
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ И СТОХАСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

© 2016 Е.А. Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, В.А. Булава,
В.И. Соловьёв, О.Ю. Пугачёва

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

С целью оценки технического состояния дизель-генераторных установок АЭС РФ было проведено измерение уровня вибрации и тепловизионный контроль. В работе описаны основные положения методики диагностирования технического состояния, предполагающей использование как традиционных, так и новых методов обработки диагностических сигналов, включая и оценку энтропии. Приводятся заключения по результатам обследования оборудования.

Ключевые слова: резервная дизельная электростанция, тепловизионный контроль, виброакустический анализ, огибающая, спектральный анализ, энтропия Шеннона, перестановочная энтропия, АЭС.

Поступила в редакцию 10.09.2016 г.

Резервная дизельная электростанция (РДЭС) является одной из обеспечивающих систем безопасности АЭС и должна постоянно находиться в работоспособном состоянии. РДЭС предназначены для аварийного электроснабжения потребителей систем безопасности в режимах обесточивания. Обеспечение бесперебойной работы дизель-генераторного оборудования АЭС является вопросом безопасности атомной энергетики.

НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в 2014-2016 гг. провел диагностирование дизель-генераторного оборудования. Диагностике подвергались два типа дизеля 15Д100 (на Смоленской и Нововоронежской АЭС) и 12ZV40/48 (на Ростовской АЭС). Дизель 15Д100 является двухтактным, т.е. двум ходам поршня соответствует один оборот коленвала. Определенным углам поворота вала, – и временным интервалам, – соответствуют следующие события: достижение поршнем внутренней мертвой точки, начало открытия выпускных окон, начало открытия впускных окон, закрытие выпускных окон, закрытие впускных окон, достижение наружной мертвой точки и начало впрыска топлива. Дизель 12ZV40/48 – четырехтактный. В данном случае рабочему циклу соответствует четыре хода поршня, и за время двух оборотов коленвала происходят следующие события: верхняя мертвая точка, выхлоп, забор воздуха, сжатие, нижняя мертвая точка, впрыск, верхняя мертвая точка, ход, нижняя мертвая точка.

При диагностике механизмов циклического действия наиболее распространение получили тепловизионные и виброакустические методы, благодаря их чувствительности и оперативности получения результатов [1]. На данных методах основано большинство известных систем диагностики, которые внедрены

преимущественно в сфере водного транспорта. Данные системы направлены на выявление механических поломок, возникающих вследствие износа дизеля при его интенсивной эксплуатации [1,2].

В условиях АЭС дизель предназначен для питания аварийных насосов. Происходит его периодическое опробование (раз в месяц), но большую часть времени он не эксплуатируется. При опробовании на некоторых АЭС измеряют вибрацию и сравнивают её уровни с нормативом по стандарту ISO 10816-6:1995. Соответствие уровней вибрации нормативным значениям, когда износ и механические поломки маловероятны, не исключает неравномерности работы из-за несогласованности работы цилиндро-поршневых групп (ЦПГ). Однако неравномерность работы, иначе говоря, отклонение угла опережения подачи топлива, выходит на первый план при эксплуатации дизелей АЭС. Данная проблема чревата снижением качества вырабатываемой энергии, повышенным расходом топлива, снижением ресурса дизеля. Существующий подход не позволяет выявить неравномерности работы. Следовательно, внедрение методик, которые выявляют несогласованность, является востребованной задачей [3].

Для выявления несогласованности были использованы специальные методы обработки данных. При обработке результатов теплотрии сравнивалась температура по цилиндрам дизелей: повышение температуры одного из объектов интерпретировалась как признак отклонения в его работе. Аналогичный подход применялся к первичной обработке сигналов вибрации. Сравнению подвергались параметры, - размах, среднеквадратичное значение, пик фактор, - в пределах типовых групп. В группы объединяются как параметры, относящиеся к одному дизелю, так и параметры соответствующие агрегатам конструктивно одинаковых дизелей. Экстремальные значения одного из параметров в группе свидетельствуют о возможных отклонениях в работе оборудования.

Для более глубокого анализа производится сравнение форм спектров в пределах типовых групп. Несовпадение форм спектров свидетельствуют о возможных отклонениях в работе оборудования.

В качестве перспективного метода реализуется сравнение форм огибающих, в которых в виде всплесков амплитуд отражаются события, повторяющиеся с цикличностью соответственно типу дизеля. Несовпадение форм в пределах типовых групп, отклонение формы от цикличности являются характерными признаками неравномерности работы дизельного оборудования.

Помимо приведенных выше традиционных методов, которые основаны на оценке детерминированных параметров, были впервые применены стохастические методы. Под стохастическими методами подразумевается оценка показателей энтропии. Использование показателей энтропии целесообразно, поскольку процессы, протекающие в объекте диагностирования, имеют во многом стохастический характер и вносят нелинейную и стохастическую составляющую в диагностические сигналы, тем большую, чем больше отклонение состояния объекта от исправного [4].

Понятие энтропии, изначально введенное для оценки меры беспорядка в термодинамических системах, широко используется в теории информации. Информационную энтропию, как оценку меры неопределенности сигналов, процессов и систем определяют различными способами. Для параметризации диагностических сигналов были выбраны энтропия Шеннона (1) и перестановочная энтропия (2):

$$H_s(x) = - \sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i), \tag{1}$$

$$H_p(x) = - \sum_{i=1}^{n!} p(i) \log_2 p(i), \tag{2}$$

где n – число исходов событий,
 $p(i)$ – вероятность каждого события.

Обе энтропии характеризуют вариабельность процесса. При чем, с ухудшением состояния объекта в сигнале появляются дополнительные гармоники, и вариабельность возрастает. Когда вариабельность возрастает, энтропия Шеннона увеличивается, а перестановочная энтропия уменьшается [5].

При проведении процедуры диагностирования внимание уделялось в первую очередь измерению вибрации цилиндропоршневых групп: топливных насосов, форсунок, цилиндрических втулок. Также производились измерения вибрации на генераторах, их подшипниках, основном и вспомогательном оборудовании. Процедура диагностирования дизеля 12ZV40/48 предполагает также регистрацию вибрации на поперечной анкерной связи. Анкерная связь представляет собой болт, который скрепляет опорный подшипник нижнего коленвала. На анкерную связь передаётся вибрация коленвала, резко возрастающая при переключке поршня в нижней мертвой точке. Сигнал, зарегистрированный на анкерной связи, чувствителен к работе ЦПГ, ему соответствующей, и двух ближайших к нему групп.

Регистрация сигналов осуществлялась с использованием штатных поверенных приборов отделов технической диагностики. В качестве средств вибродиагностики использовались приборы Атлант-8 и Ультрапроб-9000. С помощью Атлант-8 были продиагностированы дизели Смоленской АЭС. Данный прибор регистрирует колебания в диапазоне $5 \div 5\,000$ Гц (низкочастотная область). Ультрапроб применялся на Нововоронежской и Ростовской АЭС. Частотный диапазон данного прибора 20 до 100 кГц, что делает его чувствительным к регистрации колебаний, возникающих при соударениях в результате циклической работы дизеля.

Для теплотметрии также использовались два прибора FLIR AX8 (Нововоронежская АЭС) и Fluke TiS40 (Смоленская и Ростовская АЭС). Узкий диапазон температур FLIR AX8 не позволил провести процедуру теплотметрии в полном объёме.

Диагностика двух дизель-генераторов 3ДГ-4 и 3ДГ-5 типа 15Д100 проводилась на третьем блоке Смоленской АЭС 16.02.2015 года. Было выявлено несоответствие перепада температуры между цилиндрами: на 3ДГ-4 перепад $111\text{ }^{\circ}\text{C}$ (норма $60\text{ }^{\circ}\text{C}$), на 3ДГ-4 перепад $112\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По результатам вибродиагностики 3ДГ-4 и 3ДГ-5 проводилось сопоставление измеренных параметров с нормативными значениями (ISO 10816-6:1995). Обе установки по показателям вибрации были признаны исправными и работоспособными. Однако было выявлено относительное повышение вибрации на тех ЦПГ, где регистрировалась и повышенная температура. Было рекомендовано проверить работу данных ЦПГ.

В июне 2015 года было проведено диагностирование пяти дизель-генераторов ДГ1, ДГ2, ДГ6, ДГ7, ДГ8 типа 15Д100 на Нововоронежской АЭС. Теплотметрии подверглись агрегаты дизелей ДГ6, ДГ7, ДГ8: турбокомпрессор, водяной и масляный насосы. Температура всех агрегатов соответствует норме. Однако температура масляного насоса оказалась выше на дизеле ДГ-6, что было отражено в заключении.

Вибрация была измерена на десяти ЦПГ пяти обследуемых дизелей. Применение Ультрапроб-9000 позволило получить информативную огибающую, форма которой отражает последовательность событий, происходящих в ЦПГ. Форма огибающей виброакустического сигнала 15Д100 оказалась сходной для всех измерений на ЦПГ.

В пределах типовых групп сравнению подверглись расчетные параметры, формы огибающих и спектров, значения энтропии Шеннона и перестановочной энтропии.

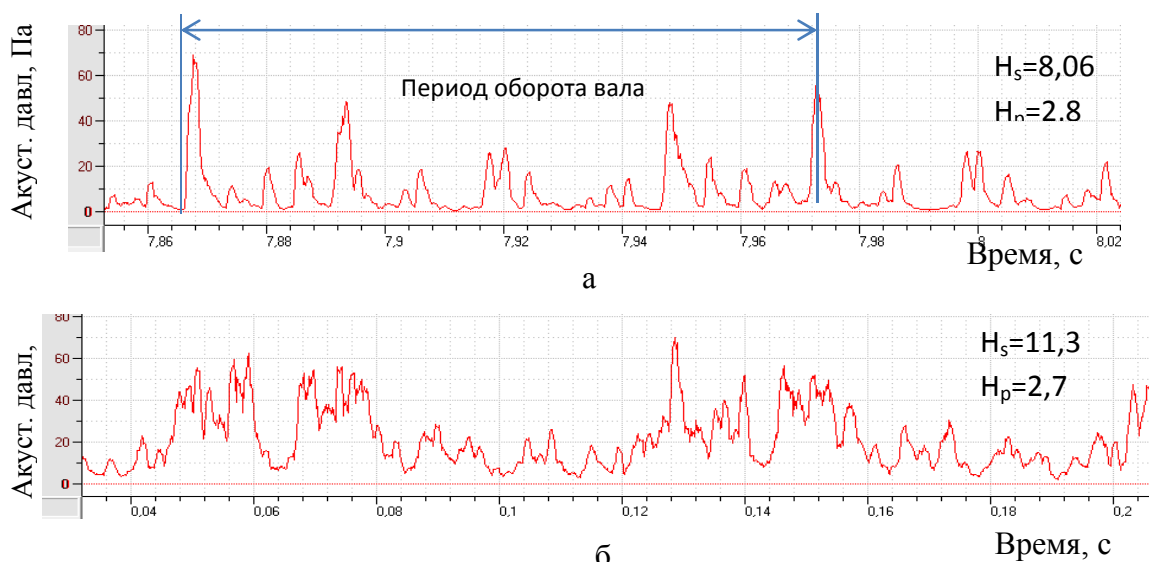


Рис. 1. – Огибающие виброакустических сигналов 7-х цилиндров дизелей Нововоронежской АЭС: а- ДГ7; б - ДГ6

Поскольку у ЦПГ №7 установки ДГ6 выявлено относительное превышение параметров, в том числе энтропии Шеннона на 27%, отклонение форм огибающих и спектров сигналов, то рекомендовано проверить работу данной ЦПГ.

В сентябре 2015 было проведено повторное диагностирование ДГ6, ДГ7, ДГ8. Результаты первичного и повторного диагностирования оказались почти тождественны. Вновь было рекомендовано обратить внимание на ЦПГ №7 установки ДГ6.

Диагностические данные дизелей 2РДЭС-2, 2РДЭС-3 Ростовской АЭС были получены 20.05.2015 и 20.05.2015. Тип объекта диагностирования, – 12ZV40/48 четырехтактный с V-образным расположением, – отличается от ранее обследованных дизелей типа 15Д100.

Теплометрия не выявила отклонения в работе обследуемых объектов, распределение температур двух дизелей оказалось почти тождественным.

Значения параметров виброакустического сигнала для 2РДЭС-2, 2РДЭС-3 совпадают вплоть до значений десятичных дробей. Значения энтропии Шеннона и перестановочной энтропии по сигналам двух дизелей отличаются не более чем на 5 %.

Огибающие сигналов, измеренных на анкерных связях, отображают (виде максимального пика) момент перекадки поршня в ЦПГ, соответствующей данной анкерной связи и двух ближайших к нему групп. Данная закономерность обусловила практическое совпадение огибающих сигналов, измеренных в идентичных точках, и отличие огибающих сигналов, измеренных в разных точках.

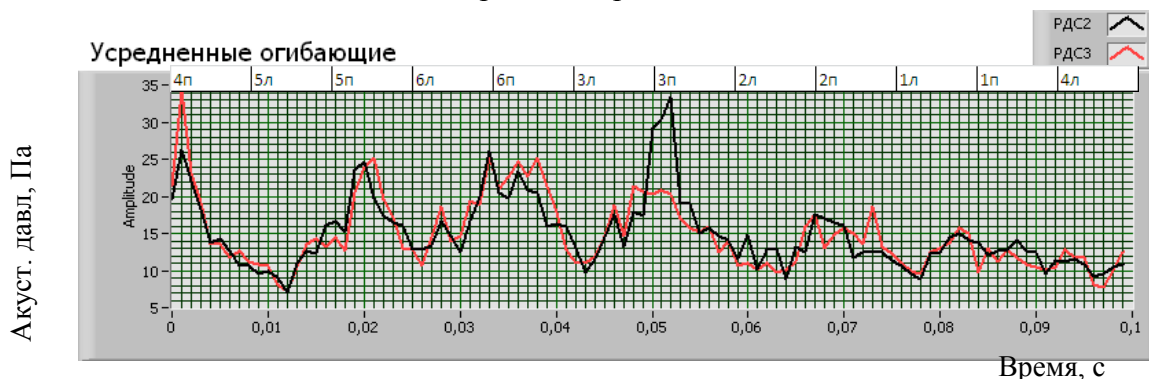


Рис. 2. – Усредненные виброакустические сигналы, измеренные на анкерных связях дизелей 2РДЭС-2, 2РДЭС-3 вблизи ЦПГ №4

Формы спектров сигналов, измеренных в идентичных точках, тоже почти совпадают, но резко отличаются от спектров сигналов, измеренных в других точках.

В заключении по результатам виброакустического и тепловизионного контроля сказано, что установки 2РДС-2 и 2РДС-3 могут быть признаны работоспособными и функционально пригодными к дальнейшей эксплуатации в составе систем безопасности энергоблока № 2. Виброакустические сигналы, измеренные вблизи анкерных связей, могут быть использованы в качестве эталонов при последующем диагностировании дизелей типа 12ZV40/48.

На основании опыта диагностирования дизель-генераторного оборудования в 2015 году можно сделать следующие общие выводы:

1) при диагностировании дизель-генераторного оборудования АЭС необходимо выявлять согласованность работы цилиндро-поршневых групп, влияющую на качество вырабатываемой электроэнергии, экономичность и ресурс дизелей;

2) по виброакустическим характеристикам, регистрируемым в определенных точках, и по распределению температур в определенных областях дизеля можно судить о равномерности работы дизеля;

3) показатели энтропии виброакустического сигнала могут быть использованы в качестве диагностических признаков технического состояния дизель-генераторного оборудования;

4) систематическое обследование дизель-генераторов АЭС детерминированными и стохастическими методами должно лежать в основе прогноза их состояния и оценки их остаточного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров, М.В. и др. Разработка диагностического комплекса для электронной системы управления отечественных автомобильных дизелей [Текст] / М.В. Тихомиров, С.В. Овчинников, Ю.Е. Хрящев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". – 2015. – №1. – С. 142–148.
2. Крашенинников, С.В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / С.В. Крашенинников // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2013. – №2(12). – С. 59–68.
3. Пугачева, О.Ю. и др. Диагностика дизель-генератора 15Д-100 по показателям вибрации [Текст] / О.Ю. Пугачева, А.К. Пугачев, В.И. Соловьев, Е.А. Абидова // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – №2(11). – С. 91–97.
4. Дулесов, А.С. и др. Применение подходов Хартли и Шеннона к задачам определения количества информации технических систем [Текст] / А.С. Дулесов, Е.А. Ускова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – №2(16). – С. 46–50.
5. 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.

REFERENCES

- [1] Tikhomirov M.V., Ovchinnikov S.V., Khryashchev Yu.E. Razrabotka diagnosticheskogo kompleksa dlya elektronnoy sistemy upravleniya otechestvennykh avtomobilnykh dizeley [Development of a diagnostic complex for an electronic control system of domestic automobile diesels]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" [Bulletin of N. E. Bauman MSTU. Mechanical engineering series], 2015, №1, ISSN 0236-3941, DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-142-148, pp. 142-148. (in Russian)
- [2] Krashennnikov S.V. Sovremennye podkhody k diagnostirovaniyu dizelnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Modern approaches to diagnosing of diesel internal combustion engines]. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta [Bulletin of the Novosibirsk state pedagogical university.], 2013, №2(12), ISSN 2226-3365, DOI: 10.15293/2226-3365, pp. 59-68. (in Russian)
- [3] Pugacheva O.Yu., Pugachev A.K., Solovlev V.I., Abidova E.A. Diagnostika dizel-generatora 15D-

- 100 po pokazatelyam vibratsii [15D-100 Diesel Generator Diagnostics on Vibration Indicators]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2014, №2(11), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 91–97 (in Russian)
- [4] Dulesov A.S., Uskova E.A. Primenenie podkhodov Khartli i Shennona k zadacham opredeleniya kolichestva informatsii tekhnicheskikh sistem [Application of Hartley and Shannon approaches to problems of determination of amount of information of technical systems]. Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo [Questions of modern science and practice. V. I. Vernadsky University.], 2009, №2(16), ISSN 1990-9047, pp. 46–50. (in Russian)
- [5] Chumak O.V. Entropiya i fraktaly v analize dannykh [Entropy and fractals in the data analysis]. M., Izhevsk Pub. NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Institut kompyuternykh issledovaniy [SRC "Regular and chaotic dynamics", Institute of Computer Science], 2011, ISBN 978-5-93972-852-2, 164 p. (in Russian)

Diesel Generator Equipment Diagnostics of Nuclear Power Plant Using Deterministic and Stochastic Methods

E.A. Abidova, L.S. Hegay, A.V. Chernov, V.A. Bulava, O.Yu. Pugachyova, V.I. Soloviev

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI"
e-mail: nii_energomash@mail.ru*

Abstract –The measurement of vibration and thermal control was carried out to assess the technical condition of the diesel generators of nuclear power plants in Russia. The paper describes the main provisions of methods of technical condition diagnosing which makes use of both traditional and new diagnostic methods of signal processing, including the assessment of entropy. The results of the equipment survey are presented.

Keywords: reserve diesel power station, thermal control, vibro-acoustic analysis, envelope spectrum analysis, Shannon entropy, permutation entropy, NPP.