
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ АРМАТУРЫ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНТРОПИЙНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

© 2016 Е.А. Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, О.Е. Драка, О.Ю. Пугачёва

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

Диагностирование электромеханического оборудования АЭС требует разработки методов, направленных на контроль степени износа по сигналу тока двигателя. Показано, что износ влияет на стохастические параметры сигнала, которые не оцениваются штатными методами. Целью работы явилась разработка методов, направленных на определение стохастических параметров сигнала тока электромеханического оборудования. В рамках работы решены следующие задачи: теоретически показана связь энтропии Шеннона с состоянием электроприводной арматуры; диагностические сигналы оборудования АЭС обработаны с использованием предлагаемых и штатных методов, и показана большая чувствительность энтропии Шеннона по отношению к отдельным видам дефектов.

Ключевые слова: техническая диагностика, токово-временные параметры, спектральный анализ, энтропия Шеннона, АЭС.

Поступила в редакцию 11.12.2016

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика электроприводного оборудования по току двигателя получает всё большее распространение благодаря упрощению, большей оперативности процедуры диагностирования по сравнению с вибрационными, виброакустическими методами [1]. Например, диагностика более тысячи единиц электроприводной арматуры (кранов, клапанов, вентилях, задвижек) стандартного блока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 осуществляется в течение месяца в период планово-предупредительного ремонта. За это время регистрируются сигналы тока электроприводной арматуры при совершении ею операций открытия и закрытия, сигналы подвергаются анализу согласно методике; по результатам анализа формируются протоколы. По результатам диагностирования арматура допускается к дальнейшей эксплуатации, либо подвергается ремонту с использованием ресурсов – механического или электрического цеха в зависимости от обнаруженной неисправности.

В настоящее время отделами технической диагностики АЭС и организациями, ежегодно осуществляющими диагностирование оборудования АЭС, накоплены базы данных диагностических сигналов тока и соответствующих протоколов. Согласно методике, зарегистрированной в госкорпорации "Росатом", по сигналу тока регистрируются токово-временные и спектральные параметры [2]. Одним из важнейших параметров, зарегистрированных по огибающей сигнала тока, является плавность хода, определяемая по формуле:

$$Y_{\%} = \left(1 - \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{median}}\right) 100\%, \quad (1)$$

где I_{max} , I_{min} , I_{median} – наибольшее, наименьшее и медианное среднее значения в огибающей сигнала тока (см. рис. 1).

Значение $Y_{\%}$ менее 75% трактуется как неисправное состояние, убывание $Y_{\%}$ как ухудшение.

Использование токово-временных и спектральных показателей удобно на практике, однако данные показатели отражают только детерминированные и отчасти стохастические особенности диагностических сигналов. При этом известно, что диагностические сигналы формируются под влиянием как детерминированных, стохастических, так и хаотических факторов.

В исследованиях [3-6] показано, что развитие дефекта как электрической, так и механической части привода, приводит к отклонениям положения ротора относительно статора. При этом центр масс ротора двигается по траектории, характер которой определяется состоянием машины. С использованием бифуркационных диаграмм показано [6], что по мере развития дефекта наблюдается усложнение траектории. Например, ротор совершает квазипериодические, двух-, трех- и более периодические вращения, переходит к хаотическим движениям, возвращается к упорядоченному восьми-, десятипериодическому вращению, снова переходит к хаотическим движениям. Отклонение ротора от соосности со статором, его сложные движения отражаются в токе статора. В токе статора при наличии дефектов наблюдаются отклонения от синусоидальности, на чем и основан принцип диагностики электроприводного оборудования по току двигателя.

Из-за мгновенных изменений трения, демпфирования или условий нагружения, диагностические сигналы электро-механических систем часто характеризуются нелинейным поведением. Таким образом, методы оценки нелинейного параметра обеспечивают хорошую альтернативу выделения признаков дефектов, скрытых в измеренных сигналах, которые не могут быть эффективно идентифицированы с использованием других методов. Наиболее адекватными в данной ситуации являются методы анализа сигнала, основанные на исследовании информационных характеристик, в частности на оценке энтропийных параметров.

Известен ряд работ по оценке энтропийных параметров – шенноновской, перестановочной и аппроксимационной энтропии [3-5] – рассчитанных по сигналам вибрации диагностируемого оборудования. Однако оценка энтропийных параметров по сигналам тока, потребляемого электромеханическим оборудованием в процессе работы, до сих пор не проводилась. Данная работа представляет определенную трудность ввиду сложности отображения диагностических параметров в сигнале тока. Тем не менее, такая работа актуальна, поскольку диагностика электроприводного оборудования по току двигателя получает всё большее распространение благодаря большей простоте и оперативности диагностирования по сравнению с вибрационными, методам.

Целью настоящей работы является разработка метода, предназначенного для анализа диагностических сигналов тока двигателя электроприводного оборудования, содержащего детерминированные, стохастические и хаотические компоненты. В настоящей работе приводятся результаты вычисления энтропийных показателей сигналов тока электроприводной арматуры, измеренных в промышленных условиях в сравнении с тестовыми сигналами, характеризующими различные состояния объекта.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНТРОПИЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Настоящая работа изучает целесообразность использования Шенноновской энтропии для обнаружения динамических изменений в сигналах тока. Шенноновская энтропия характеризует отклонения данного распределения амплитуд от равномерного распределения по уровням. Если все уровни заполнены равномерно, вероятность

попадания на каждый из уровней одинакова, в этом случае информационная энтропия максимальна. С другой стороны, если значения находятся на одном уровне, то $H_{sh}=0$ [7].

Шенноновская энтропия рассматривается как мера неопределенности в физическом процессе. Переупорядочивание не будет менять значение H_{sh} , поэтому Шенноновская энтропия считается глобальной мерой, отличной от локальных.

Рассматривая дискретный источник, для каждого возможного состояния I устанавливается вероятность. Для нахождения вероятностей p_i был использован следующий алгоритм: в рассматриваемой выборке, состоящей из N значений $\{x_k\}$, находим минимальное (x_{min}) и максимальное (x_{max}) значение. Затем интервал между максимальным и минимальным значением делим на n уровней.

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{n}$$

Далее находим число $\{x_k\}$, попавшее в каждый из уровней. После чего рассчитываем вероятность попадания значения из выборки в i -ый уровень.

$$p_i = \frac{\Delta N_i}{N}$$

Для расчёта энтропии используется формула Шеннона (1).

$$H_{sh} = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНТРОПИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Электромеханическая система (которой является электроприводная арматура) состоит из многих деталей, которые взаимодействуют друг с другом, когда машина функционирует. Измеренный сигнал тока, полученный при данном состоянии, сложен из-за отклонения от синусоидальности и шумов [1,8]. Получающийся сигнал становится более сложным при наличии неисправностей [3-5,8].

Было проведено множество измерений для обнаружения неисправностей в электроприводной арматуре. Вычислялись токово-временные и спектральные параметры. С целью исследования целесообразности нетрадиционных статистических методов вычислялась также энтропия Шеннона. Было обнаружено, что диагностические сигналы, кроме сигналов абсолютно исправных состояний, формируют два класса состояний: "отклонения в редукторе и ходовой части" и "отклонения в работе двигателя". Следует отметить, что данная классификация удобна с точки зрения разделения ремонтных работ между электрическим и механическим цехами.

Для того чтобы количественно охарактеризовать состояние электромеханической системы и её деградацию (как рост её дефектов), необходимы тестовые сигналы для обеспечения справочной базы данных. Такие тестовые сигналы были сформированы для представленного исследования, на основании сигналов тока, измеренных на обмотке статора двигателя. В качестве математической модели диагностического сигнала оборудования с разными стадиями дефекта можно рассматривать временной ряд, заданный последовательностью дискретных отсчетов, в котором степень регулярности находится в прямой зависимости от состояния оборудования.

На основании анализа сигналов тока двигателя арматуры при наличии механических дефектов в приводе или ходовом узле был сформирован тестовый сигнал с модуляцией [8]:

$$I = I_T(1 + I_p \sin \omega_p t + I_d \sin \omega_d t) \sin \omega_T t + \delta, \quad (3)$$

где I_T, ω_T – амплитуда и частота рабочего тока ($\omega_T \sim 50$ Гц, I_T – 10 А ради определенности);

I_p, ω_p – характеризуют амплитуду и частоту гармоники ротора, при чем I_p с развитием дефекта растет, а $\omega_p \sim 24$ Гц для определенности;

I_d и ω_d – амплитуда и частота срабатывания дефектного узла, I_d растет с развитием дефекта, а ω_d соответствует частоте срабатывания дефектного узла;

δ – шумовая составляющая, которая моделируется гаусовским шумом и растет при развитии дефекта.

Результаты моделирования механического дефекта представлены в таблице 1: параметры моделирования, вид сигнала спектр и энтропия Шеннона. Видно, что развитие дефекта в сигнале сопровождается увеличением глубины модуляции, а в спектре ростом боковых относительно гармоники тока составляющих гармоник ротора и дефекта. Также видно, что отклонение от синусоидальности резко (более чем в два раза) меняют показатели энтропии Шеннона, однако дальнейшее усугубление специфических признаков дефекта (рост I_p и I_d) не приводит к существенному росту H_{sh} ; дальнейшее возрастание показателя энтропии определяется ростом шумовой составляющей.

Другой тестовый сигнал связан с имитацией класса неисправностей, связанных с работой двигателя. Ряд неисправностей (перекос фаз, короткое замыкание витков) можно описать тестовым сигналом со сложением [8]:

$$I = I_T(1 + I_p \sin \omega_p t) \sin \omega_T t + I_s \sin \omega_s t + \delta \quad (4)$$

здесь I_s и ω_s – амплитуда и частота гармоники скольжения двигателя.

Наличие дефекта характеризуется специфической, отличной от предыдущего представления формой временного сигнала (см. Таблица 1). В спектре данный класс дефектов не всегда сопровождается диагностическими признаками. Также, как в предыдущих представлениях, видно, что отклонение от синусоидальности резко меняют показатели энтропии, однако дальнейшее усугубление специфических признаков дефекта (рост I_p и I_s) не приводит к росту H_{sh} ; дальнейшее возрастание показателя энтропии определяется ростом шумовой составляющей. Даже незначительный (менее 1% относительно амплитуды сигнала) рост шумовой составляющей, практически не определимый по сигналу и спектру, заметно влияет на показатель H_{sh} .

Результат подтверждает, что моделирование значения H_{sh} обеспечивает количественную меру деградации динамического сигнала, который характеризует ухудшение состояния всего механизма.

Таблица 1. – Результаты обработки тестовых сигналов с модуляцией

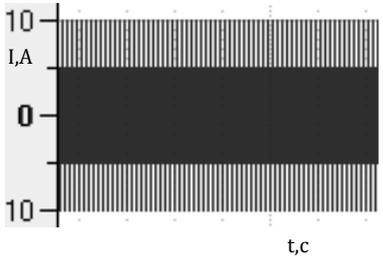
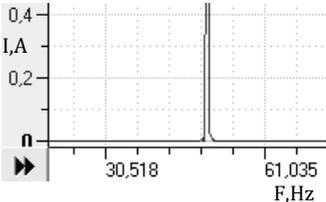
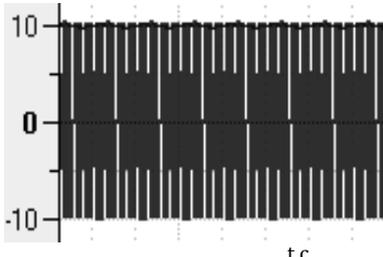
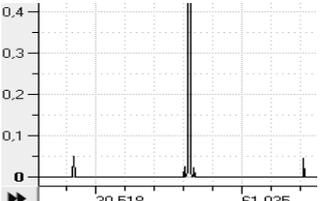
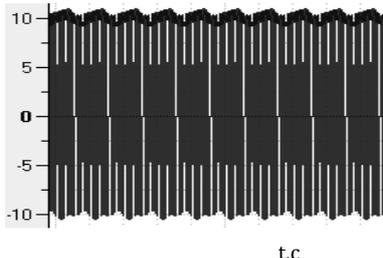
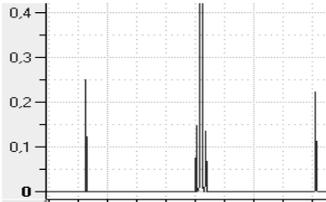
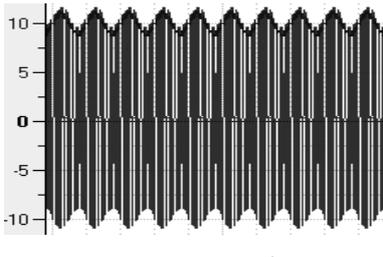
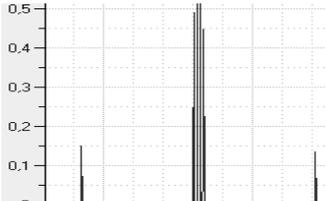
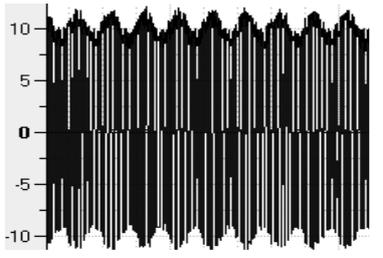
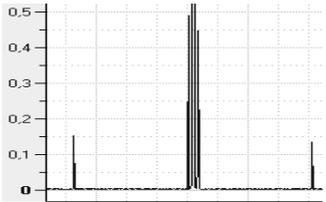
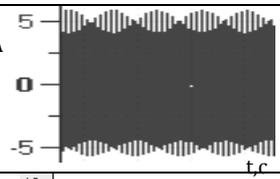
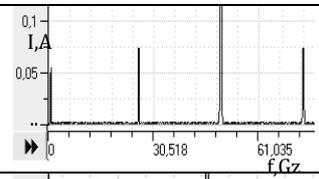
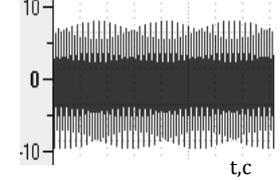
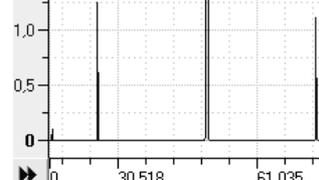
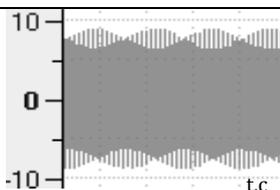
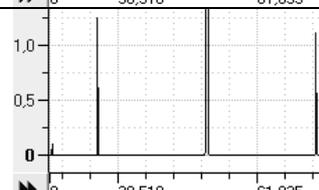
№ п/п	Параметры	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	$I_p = 0$ $I_d = 0$ $\delta = 0$ плавность 100%			4,2
2	$I_p = 0,01$ $I_d = 0,01$ $\delta = 0$ плавность 97%			8,9 (+53%)
3	$I_p = 0,05$ $I_d = 0,03$ $\delta = 0$ плавность 84%			9,3 (+4%)
4	$I_p = 0,03$ $I_d = 0,1$ $\delta = 0$ плавность 74%			9,4 (+1%)
5	$I_p = 0,03$ $I_d = 0,1$ $\delta = 0,03$ плавность 53%			11,1 (+15%)

Таблица 2. – Результаты обработки тестовых сигналов со сложением

№ п/п	Параметры	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	$I_p = 0,07$ $I_s = 0,07$ $\delta = 0$ плавность 80%			10,8
2	$I_p = 0,1$ $I_s = 0,1$ $\delta = 0$ плавность 66%			10,8 (0%)
3	$I_p = 0,1$ $I_s = 0,1$ $\delta = 0,1$ плавность 65%			11,9 (+9%)

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНТРОПИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ

Наконец были исследованы показатели энтропии сигналов электроприводной арматуры, эксплуатируемой на производстве. В первую группу были отобраны сигналы оборудования с механическим дефектом (отклонение в работе ходового узла), характеризующиеся модуляцией. Некоторые результаты представлены в таблице 3. Приведены традиционный показатель плавность хода, вид сигнала, спектр и H_{sh} . Первая арматура 1ВК-2 имеет незначительные признаки дефекта в сигнале и спектре и характеризуется самой низкой энтропией. В сигнале второй арматуры 13ГО-01 наблюдаются выраженные диагностические признаки, её состояние близко к модели, описанной в пункте 4 таблицы 1, а показатель энтропии вырос на 37%. Третья арматура по своим диагностическим параметрам признается частично работоспособной, а её показатель энтропии наибольший в выборке.

Во вторую группу были отобраны сигналы оборудования с дефектами электрической части. Некоторые результаты представлены в таблице 4. Сигналы тока искажаются из-за сложения с низкочастотной составляющей в соответствии с формулой 4. Состояние 13ПЭ-01 соответствует модели дефекта в пункте 2 таблицы 2, показатель H_{sh} у тестового и реального сигнала практически одинаков. Арматуры 13ВК-95 и 14ГО-09 находятся в практически одинаковом частично работоспособном состоянии, модель которого приводится в пункте 3 таблицы 2. Показатель H_{sh} у тестового сигнала и сигналов 13ВК-95 и 14ГО-09 практически одинаков.

Можно сказать, что результаты диагностирования электрических и механических дефектов традиционными методами в целом согласуются с тенденцией изменения энтропийного показателя. Преимуществом использования показателя H_{sh} является то, что он чувствителен к изменениям шумовой составляющей, не выявляемым традиционными методами. Другим важным преимуществом показателя H_{sh} является то, что он рассчитывается непосредственно по диагностическому сигналу, не подвергнутому никакой предварительной обработке с целью получения огибающей или спектра.

Таблица 3. – Результаты обработки диагностических сигналов с модуляцией

№ п/п	Номер/ плавность	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	1ВК-2 89%			6,6
2	13ГО-01 79%			10,4 (+37%)
3	14КГП-03 57%			11,9 (+13%)

Таблица 4. – Результаты обработки диагностических сигналов со сложением

№ п/п	Номер/ плавность	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	13ПЭ-01 76%			10,9
2	13ВК-95 73%			11,6 (+6%)
3	14ГО-09 70%			11,5 (-1%)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энтропия Шеннона оказалась эффективной мерой для индикации состояния электромеханической системы. Исследования диагностических сигналов тока электроприводной арматуры показали, что ухудшение состояния оборудования может

быть эффективно идентифицировано по увеличению значений H_{sh} (например, увеличение, на 45% при наличии развитого дефекта по сравнению с незначительным дефектом). Значения H_{sh} оказались чувствительны как к механическим, так и к электрическим дефектам.

Продолжаются исследования по анализу сигналов тока при различных типах дефектов и на различных типах двигателей и приводов с целью дальнейшей проверки широкой применимости этого метода для мониторинга работоспособности и диагностики электроприводного оборудования. Кроме того, исследуется возможность использования энтропии Шеннона и других энтропийных параметров с целью реализации прогноза остаточного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменков, А.К. и др. Опыт разработки стационарных систем диагностики арматуры. [Текст] / А.К. Адаменков, А.В. Матвеев, В.В. Головлев, М.Г. Рязанова, А.Б. Ярышев, С.М. Иванов // Арматуростроение. – 2009. – №1(58). – С. 77–80.
2. Слепов, М.Т. и др. Технологии анализа диагностических параметров электроприводной арматуры на действующих энергоблоках Нововоронежской АЭС. [Текст] / Е.А. Абидова, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева, М.Т. Слепов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – №4. – С. 16–22.
3. Lei, Y., Z. He, and Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, 2008. 35(4): p. 1593-1600.
4. Zhang, L., et al., Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Systems with Applications*, 2010. 37(8): p. 6077-6085.
5. P. Thota, H. Dankowicz, Tc-hat: a novel toolbox for the continuation of periodic trajectories in hybrid dynamical systems, *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems* 7(2008) 1283-1322.
6. He, Q., Wang, L. and Liu, B. 2007. Parameter estimation for chaotic systems by particle swarm optimization. *Chaos, Solitons and Fractals* 34: 654-61.
7. Чумак, О.В. Энтропия и фракталы в анализе данных [Текст] / О.В. Чумак. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.
8. Абидова, Е.А. Идентификация информационных процессов в системе диагностики электроприводной арматуры атомных станций: автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / Е.А. Абидова. – Волгоград, 2011. – 18 с.

REFERENCES

- [1] Adamenkov A.K., Matveev A.V., Golovlev V.V., Ryazanova M.G., Yaryshev A.B., Ivanov S.M. Opyt razrabotki stacionarnykh sistem diagnostiki armatury [Experience of stationary systems development of fitting diagnostics]. *Armaturostroenie* [Armature Engineering], 2009, №1(58), pp. 77–80. (in Russian)
- [2] Slepov M.T., E.A. Abidova, V.N. Nikiforov, O.Yu. Pugacheva. Tekhnologii analiza diagnosticheskikh parametrov elektroprivodnoj armatury na dejstvuyushhih energobloках Novovoronezhskoj AES [Technologies of the analysis of diagnostic parameters of electrodriving fittings at the New Voronezh NPP]. *Elektrotexnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrotechnical complexes and control systems], 2014, №4, ISSN 1990-5246, pp. 16–22. (in Russian)
- [3] Lei, Y., Z. He, and Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, 2008. 35(4): p. 1593-1600. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.072 (in English)
- [4] Zhang, L., et al., Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Systems with Applications*, 2010. 37(8): p. 6077-6085. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.02.118 (in English)
- [5] P. Thota, H. Dankowicz, Tc-hat: a novel toolbox for the continuation of periodic trajectories in hybrid dynamical systems, *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems* 7(2008) 1283-1322. DOI:10.1137/070703028 (in English)
- [6] He, Q., Wang, L. and Liu, B. 2007. Parameter estimation for chaotic systems by particle swarm optimization. *Chaos, Solitons and Fractals* 34: 654-661. DOI: 10.1155/2016/3795961 (in English)
- [7] Chumak O.V. Entropiya i fraktaly v analize dannykh [Entropy and fractals in the data analysis]. M. Izhevsk: Pub. NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika» [SIC "Regular and chaotic

- dynamics"], Institut kompyuternyh issledovanij [Institute of Computer Science], 2011, ISBN 978-5-93972-852-2, 164 p. (in Russian)
- [8] Abidova E.A. Identifikaciya informacionnyh processov v sisteme diagnostiki elektroprivodnoj armatury atomnyh stancij [Identification of information processes in the motorized valve diagnostic system of nuclear power plants]: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Thesis abstract of PhD in Engineering]. – Volgograd, 2011. – 18 p. (in Russian)

Diagnosis of Valves Using Entropy Indicators

E.A. Abidova, L.S. Hegay, A.V. Chernov, O.E. Draka, O.J. Pugachyova

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 34736
e-mail: nii_energomash@mail.ru*

Abstract – Diagnosing of the NPP electromechanical equipment demands development of the methods directed to control of wear degree in engine current signal. It is shown that wear influences stochastic signal parameters which aren't estimated by regular methods. The objective of work is development of the methods directed to determination of stochastic parameters of current signal. The following problems are solved: the Shannon's entropy connection with a condition of electrodriving fittings is theoretically shown; diagnostic signals of the NPP equipment are processed with use of offered and regular methods, and big sensitivity of the Shannon's entropy in relation to separate types of defects is shown.

Ключевые слова: technical diagnostics, current and time parameters, spectral analysis, Shannon's entropy, NPP.