

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИН ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ЭНЕРГООБЛОКОВ ВВЭР

© 2018 А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, Л.А. Первушин

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

В статье рассматривается задача паспортизации режимов работы и определения технического состояния перегрузочной машины энергоблока ВВЭР по результатам виброакустического мониторинга. Предлагается применение псевдофазовых диаграмм для визуализации виброакустической информации. Рассмотрен пример определения эталонных характеристик режимов работы рабочей штанги машины перегрузочной энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Ключевые слова: виброакустический контроль, информационный паспорт, псевдофазовая диаграмма, перегрузка топлива, машина перегрузочная, рабочая штанга.

Поступила в редакцию: 23.05.2018

Перегрузка топлива на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 осуществляется дистанционно управляемым краном специальной конструкции – машиной перегрузочной (МП) МПС-В-1000, изображённой на рисунке 1 [1, 2]. МП перемещает тепловыделяющие сборки (ТВС), кластеры органов регулирования и некоторые другие специальные грузы, необходимые при проведении перегрузочной кампании. При выполнении МП технологических операций её оператор взаимодействует со штатной системой управления (СУ МП).

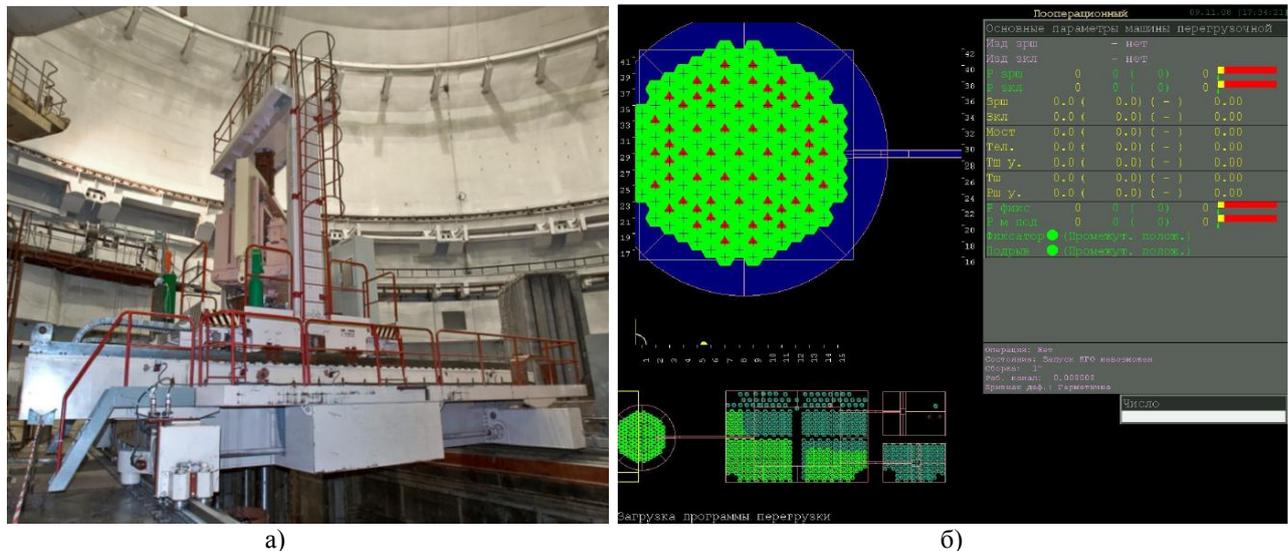


Рис. 1. – Машина перегрузочная МПС-В-1000

а – общий вид МП; б – интерфейс для оператора МП [MPS-V-1000 fuel-handling machine. a - the fuel-handling machine general view ; b - interface for the fuel-handling machine operator]

Модернизированный интерфейс СУ МП предусматривает [3, 4, 5] передачу команд оператора на исполнительные приводы механизмов МП, а также предоставление оператору информации о текущих:

- положениях механизмов МП (горизонтальные координаты моста и тележки, вертикальные отметки захватов и телекамеры, состояния захватов, углы поворота рабочей и телевизионной штанг);

- скоростях механизмов МП (мост, тележка, захваты, телекамера);

- весовых нагрузках на захватах рабочей штанги.

Кроме того, оператор получает от СУ МП телевизионный сигнал и имеет возможность управлять обзором камеры на телевизионной штанге.

Концепцией модернизации перегрузочных машин [6] с 2001 года также предусматривается оснащение МПС-В-1000 системами виброакустического контроля технического состояния основных узлов и механизмов рабочей штанги. Такие системы были поставлены на энергоблоки №№1 и 2 Тяньваньской АЭС (Китай) и энергоблок № 1 Ростовской АЭС. Структура системы виброакустического контроля обоснована в трудах ВНИИАМ и Волгодонского филиала ЮРГТУ (сейчас НИИ атомного энергетического машиностроения ВИТИ НИЯУ МИФИ) [7, 8]. В упрощённой форме схема системы виброакустического контроля рабочей штанги МП приведена на рисунке 2.

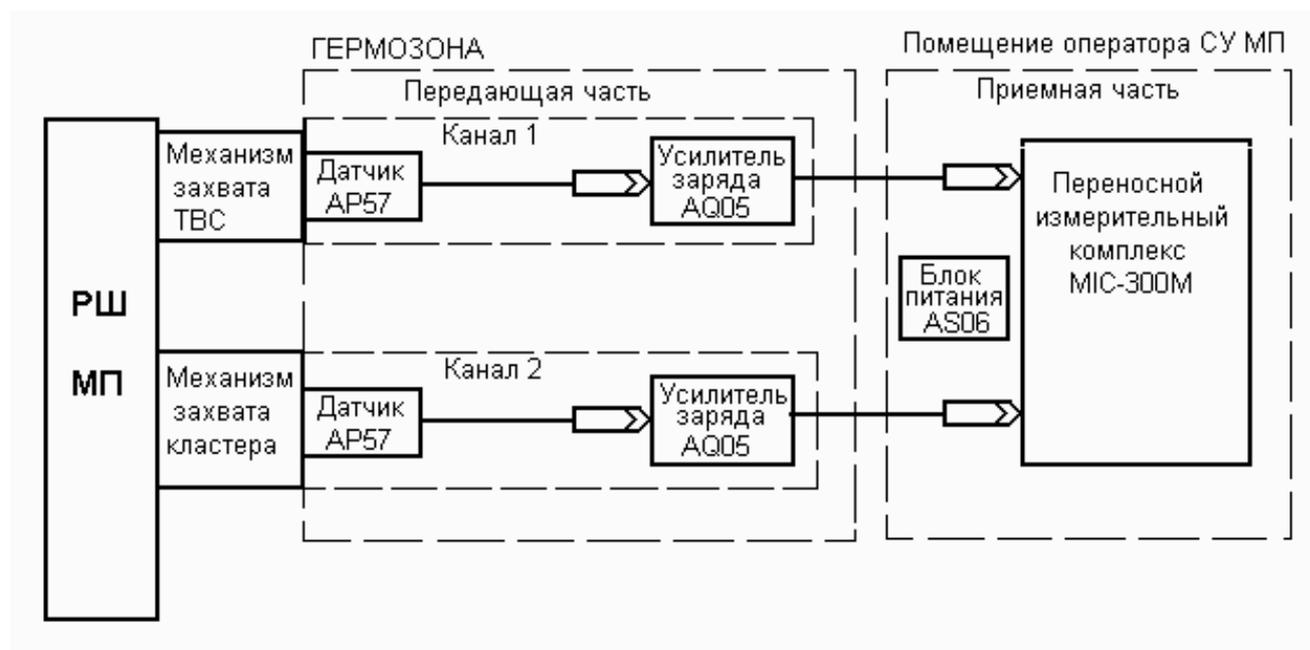


Рис. 2. – Структура системы виброакустического контроля рабочей штанги МП [The structure of the system of vibroacoustic control of the fuel-handling machine working rod]

Похожие по функционалу системы предлагаются южнокорейскими исследователями [9] как составная часть СУ МП с целью управления движениями МП по законам, подавляющим вибрацию рабочей штанги (применительно к водо-водяным реакторным установкам южнокорейского дизайна).

Аналогично виброакустическому информационному паспорту первого контура реакторной установки ВВЭР, предложенному в трудах К.Н. Проскурякова и др. [10], нами разрабатывается концепция виброакустического информационного паспорта кампаний перегрузки ядерного топлива. Виброакустическая паспортизация перегрузочных кампаний ВВЭР позволит поддерживать заданный уровень ядерной безопасности работ по перегрузке топлива, предоставляя оператору МП актуальную информацию:

- 1) о текущем техническом состоянии основных узлов и механизмов рабочей штанги;
- 2) о степени отклонения текущих характеристик сигнала от эталонных, составляющих так называемый виброакустический портрет технологической операции.

В качестве портрета технологической операции может рассматриваться массив, состоящий из числовых параметров, полученных на основе обработки виброакустического сигнала:

- временные отрезки характерных элементарных движений рабочей штанги, составляющих;
- общий уровень вибрации (среднеквадратическое значение виброускорения) и темп его изменения во времени;
- вариация (среднеквадратическое отклонение и пик-фактор);
- мощности сигнала по отдельным спектральным полосам;

- характерные резонансные частоты и полосы;
- иные характеристики, способные отобразить изменения режима работы и технического состояния механизмов рабочей штанги.

Степень отклонения текущих характеристик от эталонных может показать, к примеру, расстояние d между эталонным и фактически зарегистрированным диагностическими массивами, либо другая подобная мера.

$$d^2 = \sum_i (x_i^2 - x_{i(э)}^2)$$

$$d \leq [d]$$

Допуск $[d]$ должен определяться в зависимости от опыта эксплуатации измерительной системы и от класса безопасности обследуемого оборудования.

Первая задача может быть решена с имеющимся программным и приборным обеспечением системы виброакустического контроля. Для решения второй необходимо усовершенствование математического аппарата с целью выявления эталонных портретов заведомо качественно выполненных технологических операций. С этой целью в данной работе рассматривается применение аналитического аппарата нелинейной динамики к идентификации текущего режима работы перегрузочной машины.

Отечественные и зарубежные исследования 2010-х годов показывают, что в электромеханических системах имеются предпосылки возникновения нелинейной динамики из-за мгновенных изменений трения, демпфирования или условий нагружения. Данные факторы усугубляются при развитии дефекта. В частности, данный подход применяется НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в диагностике электроприводной арматуры АЭС [11].

В нелинейной динамике движущихся тел базовым аналитическим средством являются фазовые диаграммы, показывающие траектории движения в фазовом пространстве координат и скоростей

$$\mathfrak{R}(x, y, z, \frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t})$$

Фигура, к которой стремятся траектории системы в фазовой диаграмме, называется её аттрактором.

В связи с тем, что виброакустический сигнал, зарегистрированный одним измерительным каналом, представляет собой временной ряд, построение фазовой диаграммы напрямую невозможно. В таких случаях Ф. Муном рекомендуется построение траекторий в псевдофазовом пространстве (далее – псевдофазовых диаграмм) [12]. Псевдофазовая диаграмма представляет собой отображение временного ряда (в данной работе последовательности значений виброакустического сигнала через равные промежутки времени, определяемые частотой дискретизации f).

$$\Delta t = \frac{1}{f}$$

Отображение строится как множество точек в плоскости

$$(a_i, a_{i+1})$$

Логика отображения связана с тем, что если классическая фазовая диаграмма будет в одномерном случае построена в плоскости

$$(x, \frac{\partial x}{\partial t}),$$

то при бесконечно малом временном шаге Δt псевдофазовую плоскость можно представить похожим образом: по одной оси откладывается значение сигнала, по второй – величина, линейно связанная с его первой производной во времени

$$(a_i, a_i + \frac{\partial a}{\partial t} \cdot \Delta t)$$

Таким образом, отображение временного ряда в псевдофазовой диаграмме сходно по смыслу с отображением движения тела с одной степенью свободы в классической фазовой диаграмме [12].

Текущее десятилетие характеризуется всплеском интереса к нелинейным и хаотическим методам анализа данных. Так, отображения в псевдофазовой плоскости позволили португальским исследователям выявлять закономерности в лесных пожарах [13], землетрясениях [14] и других случайных событиях.

Для понимания закономерностей псевдофазового отображения примеры для простых сигналов приведены на рисунке 3.

Как видно, регулярное движение формирует аттрактор в виде замкнутой линии (количество замкнутых контуров связано с количеством гармоник), чистый шумовой сигнал равномерно занимает псевдофазовую плоскость, хаотический сигнал формирует фрактальный аттрактор. Линейные комбинации сигналов разного сорта сочетают узнаваемые элементы отображений на псевдофазовой диаграмме.

При построении псевдофазовых диаграмм сигналов, зарегистрированных описанной выше системой виброакустического контроля, выявлены характерные фигуры – аттракторы, которые можно связать с режимами рабочей штанги МП. Для перемещения первой секции рабочей штанги на различных скоростях осциллограммы и отображения сигналов приведены на рисунке 4.

На рисунках приведены отображения временных рядов виброускорения, обезразмеренного по формуле

$$a_i = \frac{A_i - \min(A)}{\max(A) - \min(A)},$$

где A – виброускорение, m/s^2 , a – нормированное виброускорение.

Для движений рабочей штанги с ТВС в захвате характерны аттракторы в форме замкнутых линий с достаточно широкими областями, занятыми траекториями системы. Это позволяет сопоставить изображения рисунков 4,а и 4,в с отображениями рисунков 3, а и 3, в. Таким образом, тип движения рабочей штанги с ТВС в захвате можно охарактеризовать как регулярный со значительной шумовой компонентой.

Движение рабочей штанги без груза в захвате характеризуется аттрактором сложной формы в виде вытянутой многолучевой звезды. Таким образом, можно говорить о частично хаотическом характере движения ненагруженной рабочей штанги.

Исследование на множестве фрагментов виброакустического сигнала позволило подтвердить выводы о смене характера отображения в псевдофазовой диаграмме при смене режима нагружения рабочей штанги. Для практического использования псевдофазовых диаграмм следует в дальнейших исследованиях выявить наиболее представительные численные показатели отображений, способные выступать как критерии для идентификации режима работы и технического состояния, совместно с классическими спектральными характеристиками.

Рассмотренный метод может использоваться для визуализации виброакустической информации в системе мониторинга. Типовые паттерны псевдофазовой диаграммы являются частью виброакустического портрета технологической операции, выполняемой машиной перегрузочной.

Работы по продлению сроков эксплуатации МПС-В-1000, выполненные НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в 2014-2016 годах [15], подтверждают перспективность структурирования информации об обследованиях и ремонтах машин перегрузочных в едином информационном пространстве. Исходя из вышесказанного, концепция виброакустического информационного паспорта перегрузочной кампании актуальна в свете требований новых федеральных норм и правил НП-096-15 [16], предписывающих накопление диагностической информации за весь срок эксплуатации для его обоснованного продления.

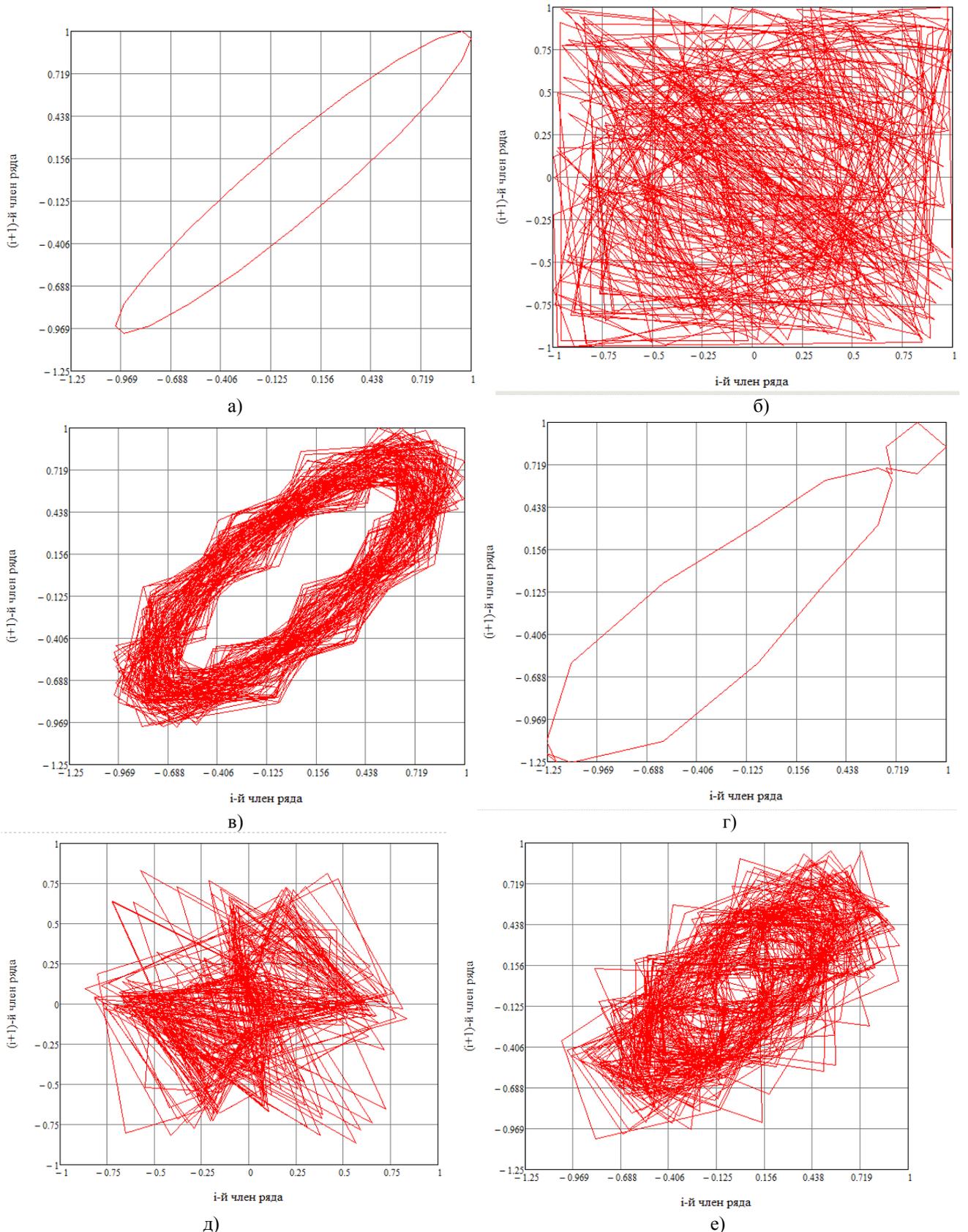


Рис. 3. – Характерные отображения различных сигналов в псевдофазовой диаграмме

а – отображение гармонического сигнала; б – отображение белого шума; в – отображение линейной комбинации гармонического сигнала и белого шума; г – отображение полигармонического сигнала; д – хаотический сигнал (аттрактор Лоренца); е – отображение линейной комбинации гармонического и хаотического сигналов [Characteristic mappings of various signals in a pseudo-phase diagram
a - harmonic signal display; b - white noise display; c - display of a linear combination of a harmonic signal and white noise; d - a polyharmonic signal mapping; e - chaotic signal (Lorenz attractor); f - mapping of a linear combination of harmonic and chaotic signals]

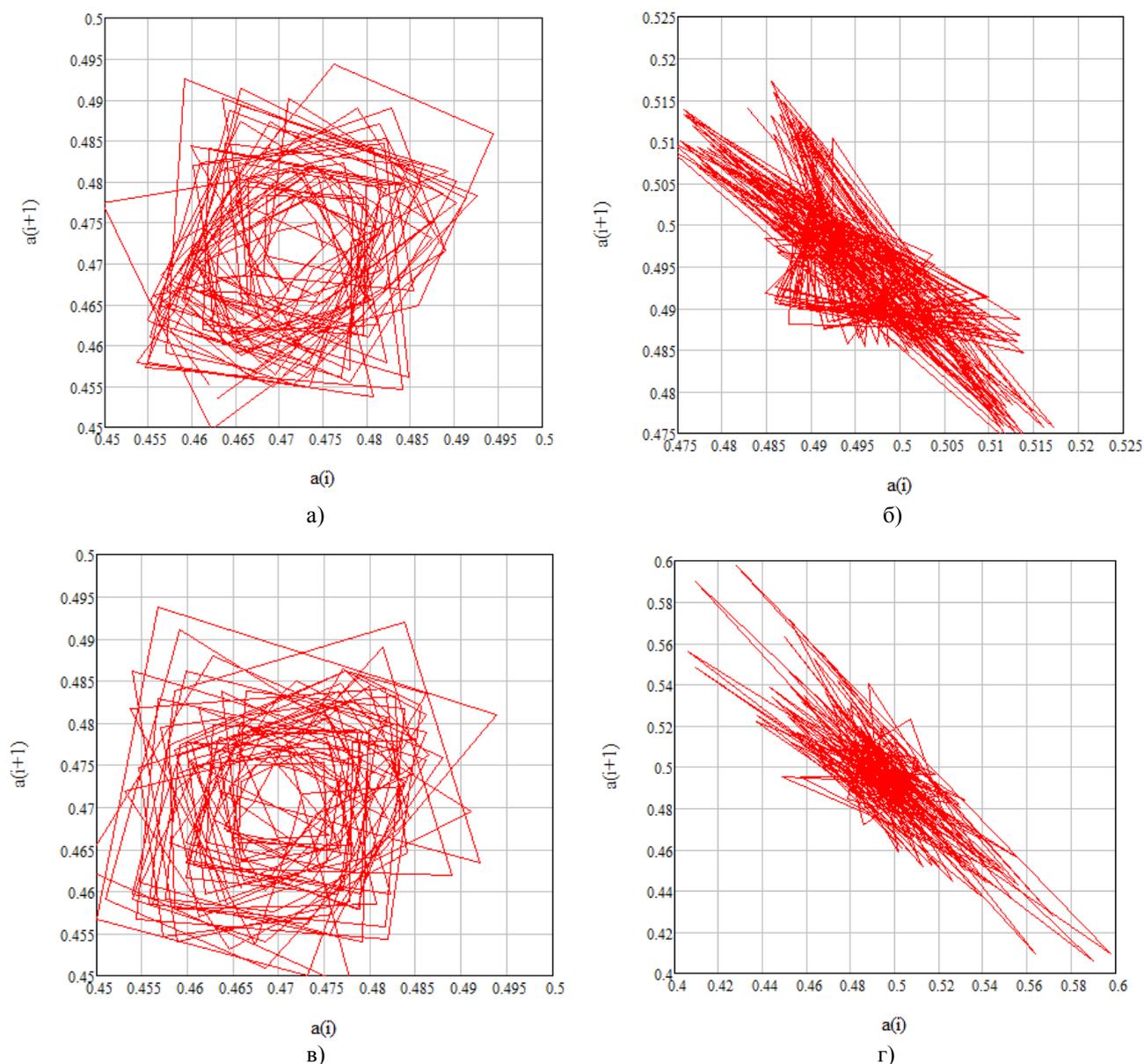


Рис. 4. – Отображения виброакустических сигналов, зарегистрированных при движении первой секции рабочей штанги

а – движение на рабочей скорости с ТВС в захвате; б – движение на малой скорости без нагрузки на захватах; в – движение на транспортной скорости с ТВС в захвате; г – движение на средней скорости без нагрузки на захватах [Vibroacoustic signals recorded when moving the first section of the working rod
 a -moving at the working speed with the fuel assembly in the grip; b - motion at low speed without load on the grippers; c - movement at the transport speed from the fuel assembly in the grip; g - motion at medium speed without load on the grippers]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрушечко, С.А. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации к эволюции проекта [Текст] / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Сенченков, В.Ф. Украинцев. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
2. Шиянов, А.И. и др. Системы управления перегрузочных манипуляторов АЭС с ВВЭР [Текст] / А.И. Шиянов, М.И. Герасимов, И.В. Муравьев. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.
3. Якубенко, И.А. Модернизация системы управления перегрузкой ядерного топлива на энергоблоке №1 Ростовской АЭС [Текст] / И.А. Якубенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4(9). – С. 35–39.
4. Терехов, Д.В. и др. Модернизация перегрузочной машины энергоблока №5 Нововоронежской АЭС [Текст] / Д.В. Терехов, В.И. Дунаев. // Теплоэнергетика. – 2014. – №2. – С. 65–71.
5. Korobkin V.V., Povarov V.P. New generation refueling machine information and control system. Nuclear Energy and Technology, Vol. 3, Issue 4, December 2017, pp. 302–306.

6. РЭ АТЭ.118.0003-2001. Модернизация перегрузочных машин для энергоблоков АЭС с ВВЭР. Концепция модернизации перегрузочных машин. Концерн «Росэнергоатом» [Текст], М., 2001. – 57 с.
7. Никифоров, В.Н. и др. Контроль технического состояния рабочей штанги перегрузочной машины для ВВЭР-1000 В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачёва, О.В. Паламарчук // Теплоэнергетика. – 2003 – №5 – С. 33–34.
8. Никифоров, В.Н. и др. Канал контроля технического состояния рабочей штанги машины перегрузочной типа МПС-В-1000-3У4.2 [Текст] / В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева, А.В. Чернов // Тез. докл. II всерос. науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – 19-23.11. 2001 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2001. – С. 116–117.
9. Umer Hameed Shah, Keum-Shik Hong. Active vibration control of a flexible rod moving in water: Application to nuclear refueling machines. Automatica, Vol. 93, July 2018, pp. 231–243.
10. Проскуряков, К.Н. Виброакустическая паспортизация АЭС – средство повышения их надежности и безопасности [Текст] / К.Н. Проскуряков // Теплоэнергетика. – 2005. – №12. – С. 30–34.
11. Абидова, Е.А. и др. Диагностирование электроприводной арматуры с использованием энтропийных показателей Е.А. Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, О.Ю. Пугачёва // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №4(21). – С. 69–77.
12. Мун, Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров [Текст] / Ф. Мун: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 312 с., ил.
13. Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Analysis of Forest Fires by means of Pseudo Phase Plane and Multidimensional Scaling Methods. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, Article ID 575872 – 8 p.
14. Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Dynamic analysis of earthquake phenomena by means of pseudo phase plane. Nonlinear Dynamics, 2013, Vol. 74, Issue 4, pp. 1191–1202.
15. Лапкис, А.А. и др. Особенности продления срока эксплуатации перегрузочных машин энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. [Текст] / А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачёва // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №1(18). – С. 95–103.
16. НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. – Утв. приказом Ростехнадзора №410 от 15.10.2015 г. [Текст] [Б.м.], 2015.

REFERENCES

- [1] Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasil'ev B.Ju., Generalov V.N., Kosourov K.B., Senchenkov Ju.M., Ukrainev V.F. AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov jekspluatcii k jevoljucii proekta [NPP with WWER-1000 Reactor. From the Physical Exploitation Basics to the Evolution of the Project]. M. Pub. Logos, 2010, 604 p. (in Russian)
- [2] Shijanov A.I., Gerasimov M.I., Muravjov I.V. Sistemy upravlenija peregruzochnyh manipulatorov AES s VVER [Control Systems for Handling Manipulators of NPP WWER reactor]. M. Pub. Energoatomizdat, 1987, 176 p. (in Russian)
- [3] Jakubenko I.A. Modernizacija sistemy upravlenija peregruzkoj jadernogo topliva na jenergobloke №1 Rostovskoj AES [Modernization of the Nuclear Fuel Congestion Management System at Unit 1 of Rostov NPP]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2013, №4(9), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 35–39. (in Russian)
- [4] Terehov D.V., Dunaev V.I. Modernizacija peregruzochnoj mashiny jenergobloka №5 Novovoronezhskoj AES [Modernization of the Fuel-Handling Machine of the Novovoronezh NPP Power Unit No. 5]. Teplojenergetika [Heat Power Engineering], 2014, №2, pp. 65–71 (in Russian)
- [5] V.V. Korobkin, V.P. Povarov. New generation refueling machine information and control system. Nuclear Energy and Technology, Volume 3, Issue 4, December 2017, DOI: 10.1016/j.nucet.2017.11.005, pp. 302–306. (in English)
- [6] RJe АТJe.118.0003-2001. Modernizacija peregruzochnyh mashin dlja jenergoblokov AES s VVER. Konceptija modernizacii peregruzochnyh mashin. Koncern «Rosjenergoatom» [RE АTE.118.0003-2001. Modernization of Fuel-Handling Machines for NPP WWER Reactor. The Concept of Modernization of Fuel-Handling Machines. Rosenergoatom Concern], M. 2001, 57 p. (in Russian)
- [7] Nikiforov V.N., Pugachjova O.Ju., Palamarchuk O.V. etc. Kontrol tehničeskogo sostojanija rabochej shtangi peregruzochnoj mashiny dlja VVER-1000 [Monitoring of the Technical Condition of the Fuel-Handling Machine Working Rod for WWER-1000]. Teplojenergetika [Heat Power Engineering], 2003, №5, pp. 33–34. (in Russian)
- [8] Nikiforov V.N., Pugacheva O.Ju., Chernov A.V. Kanal kontrolja tehničeskogo sostojanija rabochej shtangi mashiny peregruzochnoj tipa MPS-V-1000-3U4.2. Tezisy dokladov II vserossijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER», 19–23 nojabrja 2001 [The channel for Monitoring the Technical Condition of the MPS-V-1000-3U4.2 Fuel-Handling Machine Working Rod. Theses of Reports II all-Russian Scientific and Technical Conference "Providing the Safety of Nuclear Power Plants with WWER", 19-23 November, 2001], Podolsk. Pub. ОКБ «Гидропресс» [OKB Hidropress], 2001, pp. 116–117. (in Russian)
- [9] Umer Hameed Shah, Keum-Shik Hong. Active vibration control of a flexible rod moving in water: Application to nuclear refueling machines. Automatica, Volume 93, July 2018, pp. 231–243. (in English)
- [10] Proskurjakov K.N. Vibroakustičeskaja pasportizacija AES – sredstvo povyšhenija ih nadezhnosti i bezopasnosti [Vibroacoustic Certification of Nuclear Power Plants is a Means of Increasing their Reliability and Safety]. Teplojenergetika [Heat Power Engineering], 2005, №12, pp. 30–34. (in Russian)

- [11] Abidova E.A., Hegaj L.S., Chernov A.V., Pugachjova O.Ju. Diagnostirovanie jelectroprivodnoj armatury s ispol'zovaniem jentropijnyh pokazatelej [Diagnosis of Electric Drives Using Entropy Indicators]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №4,(21), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 69–77. (in Russian)
- [12] Mun F. Haoticheskie kolebanija: Vvodnyj kurs dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [перевод]. Perevod s anglijskogo [Chaotic Oscillations: Introductory Course for Scientists and Engineers]. M. Pub. Mir, 1990, 312 p. (in Russian)
- [13] Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Analysis of Forest Fires by means of Pseudo Phase Plane and Multidimensional Scaling Methods. Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014, Article ID: 575872, DOI: 10.1155/2014/575872, 8 p. (in English)
- [14] Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Dynamic analysis of earthquake phenomena by means of pseudo phase plane. Nonlinear Dynamics, 2013, Volume 74, Issue 4, pp. 1191–1202. (in English)
- [15] Lapkis A.A., Nikiforov V.N., Pugachjova O.Ju. Osobennosti prodlenija sroka jekspluatacii peregruzochnyh mashin jenergoblokov s reaktorami VVER-1000 [Peculiarities of Extending the Service Life of Fuel-Handling Machines with WWER-1000 Reactor Power Units]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №1(18), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 95–103. (in Russian)
- [16] NP-096-15. Trebovanija k upravleniju resursom oborudovanija i truboprovodov atomnyh stancij. Osnovnye polozenija. Utverzhdeny prikazom Rostehnadzora №410 ot 15.10.2015 [NP-096-15. Requirements for Resource Management of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Basic Provisions. - Approved Order of Rostekhnadzor No.410, October, 15, 2015.]. (in Russian)

Vibroacoustical Certification of Operating Modes of WWER Fuel-Handling Machines

A.A. Lapkis, V.N. Nikiforov, L.A. Pervushin

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
e-mail: VITIkafAE@mephi.ru*

Abstract – The article deals with the task of certification of operating modes and determining the technical state of the WWER fuel-handling machine based on the results of vibroacoustic monitoring. The use of pseudo-phase diagrams for vibroacoustic information visualization is proposed. An example of determining the reference characteristics of working rod operating modes of the WWER-1000 fuel-handling machine is considered.

Keywords: vibroacoustic control, information passport, pseudo-phase diagram, fuel overload, fuel-handling machine, working rod.