

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY


УДК 621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-02-09
EDN GMDHWM

Диагностика привода системы управления и защиты
реакторной установки

Е.А. Абидова ¹  , П.В. Поваров ¹ , В.М. Попов ² , О.Ю. Пугачева ¹ ,
В.Я. Шпицер ¹ 

¹ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

² Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск, Ростовская обл.,
Россия

 e-abidova@mail.ru

Аннотация. Привод системы управления и защиты (СУЗ) реактора является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности. Неисправности приводов СУЗ типа АРК зачастую являются исходными событиями для аварий, приводящих к несанкционированным простоям. Существующие в настоящее время штатные методики контроля параметров СУЗ не позволяют производить достоверную оценку состояния приводов. В настоящей работе предлагается реализовать подход, обеспечивающий повышение чувствительности при распознавании состояний приводов СУЗ АРК, за счет обработки исходных сигналов, которые представляют собой виброакустические сигналы, зарегистрированные на крышке верхнего блока реакторной установки ВВЭР. Предложена процедура обработки диагностических сигналов с использованием анализа сингулярного спектра. Предлагаемый подход отличается от известных наличием процедуры масштабирования, которая реализуется путем умножения матриц собственных значений на ганкелизованные матрицы исходных данных. За счет масштабирования обеспечивается необходимое повышение чувствительности. Предполагаемое повышение чувствительности основано на том, что собственные значения отображают структуру сигналов, которая существенно меняется под воздействием дефекта. Предложенным способом обрабатывались виброакустические сигналы, зарегистрированные на крышке верхнего блока реакторной установки ВВЭР. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде. Результаты обработки экспериментальных данных говорят о высоком качестве диагностирования. Наглядно подтвердилась гипотеза о том, что различие структуры диагностических сигналов исправного и неисправного оборудования может проявляться в собственных значениях ганкельных матриц сигналов. Предлагаемый в статье подход к обработке диагностических сигналов легко поддается автоматизации и может быть внедрен при разработке системы диагностики привода СУЗ типа АРК.


Ключевые слова: привод СУЗ, система диагностики, диагностический сигнал, анализ сингулярного спектра, эталонный базис, ошибки диагностирования.

Для цитирования: Абидова Е.А., Поваров П.В., Попов В.М., Пугачева О.Ю., Шпицер В.Я., Диагностика привода системы управления и защиты реакторной установки. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):77–87. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-09>

Diagnostics of the drive of the control and protection system of the reactor
plant ark type

Elena A. Abidova ¹  , Prokhor V. Povarov ¹ , Vladimir M. Popov ² ,
Olga Yu. Pugacheva ¹ , Vladimir Ya. Shpicer ^{3,1} 

¹ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russia

² Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia
 e-abidova@mail.ru

Abstract. The drive of the reactor control and protection system (CPS) is a system of normal operation, important for safety. Malfunctions of the drives of the ARC type CPS are often the initial events for accidents leading to unauthorized downtime. The currently existing standard methods for monitoring the parameters of the

CPS do not allow for a reliable assessment of the condition of the drives. In this paper, it is proposed to implement an approach that provides an increase in sensitivity when recognizing the states of the drives of the ARC control system by processing the initial signals, which are vibroacoustic signals registered on the lid of the upper unit of the VVER reactor. A procedure for processing diagnostic signals using singular spectrum analysis is proposed. The proposed approach differs from the known ones by the presence of a scaling procedure, which is implemented by multiplying the eigenvalue matrices by the gankelized matrices of the source data. Due to scaling, the necessary sensitivity increase is provided. The expected increase in sensitivity is based on the fact that the eigenvalues reflect the structure of the signals, which changes significantly under the influence of the defect. The proposed method was used to process vibroacoustic signals registered on the lid of the upper block of the VVER reactor unit. Experimental studies were carried out at the test stand of Izhorskiye Zavody OJSC. The results of processing experimental data indicate a high quality of diagnosis. The hypothesis was clearly confirmed that the difference in the structure of diagnostic signals of serviceable and faulty equipment can manifest itself in the eigenvalues of the gankel signal matrices. The approach proposed in the article to the processing of diagnostic signals is easily amenable to automation and can be implemented in the development of a diagnostic system for the drive of an ARC-type CPS.

Keywords: CPS drive, diagnostic system, diagnostic signal, singular spectrum analysis, reference basis, diagnostic errors.

For citation: Abidova E.A., Povarov P.V., Popov V.M., Pugacheva O.Yu., Shpicer V.Ya. Diagnostics of the drive of the control and protection system of the reactor plant ark type. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(2):77–87 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-09>

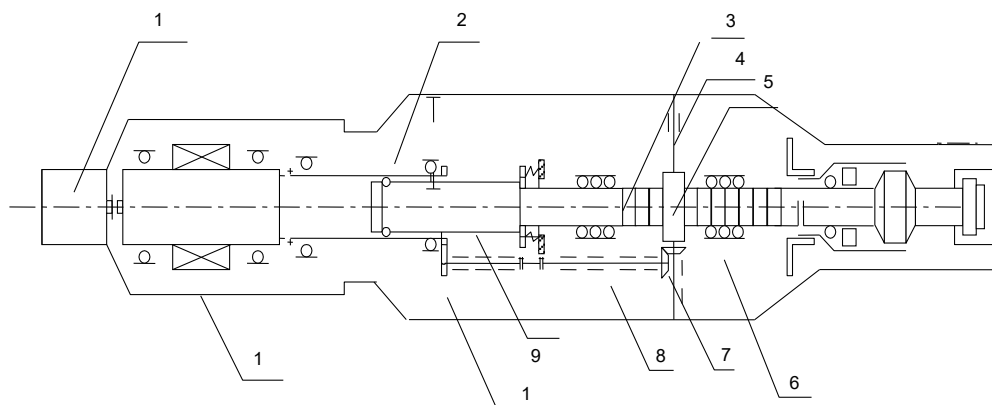
Актуальность проблемы диагностирования привода АРК

Комплекс оборудования СУЗ включает: оборудование исполнительной части аварийной предупредительной защиты, оборудование программно-технического комплекса системы группового и индивидуального управления и контроля положения органов регулирования реактора, оборудование автоматического регулирования мощности, оборудование электропитания и оборудования управления приводами ОР на стенде вертикальном [1,2].

По влиянию на безопасность, в соответствии с НП-001-15 и «Отчета по углубленной оценке безопасности», приводы кассет АРК имеют классификационное обозначение 2НЗУ (элементы, отказы которых могут являться исходными событиями, приводящими к проектным авариям).

Для перемещения в активной зоне реактора каждого из 73-х органов регулирования, совмещающего функции компенсации реактивности, регулирования мощности и аварийной защиты реактора, служит привод ОР СУЗ (привод АРК реечного типа). Привода ОР СУЗ устанавливаются в индивидуальных чехловых трубах (чехлах СУЗ), смонтированных на крышке корпуса реактора.

Схема механизма управления реактора ВВЭР-440 представлена на рисунке 1 [1].



1 – датчик линейный ЛД-1; 2 – центробежный регулятор; 3 – рейка; 4 – вал 1; 5 – реечная шестерня; 6 – направляющие ролики; 7 – коническое зацепление; 8 – вал 2; 9 – подшипник; 10 – цилиндрическая передача; 11 – электродвигатель.

Рисунок 1. Схема привода АРК ВВЭР-440
Figure 1. Drive ARC of WWPR 440 diagram

Оборудование, входящее в СУЗ, выполняет следующие функции:

- реализацию аварийной защиты реактора, обеспечивающую быстрый останов реактора при возникновении аварийной ситуации путем обесточивания приводов ОР по постоянному и переменному току;
- реализацию предупредительной защиты реактора, обеспечивающую автоматическое снижение мощности реактора с заданной скоростью путем движения вниз с рабочей скоростью групп органов регулирования, начиная с группы, определенной для движения вниз заданной автоматической последовательностью перемещения групп, либо сброса органов регулирования при возникновении нарушений в работе реакторной установки;
- формирование запрета на движение вверх групп органов регулирования и отдельных органов при поступлении сигнала предупредительной защиты;
- автоматическое дистанционное управление группами и отдельными органами регулирования;
- автоматическое регулирование мощности реактора по заданным программам;
- контроль положения органа регулирования по сигналам датчиков положения.

Неисправности приводов СУЗ зачастую являются исходными событиями для аварий, приводящих к несанкционированным простоям [3,4].

Существующие методы диагностирования привода АРК

Проведя анализ методов диагностики механизмов роторного действия, возможно, выделить три основных подхода в задачах описания состояний объектов диагностирования.

В первом подходе значения технологических параметров сравнивают с уставками [5]. Например, при диагностике АРК оцениваются следующие параметры:

- ток фазы № 1 – 3 электродвигателя в режиме движения, $10 + 15 \% A$;
- напряжение на вторичных обмотках датчика положения, $14 + 25 \% B$;
- рабочий ход рейки привода, $2500 \pm 0,8 \% \text{ мм}$ и т.д.

Однако данный метод имеет ряд недостатков: грубость в оценке измерений, ограничение одним классом диагностируемого оборудования, невозможность обнаружения места возникновения дефекта.

Вторым по распространенности методом диагностики механизмов роторного действия является спектральный анализ [6,7]. Как правило, диагностический сигнал можно представить в виде комбинации отдельных синусоидальных волн. Синусоидальные волны в графике (спектре) будут отображаться в частотной области в виде вертикальных линий, при чем, положение и высота линии представляют соответственно частоту и амплитуду. Анализ спектра основывается на зависимости амплитуды от частоты и сравнении частотных пиков с частотой срабатывания деталей механизма. Это одна из причин, по которой метод спектрального анализа и другие частотные методы эффективны для обнаружения неисправностей в механизме. Во временной области некоторые частотные особенности сигнала не видны, но их можно наблюдать в спектре. Однако спектральный анализ не лишен недостатков: затруднительно анализировать переходные процессы; затруднительно анализировать близкие по частоте гармоники; с трудом поддается автоматизации, требуют экспертных навыков. На практике зачастую признаки отклонений в спектре являются статистически малозначимыми и не позволяют однозначно выявить существующие отклонения в оборудовании, а лишь могут дать примерную картину о состоянии объекта диагностирования и его основных узлов.

Анализ спектра акустического сигнала не всегда удобен, поскольку с трудом поддается автоматизации, зачастую требует ручной обработки, выполняемой экспертом.

В основе третьего подхода лежит статистическая оценка вероятности принадлежности анализируемого состояния к одному из классов (в простейшем случае к двум классам «оборудование исправно» и «оборудование неисправно»). Данный подход требует проведения серии экспериментов для получения выборок параметров, соответствующих исправному состоянию и дефектам [8]. Выборки представляются в виде функций распределения вероятности (рис. 2), по которым возможна оценка вероятности пропуска дефекта (ошибка второго рода) и ложной информации о дефекте (ошибка первого рода).

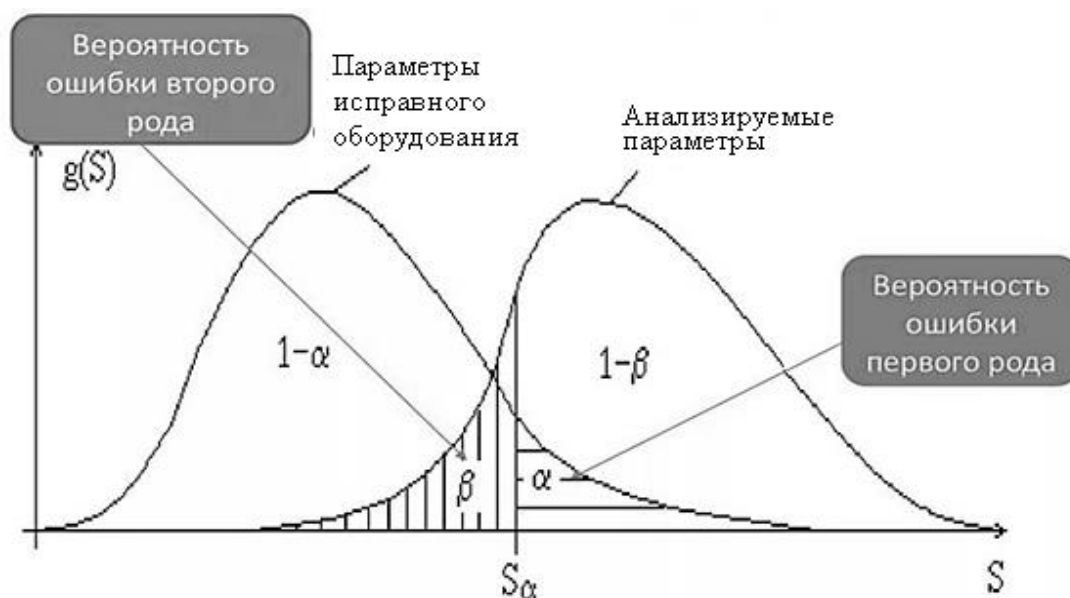


Рисунок 2. Функции распределения вероятности параметров системы
Figure 2. Probability distribution functions of system parameters

Данный подход имеет преимущества: 1) обобщенный учет всех значений параметров, описывающих динамику состояния; 2) простота реализации в автоматизированных системах диагностики.

Научной задачей в случае реализации третьего подхода является выбор чувствительных параметров, практически исключающих вероятности ошибок, или (что проще реализуемо) применение к исходным данным методов обработки (например, фильтрации) для повышения чувствительности.

Особенности диагностических сигналов привода АРК

В настоящей работе предлагается реализовать подход, обеспечивающий повышение чувствительности при распознавании состояний приводов СУЗ АРК, за счет обработки исходных сигналов. Исходные сигналы представляют собой виброакустические сигналы, зарегистрированные на крышке верхнего блока реакторной установки ВВЭР. Расположение датчиков показано на рисунке 3. Анализ характеристик измеряемых сигналов под действием определенных дефектов проводился с использованием испытательного стенда [9]. Привод при сбросе в режиме аварийной защиты обесточивался. При этом ротор двигателя оставался механически связанным с приводом и при сбросе вращался. За счет вращения и остаточного намагничивания ротора в обмотке статора электродвигателя возбуждалась электродвижущая сила. На вход автоматизированной системы в это же время подавался сигнал с закрепленного на корпусе объекта диагностирования виброакустического датчика.

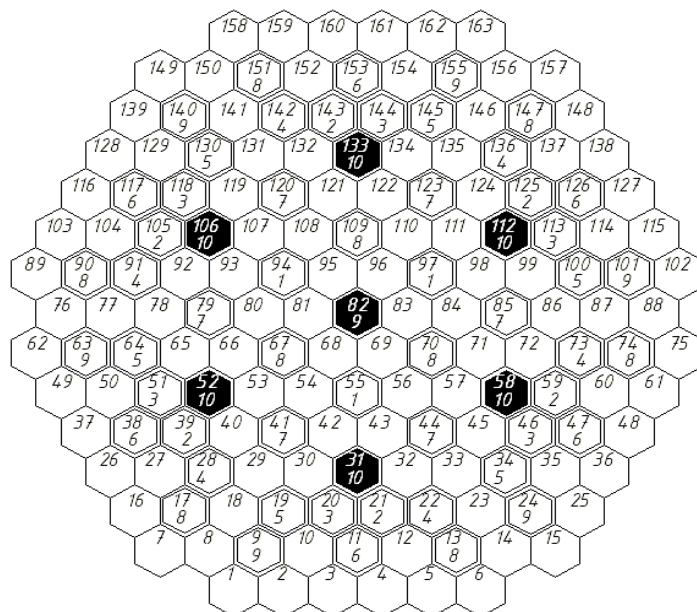


Рисунок 3. Места установки виброакустических датчиков на приводе СУЗ типа АРК
Figure 3. Places of installation of vibroacoustic sensors on the drive of the CPS type ARC

При регистрации в механизм привода вносились дефекты. Выбор дефектов осуществлялся по рекомендации специалистов атомных электростанций, эксплуатирующих привод СУЗ типа АРК. В качестве эталона также зарегистрированы сигналы исправного привода. Пример исходных сигналов представлен на рисунке 4.

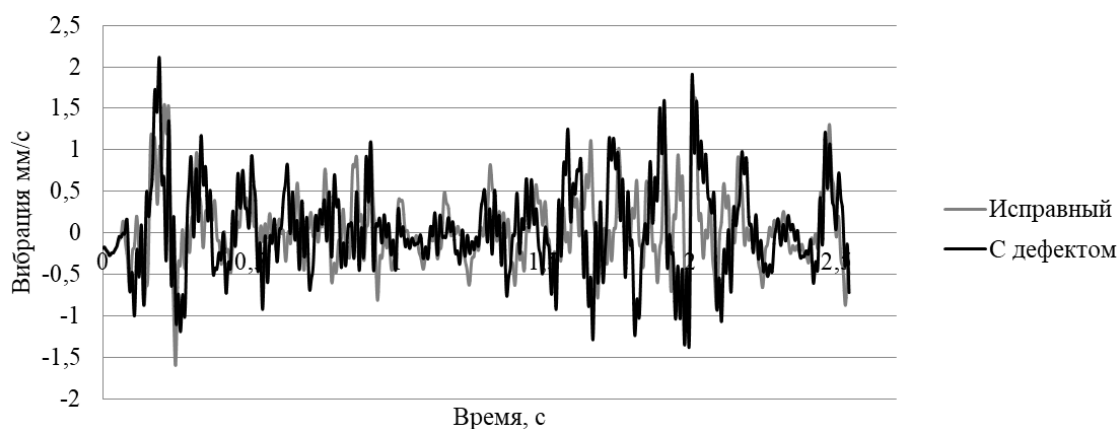


Рисунок 4. Виброакустические сигналы привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)
Figure 4. Vibroacoustic signals of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

Как видно, сигналы представляют собой периодическую последовательность импульсов, при чем, при наличии дефектов амплитуда импульсов несколько увеличивается. Первоначально к сигналам применялись традиционные методы – статистическая обработка и спектральный анализ.

Как видно на рисунке 5, различие амплитуд импульсов при отсутствии и наличии дефекта не обеспечивает достаточное различие для достоверного обнаружения дефектов.

В спектрах сигналов вибрации, которые показаны на рисунке 6, можно наблюдать диагностические признаки (различие амплитуд на отдельных частотных пиках, отклонения частот, на которых наблюдаются пики). Однако, как показал анализ с использованием статистических критериев значимости гипотез [6], признаки

отклонений в спектре являются статистически малозначимыми и не позволяют однозначно выявить существующие отклонения в приводе.

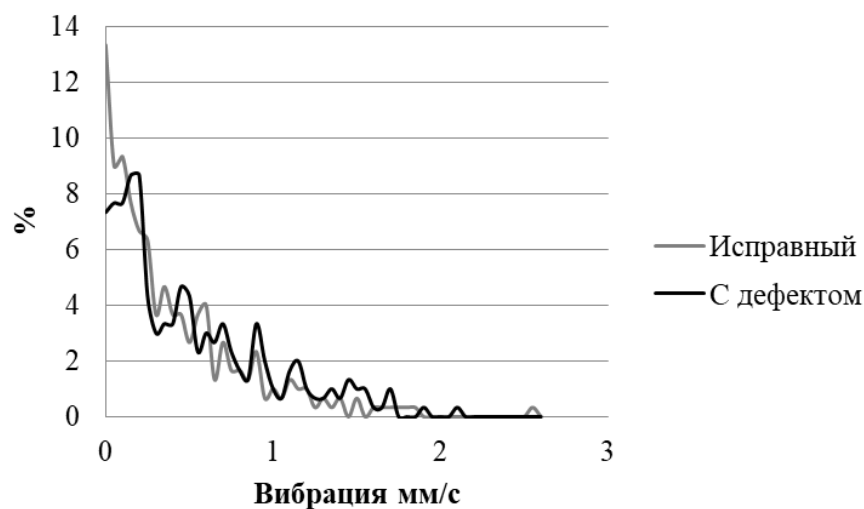


Рисунок 5. Функции распределения вероятности амплитуд вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)

Figure 5. Probability distribution functions of vibration amplitudes of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

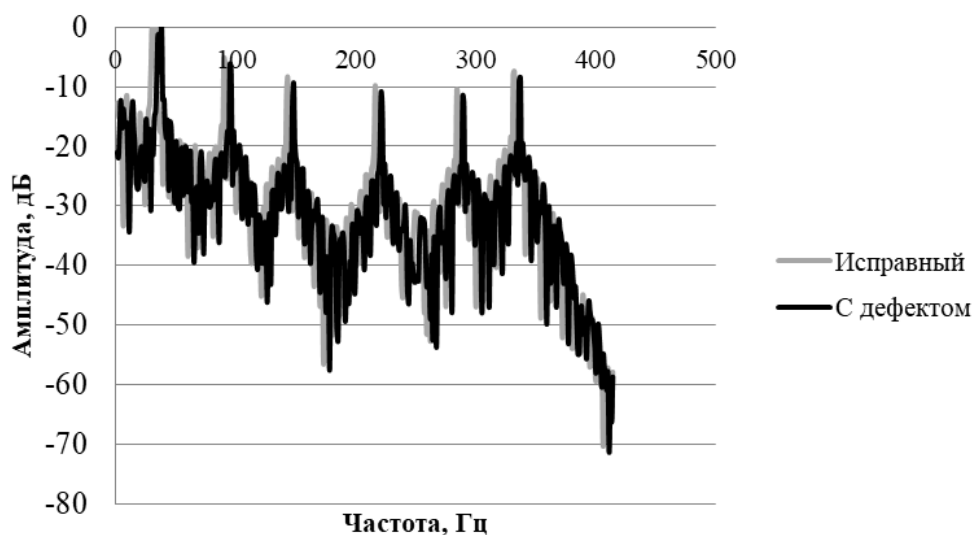


Рисунок 6. Логарифмические спектры сигналов вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)

Figure 6. Logarithmic spectra of vibration signals of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

Таким образом, предварительные исследования показывают, что существующие методы не позволяют достоверно выявлять признаки дефектов в приводе СУЗ типа АРК по его диагностическим сигналам. Требуется внедрение методов обработки исходных данных для повышения чувствительности.

Методика

Ошибки, которые наблюдаются при анализе состояния объекта (см. рис. 5), возникают в результате того, что выборки диагностических параметров, соответствующих различным состояниям, имеют близкие средние значения и широкую дисперсию. Многочисленные примеры [9-11] демонстрируют, как выборки параметров исправных и неисправных состояний перекрывают друг друга «перекрывают».

В практике обработки диагностических сигналов для усиления регулярной составляющей сигнала и ослабления выбросов, присутствующих в сигнале успешно применяется метод на основе анализа сингулярного спектра (АСС) [10-12].

Метод предполагает следующую последовательность действий:

1. Представление исходной временной последовательности сигнала исправного и состояния в виде траекторной матрицы, выражение (1):

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

где x_i – значение во временном ряду, $N = m+n-l$, n – длина окна.

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$$

За счет представления в виде траекторной матрицы обеспечивается лучшая корреляция соседних значений

2. Преобразование матрицы A в ковариационную, выражение (2):

$$[C] = \begin{bmatrix} cov(x_1, x_1) & cov(x_2, x_1) & \dots & cov(x_n, x_1) \\ cov(x_2, x_2) & cov(x_3, x_2) & \dots & cov(x_{n+1}, x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(x_m, x_m) & cov(x_{m+1}, x_m) & \dots & cov(x_N, x_m) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Чем ближе значения соседних элементов, тем больше элементы матрицы.

3. Матрица C подвергается сингулярному разложению. Сингулярное разложение позволяет разложить матрицу $[C]$ ранга L на три матрицы: $[U]$ (ортогональная матрица), $[S]$ (диагональная матрица) и $[V]^T$ (транспонированная ортогональная матрица $[V]$), выражение (3):

$$[C]_{m \times n} = [U]_{m \times m} [S]_{m \times n} [V]_{n \times n}^T, \quad (3)$$

где $U^T U = I$;

$$V^T V = I;$$

S – диагональная матрица, содержащая квадратные корни собственных значений $C^T C$, которые могут быть представлены выражением (4):

$$S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_L), \quad (4)$$

где $L = \min(m, n)$. Эти σ_i ($i=1, 2, \dots, L$) называются собственными значениями матрицы $[C]$. Собственное число определяет значимость соответствующей ей компоненты. В рассматриваемом методе матрица V , если она получена по значениям, соответствующим исправному состоянию, рассматривается как эталонный базис. Характеристики других состояний объекта проецируются на этот базис.

Процедура обработки диагностических сигналов с использованием АСС описывается схемой на рисунке 7. Предлагаемый подход отличается от известных [10-12] наличием процедуры масштабирования, которая реализуется путем умножения матриц собственных значений на ганкельные матрицы исходных данных. За счет масштабирования должно обеспечиваться необходимое повышение чувствительности. Предполагаемое повышение чувствительности, основано на том, что собственные значения отображают структуру сигналов (соотношение периодических стохастических и трендовых составляющих), которая существенно меняется под воздействием дефекта.



Рисунок 7. Обработка виброакустических сигналов с использованием ACC

Figure 7. Processing of vibroacoustic signals using SSA

Результаты исследования

Процедура обработки диагностических сигналов с использованием ACC была применена к сигналам вибрации привода СУЗ типа АРК. В результате преобразования выражения (3) над эталонными данными был получен эталонный базис, на который проецировались все экспериментальные данные. Также в результате преобразования были получены диагональные матрицы, содержащие квадратные корни собственных значений.

В нашей интерпретации собственные значения (и их корни) трактуются как масштабные коэффициенты, обеспечивающие чувствительность при диагностировании.

Примеры графиков, иначе говоря спектров, собственных значений от номеров компонент (направлений в базисе) представлены на рисунке 8. Пример наглядно подтверждает гипотезу о том, что различие структуры диагностических сигналов исправного и неисправного оборудования может проявляться в собственных значениях ганкельных матриц сигналов.

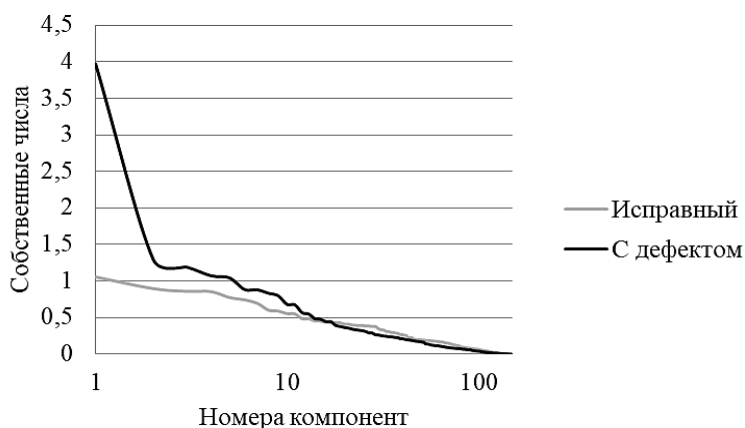


Рисунок 8. Спектр собственных значений амплитуд вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)

Figure 8. The eigenvalue spectrum of the vibration amplitudes of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

С целью обеспечения чувствительности было выполнено умножение матриц собственных значений на ганкелизованные матрицы исходных данных и проецирование результата на базис, который получился в результате преобразования выражения (3) над сигналом исправного привода. Результаты проецирования на первую компоненту представлены в виде функций распределения вероятности (рис. 9). По функциям распределения вероятности исходных параметров и функциям, полученным после обработки, были получены оценки вероятности ошибок диагностирования до и после обработки (табл. 1).

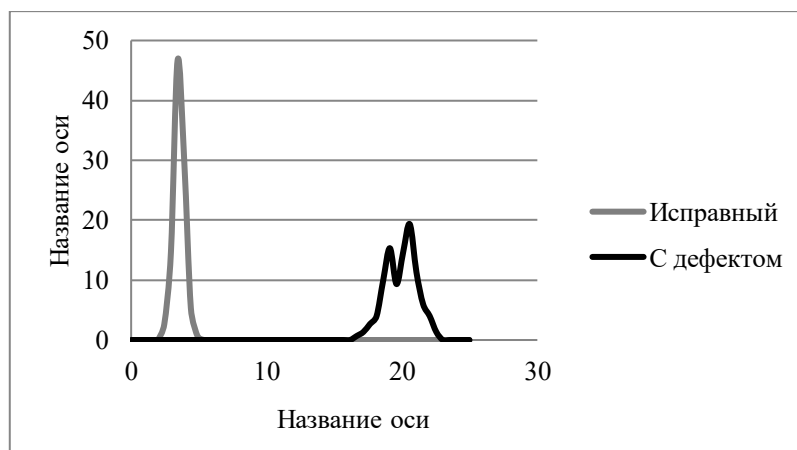


Рисунок 9. Функции распределения вероятности отмасштабированных амплитуд проекций вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)

Figure 9. Probability distribution functions of the scaled amplitudes of vibration projections of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

Таблица 1. Вероятности ошибок диагностирования до и после обработки

Table 1. Probabilities of diagnostic errors before and after processing

№	Вид дефекта	Ошибка первого рода		Ошибка второго рода	
		До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
1	расцепление защелки магнита	49	0	33	0
2	пропуск шага	47	0	24	0
3	нарушение резьбового соединения блока перемещения	46	0	31	0
4	заедание защелки	41	0	27	0
5	износ защелок привода	50	0	23	0
6	наличие постороннего предмета в корпусе	37	0	24	0

Как видно из рисунка 9 и таблицы 1, функции плотности распределения вероятности эталонного сигнала и сигнала с дефектной составляющей не пересекаются, что говорит о высоком качестве диагностирования. Предлагаемый в статье подход к обработке диагностических сигналов легко поддается автоматизации и может быть внедрен при разработке системы диагностики привода СУЗ типа АРК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Федоров А.И., Витковский С.Л. Некоторые аспекты повторного продления срока эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-440 на примере энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2019;(2):91–104. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.08>
2. International Atomic Energy Agency. Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). IAEA, Vienna (2016) (accessed: 04.12.2022).

3. Maintaining the design integrity of nuclear installations throughout their operating life. INSAG-19. A report by the international nuclear safety advisory group. URL: https://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1178_web.pdf (accessed: 04.12.2022).
4. Mazzeletti M.A., Bossio G.R., de Angelo C.H., Espinoza-Trejo D.R. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;(9):7218–7228. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2688973>
5. Erd A., Stokłosa J. Main design guidelines for battery management systems for traction purposes. *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference Automotive Safety*. 2018. Slovakia. <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345>
6. Акимов В.И., Саубанов О.М., Харисов Р.М. и др. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насосно-компрессорного оборудования. *Трубопроводный транспорт. Теория и практика*. 2018;(5):18–25.
7. Caesarendra W., Tjahjowidodo T. A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing. *Machines* 2017. 5. 21.
8. Гагроева, И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов. *Инженерный вестник Дона*. 2013;(3). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842 (дата обращения: 04.12.2022).
9. Чернов А.В., Абидова, Е.А., Хегай Л.С., Белоус М.А. Методика диагностирования состояния электромеханических приводов систем управления и защиты реакторной установки. *Инженерный вестник Дона*. 2017;(4). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4492 (дата обращения: 04.12.2022).
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg; 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62435-7>
11. Zabalza J., Ren J., Wang Z., Marshall S., Wang J. Singular spectrum analysis for effective feature extraction in hyperspectral imaging, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014;11(11):1886–1890. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312754>
12. Cava D.G., Palazzetti R., Trendafilova I., Fiorini C., Zucchelli A. Vibration-based delamination diagnosis and modelling for composite laminate plates. *Composite Structures*. 2015;(130):155–162. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.021>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Абидова Е.А. – разработка теории и выполнение анализа результатов экспериментов;
Поваров П.В. – планирование и проведение экспериментов;
Попов В.М. – разработка программного обеспечения для обработки результатов экспериментов;
Пугачева О.Ю. – руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов;
Шпицер В.Я. – разработка и создание рукописи статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена Александровна Абидова, к.т.н., доцент кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543> ; e-mail: e-abidova@mail.ru

Проход Владимирovich Поваров, к.т.н., заведующий отделом НИИ атомного энергетического машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6478-9907> ; e-mail: nii_energomash@mail.ru

Владимир Михайлович Попов, заместитель главного инженера по подготовке персонала, начальник учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Abidova E.A. – developed a theory and performed an analysis of the experimental results;
Povarov P.V. – planned and conducted experiments;
Popov V.M. – has developed software for processing experimental results;
Pugacheva O.Y. – supervised the work and checked its results;
Shpicer V.Ya. – developed and wrote the manuscript.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declares no relevant conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena A. Abidova, Associate Professor, Department of Information and Control Systems (после Cand. Sci. (Eng.) Volgondsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgondsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543> ; e-mail: e-abidova@mail.ru

Prokhor V. Povarov, Head of the Department of the Research Institute of Nuclear Power Engineering, Volgondsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgondsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6478-9907> ; e-mail: nii_energomash@mail.ru

Vladimir M. Popov, Deputy Chief Engineer for Personnel Training, Head of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC,


станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6500-5875> ; e-mail: info@vdpnp.rosenergoatom.ru

Ольга Юрьевна Пугачева, к.т.н., заместитель директора НИИ Атомного энергетического машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9168-3008> ; e-mail: OYPugacheva@mephi.ru

Владимир Яковлевич Шпицер, д.т.н., профессор кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5091> ; e-mail: VYShpitser@mephi.ru

Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6500-5875> ; e-mail: info@vdpnp.rosenergoatom.ru

Olga Yu. Pugacheva, Deputy Director of the Research Institute of Nuclear Power Engineering, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9168-3008> ; e-mail: OYPugacheva@mephi.ru

Vladimir Ya. Shpitser  Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5091> ; e-mail: VYShpitser@mephi.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022

После доработки 27.03.2023

Принята к публикации 06.04.2023

Received 22.12.2022

Revision 27.03. 2023

Accepted 06.04.2023