

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНТРОПИЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Е.А. Абидова, А.Е. Дембицкий, Н.А. Симакова, А.А. Лапкис (ВИТИ НИЯУ МИФИ)

В статье приведен анализ методов обработки сигналов в диагностических комплексах. Показано, что традиционные методы не позволяют в полном объеме получить информацию о дефектах ввиду нелинейности и хаотических проявлений взаимодействия элементов оборудования и дефектов. Обосновано использование энтропийных преобразований в блоках обработки сигналов диагностических комплексов.

Ключевые слова: диагностический комплекс, информация, сигналы, энтропия, диагностика, временные ряды, вероятность, хаотичность, дефект.

Введение

Существенная роль в повышении надежности эксплуатации энергетического оборудования принадлежит информационно-диагностическому сопровождению. Диагностические комплексы являются неотъемлемой частью технологии выявления трендов состояния оборудования и прогнозирования его надежности. Применительно к атомной энергетической отрасли увеличение межремонтного периода и перевод определенного класса оборудования на обслуживание «по состоянию» определяют актуальность исследований по совершенствованию методов обработки информации в системах диагностики оборудования АЭС.

Постановка задачи

Современные диагностические комплексы базируются на использовании информационно-измерительных систем. Согласно нормативным документам, они определяются как «совокупность объединения измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования и обработки в целях предоставления потребителю в требуемом виде». Предполагается, что носителем информации об исследуемом процессе является сигнал. Процедура получения сигнала об объекте исследования представляется уравнением [1]:

$$\lambda = R_1 \cdot R_2 \cdot k \cdot X, \quad (1)$$

где λ – диагностический сигнал, преобразованный во временной ряд; R_1 – преобразования, выполняемые в аналоговой форме; R_2 – преобразования, выполняемые в цифровой форме; k – аналогово-цифровое преобразование; X – сигнал на входе измерительного устройства.

Уравнение (1) позволяет описать операции, суть которых заключается в фильтрации и квантовании сигналов по уровню и времени. В настоящее время существует

широко используемая теория измерительных преобразований [2], позволяющая оценить соответствующие погрешности.

Рассмотрим особенности разработки диагностических комплексов, предназначенных для мониторинга состояния энергетического оборудования. Исходной формой представления диагностических сигналов являются временные ряды, представляющие собой упорядоченную последовательность пар измеренных величин, одна из которых является временем. Формирование временных рядов осуществляется операцией квантования по времени. Она сводится к замене функции, содержащей бесконечно большое число значений в заданном интервале, в решетчатую, которой соответствует множество огибающих непрерывных функций. Поэтому восстановить непрерывный сигнал по его дискретным значениям не представляется возможным.

Проанализируем дискретизацию диагностического сигнала по спектру S . Опрос соответствующих датчиков представляет собой модуляцию аналогового сигнала. Модулирующему сигналу соответствует периодическая импульсная функция с периодом T , равным интервалу времени между двумя последовательными опросами. В результате модуляции вокруг каждой модулирующей частоты образуется верхняя и нижняя боковые полосы спектра, которые могут накладываться друг на друга. В этом случае энергия дискретного сигнала будет включать энергию модулирующего сигнала. Данное явление известно под названием «биение». Оно приводит к возникновению погрешностей, зависящих от соотношений между частотными спектрами диагностического сигнала и частотой опроса. Например, если частота квантования в 10 раз превосходит исследуемый интервал частот, то погрешность, вызываемая биением спектров, может достигнуть нескольких процентов [4]. Поэтому частоту модуляции необходимо выбирать, исходя из требования теоремы Котельникова и априорных знаний о физических процессах,

протекающих в объекте диагностирования. Следует также учитывать, что теорема Котельникова справедлива для непрерывных функций, имеющих ограниченный спектр частот.

Следовательно, для получения достоверной информации необходимо, если это не противоречит цели выявления дефектов диагностируемого оборудования, ограничить спектр исследуемого сигнала вводом в структуру комплекса устройств предварительной обработки на уровне аналоговых преобразований с помощью фильтров нижних частот: Бесселя, Баттерворта или Чебышева. Исходя из практического опыта разработки диагностических комплексов, можно рекомендовать фильтр Баттерворта второго порядка [5].

Временные ряды, используемые в диагностических комплексах атомной отрасли, преобразовываются или подвергаются процедуре параметризации методами статической обработки или преобразования данных с помощью набора ортонормированных тригонометрических функций. Предполагается, что временной ряд содержит интересующий диагностический тренд, регулярную и случайную компоненты, параметры которых изменяются. Поэтому основное внимание уделяется выделению регулярных составляющих таким образом, чтобы в остатке оказался «белый шум». Параметризация сигналов считается законченной, если определены параметры регулярной составляющей, например, в виде спектра, и стохастические моменты распределений.

Недостатком такого подхода является убеждение, основанное на предположении о непрерывности, линейности и стационарности диагностических сигналов и порожденных ими временных рядов.

Если отказаться от гипотезы о линейности процессов, протекающих в объектах диагностирования, то необходимо признать, что многие эксплуатационные дефекты придают механизмам нелинейные динамические свойства, влияние которых невозможно выявить традиционными методами.

И. Пригожин в своих исследованиях по неравновесной статической механике [6] пришел к выводу, что «случайный характер взаимодействий определяется самоактивностью элементов системы». В работе [7] обоснован вывод о том, что энтропия обладает совокупностью свойств, позволяющих ее использовать в качестве меры неопределенности при статистических описаниях процессов. Утверждение Л. Больцмана, что энтропия характеризует недостающую информацию о системе, обосновывает подход к использованию энтропийных методов для обработки диагностических сигналов.

Энтропия является базисным понятием во многих науках и, в частности, в теории информации. Ее можно определить как меру неопределенности некоторой ситуации. Максимальные значения энтропия приобретает при низшей степени структурной организации системы, то есть наибольшей хаотичности и неупорядоченности.

К. Шеннон придал этому понятию строгий математический смысл. Количественно величину энтропии $H(x)$ можно рассчитать, рассматривая неопределенность

сложного статистического опыта с возможным числом исходов, равным сумме неопределенности отдельных опытов:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^N p(X_i) \cdot \log p(X_i), \quad (2)$$

где X_i представляет собой дискретные значения временного ряда с диапазоном вариаций N ; $p(X_i)$ – вероятность заполнения уровня.

В принципе энтропия безразмерна, но если в (2) используется двоичный логарифм, то единицей измерения является бит. Формулу (2) можно рассматривать как удобный функционал, внешне похожий на термодинамическую интерпретацию понятия энтропии в физике. В настоящее время эта аналогия достаточно строго узаконена. Роль микросостояний ансамбля частиц играет квант значений временного ряда, а макросостояние определяется всеми значениями.

Таким образом, диапазон вариаций X_i разбивается на N квантов. Далее определяется m_i – значение временного ряда, оказавшегося в i -м кванте. Вероятность определяется по формуле:

$$p(X_i) = \frac{m_i}{M}, \quad (3)$$

где M – общее число значений временного ряда.

По определению энтропия К. Шеннона количественно связывает распределение параметров, характеризующих систему с ее состоянием, следовательно, если состояние системы будет изменяться, то изменение величины энтропии будет количественно характеризовать степень этого изменения. Данное обстоятельство определяет смысл использования энтропийных преобразований сигналов в диагностических комплексах.

А.Н. Колмогоров обобщил понятие энтропии на область теории динамических систем посредством оценки скорости потери информации на некотором интервале времени [2].

$$K = \lim_{dt \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{K(n)}{ndt}, \quad (4)$$

где $K(n)$ – мера априорной неопределенности; ndt – интервал времени; ε – рассматриваемая ячейка; ε – рассматриваемая ячейка в фазовом пространстве, определенном для анализируемой системы (для диагностических сигналов это может быть, например, малый диапазон значений измеряемой величины).

Выражение (4) оценивает меру хаотичности системы, однако для прикладных задач наибольшее распространение получило использование аппроксимационной энтропии $ApEn$ [9], вычисляемой по формуле:

$$ApEn = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \ln \frac{c_r^m}{c_r^{m+1}}, \quad (5)$$

где c_r^m и c_r^{m+1} – вероятность появления таких пар паттернов, расстояние между которыми не превышает

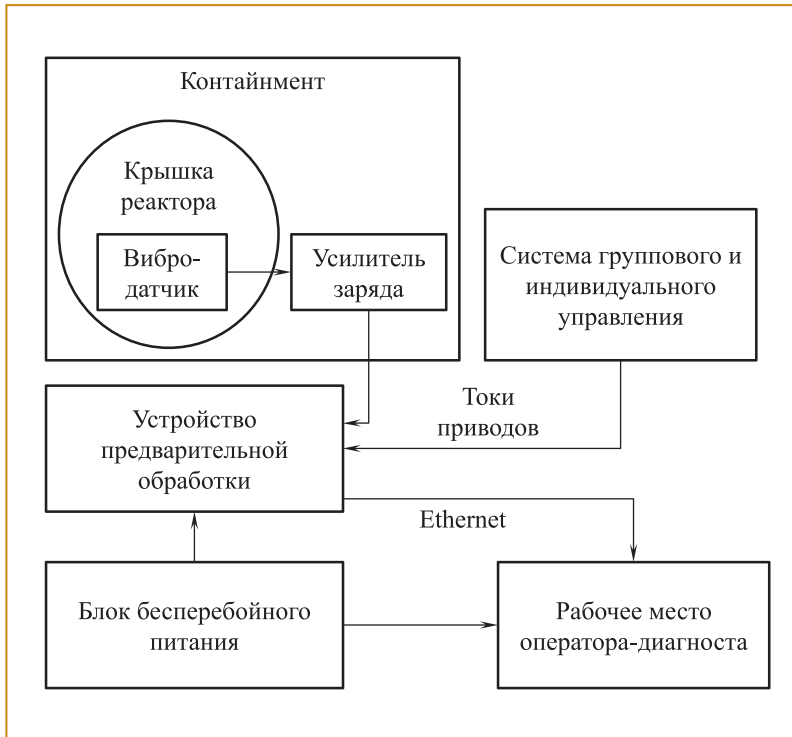


Рис. 1 Общий вид и функциональная схема диагностического комплекса

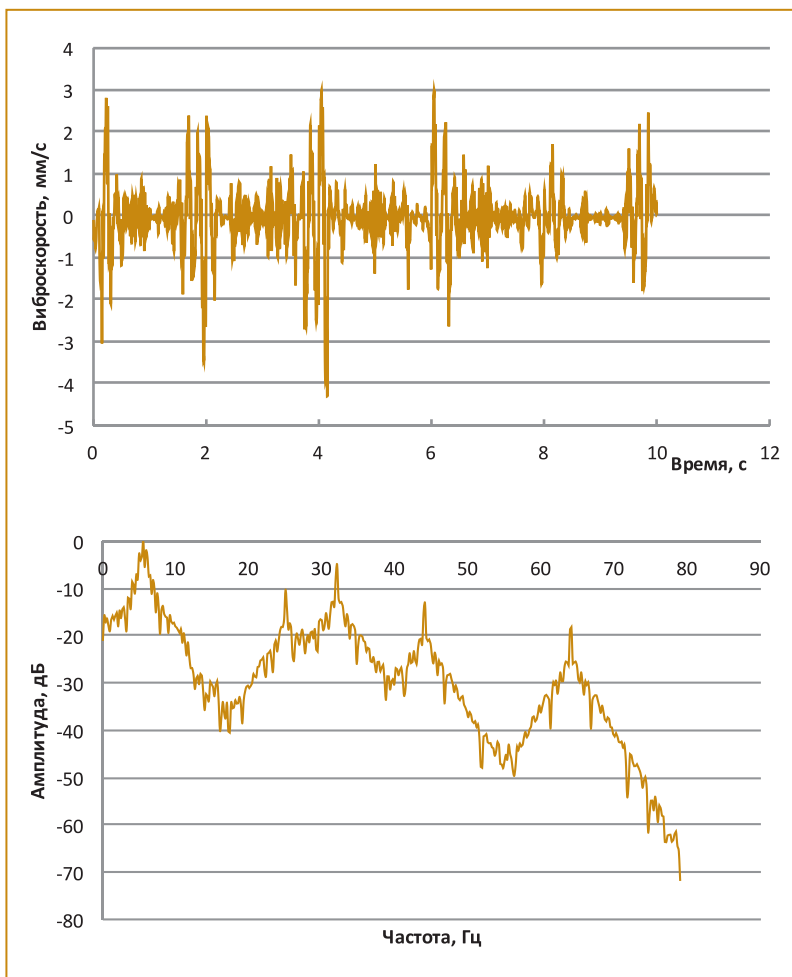


Рис. 2 Осциллограмма и спектр виброакустического сигнала привода СУЗ

Часто бывает, что, только поддав в себе вопрос «почему», мы обнаруживаем важные факты; которые затем, в ходе нашего исследования, ведут к ответу.

Людвиг Витгенштейн

заданный порог; m – размерность вложения. Аппроксимационная энтропия является приближённой оценкой энтропии по Колмогорову.

Значения $ApEn$ стремятся к нулю при регулярном движении и стремятся к бесконечности в случае отсутствия эргодичности. Применительно к состояниям детерминированного хаоса величина $ApEn$ принимает положительные значения.

Результаты проведенного теоретического анализа были использованы при разработке диагностического комплекса для приводов системы управления и защиты (СУЗ) атомных станций, в котором обработка данных проводилась на основе традиционных и энтропийных методов. Общий вид и функциональная схема комплекса представлена на рис. 1.

Рассмотрим результаты стендовых диагностических исследований привода системы управления и защиты типа АРК ядерного реактора ВВЭР-440. Фрагменты записи осциллограммы и спектра виброакустического сигнала представлены на рис. 2.

Влияние дефектов может привести к возникновению нелинейной динамики в элементах привода и появлению хаотических режимов. Хаотическая компонента не выявляется традиционными методами, и это может привести к необнаружению дефектов.

Применительно к диагностированию привода СУЗ воспользуемся расчетом аппроксимационной и шенноновской энтропий для сигналов вибрации. Состояние 1 (рис. 3) соответствует исправному приводу, остальные состояния отражают влияние дефектов различных типов: 2- расцепление защелки магнита, 3 - пропуск шага, 4 – отклонение скорости перемещения привода, 5 – затирание резьбового соединения блока перемещения, 6 – заедание защелки, 7 – износ защелок привода, 8 – наличие постороннего предмета в корпусе.

Распределение уровней значений $H(x)$ и $ApEn$ демонстрирует чувствительность энтропийных показателей к состояниям диагностируемого

Таблица. Реакция диагностических показателей на состояние привода СУЗ

№	Состояние	Признаки в спектре Фурье	H_{sh}	$ApEn$	Комментарий
1	Исправное	—	1,5	0,008	—
2	«Расцепление защелки магнита»	Рост амплитуды на частоте 32 Гц	1,6	0,009	Дефект характеризуется ростом варибельности и хаотичности
3	«Пропуск шага»	Отсутствие пика на частоте 14 Гц	1,4	0,009	Дефект характеризуется снижением варибельности и ростом хаотичности
4	«Заедание защелки»	Отсутствие пика на частоте 50 Гц	1,4	0,020	Дефект характеризуется снижением варибельности и ростом хаотичности
5	«Износ защепок привода»	Рост амплитуд на частотах 32, 42 и 56 Гц	1,6	0,004	Дефект характеризуется ростом варибельности и снижением хаотичности
6	«Наличие постороннего предмета в корпусе»	Рост амплитуды на частоте 15 Гц	1,5	0,020	Дефект характеризуется ростом варибельности и хаотичности

оборудования. Сопоставление диагностических показателей с использованием спектральных и энтропийных преобразований представлено в таблице.

Анализ данных (табл. 1) позволяет выявить корреляции энтропийных и спектральных показателей. Вариация их значений демонстрирует реакцию на изменение состояния оборудования и обосновывает возможность использования энтропийных оценок к разработке диагностических комплексов.

Выводы

1. На основе теоретического и экспериментального анализа установлено, что энтропийные показатели дополняют оценки состояния объекта, рассчитанные по традиционным методам.

2. Использование в диагностических комплексах методов обработки, базирующихся на применении статистических и спектральных преобразований, накладывает ограничения на свойства обрабатываемых сигналов, которые не всегда соответствуют характеру генераций хаотических процессов, происходящих в объектах диагностирования.

3. Анализ информационных свойств энтропийных преобразований обосновывает их использова-

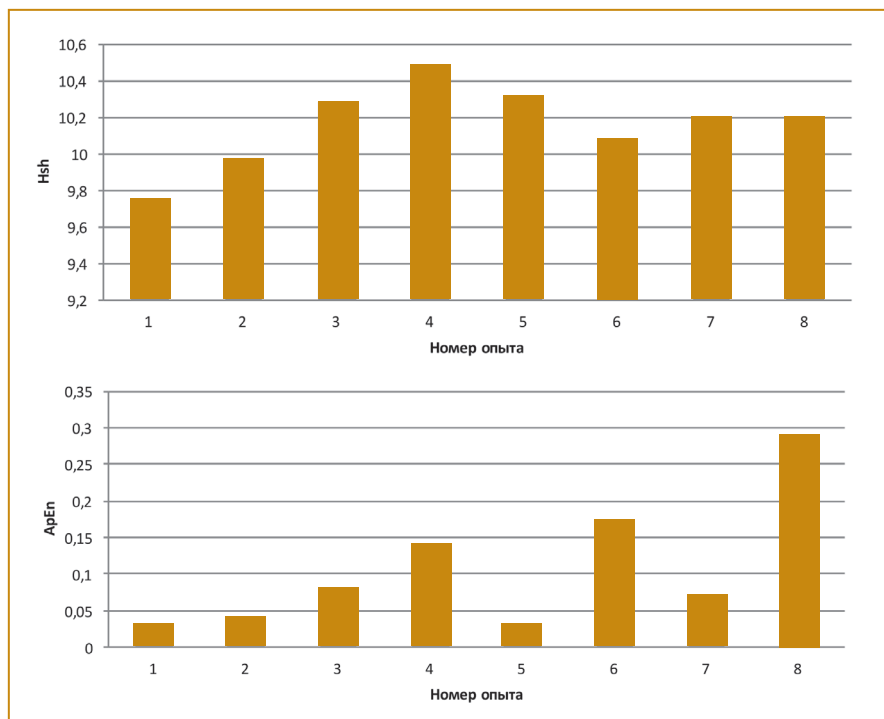


Рис. 3. Результаты диагностирования привода СУЗ с использованием энтропийных показателей: а) – энтропия Шеннона; б) аппроксимационная энтропия

ние в системах обработки диагностических сигналов и обеспечивает инвариантность к проявлению свойств нестационарности и хаотичности.

4. Экспериментально подтверждено существенное влияние состояния диагностируемого оборудования

на уровне энтропийных показателей, варибельности и хаотичности диагностических сигналов.

Список литературы

1. *Цветков Э.И.* Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э.И. Цветков. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
2. *Цветков Э.И.* Метрологические испытания без применения эталонов / Э.И. Цветков // Мир измерений. – 2016. – С. 12-18
3. *Бородин А.Н.* Случайные процессы: Уч. пособие / А.Н. Бородин. - СПб.: Лань, 2013. –640 с.
4. *Артемьев В.М.* Дискретные системы управления со случайным периодом квантования / В.М. Артемьев, А.В. Ивановский. - М.: Энергоатомиздат, 2018. - 486 с.
5. *Сас А.В* и др. Регистрация характеристик инверторных источников питания Текст / А.В. Сас, М.А. Островский // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №2(19). – С. 29–32
6. *Николис Г., Пригожин И. Р.* Познание сложного. Введение / Пер. с англ., М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344 с.
7. *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем / Ю.Л. Климонтович. – М.: Машиностроение, 2015. –376 с.
8. *Чумак О. В.* Энтропии и фракталы в анализе данных. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.
9. *Абидова Е.А.* Совершенствование методов обработки информации в системах диагностики оборудования АЭС. Монография / Е.А. Абидова, А.В. Чернов, Л.С. Хегай – М.: НИЯУ МИФИ; Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 128 с.

*Абидова Елена Александровна - канд. техн. наук, доцент, кафедра «Информационные и управляющие системы»,
 Лапкис Александр Аркадьевич - старший преподаватель кафедры атомной энергетики,
 Симакова Наталья Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Информационные и управляющие системы»,
 Дембицкий Артем Евгеньевич – зам. заведующего кафедрой атомной энергетики,
 Волгодонский инженерно-технический институт филиал Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" (г. Волгодонск).
 E-mail: VITIkaFIUS@mephi.ru, aedembitskii@mephi.ru*

Системы испытания аккумуляторов электромобилей

Keysight Technologies, Inc., лидер в области контрольно-измерительных технологий, и Proventia Oу, международная финская технологическая компания, предоставляющая решения для борьбы с изменением климата в отраслях двигателестроения, машиностроения и автомобилестроения, объединили усилия в области совершенствования решений для испытания аккумуляторов электромобилей (ЭМ).

У автопроизводителей, поставщиков и испытательных центров есть необходимость в увеличении пробега ЭМ без дозарядки, повышении их динамических характеристик и безопасности, а также в снижении затрат. Экономия времени приобретает решающее значение при разработке и тестировании высоковольтных аккумуляторов на этом конкурентном рынке. Сотрудничество между компаниями Keysight и Proventia обеспечивает возможность быстрого развертывания безопасной испытательной лаборатории независимо от местоположения.

В рамках испытательной лаборатории реализуются следующие ключевые решения:

- Keysight Scienlab для испытания аккумуляторов, в том числе испытательная система SL1700A для тестирования уровня заряда высоковольтных аккумуляторов напряжением до 1500 В. В данной системе большое внимание уделено вопросам безопасности с дублированием измерений, а также используется новая технология силовых полупроводников из карбида кремния (SiC) для высоковольтных аккумуляторов, обеспечивающая возможность рекуперации 96 % энергии;
- программное обеспечение Keysight Scienlab Energy Storage Discover, которое осуществляет управление и

контроль тестовых систем и лабораторных компонентов с испытуемого устройства, в том числе контроль системы управления аккумулятором и климатической камеры;

- программное обеспечение Keysight PathWave Lab Operations для испытания аккумуляторов позволяет управлять всей лабораторией и оптимизировать рабочий процесс, сбор и обработку данных;

- стандартизированные модульные испытательные станции Proventia, позволяют клиентам выбирать испытательные камеры подходящего размера для быстрого развертывания, обеспечивая сокращение времени и затрат благодаря своей масштабируемости;

- испытательные лаборатории Proventia предоставляют возможности интеграции и контроля климатических камер, систем кондиционирования жидкости и кондиционирования воздуха, диспетчерских и помещений для подготовки ИУ. Для предотвращения опасных ситуаций и защиты здоровья сотрудников при испытании аккумуляторов предусмотрены функции обнаружения газа и пожара, а также системы сигнализации и контроля доступа.

Сотрудничество компаний Keysight и Proventia позволило предложить клиентам модульную, безопасную и быструю в развертывании инфраструктуру испытательной лаборатории, оснащенную современными решениями для тестирования и испытания аккумуляторов, отвечающую конкретным потребностям клиентов. Применение этих технологий позволяет автопроизводителям ускорить вывод аккумуляторов на рынок без ущерба для производительности, качества и возможностей испытаний.

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