

КОНТРОЛЬ РАБОТЫ МАШИНЫ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ С ПОМОЩЬЮ ОТОБРАЖЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИЗНАКОВ

© 2020 г. Е. А. Абидова¹, В. В. Бойко¹, А. А. Лапкис^{1,*}

¹ Волгодонский инженерно-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Волгодонск, 347360, Россия

*e-mail: aalapkis@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.05.2020 г.

После доработки 08.11.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

В работе проанализированы результаты применения методов технической диагностики к контролю технического состояния машины перегрузочной энергоблока ВВЭР-1000. Оперативный контроль вибрационного состояния ее механизмов затруднен обилием возможных режимов работы, различающихся скоростью, направлением движения и весовыми нагрузками на захватах. С помощью инструментов кластерного анализа показано, какие вибрационные параметры позволяют обеспечить наилучшее разделение режимов работы механизмов в пространстве признаков.

На данных промышленного эксперимента на Ростовской АЭС построены типичные кластеры точек, соответствующих различным режимам работы механизмов МП. Показана необходимость использования как традиционных вибрационных параметров, так и коэффициента эксцесса виброускорения, учитывающего форму распределения вибрации. Анализ профилей компактности и соотношений между расстояниями внутри и между построенными кластерами позволил выявить режимные параметры, которые больше всего оказывают влияние на вибрационное состояние механизмов.

Ключевые слова: ВВЭР, перегрузка топлива, машина перегрузочная, диагностика, техническое состояние, кластеризация, кластерный анализ, пространство признаков, профиль компактности

DOI: 10.1134/S2304487X20050028

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В рамках задач, поставленных АО “Концерн Росэнергоатом” в части модернизации перегрузочных машин действующих энергоблоков АЭС, НИИ атомного энергетического машиностроения ВИТИ НИЯУ МИФИ в течение более чем 15 лет выполняет работы по обследованию, оценке технического состояния и ресурсных характеристик машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР [1–3]. Практический опыт по поставке и сопровождению каналов виброакустического контроля на действующие и строящиеся АЭС (энергоблок № 1 Ростовской АЭС, энергоблоки 1 и 2 Тяньваньской АЭС) показал, что 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).

Постоянный мониторинг работы МП методами технической диагностики позволит повысить эффективность ее эксплуатации и сократить затраты времени на поиск дефектов и ремонт механизмов.

К особенностям перегрузочной машины как объекта контроля следует отнести огромное количество возможных режимов — сочетаний направления и скорости движения с типом перегружаемого изделия для каждого механизма (захват кассеты, захват кластера). Число таких режимов 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.

2. ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ

Традиционно применяемые на оборудовании АЭС виброметры и виброанализаторы преиму-

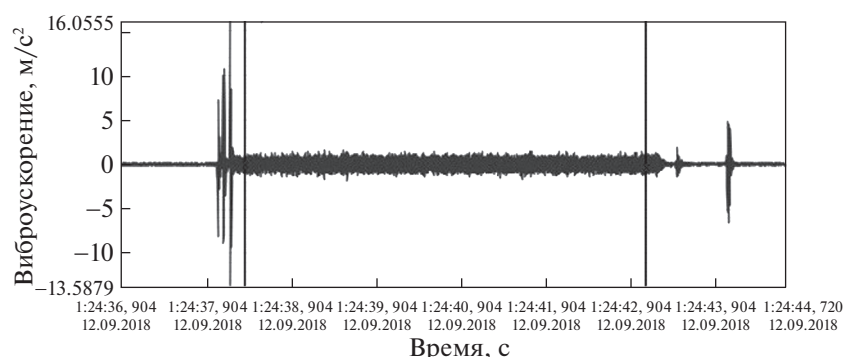


Рис. 1. Циклограмма срабатывания механизма фиксатора.

шественно делают оперативный вывод о техническом состоянии объекта (обычно это паровая турбина, насос или вентилятор, или иной вращающийся с высокой скоростью механизм) по изменению общего уровня вибрации. Экспертные системы, кроме того, применяют широко развитый математический аппарат спектрального анализа для поиска деталей, возбуждающих характерные колебания на соответствующих детерминированных частотах [4].

Авторами было показано ранее, что для механизмов МП, состоящих из низкочастотных вращающихся узлов, а также узлов с поступательным движением груза, спектральный анализ также позволяет выявить «звучание» отдельных кинематических пар и валов редуктора [5]. При этом применение наиболее распространенного подхода анализа по общему уровню вибрации для механизмов МП затруднено в связи с ограниченностью применения соответствующих ГОСТ [6] к их приводам.

В связи с этим выбор наиболее значимых признаков, описывающих вибрационное состояние механизмов машины перегрузочной, должен быть выполнен на основе промышленного эксперимента. Критерием важности того или иного параметра будут являться свойства идентифицируемости и изолируемости — способности данного набора параметров обеспечить различение нормальных режимов работы МП и режимов с отклонениями [7]. В качестве демонстрации подхода в настоящей работе использованы признаки вибрационного состояния механизма:

- среднеквадратическое значение виброускорения;
- пиковое значение виброускорения;
- пик-фактор;
- коэффициент эксцесса виброускорения.

Задача контроля в рассматриваемой системе сводится к необходимости оценить принадлежность вновь регистрируемых данных к известным классам. В данной работе требуется найти набор

координат, в которых имеющиеся данные будут разделяться в пространстве состояний между известными классами наилучшим образом, для улучшения качества оценки новых сигналов. При этом имеющиеся данные получены на действующей перегрузочной машине АЭС при заведомо известном состоянии оборудования и известных режимах.

В качестве параметра в связи с наличием на Ростовской АЭС каналов виброакустического контроля МП, оснащенных виброакселерометрами, выбрано виброускорение, а вычисление всех признаков проведено программно на фрагментах сигнала одинаковой длины, равной одной секунде. Анализ подверглись перемещения механизмов захвата кластера (ЗКл) и захвата рабочей штанги (ЗРШ).

Для механизма фиксатора (винтового захвата) ТВС, циклограмма срабатывания которого приведена на рис. 1, построен индивидуальный виброакустический портрет срабатывания, содержащий 9 параметров, показанных на рис. 2. В его состав были включены амплитуды пиков виброускорения и длительности промежутков между ними.

Параметры портрета срабатывания фиксатора приведены на рис. 2.

3. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ВЫБОРА ПРИЗНАКОВ СОСТОЯНИЯ

Для выбора наиболее значимых признаков применен следующий подход. Набор признаков, вычисляемых для оценки технического состояния механизма на данном режиме, называется информационным портретом. Если от исключения признака из портрета свойство изолируемости, то есть разделения режимов в исправном состоянии, ухудшается, то данный признак являлся важным. Количественно ухудшение изолируемости может быть продемонстрировано с применением инструментов кластерного анализа.



Рис. 2. Параметры портрета срабатывания фиксатора.



Рис. 3. Примеры отображения режимов механизма ЗКл на плоскости.

Если каждый признак представить как координату и составить информационный портрет из n признаков, то один зарегистрированный сигнал можно отобразить как одну точку в n -мерном пространстве признаков $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. При качественном выборе признаков точки, зарегистрированные на одинаковых режимах, возможно рассматривать как кластеры, вычисляя характерные расстояния внутри них и между ними.

Для вычисления расстояний при использовании данных различной размерности и вариативности они должны быть подвергнуты нормированию. В данной работе применялось z -нормирование, при котором нормированное значение признака X_j для k -го сигнала равно

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

где $M(X)$ – математическое ожидание, $S(X)$ – среднеквадратическое отклонение в массиве значений X_j .

Расстояние d между точками k и m в нормированном пространстве использовано Евклидово

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

Предварительное построение кластеров показало, что они имеют преимущественно вытянутую форму эллипсоидов или цепочек. Примеры таких кластеров показаны для портрета из двух признаков на рис. 3.

В качестве характерных расстояний для кластеров подобной формы рекомендуется оценка по расстоянию до ближайшего соседа [8]. В данной работе рассматривался вариант с оценкой средних расстояний внутри кластера, но был отброшен в связи с тем, что эти расстояния для некоторых режимов описывали слишком крупные области, не похожие по форме на имеющиеся массивы данных. 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

$$d_{\min}(A, B) = \min(d(A_k, B_m))$$

при $k = 1 \dots NA, m = 1 \dots NB$,

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

Таблица 1. Проанализированные режимы механизмов МП

Способ классификации	Для ЗКл	Для ЗРШ	Для фиксатора
По направлению движения	Вверх или вниз	Вверх или вниз	Сцепление или расцепление
По типу перегружаемого изделия	Пустой захват или ПС СУЗ	Пустой захват или ТВС	Только ТВС
По скорости перемещения	Малая, большая	0.6; 1.2; 2.0; 4.0; 6.0 м/мин	Скорость механизма не регулируется

Визуализация качества разделения режимов механизма тем или иным набором признаков может быть выполнена с помощью профиля компактности [9]. Профиль компактности определяется по формуле:

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

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

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

Описанный механизм вычисления метрик и профилей компактности был реализован в графической среде программирования LabView. Выбор инструмента разработки был обусловлен тем, что программное обеспечение канала виброакустического контроля анализируемой МП также написано в данной среде.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Виброакустические сигналы, зарегистрированные на Ростовской АЭС, были обработаны с вычислением четырех признаков вибрационного состояния механизмов подъема ЗРШ и ЗКл:

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

Для работы механизма фиксатора, как было сказано выше, определен виброакустический портрет из девяти признаков.

Режимы работы механизмов МП были классифицированы в соответствии с табл. 1.

Общее количество возможных режимов для привода ЗКл составило восемь (из которых фактически зарегистрированы шесть), для привода

захвата кассеты — 20, а для фиксатора — два. При использовании четырехпараметрических портретов характерные минимальные расстояния внутри кластеров для отдельных режимов приведены в табл. 2.

В результате исключения одного из признаков портрет становится трехпараметрическим, а расстояния внутри и между кластерами изменяются. Для любой пары режимов при одном и том же наборе параметров может быть построен профиль компактности. Чем более важным являлся признак, тем сильнее будет выровнен профиль компактности при его исключении по сравнению с эталонным профилем (скачкообразное изменение от нуля до единицы, как было замечено выше). Примеры анализа изолируемости при исключении отдельных признаков приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 1–6.

В табл. 2 средние расстояния между рассмотренными режимами построены в матричной форме: на пересечении строк и столбцов занесены расстояния между соответствующими режимами, а на главной диагонали — средние расстояния внутри самих этих режимов. Характерные расстояния между режимами с различными скоростями (МС и БС) заметно уменьшаются, если исключить коэффициент эксцесса виброускорения из числа признаков. Уменьшение данных метрик можно трактовать как слияние различных режимов работы механизма в пространстве признаков.

Средние расстояния внутри отдельных режимов в случае анализа вибрации привода МП достаточно часто, в соответствии с табл. 1, оказываются выше, чем расстояния между разными режимами. Повысить изолируемость можно, перейдя в соответствии с вышесказанным, на анализ расстояния до ближайшего соседа, которое больше подходит для оценки принадлежности к кластеру сильно вытянутой формы [8]. Демонстрация такого подхода приведена в табл. 3 и 4, где выполнено сопоставление расстояния до ближайшего соседа внутри конкретного режима с расстоянием между ближайшими точками разных режимов. Для визуализации слияния/разделения режимов на рис. 4, 5 также приведены профили компактности для проанализированных пар режимов.

Примеры анализа, приведенные на рис. 4, показывают, что исключение эксцесса из числа ана-

Таблица 2. Расстояния между кластерами в пространстве трех признаков (исключен признак пик-фактор)

Режим механизма	вверх с ПС БС	вверх с ПС МС	вниз с ПС БС	вниз с ПС МС	вниз без ПС МС	вверх без ПС МС
Исключен признак пик-фактор						
вверх с ПС БС	2.31	23.46	4.15	11.16	26.95	25.85
вверх с ПС МС	23.46	5.50	6.79	2.70	2.79	2.30
вниз с ПС БС	4.15	6.79	3.27	15.49	16.02	15.02
вниз с ПС МС	11.16	2.70	15.49	3.92	2.55	2.48
вниз без ПС МС	26.95	2.79	16.02	2.55	2.21	2.32
вверх без ПС МС	25.85	2.30	15.02	2.48	2.32	4.33
Исключен признак эксцесс						
вверх с ПС БС	2.31	6.34	3.62	6.65	7.18	7.27
вверх с ПС МС	6.34	2.31	4.53	2.55	2.56	2.20
вниз с ПС БС	3.62	4.53	2.31	6.00	6.55	6.44
вниз с ПС МС	6.65	2.55	6.00	2.31	2.45	2.45
вниз без ПС МС	7.18	2.56	6.55	2.45	2.21	2.27
вверх без ПС МС	7.27	2.20	6.44	2.45	2.27	2.08

Таблица 3. Совместный анализ важности признаков и режимных параметров работы механизма ЗКл

Изменение режима	Изменение скорости	Изменение весовой нагрузки	Изменение направления
Режим А	Вниз с ПС – малая	Вниз с ПС – малая	Вниз с ПС – малая
Режим Б	Вниз с ПС – большая	Вниз без ПС – малая	Вверх с ПС – малая
Набор признаков без пик-фактора			
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима А	0.26–1.15	0.26–1.15	0.26–1.15
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима Б	0.81–1.58	0.43–1.29	0.411–2.18
Расстояние между точками из режима А до точек из режима Б	8.29–10.25	0.24–1.89	0.50–3.37
Набор признаков без эксцесса			
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима А	0.44–1.29	0.44–1.29	0.44–1.29
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима Б	0.56–1.70	0.32–2.01	0.38–2.62
Расстояние между точками из режима А до точек из режима Б	2.99–6.77	0.20–2.02	0.44–3.17

лизируемых параметров, приводят к деформации профиля компактности, свидетельствующей о неразделении режимов в пространстве оставшихся признаков.

Аналогичный анализ, выполненный для режимов перемещения захвата кассеты, приведен в табл. 4.

Анализ профилей компактности и расстояний до ближайшего соседа показывает, что для обоих рассмотренных механизмов:

– исключение из признаков коэффициента эксцесса виброускорения способствует ухудшению изолируемости – разделения режимов МП в пространстве признаков;

– при изменении скорости движения механизма его режимы эффективно разделяются в пространстве признаков, то есть определяющим режимным параметром для оценки вибрационного состояния МП является скорость;

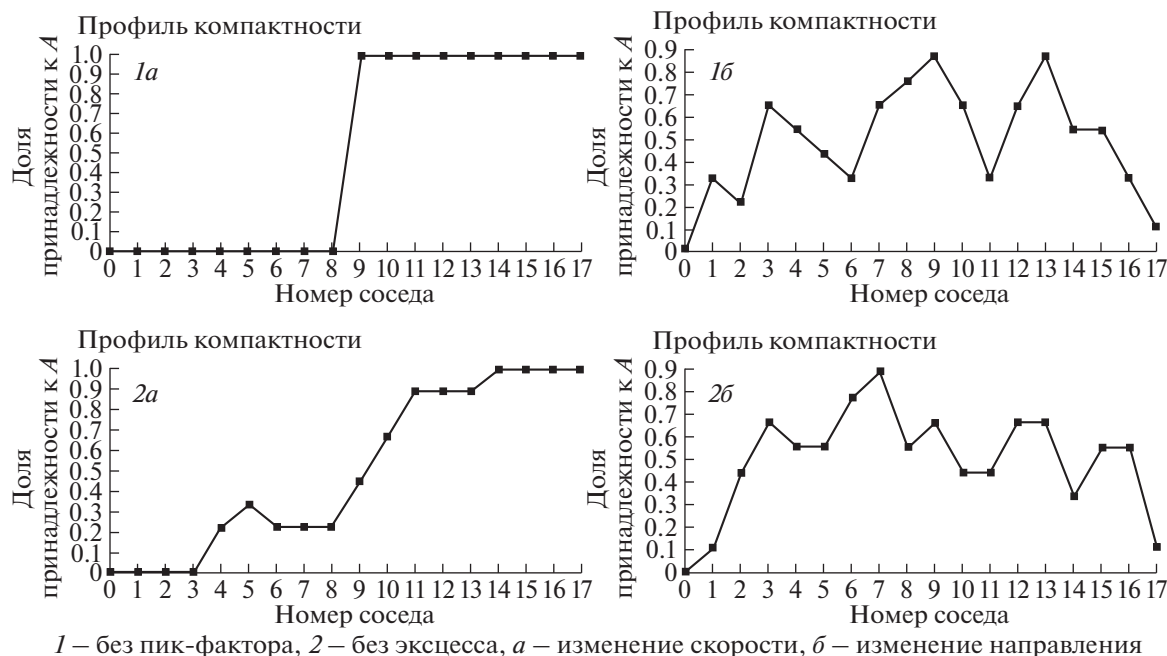


Рис. 4. Типовые профили компактности разделения режимов механизма ЗКл.

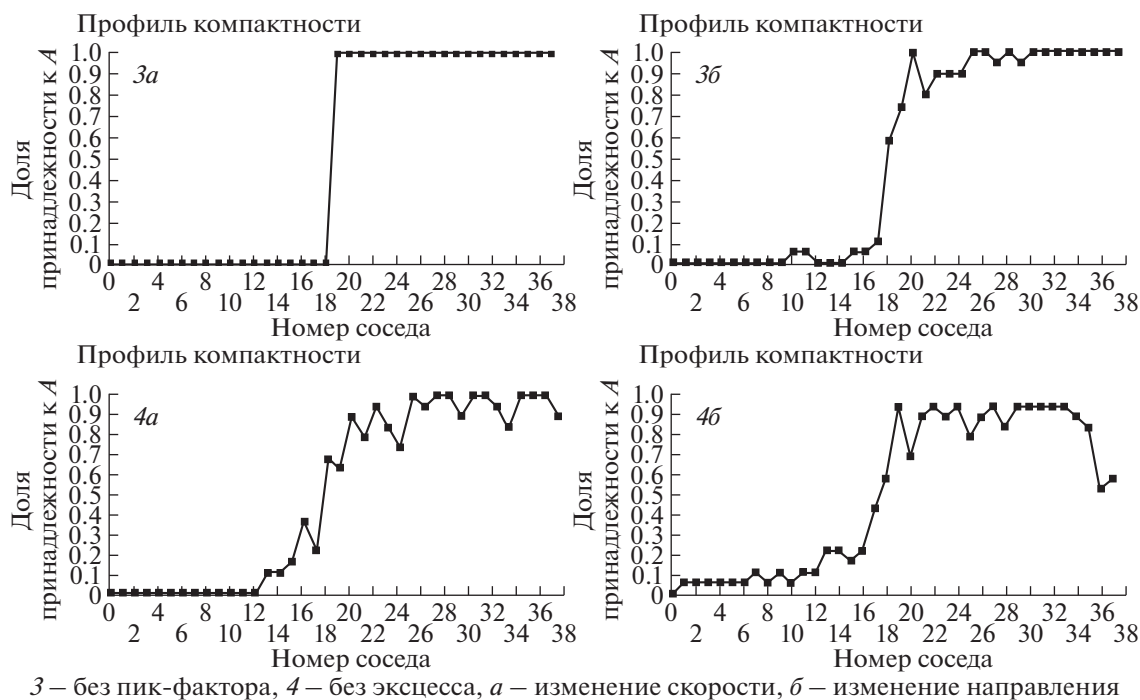


Рис. 5. Типовые профили компактности разделения режимов механизма ЗРШ.

– для более мощного механизма подъема ЗРШ достаточно эффективно разделяются режимы с движениями вверх и вниз при прочих неизменных параметрах;

– практически никакого влияния на вибрационное состояние не оказывает весовая нагрузка на механизм, выражаемая как наличие или отсутствие в захвате перегружаемого изделия.

Для механизма фиксатора вычисление характерных метрик, разделяющих портреты сцепления и расцепления с ТВС, позволило отделить друг от друга как нормальные режимы работы, так и режимы, для которых был выявлен дефект (растяжение каната фиксатора). Основные результаты анализа работы фиксатора приведены в табл. 5, а типовые профили компактности – на

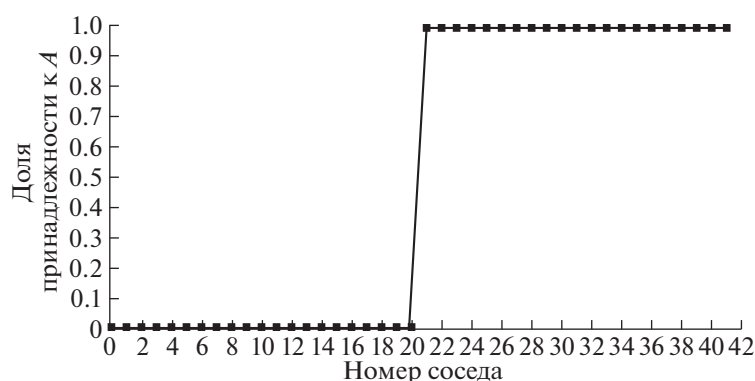


Рис. 6. Профиль компактности между режимами сцепления и расцепления с ТВС.

рис. 6, 7. Тонкой вертикальной линией на рис. 7 отделены точки режима А от режима Б в соответствии с табл. 5.

Инструменты кластерного анализа позволили отделить друг от друга как различные режимы работы исправного механизма фиксатора, так и подтвердить отделение от них режима с дефектом механизма. При этом внутри кластеров с успеш-

ными срабатываниями механизма случайно отобранная подвыборка не отделяется от остальных точек.

На основании выполненной работы система виброакустического контроля может быть дополнительно снабжена модулем контроля сцепления с ТВС по степени отличия от эталонной работы механизма.

Таблица 4. Совместный анализ важности признаков и режимных параметров работы механизма ЗРШ

Изменение режима	Изменение скорости		Изменение весовой нагрузки	Изменение направления	Изменение числа секций
Режим А	Вверх с ТВС, 2 секции, 6 м/мин	Вверх с ТВС, 2 секции, 6 м/мин	Вверх с ТВС, 2 секции, 6 м/мин	Вверх без ТВС, 1 секция, 6 м/мин	Вверх без ТВС, 1 секция, 6 м/мин
Режим Б	Вверх с ТВС, 2 секции, 0.6 м/мин	Вверх с ТВС, 2 секции, 2 м/мин	Вверх без ТВС 2 секции, 6 м/мин	Вниз без ТВС, 1 секция, 6 м/мин	Вверх без ТВС, 2 секции, 6 м/мин
Набор признаков без пик-фактора					
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима А	0.30–1.58	0.30–1.58	0.30–1.58	0.21–1.10	0.21–1.10
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима Б	0.14–4.09	0.29–6.44	0.39–2.46	0.41–4.12	0.36–2.87
Расстояние между точками из режима А до точек из режима Б	13.49–17.26	0.11–5.86	0.44–5.96	3.51–6.44	0.83–6.29
Набор признаков без эксцесса					
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима А	0.20–1.60	0.20–1.60	0.20–1.60	0.15–1.19	0.15–1.19
Расстояние до ближайшего соседа внутри режима Б	0.11–3.56	0.10–2.26	0.11–1.97	0.09–5.46	0.09–1.43
Расстояние между точками из режима А до точек из режима Б	2.69–9.19	0.10–3.55	0.22–5.27	1.04–4.16	0.28–3.11

Таблица 5. Основные метрики кластеров сцепления и расцепления с ТВС

Вид сравнения	Два кластера с исправными механизмами	Два кластера с исправными механизмами	Кластер с неисправностью и кластер с исправным механизмом	Два кластера с исправными механизмами
Режим А	Три случайно выбранных расцепления	Три случайно выбранных сцепления	Три сцепления, с дефектами	Все сцепления, без дефектов
Режим Б	Все остальные расцепления	Все остальные сцепления	Все сцепления, без дефектов	Все расцепления, без дефектов
Среднее расстояние между Б и А	4.49	4.04	13.42	815.6
Среднее расстояние между точками внутри А	4.14	4.12	4.14	4.10
Среднее расстояние между точками внутри Б	4.40	2.29	2.34	81.56
Наибольшее расстояние до ближайшего соседа внутри А	3.47	4.98	5.25	5.26
Наибольшее расстояние до ближайшего соседа внутри Б	5.21	2.82	2.19	91.63
Минимальное расстояние между ближайшими соседями в Б и А	1.24	1.18	10.72	654.8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании системы контроля технического состояния механизма, работающего на большом числе режимов, хорошие результаты показали инструменты кластерного анализа. Для обоснования выбора рассчитываемых признаков состояния следует выполнить следующую последовательность:

- отобразить зарегистрированные сигналы в z -нормированном виде в многомерном пространстве признаков;

- вычислить основные характерные метрики полученных кластеров;

- исключая по очереди признаки, отследить изменение метрик и деформацию профилей компактности;

- выбрать наиболее важные признаки из числа тех, которые при исключении сильнее всего снижают расстояние между кластерами с различными режимами работы механизма и выравнивают профиль компактности между ними.

Применение инструментов кластерного анализа позволило оценить количественно изменение вибрационного состояния механизма при появлении дефекта, что было показано на примере анализа работы фиксатора ТВС.

Для системы вибродиагностики перегрузочной машины энергоблока ВВЭР-1000 применение вы-

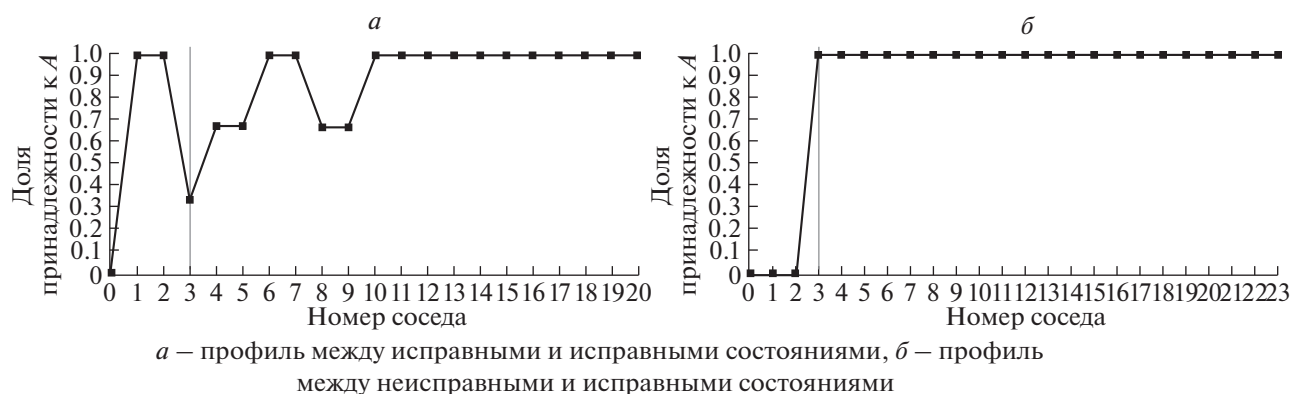


Рис. 7. Профили компактности между режимами сцепления с ТВС.

шеописанного алгоритма позволило обоснованно ввести коэффициент эксцесса виброускорения в число наиболее важных характеристик вибрационного состояния механизмов, а также не рассматривать отдельно оценку вибрационного состояния для режимов, плохо разделяемых в пространстве признаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров В.Н., Пугачева О.Ю., Паламарчук А.В., Елзов Ю.Н., Первушин Л.А. Контроль технического состояния рабочей штанги перегрузочной машины для ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. 2003. № 5. С. 33–34.
2. Лапкис А.А., Никифоров В.Н., Первушин Л.А. Виброакустическая паспортизация режимов работы машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР // Глобальная ядерная безопасность. 2018. № 2 (27). С. 82–90.
3. Лапкис А.А., Малахов И.В., Никифоров В.Н., Поваров В.П. Вопросы виброакустической паспортизации процессов перегрузки ядерного топлива энергоблоков ВВЭР / Доклад на Международной научно-практической конференции “55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом”. 23–27 сентября 2019 г. Нововоронеж, 2019.
4. Русов В.А. НПФ “Вибро-центр”. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. <https://vibrocenter.ru/book2012.htm> (дата обращения 15.03.2020).
5. Бойко В.В., Лапкис А.А. Построение эталонных виброакустических портретов операций перегрузки ядерного топлива / Системы обеспечения технологической безопасности: материалы VI Всероссийской конференции и школы для молодых ученых (Таганрог, Россия, 4–5 октября 2019 г.) Ростов-на-Дону. Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2019. С. 32–34.
6. Комплекс ГОСТ ИСО 10816. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях.
7. Муха Ю.П., Авдюк О.А., Королева И.Ю. Информационно-измерительные системы с адаптивными преобразованиями. Управление гибкостью функционирования. Монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2010. 303 с.
8. StatSoft, Inc. (2012). Электронный учебник по статистике. Москва, StatSoft. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения 15.03.2020).
9. Воронцов К.В., Колосков А.О. Профили компактности и выделение опорных объектов в метрических алгоритмах классификации // Искусственный Интеллект. 2006. С. 30–33.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 460–469

Monitoring the Technical Condition of a Refueling Machine Using Representation in a Multidimensional Feature Space

E. A. Abidova^a, V. V. Boiko^a, and A. A. Lapkis^{a, #}

^a Volgodonsk Engineering and Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Volgodonsk, 347360 Russia

[#] e-mail: aalapkis@mephi.ru

Received May 4, 2020; revised November 8, 2020; accepted November 10, 2020

Abstract—The possibility of applying the methods of technical diagnostics to monitor the technical condition of the VVER-1000 power unit refueling machine (RM) has been analyzed. Operational monitoring of the vibrational state of its mechanisms is complicated by the abundance of possible operating modes, differing in speed, direction of movement, and weight loads on the grips. Cluster analysis tools have shown which vibration parameters allow the best separation of the operating modes of mechanisms in the normalized feature space.

Typical clusters of points corresponding to different operation modes of the RM mechanisms have been constructed on the data of an industrial experiment at the Rostov NPP. The necessity of using both traditional vibrational parameters and vibration acceleration kurtosis taking into account the form of vibration distribution has been shown. The analysis of the compactness profiles and the relationships between the distances inside and between the built clusters has revealed the regime parameters that mostly affect the vibrational state of the mechanisms.

Keywords: VVER, refueling, refueling machine, diagnostics, technical condition, clustering, cluster analysis, feature space, compactness profile

DOI: 10.1134/S2304487X20050028

REFERENCES

1. Nikiforov V.N., Pugacheva O.Yu., Palamarchuk A.V., Elzhov Yu.N., Pervushin L.A., Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya rabochey shtangi peregruzochnoy mashiny dlya VVER-1000 (Control of the Technical Condition of the Working Rod of the Reloading Machine for VVER-1000), *Teploenergetika*, 2003, no. 5, pp. 33–34 (in Russian).
2. Lapkis A.A., Nikiforov V.N., Pervushin L.A., *Vibroakusticheskaya pasportizatsiya rezhimov raboty mashin peregruzochnykh energoblokov VVER* (Vibroacoustic certification of operating modes of VVER reloading power units machines), *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2018, no. 2 (27), pp. 82–90 (in Russian).
3. Lapkis A.A., Malakhov I.V., Nikiforov V.N., Povarov V.P., (Questions of vibroacoustic certification of processes of nuclear fuel overload of VVER power units), *Doklad na Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “55 let bezopasnoy ekspluatatsii AES s VVER v Rossii i za rubezhom”* (Report at the International scientific and practical conference “55 years of safe operation of nuclear power plants with VVER in Russia and abroad”, Novovoronezh, 2019 (in Russian).
4. Rusov V.A., *Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam* (Diagnostics of Rotating Equipment Defects by Vibration Signals), Available at <https://vibrocenter.ru/book2012.htm>. Accessed 15.03.2020.
5. Boyko V.V., Lapkis A.A. (Construction of reference vibroacoustic portraits of nuclear fuel overload operations), *Sistemy obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti: materialy VI Vserossiyskoy konferentsii i shkoly dlya molodykh uchenykh* (Systems for Ensuring Technosphere Security: Proceedings of the VI All-Russian Conference and School for Young Scientists), Taganrog, 2019, pp. 32–34 (in Russian).
6. GOST ISO 10816, Vibratsiya, Kontrol sostoyaniya mashin po rezultatam izmereniy vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh (State Standard ISO 10816, Mechanical Vibration, Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts), Gosstandart of Russia, 1999, 29 p.
7. Mukha Yu.P., Avdeyuk O.A., Koroleva I.Yu., *Informatsionno-izmeritelnyye sistemy s adaptivnymi preobrazovaniyami. Upravleniye gibkostyu funktsionirovaniya* (Information and Measurement Systems with Adaptive Transformations. Managing the Flexibility of Functioning), Volgograd, VolgGTU, 2010, 303 p.
8. Borovikov V.P., Populyarnoye vvedeniye v sovremenny analiz dannykh v sisteme STATISTICA (A Popular Introduction to Modern Data Analysis in the STATISTICA System), Available at <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. Accessed 15.03.2020.
9. Vorontsov K.V., Koloskov A.O., *Profili kompaktnosti i vydeleniye opornykh obyektov v metricheskikh algoritмах klassifikatsii* (Compactness Profiles and Selection of Reference Objects in Metric Classification Algorithms), *Iskusstvennyy Intellekt*, 2006, pp. 30–33 (in Russian).