаются независимо от условий эксперимента и вида датчика;

- отсутствует однозначная зависимость между объемом протечки (заданной числом рисок) и величиной ошибки, иначе говоря, отсутствует зависимость между объемом протечки и амплитудой и дисперсией сигнала, т.е. данные показатели сами по себе не могут использоваться для установления наличия и величины протечки.

Выводы. Разработан комплекс контроля протечек, предназначенный для контроля герметичности запорной арматуры в трубопроводах АЭС.

Результаты эксперимента

№	Условия эксперимента 1-го рода	Ошибка при анализе исходных данных, %		Ошибка при анализе данных после обработки, %		
		2-го рода	1-го рода	2-го рода		
1	Gt205, $t = 30^\circ\text{C}$	1 риска	1	0	0	
	Герметичная		1	1	0	
			0	2	0	
2	Gt205, $t = 80^\circ\text{C}$	Герметичная	31	37	10	
	Герметичная		31	30	8	
			19	40	3	
3	Gt300, $t = 80^\circ\text{C}$	Герметичная	20	35	0	
	Герметичная		19	13	11	
			23	13	14	
4	Gt400, $t = 30^\circ\text{C}$	Герметичная	0	1	0	
	Герметичная		10	2	0	
			0	1	0	
5	Gt400, $t = 80^\circ\text{C}$	Герметичная	5	10	0	
	Герметичная		1	1	0	
			4	15	0	

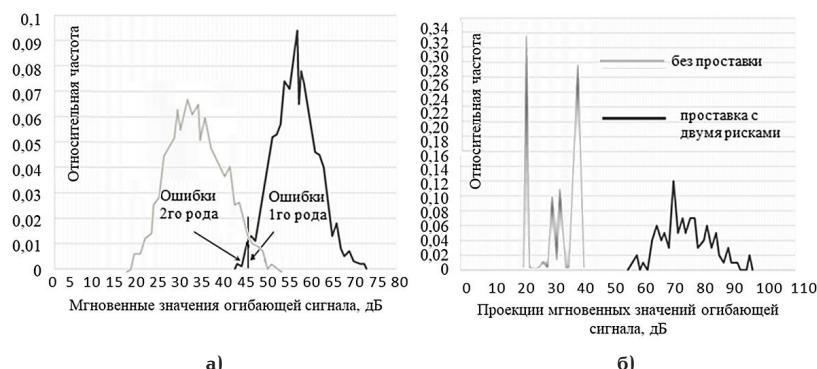


Рис. 6. Результаты обработки акустического сигнала после запорного клапана Ду150 герметичного и с простоякой, зарегистрированного преобразователем Gt400 при температуре 80°C : а) без обработки; б) после обработки

Особенностью измерительного комплекса является возможность регистрации акустического сигнала в широком частотном диапазоне, что обеспечивает чувствительность к наличию протечек. Достоинствами прибора также являются широкий диапазон рабочих температур, относительная простота, низкая стоимость комплектации. В основу обработки данных положен алгоритм на основе SSA. Приводятся результаты испытаний измерительного комплекса с использованием гидравлического стенда: изменяется температура среды и объём протечки, используются различные акустические преобразователи. Эксперименты подтверждают эффективность комплекса, реализующего автоматическую

обработку сигнала с последующим выводом о герметичности арматуры. Комплекс контроля протечек внедрен на Нововоронежской АЭС и используется персоналом по своему назначению.

Библиографический список

1. РД ЭО 1.1.2.01.0190-2010. Положение по оценке технического состояния и остаточного ресурса трубопроводной арматуры энергоблоков атомных станций (с изм. 1-4) / ОАО «Концерн Росэнергоатом». Москва, 2016. 23 с.

2. Сейнов С. В., Гошко А. И., Адаменков А. К. [и др.]. Техническое диагностирование арматуры АЭС. Москва: Машиностроение (Библиотека арматурщика АЭС), 2012. 452 с.

3. НП-089-15. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва, 2017. 72 с.
4. Teju V., Bhavana D. An efficient object detection using OFSA for thermal imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education. 2020. № 1 (22). Р. 1–22. DOI: 10.1177/0020720920944434.
5. Дроботов А. В. Метод диагностирования электроприводной арматуры с контролем диагностических параметров и опыт его применения на Смоленской АЭС // Арматуростроение. 2008. № 1 (52). С. 52–60.
6. Адаменков А. К., Веселова И. Н., Ясный С. И. Метод оценки герметичности трубопроводной арматуры тепловых и атомных станций. Тяжелое машиностроение. 2008. № 6. С. 2–3.
7. Испытания стендов «Крона-517» и «АТЭ ТС-3000». URL: <http://npk-krona.ru/2015/03/ispytaniya-stendov-krona-517-i-ate-ts-3000> (дата обращения: 01.04.2020).
8. Abidova E. A., Dembitsky A. E., Lapkis A. A., Chernov A. V. Synthesis of Control Systems for Complex Technical Objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971, Issue 3. 032058. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/0320589.
9. Чернов А. В., Абидова Е. А., Хегай Л. С. Диагностика негерметичности в затворе электроприводной арматуры по энтропийным показателям звуковых и ультразвуковых сигналов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493> (дата обращения: 10.06.2023).
10. Hassani J., Kalantari H., Beneki C. Comparative Assessment of Hierarchical Clustering Methods for Grouping in Singular Spectrum Analysis // Applied Math 2021. Vol. 1 (1). Р. 18–36. DOI: 10.3390/appliedmath1010003.
11. Hassani H., Kalantari M. Automatic Grouping in Singular Spectrum Analysis // Forecasting. 2019. Vol. 1. Р. 189–204. DOI: 10.3390/forecast1010013.
12. Оптимизация методов диагностики подшипников качения по высокочастотной вибрации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. 2002. Вып. 15. URL: <https://masters.donntu.ru/2010/etf/prokopets/library/article5.htm> (дата обращения: 10.06.2023).
13. Kilundu B., Dehombreux P., Letot C. [et al.]. Early detection of bearing damage by means of decision trees // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. 2009. Vol. 3. Р. 70–74.
14. Balaratnam N., Weidenauer J., Wagner F. [et al.]. Comparison of envelope demodulation methods in the analysis of rolling bearing damage // Journal of Vibration and Control. 2022. Р. 1–12. DOI: 10.1177/10775463221129155.
15. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis for Time Series. 2nd ed. New York: Springer, 2020. 146 p.
16. Бабенко Р. Г., Никифоров В. Н., Пугачёва О. Ю. [и др.]. Оценка вероятности обнаружения дефектов при диагностике оборудования вибромагнитическим методом // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 4. (13). С. 74–78.

АБИДОВА Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляемых систем Волгодонского инженерно-технического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ), г. Волгодонск. ORCID: 0000-0003-0258-5543

Адрес для переписки: 1nii_energomash@mail.ru

РАТУШНЫЙ Виктор Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физико-математических дисциплин ВИТИ НИЯУ МИФИ, г. Волгодонск.

SPIN-код: 6826-4290

ORCID: 0000-0002-5701-6279

AuthorID (SCOPUS): 6603218775

Адрес для переписки: VRatushnyj@mephi.ru

Для цитирования

Абидова Е. А., Ратушный В. И. Регистрация и обработка сигналов в измерительном комплексе контроля протечек трубопроводной арматуры атомной электростанции // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124.

Статья поступила в редакцию 19.07.2023 г.

© Е. А. Абидова, В. И. Ратушный

REGISTRATION AND SIGNAL PROCESSING IN MEASURING SYSTEM FOR MONITORING LEAKS OF NPP PIPELINE FITTINGS

The article is devoted to the problem of identification of leakiness of pipeline fittings. A measuring system for leak monitoring is described. In contrast to the organoleptic approach adopted in practice, automatic signal processing is proposed, followed by a conclusion about the tightness of the valve. The automatic processing is based on an algorithm based on the analysis of the singular spectrum, which provides an increase in sensitivity. The effectiveness of the complex is confirmed by the test results of the measuring complex using a hydraulic stand.

Keywords: valve leakage, acoustic signal, operating frequency range, singular spectrum analysis, statistical hypothesis testing, errors of the first and second kind.

References

1. RD EO 1.1.2.01.0190-2010. Polozheniye po otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa truboprovodnoy armatury energoblokov atomnykh stantsiy [Regulations on the assessment of the technical condition and residual life of pipeline fittings of power units of nuclear power plants]. Moscow, 2016. 23 p. (In Russ.).
2. Seynov S. V., Goshko A. I., Adamenkov A. K. [et al.]. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye armatury AES [Technical diagnostics of NPP fittings]. Moscow, 2012. 452 p. (In Russ.).
3. NP-089-15. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [Rules for the design and safe operation of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, 2017. 72 p. (In Russ.).
4. Teju V., Bhavana D. An efficient object detection using OFSA for thermal imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education. 2020. No. 1 (22). P. 1–22. DOI: 10.1177/0020720920944434. (In Engl.).
5. Drobotov A. V. Metod diagnostirovaniya elektroprivodnoy armatury s kontrolem diagnosticheskikh parametrov i opyt yego primeneniya na Smolenskoy AES [Method for diagnosing electric valves with control of diagnostic parameters and experience of its application at the Smolensk NPP] // Armaturostroyeniye. 2008. No. 1 (52). P. 52–60. (In Russ.).
6. Adamenkov A. K., Veselova I. N., Ryasnyy S. I. Metod otsenki germetichnosti truboprovodnoy armatury teplovyykh i atomnykh stantsiy [Method of tightness evaluation of the nuclear and thermal power plant valves] // Tyazheloye mashinostroyeniye. 2008. No. 6. P. 2–3. (In Russ.).
7. Ispytaniya stendov «Krona-517» i «ATE Ts-3000» [Testing of stands «Krona-517» and «ATE TS-3000»]. URL: <http://npp-krona.ru/2015/03/ispytaniya-stendov-krona-517-i-ate-ts-3000> (accessed: 01.04.2020). (In Russ.).
8. Abidova E. A., Dembitsky A. E., Lapkis A. A., Chernov A. V. Synthesis of Control Systems for Complex Technical Objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971, Issue 3. 032058. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/0320589. (In Engl.).
9. Chernov A. V., Abidova E. A., Khegay L. S. Diagnostika negermetichnosti v zatvore elektroprivodnoy armatury po entropiynym pokazatelyam zvukovykh i ul'zvukovykh signalov [Diagnosis of leakage in the gate of electric drives by the entropy indicators of sound and ultrasonic signals] // Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don. 2017. No. 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493> (accessed: 10.06.2023). (In Russ.).
10. Hassani J., Kalantari H., Beneki C. Comparative Assessment of Hierarchical Clustering Methods for Grouping in Singular Spectrum Analysis // Applied Math 2021. Vol. 1 (1). P. 18–36. DOI: 10.3390/appliedmath1010003. (In Engl.).
11. Hassani H., Kalantari M. Automatic Grouping in Singular Spectrum Analysis // Forecasting. 2019. Vol. 1. P. 189–204. DOI: 10.3390/forecast1010013. (In Engl.).
12. Optimizatsiya metodov diagnostiki podshipnikov kacheniya po vysokochastotnoy vibratsii [Optimisation of methods of rolling bearings diagnostics by high-frequency vibration] // Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya. Methods and Means of Power Equipment Condition Assessment. 2002. Issue 15. URL: <https://masters.donntu.ru/2010/etf/prokopets/library/article5.htm> (accessed: 10.06.2023). (In Russ.).
13. Kilundu B., Dehombreux P., Letot C. [et al.]. Early detection of bearing damage by means of decision trees // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. 2009. Vol. 3. P. 70–74. (In Engl.).
14. Balaratnam N., Weidenauer J., Wagner F. [et al.]. Comparison of envelope demodulation methods in the analysis of rolling bearing damage // Journal of Vibration and Control. 2022. P. 1–12. DOI: 10.1177/10775463221129155. (In Engl.).
15. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis for Time Series. 2nd ed. New York: Springer, 2020. 146 p. (In Engl.).

16. Babenko R. G., Nikiforov V. N., Pugacheva O. Yu. [et al.]. Otsenka veroyatnosti obnaruzheniya defektov pri diagnostike oborudovaniya vibroakusticheskim metodom [Estimating the probability of defect detection in the equipment diagnosis by vibroacoustic method] // Global'naya yadernaya bezopasnost'. *Global Nuclear Safety*. 2014. No. 4. (13). P. 74–78. (In Russ.).

ABIDOVA Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information and Control Systems Department, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology — branch of the National Research Nuclear University «MEPHI», Volgodonsk.

ORCID: 0000-0003-0258-5543

Correspondence address: 1nii_energomash@mail.ru

RATUSHNY Viktor Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Physical and

Mathematical Disciplines Department, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology — branch of the National Research Nuclear University «MEPHI», Volgodonsk.

SPIN-code: 6826-4290

ORCID: 0000-0002-5701-6279

AuthorID (SCOPUS): 6603218775

Correspondence address: VIRatushnyj@mephi.ru

For citations

Abidova E. A., Ratushny V. I. Registration and signal processing in measuring system for monitoring leaks of NPP pipeline fittings // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124.

Received July 19, 2023.

© E. A. Abidova, V. I. Ratushny