

ИНСТРУМЕНТЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е.А. Абидова, В.В. Бойко, А.А. Лапкис (ВИТИ НИЯУ МИФИ)

Предложены методики выбора наиболее важных контролируемых параметров при построении систем технической диагностики. Для этого предлагается проведение анализа зарегистрированной диагностической информации инструментами кластерного анализа: метриками в многомерном пространстве и профилями компактности. Приведен пример такого подхода для системы виброакустического мониторинга машины перегрузочной (МП) энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Предлагаемый подход показал важность контроля формы распределения вибрационного сигнала в дополнение к традиционному контролю по общему уровню вибрации.

Ключевые слова: техническая диагностика, техническое состояние, обработка сигналов, кластерный анализ, метрика, профиль компактности, машина перегрузочная, АЭС.

Введение

В настоящее время методы технической диагностики широко применяются в рамках современных стратегий технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электроприводного оборудования, основанных на техническом состоянии и риске¹. Техническая диагностика позволяет оптимизировать затраты на ремонт, сократить время и ресурсы, необходимые для поиска дефекта, выделить оборудование с динамикой ухудшения технического состояния.

Для электроприводных механизмов обычно применяют диагностику по вибрации отдельных узлов и электрическим сигналам питающей сети электропривода. Научно-исследовательский институт атомного энергетического машиностроения — подразделение ВИТИ НИЯУ МИФИ — имеет более чем 30-летний опыт диагностики трубопроводной арматуры, насосов, вентиляторов, приводов органов регулирования реакторов и перегрузочных машин атомных станций [1–3].

В настоящей работе рассмотрен способ обоснования набора диагностических параметров, которые должны определяться системой технической диагностики, с целью повышения качества диагностирования.

Оба указанных метода диагностики (по вибрационным и электрическим сигналам) подразумевают большой набор диагностических параметров, которые можно вычислить по сигналу. Например, для виброакустического метода контроля параметрами могут являться:

- среднееквадратическое значение (СКЗ) виброскорости или виброускорения;
- пиковое значение виброскорости или виброускорения;
- амплитуды гармоник на детерминированных частотах данного механизма;
- параметры, характеризующие форму распределения вибрационного сигнала: пик-фактор, коэффициент эксцесса, энтропийные показатели сигнала и т. п.

Выбор параметров для контроля может быть однозначно определен ГОСТ (например, комплекс ГОСТ ИСО 10816 предписывает оценивать состояние оборудования по СКЗ виброскорости), а может быть за-

ранее неизвестен. В этом случае нужно использовать такой набор параметров, который позволит различать: диагностические сигналы для исправных состояний на различных режимах, исправные состояния от неисправных, неисправные состояния между собой.

Инструменты кластерного анализа

Кластерный анализ — современная область знаний, в которой исследуется качество разделения данных на классы. Таким образом, в задачах технической диагностики можно воспользоваться наработанным инструментарием кластерного анализа.

К инструментам, пригодным для применения в технической диагностике, отнесем метрики и профили компактности. Метрики представляют собой расстояния в многомерном пространстве признаков (размерность пространства равна числу параметров диагностирования), а профиль компактности показывает, какая доля соседей данной точки относится к другому классу. При этом понятие «сосед» также связано с метрикой в том же пространстве признаков.

Если каждый диагностический параметр представить как координату и составить набор из n параметров, то один зарегистрированный сигнал (или фрагмент сигнала) можно отобразить как одну точку в n -мерном пространстве параметров $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. При этом точки, зарегистрированные на одинаковых режимах, можно рассматривать как кластеры, вычисляя характерные метрики внутри них и между ними.

Для вычисления метрик в кластерном анализе общепринятой является практика обезразмеривания или нормирования параметров. При использовании данных различной размерности и вариабельности удобно применение z -нормирования, когда каждая величина измеряется в безразмерных единицах ее среднеквадратического отклонения (СКО). При этом нормированное значение признака X_j для k -й точки равно

$$X_{j(k,n)} = \frac{X_{jk} - M(X_j)}{S(X_j)},$$

где $M(X)$ — математическое ожидание, $S(X)$ — СКО в массиве значений X_j .

¹ СТО 1.1.1.01.0069-2017 Стандарт организации. Правила организации технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций.

Для вычисления метрик наиболее употребительным является Евклидово расстояние. Расстояние d между точками k и m в нормированном пространстве составит:

$$d(k, m) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{j(k,n)} - X_{j(m,n)})^2}.$$

В качестве метрик в настоящей работе применены [4]:

— среднее расстояние между точками внутри кластера:

$$d_{cp(A)} = \overline{d_{k,m}}.$$

— наибольшее расстояние до ближайшего соседа в кластере

$$d_{ближ(A)} = \max \{ \min(d_{k,m}) \}.$$

Для оценки того, насколько кластеры удалены в пространстве признаков, использованы:

— средние попарные расстояния между точками

$$\overline{d(A, B)} = \frac{\sum_{k=1}^{NB} \sum_{m=1}^{NA} d(A_k, B_m)}{NA \cdot NB};$$

— минимальные расстояния между ближайшими точками разных кластеров

$$d_{min}(A, B) = \min(d(A_k, B_m)) \text{ при } k = 1..NA, m = 1..NB,$$

где NA и NB — соответственно числа элементов в кластерах A и B .

Визуализация качества разделения режимов механизма тем или иным набором признаков может быть выполнена с помощью профиля компактности, который определяется между двумя классами (кластерами) данных A и B по формуле [5]:

$$R(j, A, B) = \frac{1}{NA + NB} \sum_{j=1}^m [y_j \neq y_{j,xi}],$$

где $R(j)$ — доля объектов выборки, для которых j -й сосед лежит в другом классе; X^m — выборка; y_i и $y_{j,xi}$ — элементы обучающей и контрольной выборки, m — длина выборки, NA и NB — число элементов в классах A и B .

Плавный рост профиля $R(j)$ указывает на недостаточно качественное разделение данных, при этом идеальному разделению соответствует скачкообразное изменение R от нуля до единицы при $j=NA$ (рис. 1).

Возьмем для примера два одномерных набора данных, составленных из нулей и из единиц (рис. 1а). На графике мы видим четкое разделение между двумя кластерами, что подтверждает данный профиль компактности. Если же взять наборы данных с числами от 1 до 30 и от 30 до 1 (рис. 1б), то профиль компактности таких данных показывает, что кластеры смешаны в пространстве.

Описанный механизм вычисления метрик и профилей компактности был реализован в графической среде программирования LabView.

Величины метрик и форма профиля компактности будут изменяться в зависимости от того, какой набор параметров диагностирования применен. Для использования в системе диагностики набор должен обладать свойствами идентифицируемости и изолируемости, то есть способности данного набора параметров разделять нормальные режимы работы МП как между собой, так и от режимов с отклонениями [6]. Для предлагаемого подхода это значит, что набор параметров должен быть выбран таким, чтобы метрики между классами данных были максимальны. Математически это будет означать рост соотношений:

$$\frac{\overline{d(A, B)}}{d_{ближ(A)}}; \frac{\overline{d(A, B)}}{d_{cp(A)}}$$

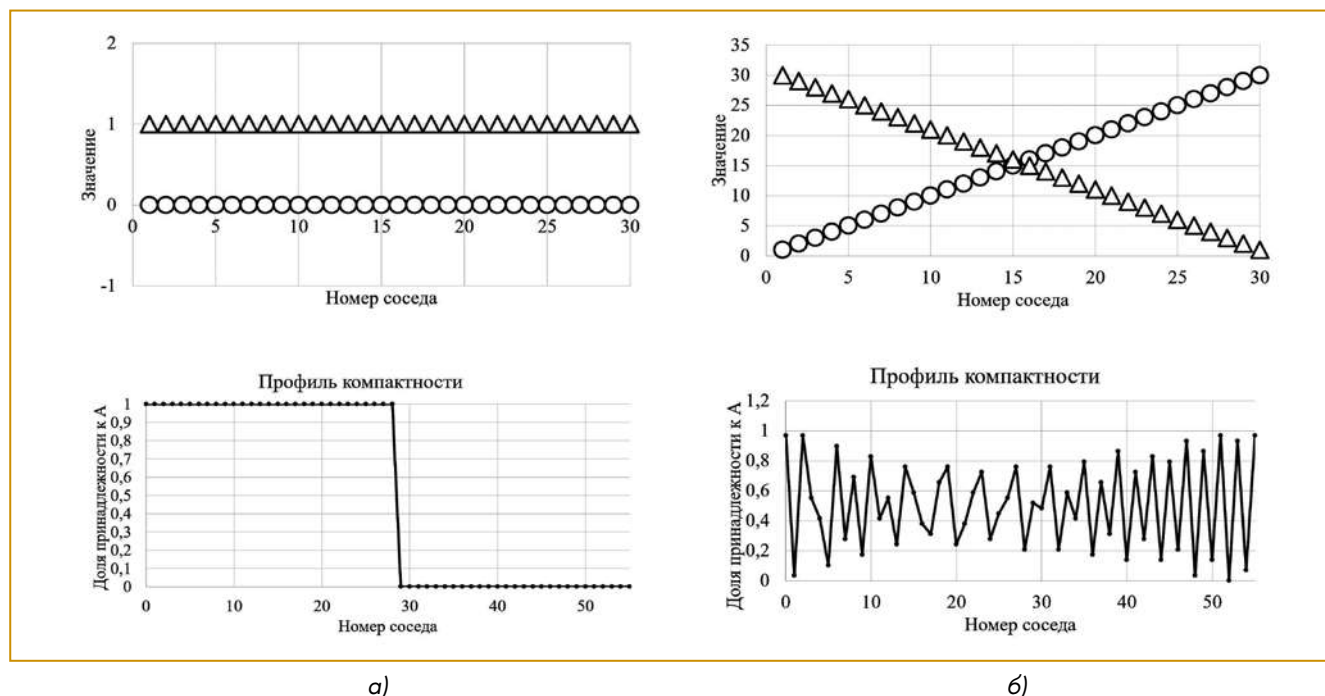


Рис. 1. Примеры образцовых профилей компактности

ром ВВЭР-1000, разработанной ВИТИ НИЯУ МИФИ.

Объект диагностики

Перегрузочная машина (МП) атомной станции — это дистанционно управляемый автоматизированный манипулятор, по конструкции подобный мостовому крану, снабженный специализированным грузоподъемным органом — рабочей штангой. Конструкция МП схематично показана на рис. 2.

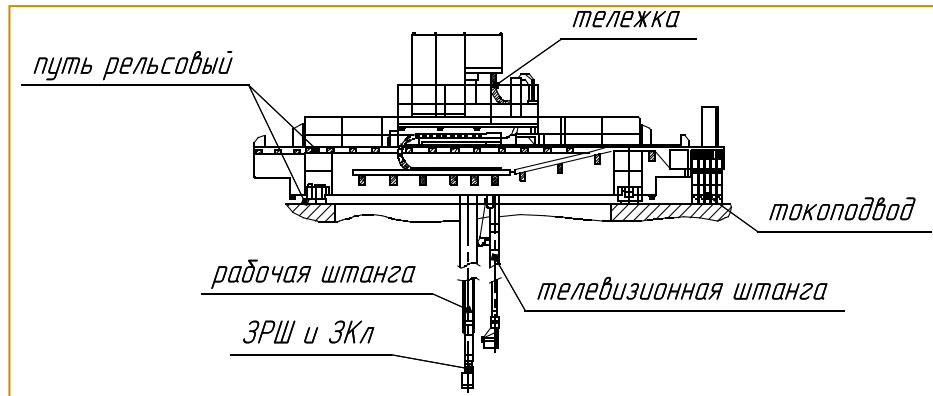


Рис. 2. Схематическая конструкция машины перегрузочной энергоблоков ВВЭР-1000

Форма профиля компактности $R(k, A, B)$ при этом должна соответствовать наилучшему разделению классов A и B , то есть подобной рис. 1а.

Для выбора наиболее значимых параметров предлагается следующая последовательность:

- обезразмерить анализируемые параметры с применением z -нормирования;
- построить полученные данные для различных режимов механизма как кластеры точек в многомерном пространстве диагностических параметров;
- вычислить основные характерные метрики полученных кластеров: среднее расстояние внутри кластера, максимальное расстояние до ближайшего соседа внутри кластера, среднее расстояние между кластерами;
- построить профили компактности между исследуемыми режимами;
- отследить изменение метрик и деформацию профилей компактности, исключая по очереди признаки;
- выбрать наиболее важные признаки из числа тех, которые при их исключении сильнее всего снижают расстояние между кластерами с различными режимами работы механизма и выравнивают профиль компактности между ними.

Рассмотрим ниже пример применения такого подхода к системе виброакустического контроля (СВК) перегрузочной машины энергоблока АЭС с реакто-

ром ВВЭР-1000, разработанной ВИТИ НИЯУ МИФИ. Мост МП перемещается по рельсовому пути реакторного отделения, а тележка — по рельсовому пути на раме моста. Особенности перегрузочной машины как объекта контроля определяют ее режимы работы — сочетаниями направления и скорости движения с типом перегружаемого изделия для каждого механизма. К перегружаемым изделиям (ПИ) относятся:

- ядерное топливо в тепловыделяющих сборках (ТВС);
- поглощающие стержни (ПС), иначе называемые кластерами, предназначенные для управления цепной реакцией деления в реакторе;
- некоторые другие специальные грузы.

Рабочая штанга, снабженная двумя захватами (для ТВС и для ПС), размещена на тележке. Для подъема и перемещения ядерного топлива предусмотрен механизм захвата рабочей штанги (ЗРШ), а для подъема и перемещения ПС — механизм захвата кластера (ЗКл). Сцепление с ядерным топливом осуществляется фиксатором — специальным винтовым захватом, управляемым отдельным механизмом фиксатора. На рис. 3 показана конструкция механизма ЗКл с элементами механизма ЗРШ.

В состав каждого из описанных механизмов входит электродвигатель, тормоз, редуктор и барабан. Механизмы ЗРШ, ЗКл и фиксатора работают в обоих вертикальных направлениях (вверх и вниз), а их ско-

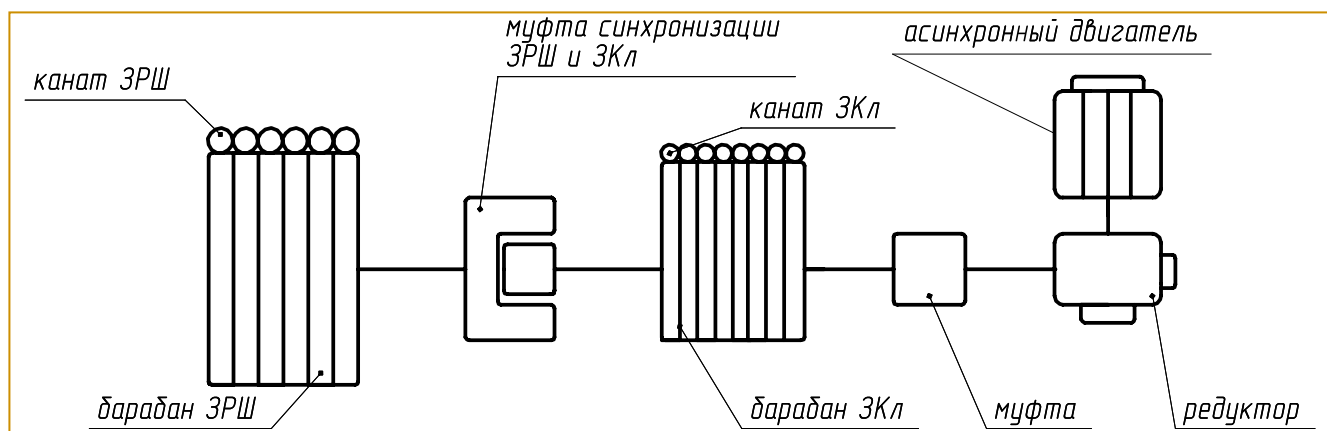


Рис. 3. Принципиальные схемы обследуемых механизмов



Рис. 4. Пример отображения вибросигналов механизма ЗРШ на плоскости

Общее число режимов работы МП достигает нескольких десятков, что накладывает повышенные требования к системе контроля: признаки технического состояния должны обеспечивать качественное разделение как исправных и неисправных состояний, так и исправных состояний на разных режимах между собой.

Применение подхода к системе виброакустического контроля на АЭС

Средства виброакустического контроля, традиционно применяемые на АЭС, преимущественно анализируют техническое состояние объекта (обычно это паровая турбина, насос или вентилятор или иной вращающийся с высокой скоростью механизм) по СКЗ виброскорости.

Более продвинутое устройство (спектроанализаторы с экспертным программным обеспечением) применяют инструменты спектрального анализа для поиска узлов, возбуждающих колебания на частотах, детерминированных для данного механизма (частоты зацепления зубьев, оборотные, сетевые и т. п.) [7].

рость определяется условиями ядерной безопасности, установленными заводом-изготовителем топлива и поглощающих стержней.

Вибрационное состояние основных узлов и механизмов машины перегрузочной может быть связано с:

- режимом работы механизма (весовая нагрузка, скорость, направление движения и т. п.);
- техническим состоянием механизма (износ элементов, виброударные взаимодействия).

Таблица 1. Набор анализируемых режимов

Рисунок	Режим слева профиля			Режим справа профиля		
	Перегружаемое изделие	Скорость, м/мин	Направление	Перегружаемое изделие	Скорость, м/мин	Направление
1А, 2А	ТВС	6,0	вверх	ТВС	0,6	вниз
1Б, 2Б	Нет	6,0	вверх	Нет	6,0	вниз

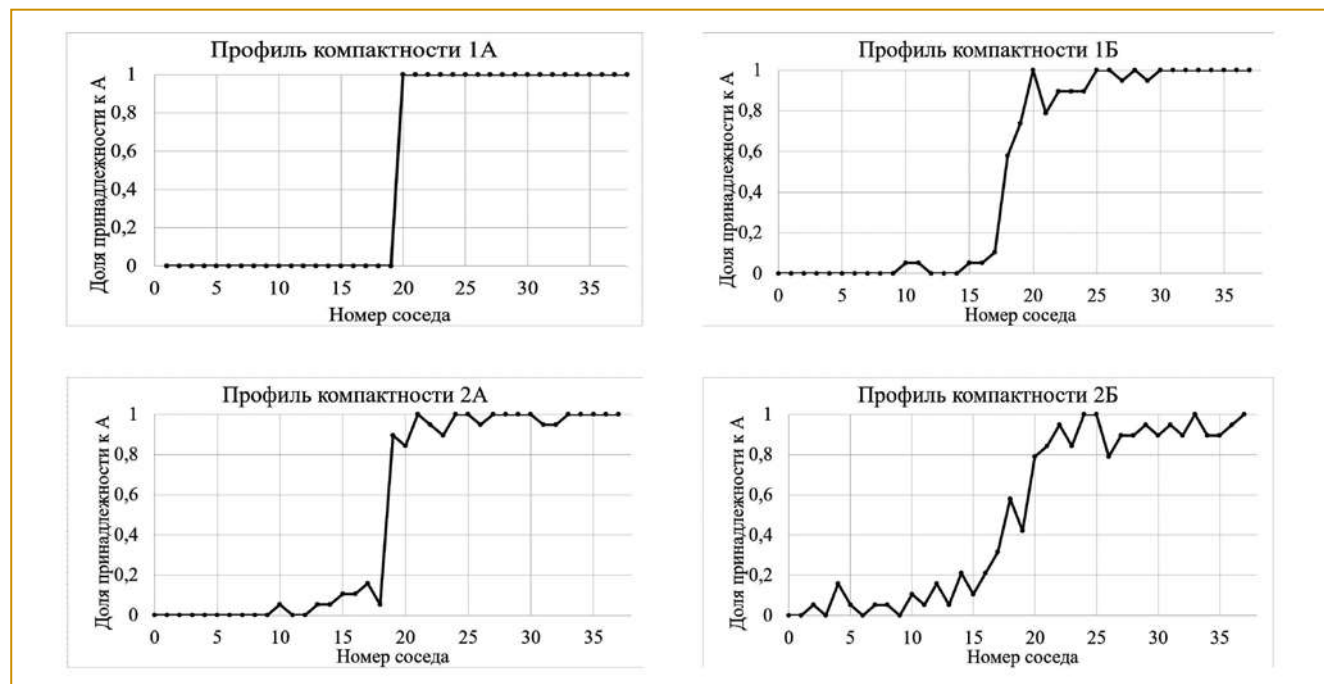


Рис. 5. Типовые профили компактности разделения режимов механизма ЗРШ
1 – набор параметров без пик-фактора, 2 – набор параметров без коэффициента эксцесса

Таблица 2. Результат расчета метрик

Изменение режима	Изменение скорости	Изменение весовой нагрузки	Изменение направления
Режим А – слева профиля	Вверх с ТВС, 6 м/мин	Вверх с ТВС, 6 м/мин	Вверх без ТВС, 6 м/мин
Режим Б – справа профиля	Вверх с ТВС, 0,6 м/мин	Вверх без ТВС, 6 м/мин	Вниз без ТВС, 6 м/мин
Набор признаков без пик-фактора			
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима А	0,30...1,58	0,30...1,58	0,21...1,10
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима Б	0,14...4,09	0,39...2,46	0,41...4,12
Расстояние между точками из режима А до точек из режима Б	13,49...17,26	0,44...5,96	3,51...6,44
Набор признаков без эксцесса			
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима А	0,20...1,60	0,20...1,60	0,15...1,19
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима Б	0,11...3,56	0,11...1,97	0,09...5,46
Расстояние между точками из режима А до точек из режима Б	2,69...9,19	0,22...5,27	1,04...4,16

Авторами было показано, что для механизмов МП, состоящих из низкочастотных вращающихся узлов, а также узлов с поступательным движением груза, спектральный анализ также позволяет выявить в вибросигнале влияние отдельных кинематических пар и валов редукторов приводов ЗРШ и ЗКл [8]. При этом прямое применение комплекса ГОСТ ИСО 10816 к механизмам МП не предусмотрено.

В рассматриваемой СВК машины перегрузочной датчики виброускорения установлены на рамы приводов ЗРШ и ЗКл, после чего оцифрованный сигнал передается на промышленный компьютер для обработки и архивации. Сведения о режиме работы в данный момент времени СВК получает по сетевому кабелю от сервера системы управления МП [8,9]. Вычисление всех диагностических параметров проведено программно на фрагментах сигнала одинаковой длины, равной 1 с. Анализ подверглись перемещения механизмов захвата кластера и захвата рабочей штанги. Для анализа использовано программное обеспечение собственной разработки, созданное в графической среде программирования LabView.

Для механизма ЗРШ использованы его вибрационные параметры на постоянной скорости:

- среднеквадратическое значение виброускорения (СКЗ);
- пиковое значение виброускорения (ПИК);
- пик-фактор виброускорения (ПФ);
- коэффициент эксцесса (КЭ).

Рассмотрим пример применения подхода к вибрационным параметрам привода ЗРШ. Построение кластеров показало, что они имеют преимущественно вытянутую форму эллипсоидов или цепочек. На рис. 4 показаны примеры таких кластеров, спроецированные на плоскость {СКЗ; КЭ}. В этом случае источник [4] рекомендует использование метрики расстояния до ближайшего соседа, поскольку среднее расстояние внутри такого кластера получается завышенным. Отметим, что экспериментальные данные содержат выбросы, неизбежные при промышленном эксперименте.

На рис. 5 показаны профили компактности между режимами работы механизма ЗРШ в соответствии с табл.

Результаты расчета метрик для выбранных режимов приведены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что исключение эксцесса снижает метрику расстояния между кластерами с различными режимами работы МП сильнее, чем исключение пик-фактора. Таким образом, учитывая, что физический смысл параметров близок (мера островежности распределения сигнала), следует предпочесть использование коэффициента эксцесса. Аналогичный вывод был сделан при анализе остальных режимов работы обследуемой машины.

Для данного примера анализ метрик и профилей компактности показал:

- исключение из набора параметров коэффициента эксцесса виброускорения способствует ухудшению изолируемости — разделения режимов МП в пространстве признаков;
- при изменении скорости движения механизма его режимы эффективнее всего разделяются в пространстве признаков, то есть определяющим режимным параметром для оценки вибрационного состояния МП является скорость;
- практически никакого влияния на вибрационное состояние не оказывает весовая нагрузка на механизм, выражаемая как наличие или отсутствие в захвате перегружаемого изделия.

Заключение

Набор диагностических параметров при создании системы диагностики механизма, работающего на большом числе режимов, требует обоснования с точки зрения свойства изолируемости наборов данных. Для этого могут быть эффективно применены инструменты кластерного анализа — метрики и профили компактности. Для обоснования набора диагностических параметров в данной работе предложен алгоритм анализа.

Применение инструментов кластерного анализа к разработке системы вибродиагностики перегрузочной машины АЭС позволило:

Все в этом мире движется - вагон ли трамвая, пароходы, паровозы, - все это движется вовсе не электрической силой, не углем, а нашим разумом. Несомненно, не будь этого, не было бы электричества.

В.П. Карцев

— ранжировать диагностические параметры вибросигналов по важности;

— ввести коэффициент эксцесса виброускорения в число наиболее важных характеристик вибрационного состояния механизмов;

— снизить значимость для анализа диагностических параметров, не улучшающих идентификацию режимов работы механизма.

Список литературы

1. Никифоров В.Н. Контроль технического состояния рабочей штанги перегрузочной машины для ВВЭР-1000/В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева, А.В. Паламарчук, Ю.Н. Елзов, Л.А. Первушин//Теплоэнергетика. — 2003. — № 5. — С. 33-34.
2. Пугачева О.Ю. Интерактивная система паспортизации оборудования АЭС/О.Ю. Пугачева, В.И. Сиротина, Ю.Е. Ульянова//Глобальная ядерная безопасность. — 2013. — № 4 (9). — с. 46-52.

3. Абидова Е.А. Технологии анализа диагностических параметров электроприводной арматуры на действующих энергоблоках Нововоронежской АЭС/Е.А. Абидова, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева, М.Т. Слепов//Электротехнические комплексы и системы управления. — 2014. — № 4. — с. 16-22.
4. Электронный учебник по статистике. М. StatSoft, Inc. 2012. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>
5. Воронцов К.В. Профили компактности и выделение опорных объектов в метрических алгоритмах классификации/К.В. Воронцов, А.О. Колосков//Искусственный Интеллект. — 2006. — С. 30-33.
6. Муха Ю.П. Информационно-измерительные системы с адаптивными преобразованиями. Управление гибкостью функционирования: монография/Ю.П. Муха, О.А. Авдеюк, И.Ю. Королева. ВолгГТУ. — Волгоград. 2010. — 303 с.
7. Русов В.А. НПФ «Вибро-центр». Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам/В.А. Русов/<https://vibrocenter.ru/book2012.htm>
8. Лапкис А.А. Виброакустическая паспортизация режимов работы машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР/А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, Л.А. Первушин//Глобальная ядерная безопасность. — 2018. — № 2 (27). — С. 82-90.
9. Лапкис А.А. Вопросы виброакустической паспортизации процессов перегрузки ядерного топлива энергоблоков ВВЭР/А.А. Лапкис, И.В. Малахов, В.Н. Никифоров, В.П. Поваров//Гр. междунар. научно-практич. конф. «55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом». Нововоронеж, 2019.

Абидова Елена Александровна — канд. техн. наук, научный сотрудник, Бойко Виктория Владимировна — студент, Лапкис Александр Аркадьевич — главный специалист Волгодонского инженерно-технического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», (г. Волгодонск, Ростовская обл.). E-mail: abidova@mail.ru, bojkina98@gmail.com, aalapkis@mephi.ru

КРОК разработал передовую систему обучения на базе VR для Пермского «УРАЛХИМа»

Филиал «ПМУ» холдинга «УРАЛХИМ» внедрил тренажер виртуальной реальности для обучения электромонтеров. Решение позволит специалистам предприятия отрабатывать навыки оперативных переключений на электротехническом оборудовании в безопасной среде, а также сократит время обучения квалифицированных электромонтеров и упростит подготовку опытных сотрудников к аттестации. Разработчиком новой обучающей системы выступила команда «КРОК Иммерсивные технологии» — бизнес-подразделение ИТ-компании КРОК.

Тренажер расположен в учебном классе Пермского филиала «УРАЛХИМ» и состоит из аппаратного блока на базе системы виртуальной реальности HTC Vive Pro и разработанного экспертами КРОК программного обеспечения. В состав виртуального тренажера вошли два сценария. Первый — вывод в ремонт комплектного распределительного устройства (КРУ) 6 кВ первой секции шин распределительной подстанции №15 (РП15). Второй — ввод этого оборудования в работу.

Эксплуатация таких электроустановок, как КРУ требует от персонала высокой квалификации и точных действий. Ошибки в работе с подобным оборудованием могут иметь неблагоприятные последствия для всего предприятия — от вынужденных простоев оборудования и, соответственно, финансовых издержек до несчастных случаев среди полевых сотрудников. Перед допуском к проведению оперативных переключений в электроустановках электромонтер изучает теоретический материал, а практиковаться

в реальной жизни может лишь один раз в год во время плановых остановочных ремонтов. При помощи VR-тренажера отрабатывать и доводить до автоматизма навыки можно каждый день, что напрямую влияет на скорость и качество обучения, а также способствует снижению показателя LTIFR (коэффициент частоты травм с временной потерей трудоспособности).

Сценарии тренажера включают 14 глав, каждая из которых содержит определенный объем организационных и оперативных мероприятий, к примеру «подготовка к выводу в ремонт и ввод в параллель». Общее время прохождения всех глав по сценариям занимает 4...6 ч непрерывной работы в формате тестирования на виртуальном тренажере.

Также в тренажере предусмотрено формирование отчетов о пройденном обучении и тестировании. Результаты автоматически отправляются на почту руководителю в формате таблицы Excel вместе с видеозаписями обучающих сессий, чтобы была возможность провести разбор по итогам пройденного обучения или аттестации. Отчет включает оценку по ряду параметров — от выбора СИЗ до последовательности действий в рамках оперативных мероприятий. Управление тренажером осуществляется из панели администратора, где можно выбирать сценарии и отдельные главы, назначать обучение конкретному электромонтеру, выдавать права доступа и выгружать статистику за любой период.

В 2021 г. планируется развитие системы и масштабирование тренажера новыми сценариями.

[Http://www.croc.ru](http://www.croc.ru)