



КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИНТЕГРАЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ

Зайниев А.В., Хакимьянов М.И.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

Azat70000@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Газопоршневые электроагрегаты с синхронными генераторами с возбуждением от постоянных магнитов широко применяются в нефтяной промышленности и в малой распределенной энергетике. Эффективным средством повышения их эксплуатационной готовности и надежности являются непрерывная техническая диагностика. В статье исследовано использование корреляционных зависимостей диагностических признаков для повышения достоверности мультифизического диагностирования. *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть возможность надёжной классификации дефектов газопоршневых электроагрегатов с синхронными генераторами с возбуждением от постоянных магнитов на основе анализа корреляционных коэффициентов между вибрацией, напряжением и магнитным потоком. Исследовать использование корреляционного подхода в составе цифровой тени машины для интеграции в единую систему мультифизического диагностирования. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялись методы математического моделирования с использованием пакетов компьютерных программ Google Colab, PlantUML, объектно-ориентированного программирования с использованием языка программирования Python. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Экспериментальная апробация использования корреляционного подхода в составе цифровой тени на эталонных и реальных данных подтвердила высокую чувствительность системы к выявлению как единичных, так и комбинированных неисправностей. Установлено, что такой подход обеспечивает раннюю диагностику и повышение достоверности принимаемых решений по техническому обслуживанию. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Совместный учёт спектральных и корреляционных характеристик в рамках цифровой тени обеспечивает строгую, физически интерпретируемую и статистически устойчивую идентификацию неисправностей, что подтверждено как вычислительными экспериментами, так и эмпирическими исследованиями. Такой подход обеспечивает высокую чувствительность к комплексным отказам. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования корреляционного анализа как ключевого элемента в архитектуре цифровых теней и двойников многосигнальных объектов энергетики.

Ключевые слова: синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов; газопоршневой электроагрегат; диагностика; цифровая тень; корреляция сигналов.

Для цитирования: Зайниев А.В., Хакимьянов М.И. Корреляционный подход к интеграции диагностических признаков газопоршневых электроагрегатов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 4. С. 84-95. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-84-95.

A CORRELATIVE APPROACH TO THE INTEGRATION OF DIAGNOSTIC FEATURES OF GAS PISTON ELECTRIC UNITS

Zayniev A.V., Khakimyanov M.I.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Azat70000@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* Gas-piston electric units with synchronous generators with excitation from permanent magnets are widely used in the oil industry and in small distributed power engineering. Continuous technical diagnostics are an effective means of increasing their operational readiness and reliability. The article examines the use of correlation dependencies

of diagnostic features to increase the reliability of multiphysical diagnosis. **THE PURPOSE.** To consider the possibility of reliable classification of defects in gas-piston electric units with synchronous generators with excitation from permanent magnets based on the analysis of correlation coefficients between vibration, voltage and magnetic flux. To investigate the use of the correlation approach as part of the digital shadow machine for integration into a single system of multiphysical diagnostics. **METHODS.** When solving this problem, mathematical modeling methods were used using Google Colab, PlantUML computer software packages, and object-oriented programming using the Python programming language. **RESULTS.** Experimental testing of the use of the correlation approach as part of the digital shadow on reference and real data confirmed the high sensitivity of the system to detect both single and combined faults. It has been established that this approach provides early diagnosis and increases the reliability of maintenance decisions. **CONCLUSION.** The combined accounting of spectral and correlation characteristics within the digital shadow ensures strict, physically interpretable and statistically stable fault identification, which is confirmed by both computational experiments and empirical studies. This approach provides high sensitivity to complex failures. The results obtained confirm the expediency of using correlation analysis as a key element in the architecture of digital shadows and doppelgangers of multi-signal energy facilities.

Keywords: synchronous generator with permanent magnet excitation; gas piston unit; diagnostics; digital shadow; signal correlation.

For citation: Zayniev A.V., Khakimyanov M.I. A correlative approach to the integration of diagnostic features of gas piston electric units. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (4): 84-95. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-84-95.

Введение (Introduction)

В настоящее время ограниченные средства на ремонт оборудования и неблагоприятная внешняя конъюнктура часто вынуждают промышленные предприятия переходить с планово-предупредительного обслуживания на стратегию ремонта по техническому состоянию. Такой подход повышает операционную эффективность предприятия, однако может применяться только при наличии современных систем контроля технического состояния и технического диагностирования.

Вопросы оценки технического состояния и диагностики электротехнических комплексов и систем изучаются широким кругом специалистов. Несмотря на это, в настоящее время имеется довольно широкий круг нерешенных задач в данной области знаний. Все современные методы технической диагностики обладают рядом своих недостатков. В частности, применение вибродиагностики электрических машин связано с затруднениями, связанными с влиянием приводящего (приводимого) агрегата. При использовании диагностики по изменению внешнего магнитного поля возникают сложности интерпретации измерений, связанные с наличием искажений измеряемого сигнала от внешних помех и, как следствие, трудности при локализации дефектов и постановке диагноза. К недостаткам спектродиагностики можно отнести «размытие» спектра при нестационарных условиях работы машины, а также при влиянии внешней сети, и связанную с этим сложность идентификации гармоник дефектов.

Одним из возможных решений является система комплексной мультифизической диагностики, включающая в себя несколько методов, которые могут дополнять друг друга, сводя к минимуму вероятность ошибки при постановке диагноза [1, 2].

Однако при использовании данной системы остается актуальной проблема эффективной интеграции данных от разнородных датчиков (вибрационных, электрических, магнитных) в обобщенную цифровую модель, обеспечивающую высокую чувствительность к выявлению как единичных, так и комбинированных неисправностей, раннюю диагностику и повышение достоверности принимаемых решений по техническому обслуживанию [3].

Цель исследования заключается в разработке модели интеграции данных комплексной мультифизической системы диагностики газопоршневых электроагрегатов (ГПЭА) с газовыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и синхронными генераторами с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) в единую систему за счет подтверждения корреляционной согласованности проявлений в смежных подсистемах.

Научная значимость исследования состоит в выявлении дополнительных

устойчивых диагностических признаков, которые открывают новые возможности для развития архитектуры построения цифровых двойников и цифровых теней многоканальных электротехнических комплексов.

Практическая значимость исследования заключается в повышении надежности генерирующих мощностей, сокращении непроизводительных расходов на внеплановый ремонт оборудования и упущенной выгоды от простоя за счет повышения достоверности результатов технической диагностики.

Литературный обзор (Literature Review)

Современные подходы к техническому диагностированию электрических машин сосредоточены на измерениях и обработке данных с использованием нейронных сетей и других методов машинного обучения [1, 3].

Новейшей тенденцией в промышленном производстве и мониторинге является разработка цифровых двойников, применение которых позволяет формировать обобщенные цифровые модели технологических процессов, выявляя факторы зарождения критических изменений режимов работы [4, 5].

ГОСТ Р 57700.37-2021¹ определяет цифровой двойник как систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями.

Наряду с термином «цифровой двойник», в последнее время все чаще упоминается термин «цифровая тень», определения которого в действующих стандартах нет. Под «цифровой тенью» принято понимать систему связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта и содержащихся в данных, получаемых с реального объекта при помощи сетевых технологий [6, 7]. Таким образом, принципиальное отличие цифровой тени от цифрового двойника заключается в отсутствии управляющего воздействия на объект. Однако, необходимо отметить, что во многих исследованиях зарубежных авторов систему, включающую в себя цифровую модель и односторонние информационные связи так же называют «цифровой двойник».

В работе [8] предложен цифровой двойник для диагностики неисправностей фотоэлектрического преобразователя энергии (PVECU) в режиме реального времени. Диагностика неисправностей выполняется путем генерации и оценки вектора остаточной ошибки, который представляет собой разницу между расчетными и измеренными выходными данными.

Компания «РОТЕК» разработала диагностическую систему Prana [9] для оценки технического состояния энергетического оборудования. Основой системы Prana является цифровой двойник на основе многомерной векторной статистической модели, который воспроизводит многомерные модели состояния оборудования в течение контрольного периода и в режиме реального времени.

В исследовании [10] авторы отмечают, что цифровой двойник обеспечивает привлекательный вариант предупреждения о неисправностях газового тракта газовых турбин. Однако существуют технические проблемы его реализации, в частности: низкая точность моделирования, вызванная индивидуальными различиями между газовыми турбинами, низкая эффективность решения из-за чрезмерного количества итераций и ложные срабатывания/несрабатывания защит, вызванные традиционным методом расчета уставок с фиксированным порогом.

В статье [11] предлагается использование классификации неисправностей редуктора ветряной турбины с использованием алгоритмов случайного леса и глубокого многослойного перцептрона, а для обработки исходных акустических и вибрационных сигналов используется декомпозиция по вариационному режиму и коэффициент корреляции Спирмена.

Авторы работы [12] показали возможность использования технологии цифровой двойник и методов машинного обучения для оценки и прогнозирования технического состояния трансформаторов тока.

Исследование [13] посвящено использованию беспилотных летательных аппаратов для диагностики электрических систем. При этом цифровой двойник предлагается использовать для оценки решений, генерируемых нейронной сетью.

В работе [14] для анализа неисправностей обмотки статора асинхронных двигателей применен метод выбора характеристик на основе корреляции.

¹ ГОСТ Р 57700.37-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 16.09.2021 № 979-ст).

Авторами [15] исследована методология выявления неисправностей электрических машин с помощью онлайн-измерений вибрации, температуры и тока в сочетании с методами машинного обучения.

Большинство подходов в рассмотренных выше работах требует значительных вычислительных мощностей для анализа входных сигналов различной физической природы. Поэтому актуальной является задача разработки модели интеграции данных комплексной мультифизической системы диагностики в единую систему.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследования проводились на шести аналогичных по техническим характеристикам ГПЭА единичной номинальной мощностью 2,5 МВА, работающих в составе газопоршневой электростанции. Основные технические характеристики ГПЭА электростанции приведены в работе [1].

Для эффективной оценки технического состояния ГПЭА необходим интегрированный подход, основанный на сочетании спектрального анализа, анализа магнитного поля и вибродиагностики. Эти методы обладают высокой информативностью и взаимно дополняют друг друга, что позволяет идентифицировать широкий спектр дефектов как механической, так и электрической природы [1].

Схема системы комплексной диагностики ГПЭА, реализующая мультифизический подход к интеграции диагностических признаков может быть представлена в виде, показанном на рисунке 1.



Рис. 1. Схема системы комплексной диагностики ГПЭА

Fig. 1. The scheme of the system of complex diagnostics of GPEU

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Вибросигналы анализируются в частотной области с использованием преобразования Фурье:

$$S_v(f) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n),$$

где $S_v(f)$ – спектральная плотность вибрационного сигнала; A_n – амплитуды гармоник; f_n – частоты гармонических составляющих; t – время; φ_n – фазовые сдвиги.

Спектральный анализ выходного фазного напряжения выявляет электрические неисправности, такие как межвитковые замыкания, асимметрия обмоток и размагничивание постоянных магнитов. Спектральный состав напряжения выражается через быстрое преобразование Фурье (БПФ):

$$S_u(f) = \sum_{n=1}^N U_n e^{-j2\pi f_n t},$$

где U_n – амплитуды гармоник фазного напряжения; f_n – диагностические частоты.

Регистрация внешнего магнитного поля позволяет диагностировать изменения в работе генератора, связанные с дефектами ротора и статора.

Магнитный поток в воздушном зазоре определяется уравнением:

$$B(t) = B_0 + \sum_{n=1}^N B_n \cos(2\pi f_n t + \theta_n),$$

где B_0 – среднее значение индукции; B_n – амплитуды гармонических составляющих; θ_n – фазовые сдвиги.

Предложенный мультифизический подход к диагностике неисправностей, основанный на интеграции и совместном анализе данных вибрации, фазного напряжения

и внешнего магнитного поля, реализован в программном модуле цифровой тени ГПЭА с СГПМ на языке Python [3]. Системная архитектура цифровой тени представлена на рисунке 2 в виде UML-диаграммы активности, иллюстрирующей последовательность этапов анализа сигналов и формирования диагностического заключения.

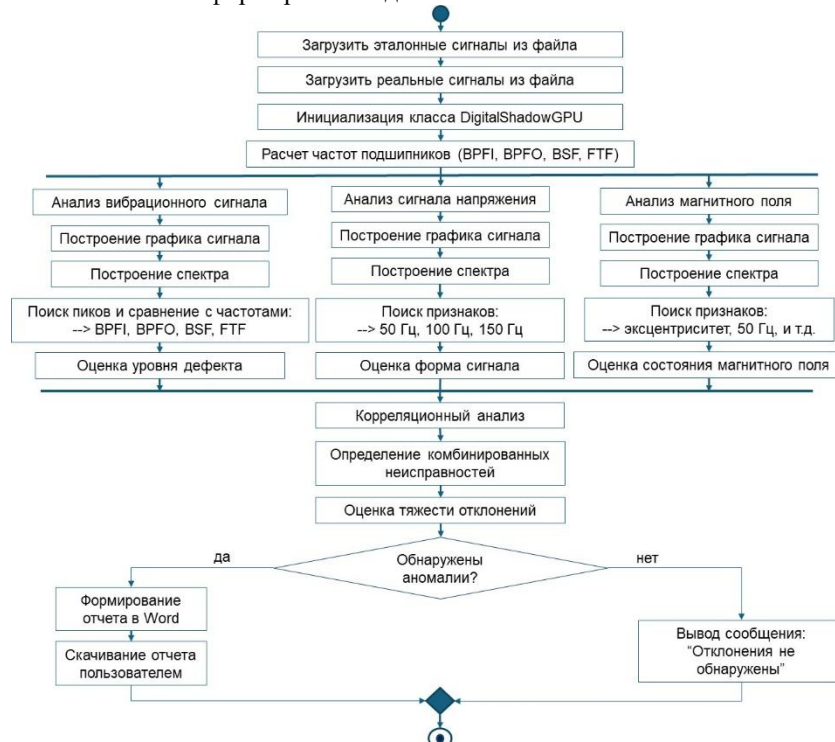


Рис. 2. UML-диаграмма деятельности цифровой тени для диагностики неисправностей ГПЭА

Fig. 2. UML diagram of the digital shadow activity for fault diagnosis of a gas piston electric unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Разработанная цифровая тень для диагностики неисправностей ГПА на основе мультифизического подхода, интегрирует данные трёх каналов (напряжение, магнитное поле, вибрация), выбранных на основе систематизации дефектов. Модуль реализует спектральный анализ с быстрым преобразованием Фурье, сравнение с эталонными данными, автоматическую классификацию дефектов (например, межвитковые замыкания, размагничивание) и генерацию диагностических отчётов.

Сбор эталонных данных производится персоналом в условиях нормальной работы исправного агрегата (сохраняются сигналы вибрации, фазного напряжения и внешнего магнитного поля). Используется частота дискретизации 1000 Гц и длительность записи 1 секунда. Персонал преобразует полученные данные в файлы формата «.xls» и загружает их в цифровую тень. На этапе инициализация цифровой тени выполняется настройка параметров: устанавливается частота дискретизации (1000 Гц) и частота вращения ротора (например, 25 Гц) в соответствии с реальным оборудованием (например, G3520С производства фирмы Caterpillar). Расчет характерных частот типичных дефектов подшипников производится в программе на основе их геометрических параметров. Эти значения в дальнейшем используются для анализа вибрационных спектров.

Для количественного анализа взаимосвязи диагностических параметров разной физической природы используется классический коэффициент корреляции Пирсона:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

где x_i – значения одного диагностического параметра (например, вибрации); y_i – значения другого параметра (например, напряжения); $\bar{x}, \bar{y}$ – средние значения параметров.

Сравнение ведётся относительно коэффициентов корреляции в исправном состоянии $\rho_{X,Y}^0$; далее анализируются приращения:

$$\Delta\rho_{X,Y} = \rho_{X,Y} - \rho_{X,Y}^0,$$

$$\Delta\rho_{max} = \max\{|\Delta\rho_{Vib,Volt}|, |\Delta\rho_{Vib,Flux}|, |\Delta\rho_{Volt,Flux}|\},$$

где $\rho_{X,Y}$ – коэффициент корреляции пары каналов X, Y для текущего сценария; $\rho_{Vib,Volt}$ – коэффициент корреляции между сигналами вибрации и напряжения; $\rho_{Vib,Flux}$ –

коэффициент корреляции между сигналами вибрации и магнитного потока; $\rho_{Volt,Flux}$ – коэффициент корреляции между сигналами напряжения и магнитного потока; $\Delta\rho_{max}$ – максимальный коэффициент корреляции между сигналами.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В разработанной цифровой тени ГПЭА были сгенерированы сигналы вибрации, напряжения и магнитного потока для 11 сценариев, соответствующих различным комбинациям неисправностей.

Разработанная программа генерации реалистичных синтетических сигналов опирается на анализ реальных спектров, полученных при экспериментальных измерениях на действующем оборудовании и отражает основные физические процессы в диагностируемом объекте.

Сигнал вибрации синтезируется в виде суммы гармонических сигналов с добавлением мелких всплесков и гауссовского шума, что позволяет обеспечить воспроизводимость экспериментов и приближение к условиям работы реального оборудования. Основные гармоники сигнала выбраны на основе реальных спектров.

Сигнал фазного напряжения генератора моделируется на основе основной синусоиды с частотой 50 Гц, дополнительно включающей фазовые колебания, моделирующие нестабильность электромеханических процессов. В сигнал встроены пропуски амплитуды на заданных интервалах времени, что позволяет имитировать, например, дефекты возбуждения, проскальзывание или разрывы электрических цепей. Уровень добавленного шума снижен по сравнению с исходной моделью для обеспечения четкости основных гармоник.

Сигнал внешнего магнитного поля реализуется в виде суммы трёх гармоник с частотами 50, 150 и 250 Гц, что соответствует реальным спектрам, полученным в результате экспериментальных измерений. Для повышения реалистичности добавлены мелкие всплески на частотах 100 и 200 Гц с низкими амплитудами, а также минимальный уровень гауссовского шума.

Использованные математические модели дефектов ГПЭА приведены в работе [1].

Для каждого сценария цифровая тень вычисляет максимальные отклонения сигналов от эталона, спектральные характеристики (доминирующие частоты и фазовые сдвиги) и коэффициенты корреляции между парами сигналов (вибрация – напряжение, вибрация – магнитный поток, напряжение – магнитный поток). Корреляционный анализ выполняется по временным рядам сигналов за одинаковый интервал времени в установившемся режиме работы агрегата. Полученные коэффициенты корреляции отражают, насколько синхронно изменяются, например, вибрация и напряжение, или вибрация и магнитный поток. В таблицу 2 сведены результаты диагностики по сценариям (корреляции и характерные признаки).

Таблица 2

Table 2

Сводка результатов диагностики по сценариям (корреляции и характерные признаки)

Summary of diagnostic results by scenario (correlations and characteristic features)

№	Сценарий	Приращения коэффициента корреляции Пирсона $\Delta\rho$ относительно исправного состояния			
		$\Delta\rho_{Vib,Volt}$	$\Delta\rho_{Vib,Flux}$	$\Delta\rho_{Volt,Flux}$	$\Delta\rho_{max}$
1	Дефект наружной обоймы подшипника	-0,2642	-0,0035	-0,1826	0,2642
2	Дефект внутренней обоймы подшипника	-0,0138	-0,0246	-0,6275	0,6275
3	Дефект тела качения подшипника	-0,1105	0,0425	-0,3668	0,3668
4	Дефект сепаратора подшипника	-0,111	0,0432	-1,7522	1,7522
5	Магнитный дефект (размагничивание)	-0,1104	0,0430	-0,9023	0,9023
6	Статический эксцентриситет	0,1934	-0,5355	-1,6307	1,6307
7	Фазовая асимметрия	-0,1112	0,0458	-1,5395	1,5395
8	Дисбаланс ротора	0,1127	0,0492	-0,5184	0,5184
9	Комбинированный дефект наружной обоймы подшипника и размагничивание постоянных магнитов	-0,1105	0,0426	-0,9011	0,9011
10	Комбинированный дефект тела качения подшипника и электрический дефект	-0,1107	0,0397	-0,3402	0,3402
11	Комбинированный дефект сепаратора подшипника, дисбаланс ротора и	0,0607	0,0870	-0,9095	0,9095

№	Сценарий	Приращения коэффициента корреляции Пирсона $\Delta\rho$ относительно исправного состояния			
		$\Delta\rho_{Vib,Volt}$	$\Delta\rho_{Vib,Flux}$	$\Delta\rho_{Volt,Flux}$	$\Delta\rho_{max}$
	размагничивание постоянных магнитов				

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

На рисунке 3 приведены примеры спектральных и корреляционных характеристик дефектов.

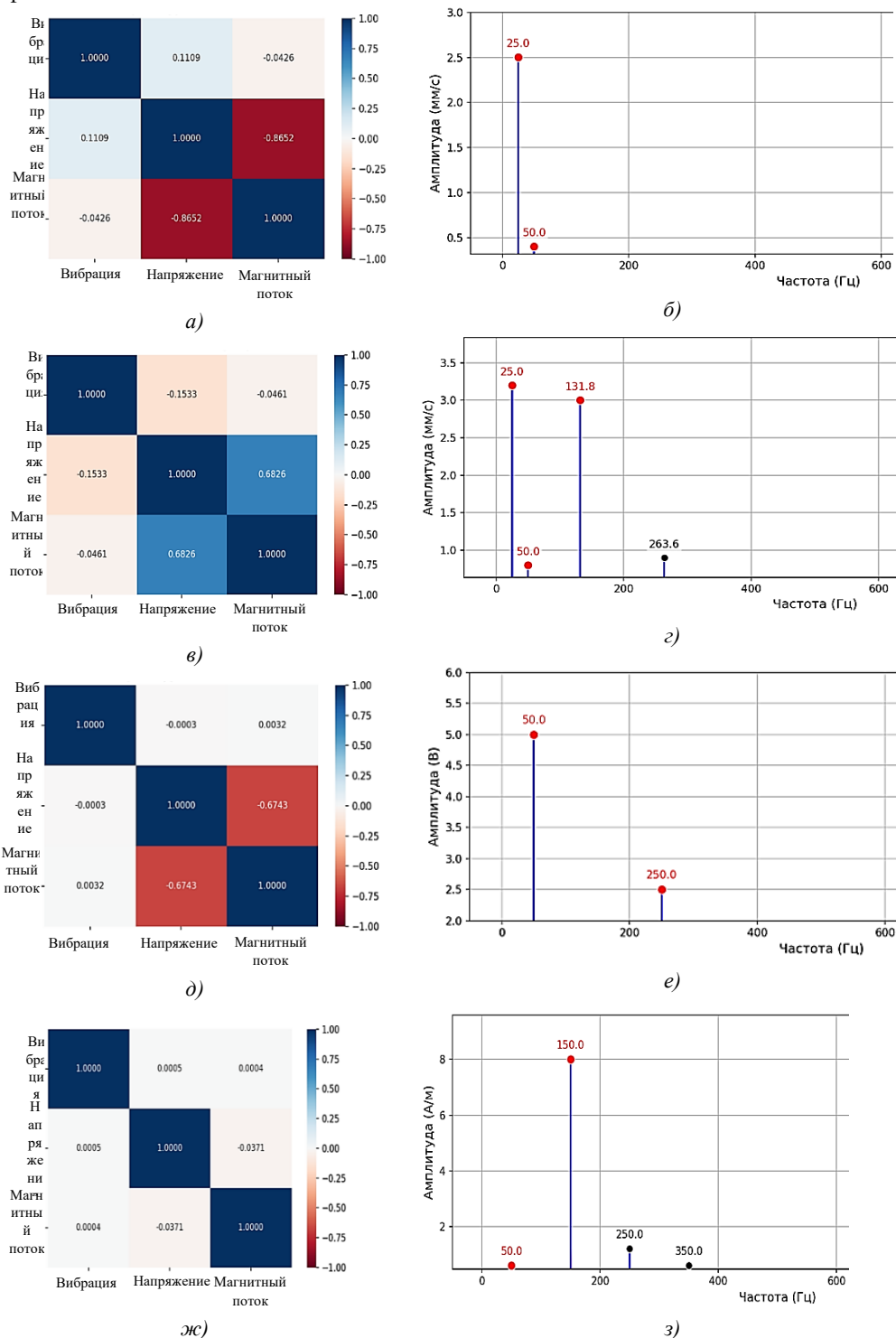


Рис. 3. Интерпретация корреляционных связей и спектральных характеристик для идентификации неисправностей: а) тепловая карта в исправном состоянии; б) спектр вибрации в исправном состоянии; в) тепловая карта при дефекте наружной обоймы подшипника; г) спектр

вибрации при дефекте наружной обоймы подшипника; д) тепловая карта при фазовой асимметрии; е) спектр напряжения при фазовой асимметрии; ж) тепловая карта при размагничивании постоянных магнитов; з) спектр напряженности магнитного поля при размагничивании постоянных магнитов

spectrum in case of a defect in the outer bearing cage; e) a heat map in case of phase asymmetry; f) a voltage spectrum in case of phase asymmetry; g) a heat map in case of permanent magnet demagnetization h) the spectrum of magnetic field strength during demagnetization of permanent magnets

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Отрицательная корреляция между напряжением и магнитным потоком на корреляционной матрице исправного оборудования (рис. 2, а) объясняется сдвигом по фазе между сигналами.

Совмещение спектрального и корреляционного анализа обеспечивает классификацию источника неисправности (по активным частотам и физически связанному каналу) и проверку согласованности проявлений в соседних подсистемах:

- механические дефекты. Спектры вибрации характеризуются выраженными компонентами на частоте вращения (25 Гц) и/или частотами дефектов подшипников и их боковыми полосами (рис. 3, г). Компоненты на частотах дефектов подшипников выявляются и в магнитном потоке (через модуляцию зазора), тогда как напряжение сохраняет спектр исправного состояния. Для тепловой карты корреляций типичны изменения $\Delta\rho_{Vib,Volt}$ и $\Delta\rho_{Volt,Flux}$ (рис. 3, в);

- электрические дефекты. В спектрах напряжения и магнитного поля доминируют гармоники, кратные сетевой (100 Гц, 150 Гц) и селективные составляющие (например, пятая гармоника на частоте 250 Гц) (рис. 3, е); вибрация содержит меньшие по амплитуде ответные компоненты. Корреляционно это проявляется в заметной величине $|\Delta\rho_{Volt,Flux}|$ (общая электрическая/магнитная причина) при малых $\Delta\rho_{Vib,Volt}$, $\Delta\rho_{Vib,Flux}$ (рисунок 3, д);

- магнитные дефекты. Для размагничивания спектр магнитного сигнала демонстрирует снижение первой гармоники на частоте 50 Гц и рост амплитуд нечётных гармоник (150, 250, 350 Гц) (рис. 3, з), тогда как согласованность вибрации с другими каналами существенно не изменяется: $\Delta\rho_{Vib,Volt} \approx 0$. При этом $\rho_{Volt,Flux}$ обычно смещается к нулю вследствие ослабления связи на 50 Гц (рис. 3, ж);

- комбинированные дефекты. В комбинированных сценариях наблюдается одновременное изменение двух и более пар межканальных связей, что выражается в росте нескольких $|\Delta\rho|$ и повышенных значениях $\Delta\rho_{max}$, что отражает мультифизическую природу процесса, на фоне «смешанной» спектральной картины («механические» линии в спектре вибрации совместно с электрическими и магнитными гармониками в спектрах напряжения и магнитного потока).

На рисунке 4 приведена тепловая карта корреляционных связей, соответствующая поученным значениям при измерениях на действующем ГПЭА.

На рисунке 5 приведен пример сравнения спектров анализируемых диагностических сигналов, полученных по результатам измерений на действующем ГПЭА, со спектрами в исправном состоянии.

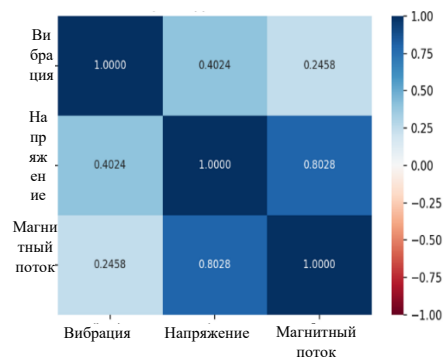


Рис. 4. Тепловая карта, полученная по результатам измерений на действующем ГПЭА Fig. 4. Heat map obtained from the results of measurements at the current GPEA

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Анализ рисунков 4, 5 показывает, что спектры вибрации характеризуются выраженными компонентами на частоте вращения и частотами дефектов подшипников (рис. 5, б); в спектрах напряжения и магнитного поля присутствуют селективные

составляющие (рис. 5, г, е); тепловая карта (рис. 4) характеризуется изменением пар межканальных связей, что выражается в росте нескольких $|\Delta\rho|$ и повышенных значениях $\Delta\rho_{max}$ относительно тепловой карты в исправном состоянии (рис. 3, а).

Совокупность обнаруженных признаков указывает на комбинированный дефект, включающий механические, требующие проверки ротора, подшипников и соосности валов, и электрические неисправности. Выполненная ревизия заднего подшипника СГПМ подтвердила одно из предположений. Для выявления и устранения остальных дефектов требуется ремонт СГПМ, рекомендации даны обслуживающему персоналу.

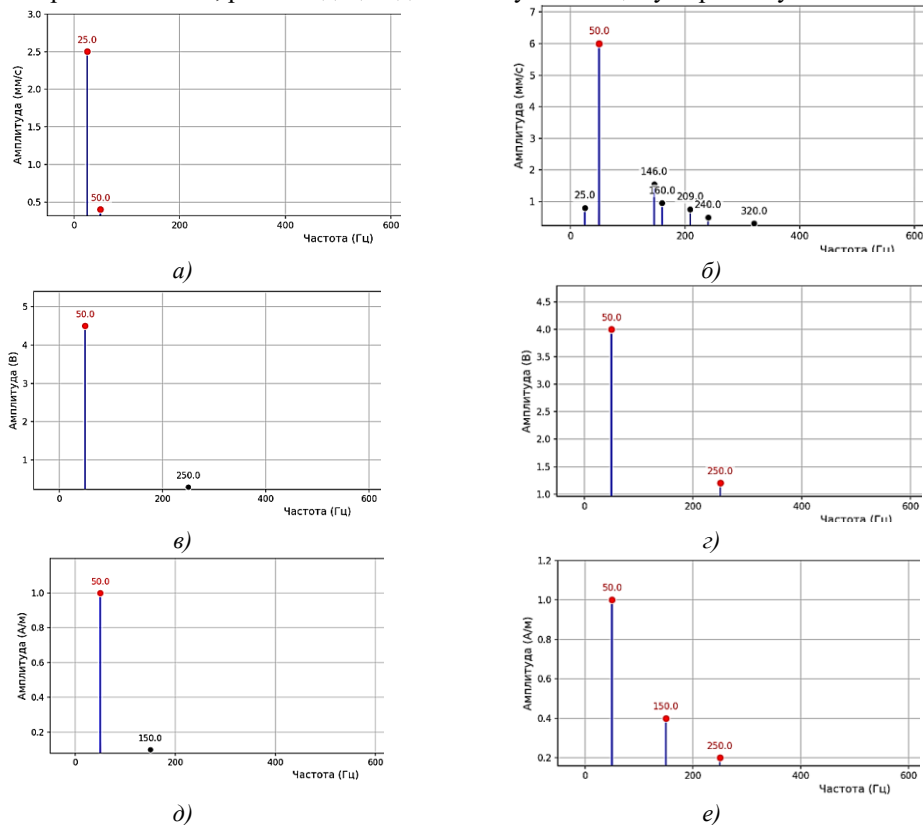


Рис. 5. Интерпретация данных диагностического отчета цифрового тени действующего ГПЭА: а) спектр вибрации в исправном состоянии; б) спектр вибрации в текущем состоянии в) спектр выходного фазного напряжения в исправном состоянии; г) спектр выходного фазного напряжения в текущем состоянии; д) спектр внешнего магнитного поля в исправном состоянии; е) спектр внешнего магнитного поля в текущем состоянии

Fig. 5. Interpretation of the data of the diagnostic report of the digital shadow of the current GPEA: a) the vibration spectrum in good condition; b) the vibration spectrum in the current state; c) the spectrum of the output phase voltage in good condition; d) the spectrum of the output phase voltage in the current state; e) the spectrum of the external magnetic field in good condition; f) the spectrum of the external magnetic field in the current state

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the authors.

Таким образом, совместный учёт спектральных и корреляционных характеристик в рамках цифровой тени обеспечивает строгую, физически интерпретируемую и статистически устойчивую идентификацию неисправностей ГПЭА, что подтверждено как вычислительными экспериментами, так и эмпирическими исследованиями.

Ввиду значительной стоимости объекта исследования и его непрерывного режима работы экономически нецелесообразно намеренное внесение отдельных неисправностей, требующих остановки и последующего ремонта (например, витковых замыканий обмотки статора) для увеличения объема выборки и экспериментального подтверждения предложенной системы. В связи с этим, оценка доверительного интервала и проверка на устойчивость к выбросам будет выполняться в рамках текущей эксплуатации.

Заключение (Conclusions)

1. Впервые продемонстрирована возможность надёжной классификации дефектов газопоршневого электроагрегата с синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов на основе анализа корреляционных коэффициентов между

сигналами вибрации, напряжения и магнитного потока. Установлены устойчивые диагностические признаки типов дефектов, включая комбинированные неисправности.

2. Применение корреляционного подхода в цифровой тени позволяет эффективно интегрировать данные от разнородных датчиков в единую цифровую модель для диагностики.

3. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования корреляционного анализа как ключевого элемента в архитектуре цифровых теней и двойников многосигнальных объектов энергетики.

Литература

1. Зайниев А.В., Хакимьянов М. И. Комплексная диагностика неисправностей синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в составе газопоршневого агрегата с использованием нейронных сетей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17. № 1(65). С. 23-37.

2. Зайниев А.В., Хакимьянов М.И. Анализ пространственно-временных характеристик внешнего магнитного поля синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов для целей диагностики неисправностей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 18. № 4 (68). С. 24-38.

3. Zayniev A.V., Khakimyanov M.I., Nedelchenko O.I. Digital Twin for Fault Diagnosis of Gas-Piston Electric Units on the Basis of Multiphysics Approach. 2025 *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation*. 2025:863-869, doi: 10.1109/UralCon67204.2025.11206603.

4. Исаев А.В., Нефедьев А.И., Исаев И.А. Выявление аварийных режимов силовых электроприводов с применением методов машинного обучения // Технологии электромагнитной совместимости. 2024. № 1(88). С. 3-14.

5. Falekas G., Karlis A. Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects // *Energies*. 2021. Vol. 14. pp. 5933. doi: 10.3390/en14185933.

6. Khalyasmaa A.I., Stepanova A.I., Eroshenko S.A., et al. Review of the Digital Twin Technology Applications for Electrical Equipment Lifecycle Management // *Mathematics*. 2023. Vol. 11(1315). doi: 10.3390/math11061315.

7. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования. 2020. Т.10. № 3(37). С. 327-337. doi: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-33.

8. Jain P., Poon J., Singh J.P., et al. A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, N1. pp. 940-956. doi: 10.1109/TPEL.2019.2911594.

9. PRANA Predictive Analytics Systems, Equipment Operation Monitoring. Доступно по: <https://prana-system.com/>. Ссылка активна на 03 февраля 2026.

10. Hu M., He Y., Lin X., et al. Digital twin model of gas turbine and its application in warning of performance fault // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol. 36. doi: 10.1016/j.cja.2022.07.021.

11. SVVS Narayana P., Ruchir Y., Sabareesh G.R., et al. Optimal sensor placement for identifying multi-component failures in a wind turbine gearbox using integrated condition monitoring scheme // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 187. pp. 108505. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108505.

12. Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3(55). С. 99-113.

13. Eroshenko, S.A. Application of a Risk-Based Approach and Deep Convolutional Neural Networks to Determine the Set of Flight Points in the Diagnostics and Design of Electrical Facilities. In: *Proceedings of the 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*; 2022. pp. 220-224. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016977.

14. Likitjarernkul T., Sengchai K., Duangsoithong R., et al. Correlation Feature Selection Analysis for Fault Diagnosis of Induction Motors. In: Sulaiman H., Othman M., Rahim Y. et al. editors. *Advanced Computer and Communication Engineering Technology. Lecture Notes in Electrical Engineering*; Cham: Springer; 2016; vol. 362. doi: 10.1007/978-3-319-24584-3_104.

15. Bhattacharya D. Diagnosis and condition monitoring of electrical machines using

machine learning techniques // International Journal of Applied Mathematics. 2025. Vol. 38. pp. 1145-1160. doi: 10.12732/ijam.v38i7s.539.

Авторы публикации

Зайниев Азат Венерович – аспирант Уфимского государственного нефтяного технического университета. ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-7692-5827>. Email: Azat70000@gmail.com.

Хакимьянов Марат Ильгизович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3344-7469>. Email: hakimyanovmi@gmail.com.

References

1. Zayniev A.V., Khakimyanov M.I. Comprehensive diagnostics of malfunctions of a permanent magnet synchronous generator as part of a gas piston unit using neural networks] // *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2025. Vol. 17. No. 1 (65), P. 23-37. (In Russ).
2. Zayniev A.V., Khakimyanov M.I. Analysis of the spatiotemporal characteristics of the external magnetic field of a synchronous generator with excitation from permanent magnets for fault diagnosis purposes // *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2025. Vol. 18. No. 4 (68). P. 24-38. (In Russ).
3. Zayniev A.V., Khakimyanov M.I., Nedelchenko O.I. Digital Twin for Fault Diagnosis of Gas-Piston Electric Units on the Basis of Multiphysics Approach. 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation. 2025:863-869, doi: 10.1109/UralCon67204.2025.11206603.
4. Isaev AV., Nefed'ev AI., Isaev IA. Vyyavlenie avarijnykh rezhimov silovykh ehlektroprivodov s primeneniem metodov mashinnogo obucheniya. *Tekhnologii ehlektromagnitnoj sovmestimosti*. 2024; 1(88):3-14. (In Russ).
5. Falekas G., Karlis A. Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects. *Energies*. 2021;14:5933. doi: 10.3390/en14185933.
6. Khalyasmaa A.I.; Stepanova A.I.; Eroshenko S.A et al. Review of the Digital Twin Technology Applications for Electrical Equipment Lifecycle Management. *Mathematics*. 2023;11:1315. doi: 10.3390/math11061315.
7. Massel' L.V., Vorozhova T.N. Ontologicheskij podkhod k postroeniyu cifrovyykh dvoynikov ob'ektov i sistem ehnergetiki. *Ontologiya proektirovaniya*. 2020; 10:3(37):327-337. doi: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-33.
8. Jain P., Poon J., Singh J.P., et al. A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020;35(1):940-956. doi: 10.1109/TPEL.2019.2911594.
9. PRANA Predictive Analytics Systems, Equipment Operation Monitoring. Available at: <https://prana-system.com/>. Accessed: 03 Feb. 2026.
10. Hu M., He Y., Lin X., et al. Digital twin model of gas turbine and its application in warning of performance fault. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022;36. doi: 10.1016/j.cja.2022.07.021.
11. SVVS Narayana P., Ruchir Y., Sabareesh G.R., et al. Optimal sensor placement for identifying multi-component failures in a wind turbine gearbox using integrated condition monitoring scheme. *Applied Acoustics*. 2022;187:108505. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108505.
12. Khalyasmaa AI, Revenkov IS, Sidorova AV. Application of digital twin technology for analysis and prediction state of power transformer equipment. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022;14;3(55):99-113. (In Russ).
13. Eroshenko, S.A. Application of a Risk-Based Approach and Deep Convolutional Neural Networks to Determine the Set of Flight Points in the Diagnostics and Design of Electrical Facilities. In: *Proceedings of the 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*; 2022. pp. 220-224. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016977.
14. Likitjarernkul T., Sengchaui K., Duangsoithong R., et al. Correlation Feature Selection Analysis for Fault Diagnosis of Induction Motors. In: *Sulaiman H., Othman M.*

Rahim Y. et al. editors. Advanced Computer and Communication Engineering Technology. Lecture Notes in Electrical Engineering; Cham: Springer; 2016; vol. 362. doi: 10.1007/978-3-319-24584-3_104.

15. Bhattacharya D. Diagnosis and condition monitoring of electrical machines using machine learning techniques. *International Journal of Applied Mathematics*. 2025;38:1145-1160. doi: 10.12732/ijam.v38i7s.539.

Authors of the publication

Azat V. Zayniev – Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-7692-5827>. Email: Azat70000@gmail.com.

Marat I. Khakimyanov – Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3344-7469>. Email: hakimyanovmi@gmail.com.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **30.03.2026 г.**

Отредактировано **10.06.2026 г.**

Принято **15.06.2026 г.**