

УДК 681.518.5/519.23/519.24/519.25

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.021](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.021)

Паспортизация перегрузочных операций для контроля состояния оборудования атомной электростанции

Е.А. Абидова, А.А. Лапкис, В.Д. Ожерельев, А.В. Чернов

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ.)
г. Волгодонск, Российская Федерация*

Резюме: Работа направлена на повышение безопасности АЭС за счет контроля перегрузки топливных кассет, осуществляемой перегрузочной машиной. Показана необходимость разработки системы контроля, предупреждающей сбои при выполнении перегрузочных операций. Утверждается, что разработка системы обязана предваряться этапом наблюдения и систематизации токовых характеристик объекта в процессе неоднократного выполнения операций с различными перегружаемыми изделиями. Упрощение процедуры мониторинга достигается за счет использования сигналов питающей сети, регистрируемых в процессе работы приводов машины. Представлена схема регистрации диагностических сигналов. Описаны подходы к обработке и анализу сигналов. Предлагаемый подход опробован в период перегрузочной кампании на Ростовской АЭС. По сигналам питающей сети, зарегистрированным в процессе перегрузки, продемонстрирована возможность паспортизации перегрузочных операций. С целью кластеризации к параметрам тока применяется метод главных компонент. Разработанные диагностические паспорта могут быть использованы как эталонные при последующем мониторинге перегрузки. Показано, что сигналы, соответствующие приводу захвата рабочей штанги (ЗРШ), могут быть использованы для контроля усилий перегрузочной машины при извлечении топлива. Таким образом, в работе обосновывается перспективность системы контроля процесса перегрузки на основе регистрации и анализа тока, потребляемого приводами перегрузочной машины.

Ключевые слова: перегрузка ядерного топлива, система мониторинга, регистрация сигналов, эталоны, кластеризация данных.

Для цитирования: Абидова Е.А., Лапкис А.А., Ожерельев В.Д., Чернов А.В. Паспортизация перегрузочных операций для контроля состояния оборудования атомной электростанции. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=917> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.021

Passportization of refueling operations to monitor the state of equipment in the NPP core

E.A. Abidova, A.A. Lapkis, V.D. Ozherelyev, A.V. Chernov

*Volgodonsk Engineering Technical Institute - a branch of the National Research Nuclear University "MEPhI" (VETI NRNU MEPhI)
Volgodonsk, Russian Federation*

Abstract: The work is focused on increasing the reliability of nuclear power plants by monitoring the overloading of fuel cartridges carried out by the refueling machine. The necessity of developing a control system that prevents failures during reloading operations is shown. It is argued that the development of the system must be preceded by the stage of observation and systematization of the current characteristics of the object in the process of repeated operations with various overloaded products. Simplification of the monitoring procedure is achieved using the current signals consumed by the machine drives during operation. The scheme of registration of diagnostic signals is presented.

Approaches to signal processing and analysis are described. The proposed approach was tested during the refueling campaign at the Rostov NPP. Based on the current signals registered during the overload process, the possibility of creating passports of overloading operations has been demonstrated. For clustering, the principal component method is applied to the current parameters. The developed passports can be used as a reference pattern for subsequent overload monitoring. It is shown that the signals corresponding to the main driving stem can be used to control the efforts of the refueling machine when removing fuel. Thus, the paper grounds the prospects of the control system for the reloading process based on the registration and analysis of the current consumed by the drives of the refueling machine.

Keywords: nuclear fuel reloading, monitoring system, signal registration, reference passports, data clustering.

For citation: Abidova E.A., Lapkis A.A., Ozherelyev V.D., Chernov A.V. Passportization of refueling operations to monitor the state of equipment in the NPP core. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=917> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.021 (In Russ).

Введение

Процесс перегрузки топлива, выполняемый в период планово-предупредительного ремонта реактора ВВЭР-1000 с помощью машины перегрузочной (МП), – одна из самых ответственных операций, производимых на АЭС. В настоящее время процесс перегрузки контролируют с помощью датчиков веса на захватах (тензодатчиков), датчиков перемещения и посредством телевизионной системы[1]. Существующий подход позволяет установить факт выполнения перегрузочной операции, либо констатировать сбой после того, как он произошел. Разработка системы мониторинга перегрузки топлива является востребованной задачей с точки зрения предупреждения сбоев при реализации одного из самых ответственных технологических процессов АЭС[2].

Следующие особенности конструкции и функционирования МП затрудняют внедрение универсальных подходов к мониторингу процессов и диагностике оборудования:

- 1) выполнение разнообразных операций (опускание и поднятие грузов, сцепление и расцепление с грузами и т.д.) требующее работы объекта в различных режимах;
- 2) нестандартная конструкция машины, включающая несколько функциональных групп – приводов;
- 3) производственные условия – повышенное ионизирующее излучение, влажность, высокий уровень электромагнитных помех и наводок в электрооборудовании в центральном зале реакторного отделения, особый режим доступа в зону работ со вскрытым реактором;
- 4) время перегрузки топлива ограничивается периодом перегрузки, которое на российских АЭС с реакторами ВВЭР-1000 составляет 3-5 недель за топливный цикл 1,5 года.

Первые две особенности предполагают, что разработка системы мониторинга должна предваряться этапом наблюдения за характеристиками оборудования в процессе многократного выполнения различных операций. Данный этап позволит установить диапазон изменения параметров характерный для работы различных функциональных групп объекта т. е. реализовать паспортизацию процесса перегрузки, как это описано в [3] для виброакустических методов мониторинга МП. Сравнение диагностических паспортов, полученных в результате предыдущих перегрузочных кампаний, с

результатами последующего диагностирования позволит выявить тенденции изменения состояния оборудования до возникновения отказа.

Особенности, связанные с условиями эксплуатации объекта, затрудняют использование переносных и стационарных средств вибродиагностики для мониторинга параметров МП[4] в процессе перегрузки. При этом использование средств контроля тока имеет ряд преимуществ:

- 1) сигналы могут быть зарегистрированы вне зоны функционирования объекта[5];
- 2) уменьшение влияния внешних помех при регистрации данных[6];
- 3) одни и те же переносные средства могут обеспечить регистрацию сигналов МП всех блоков многоблочной АЭС.

Поэтому настоящее исследование, направленное на повышение надежности оборудования АЭС, посвящено проблеме регистрации и анализа тока, потребляемого приводами МП в процессе её функционирования.

Регистрация и предварительная обработка токовых сигналов перегрузочной машины

Для анализа сигналов питающей сети электроприводов МП измеряются значения силы тока и напряжения на шинах после преобразователей частоты и фильтров (Рисунок 1). Данные замеры выполняются с применением стенда «Крона-517».

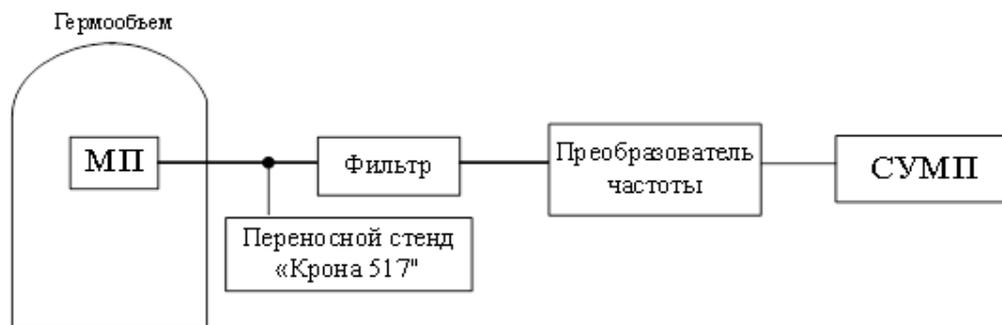


Рисунок 1– Схема снятия сигналов с МП при помощи стенда «Крона 517»

Figure 1-The scheme of registration of signals at the refueling mashin using the recorder "Krona 517»

По сигналу, зарегистрированному с помощью «Крона-517», вычислялись следующие параметры: рабочий ток, коэффициент гармонических составляющих, коэффициент асимметрии фаз.

Рабочий ток по фазам I_p^A, I_p^B, I_p^C [А] оценивается по формуле

$$I_p^\phi = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j^\phi)^2}{N}}, \quad (1)$$

где I_p^ϕ – рабочий ток по фазам I_p^A, I_p^B, I_p^C ;

x_j^ϕ – j -ое значение выборки рабочего тока фазы $\phi \in (A, B, C)$;

N – размер выборки.

При этом качество синусоиды переменной частоты, генерируемой преобразователем, было оценено коэффициентом гармонических составляющих в каждой фазе (в соответствии с ГОСТ 30804.3.12-2013 "Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А

(в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения")

$$K_u^\phi = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}, \quad (2)$$

где K_u^ϕ – коэффициент гармонических составляющих;
 I_1 – первая гармоника сигнала;
 I_2, I_3, I_N – высшие гармоники сигнала.

Равномерность фазных нагрузок в трёхфазной сети оценивается по коэффициенту асимметрии рабочего тока в фазах $\delta_{IAB}, \delta_{IAC}, \delta_{IBC}$ [%]

$$\delta_{I_{\phi 1 \phi 2}} = \frac{|I_p^{\phi 1} - I_p^{\phi 2}|}{I_p^{cp}} * 100\% \quad (3)$$

где $\delta_{I_{\phi 1 \phi 2}}$ – коэффициенту асимметрии;

$I_p^{\phi 1}$ и $I_p^{\phi 2}$ – действующие значения токов фазы $\phi 1 \in (A, B, C)$ и $\phi 2 \in (A, B, C)$ соответственно, причем $\phi 1 \neq \phi 2$;

I_p^{cp} – среднее значение. Коэффициент асимметрии фаз нормируется согласно ГОСТ Р 51700-2000 "Технические средства, подключаемые к симметричным линиям параметры асимметрии относительно земли. Схемы измерений".

Кроме этого, рассчитывалась огибающая сигнала методом среднеквадратичного значения с учетом переменной частоты согласно формуле

$$D^\phi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |X_i^\phi|^2} \quad (4)$$

где D^ϕ – огибающая сигнала;

n – число отсчетов, которое соответствует отношению частоты дискретизации и фундаментальной частоты (ФЧ);

X – отсчеты датчика тока в фазе.

Плавность хода в фазе была оценена по коэффициенту осцилляции на основе параметров огибающей как процентное отношение размаха вариации R к среднему значению \bar{X}

$$V_R^\phi = \frac{R_\phi}{\bar{X}^\phi} * 100\% \quad (5)$$

где V_R^ϕ – коэффициент осцилляции;

R^ϕ – размах вариации;

\bar{X}^ϕ – среднее значение.

Паспортизация перегрузочных операций на основе параметров тока

Было произведено обследование перегрузочной машины Ростовской АЭС блока №1 в марте-апреле 2020 г. С помощью стенда «Крона 517» зарегистрированы значения силы тока, потребляемого приводом ЗРШ, при выполнении следующих операций:

1. опускание без груза (топливной сборки) на малой скорости;
2. опускание с грузом на малой скорости;
3. подъём без груза на малой скорости;
4. подъём с грузом на малой скорости;
5. опускание без груза (топливной сборки) на большой скорости;

6. опускание с грузом на большой скорости;
7. подъём без груза на большой скорости;
8. подъём с грузом на большой скорости.

Каждая операция представлена не менее чем двенадцатью сигналами, зарегистрированными в период перегрузочной кампании 2020 г. блока №1. В рамках предварительной обработки для каждого сигнала были вычислены параметры - коэффициент осцилляции, рабочий ток, коэффициент гармонических составляющих, коэффициент асимметрии фаз.

При анализе значений параметров МП блока №1 установлены следующие закономерности:

- 1) рабочие токи отрицательно коррелируют со скоростью, при этом слабо зависят от направления и не зависят от наличия груза;
- 2) КО положительно коррелируют со скоростью, но слабо зависят от наличия груза и направления;
- 3) наибольшие значения коэффициента асимметрии наблюдаются между фазами А и В, они не зависят от направления, скорости и груза;
- 4) коэффициент гармонических составляющих положительно коррелирует со скоростью, не зависит от направления, скорости и груза;

Определены диапазоны изменения параметров при выполнении МП операций в штатном режиме. По соответствию данным диапазонам может быть оценена корректность операций при последующем мониторинге процесса перегрузки на первом блоке Ростовской АЭС.

Наиболее чувствительным к режиму работы МП параметром является КО, который в связи с этим наилучшим образом подходит для описания её режимов. Однако, диапазоны КО для разных режимов всё же перекрываются. Например, сигналы при подъёме на малой скорости имеют КО, вычисленный по формуле 5, для режимов без груза в диапазоне 0,1 – 4,0, а для режимов с кассетой в диапазоне 0,2 – 19. Для разделения кластеров данных, соответствующих различным режимам работы, целесообразно применение алгоритма разделения на основе метода главных компонент (ГК)[7-8]. Поскольку КО для различных скоростных режимов легко различаются и без дополнительной обработки, алгоритм разделения реализовался для четырех групп параметров:

- «опускание без груза»,
- «опускание с грузом»,
- «подъём без груза»,
- «подъём с грузом».

Согласно алгоритму параметры различных операций были представлены в форме матриц. Матрицы параметров подверглись сингулярному разложению. Следующий этап - формирование базового пространства, в котором расстояние между данными, соответствующими различным режимам, существенно больше, чем в исходном. Для формирования пространства на основе сопоставления спектров сингулярного разложения выбраны две первых ГК. На полученное базовое пространство спроецированы исходные матрицы. Результат идентификации данных по каждой операции в базовом пространстве представлен на Рисунке 2.

Как видно, при малой скорости состояния «подъём с грузом» и «подъём без груза» идентифицируются однозначно, а «опускание с грузом» и «опускание без груза» частично совпадают. Кластеры данных, соответствующих штатному режиму работы МП (несмотря на частичное перекрытие между собой) могут быть использованы при

последующем мониторинге для идентификации отклонений от штатного функционирования МП.

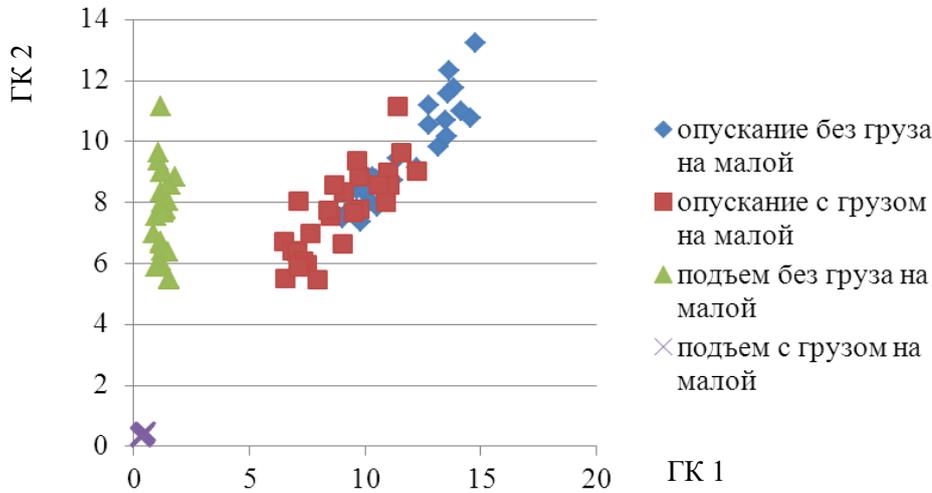


Рисунок 2 – Проекция параметра при малой скорости
 Figure 2 - Projections of the parameter at low speed

В случае несоответствия сигналов норме в связи с повышением (уменьшением) механической нагрузки при извлечении (установке) ТВС система выдаёт соответствующее сообщение оператору.

Представление результатов мониторинга

Под действием облучения в реакторе в тепловыделяющих сборках (ТВС) с топливом возникают деформации[10]. Деформации требуют дополнительных усилий при извлечении. В реакторе типа ВВЭР-1000 ТВС эксплуатируются в течение трех кампаний, возникающие за это время деформации требуют больших усилий при извлечении сильно выгоревшего топлива из реактора, чем при извлечении более свежего топлива. При мониторинге процесса перегрузки выявление различия усилий при извлечении топлива позволяет предупредить возможные повреждения оболочек топливных кассет. Однако параметры, вычисление которых описано во втором параграфе настоящей работы, не чувствительны к изменению усилий. При этом анализ с использованием метода ГК[6] показывает, что сигнал содержит информацию об усилиях при извлечении.

Сигналы, соответствующие извлечению ТВС, были представлены в виде траекторных матриц, к ним применялось сингулярное преобразование. В результате сингулярного преобразования получены пространственные направления по числу столбцов в матрице. Из числа компонент разложения выбраны ГК, которые соответствуют разделению сигналов исследуемых состояний, тем самым обеспечивая их кластеризацию в пространстве ГК. Соответствующие преобразования были выполнены над сигналами, зарегистрированными при извлечении ТВС. Анализ спектров собственных значений позволил выбрать направления пространства, в котором проявляются различия между сигналами при извлечении деформированных и недеформированных ТВС. На Рисунке 3 представлены кластеры сигналов при извлечении из ячеек №№186-190 ТВС, отработавших одну кампанию, – синие и из ячеек №№149-152 ТВС, отработавших три кампании – красные.

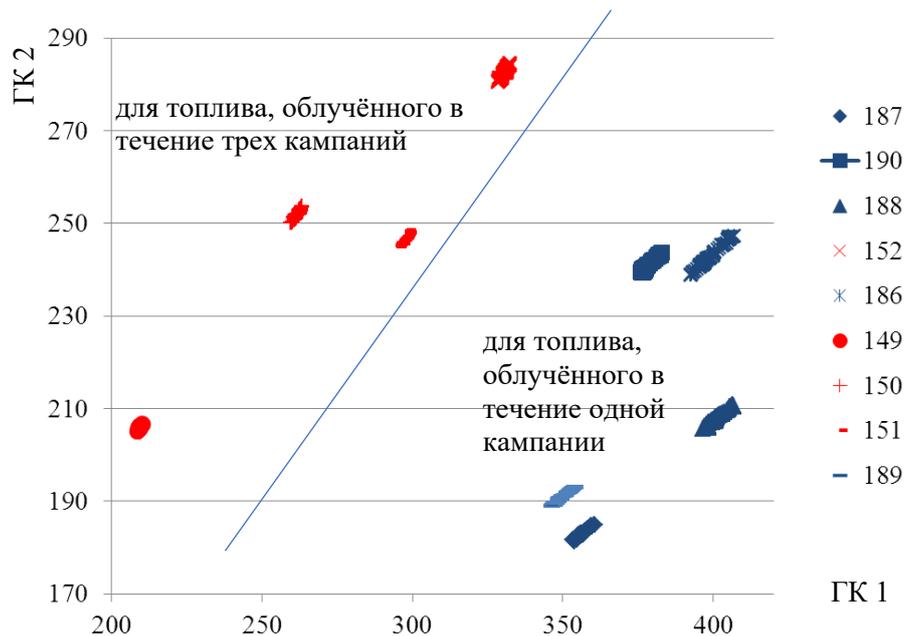


Рисунок 3– Проекция токовых сигналов при извлечении топливных сборок
Figure 3 - Projections of current signals when removing fuel assemblies

Кластеры сигналов кассет, у которых предполагаются деформации, локализируются в области пространства ГК, не совпадающей с областью кластеров сигналов кассет без деформации. Красные кластеры также меньше по размеру, чем синие.

Предлагается на базис, полученный при обработке ранее зарегистрированных сигналов проецировать сигналы, зарегистрированные при последующем мониторинге перегрузки. По положению кластеров сигналов в пространстве ГК можно оценить степень несоответствия сигнала норме.

Заключение

Утверждается необходимость разработки системы мониторинга перегрузки топлива, контролирующей изменения состояния МП. Показано, что разработка такой системы должна предваряться этапом мониторинга токовых параметров объекта в процессе многократного выполнения различных операций с топливом и другими грузами. Представлены схема регистрации диагностических сигналов и подходы к их анализу. Приводятся результаты анализа сигналов питающей сети, зарегистрированных в процессе работы перегрузочной машины Ростовской АЭС блока №1, в марте-апреле 2020 г при выполнении операций установки и извлечения топлива. Сигналы подверглись обработке, которая с одной стороны направлена на построение диагностических паспортов операций, а с другой стороны на повышение чувствительности при анализе диагностической информации.

Как показал анализ, паспортизацию при описании перегрузочных операций обеспечивают следующие параметры: коэффициент осцилляции, рабочий ток, коэффициент гармонических составляющих, коэффициент асимметрии фаз. Однако из-за того, что диапазоны изменения параметров при выполнении различных операций частично перекрываются, предложен алгоритм разделения кластеров параметров

операций на основе метода ГК. В результате применения алгоритма к диагностическим параметрам описаны классы операций, которые при последующем мониторинге перегрузки блока №1 Ростовской АЭС могут быть использованы как эталонные.

Исследование сигналов при извлечении ТВС продемонстрировали возможность использования тока, потребляемого приводом ЗРШ МП, для контроля усилий, развиваемых при извлечении ТВС в дополнение к штатному весоизмерительному устройству.

Таким образом, выполненная работа, обосновывает перспективы разработки системы мониторинга перегрузки ядерного топлива по току, потребляемому электроприводами МП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Портной Ю.Т. Системы управления перегрузочными машинами АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Москва: *Труды НИИ ВНИИЭМ*. 2001:225-234.
2. Steele J.A., Martin L.A., McArthur S. D. J., Moyes A., Mc-Donald J. R., Howie D., Elrick R., Yule I.Y. An intelligent system for interpreting the nuclear refuelling process within an AGR. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A*. 2003:159-167.
3. Лапкис А.А., Никифоров В.Н., Первушин Л.А. Виброакустическая паспортизация режимов работы машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2018;2(27):82-90.
4. DIN ISO 10816-6-2015 Вибрация механическая. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 6. Машины с возвратно-поступательным движением номинальной мощностью свыше 100 кВт.
5. Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., and Capolino G.-A. Advances in electrical machine, power electronic and drive condition monitoring and fault detection: State of the art. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015;62(3):1746-1759.
6. Choi S., Pazouki E., Baek J., and Bahrami H.R. Iterative condition monitoring and fault diagnosis scheme of electric motor for harsh industrial application. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015;62(3):1760-1769.
7. Абидова Е.А., Чернов А.В., Хегай Л.С. Совершенствование методов обработки информации в системах диагностики оборудования АЭС. *Монография*. Москва. Волгодонский инженерно-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». 2019;ISBN 978-5-7262-2589-0.
8. Дылевский А.В., Власова О.О., Ракитин Д.А. Построение переходных процессов в системах с распределенными параметрами. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Системный анализ и информационные технологии*. 2016;(3):85-89.
9. Al Bugarbee H., Trendafilova I.A. Methodology for fault detection in rolling element bearings using singular spectrum analysis. *International Conference on Engineering Vibration 2017 (ICoEV 2017) – 4-7 September 2017, Sofia, Bulgaria*. 2018:1-5.– Доступно по: <https://strathprints.strath.ac.uk/62663>.
10. Марков Д.В. Основные закономерности изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР и РБМК нового поколения в период эксплуатации по результатам комплексных послереакторных исследований. *Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук*. Москва. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». 2018.

REFERENCES

1. Portnoj YU.T. Sistemy upravleniya peregruzochnymi mashinami AES s reaktorami VVER-1000. Moskva: *Trudy NPP VNIEM*. 2001:225-234 (In Russ.)
2. Steele J.A., Martin L.A., McArthur S.D.J., Moyes A., Mc-Donald J.R., Howie D., Elrick R., Yule I.Y. An intelligent system for interpreting the nuclear refuelling process within an AGR. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A*. 2003:159-167.
3. Lapkis A.A., Nikiforov V.N., Pervushin L.A. Vibroacoustical Certification of Operating Modes of WWER Fuel-Handling Machines. *Global nuclear safety*. 2018;2(27):82-90 (In Russ.)
4. DIN ISO 10816-6-2015. Mechanical Vibration. Assessment of the Machine Condition Based on the Results of Vibration Measurements on Non-Rotating Parts. Part 6. Machines with Reciprocating Motion with a Rated Power over 100 kW(In Russ.)
5. Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., and Capolino G.-A. Advances in electrical machine, power electronic and drive condition monitoring and fault detection: State of the art. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015;62(3):1746-1759.
6. Choi S., Pazouki E., Baek J., and Bahrami H.R. Iterative condition monitoring and fault diagnosis scheme of electric motor for harsh industrial application. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015;62(3):1760-1769.
7. Abidova E.A., Chernov A.V., Khagai L.S. Improvement of Information Processing Methods in NPP Equipment Diagnostics Systems. *Monograph*. Moscow. Volgodonsk Institute of Engineering and Technology - branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nuclear University" МЕРНІ». 2019. ISBN 978-5-7262-2589-0 (In Russ.)
8. Dylevsky A.V., Vlasova O.O., Rakitin D.A. Construction of transients in systems with distributed parameters. *Bulletin of the Voronezh state University. Ser. System analysis and information technologies*. 2016;(3):85-89.
9. Al Bugarbee H., Trendafilova I.A. Methodology for fault detection in rolling element bearings using singular spectrum analysis. *International Conference on Engineering Vibration 2017 (ICoEV 2017) – 4-7 September 2017, Sofia, Bulgaria*. 2018:1-5. Available from: <https://strathprints.strath.ac.uk/62663>.
10. Markov D.V. Osnovnye zakonomernosti izmeneniya svoystv i harakteristik topliva VVER i RBMK novogo pokoleniya v period ekspluatatsii po rezul'tatam kompleksnyh poslereaktornyh issledovaniy. *Doctor of Technical Sciences thesis*. Moscow. National Research Center "Kurchatov Institute". 2018 (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Абидова Елена Александровна, кандидат технических наук, Научный сотрудник НИИ атомного энергетического машиностроения ВИТИ НИЯУ МИФИ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Ростовская область, Волгодонск, Российская Федерация
e-mail: e-abidova@mail.ru

Elena A. Abidova, Ph.D. (Technology), Research Worker, Volgodonsk Engineering Technical Institute The Branch Of National Research Nuclear University “Mephi”, Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation

Лапкис Александр Аркадьевич, главный специалист НИИ атомного энергетического машиностроения ВИТИ НИЯУ МИФИ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Ростовская область, Волгодонск, Российская Федерация
e-mail: paltusmeister@gmail.com

Alexander A. Lapkis, Chief Specialist, Volgodonsk Engineering Technical Institute The Branch Of National Research Nuclear University “Mephi”, Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation

Ожерельев Виктор Дмитриевич, магистрант кафедры Информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Ростовская область, Волгодонск, Российская Федерация
e-mail: victorozhereliev@yandex.ru

Viktor D. Ozherelev, Master's Student Of The Department Of Information And Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute The Branch Of National Research Nuclear University “Mephi”, Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation

Чернов Александр Викторович, Доктор технических наук, профессор кафедры Информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Ростовская область, Волгодонск, Российская Федерация
e-mail: vitikafius@mephi.ru

Alexander V. Chernov, Doctor Of Technology, Professor Of The Department Of Information And Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute The Branch Of National Research Nuclear University “Mephi”, Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation