

УДК 621.039

ДИАГНОСТИКА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА 15Д-100 ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ВИБРАЦИИ

© 2014 г. О.Ю. Пугачева, А.К. Пугачёв, В.И. Соловьёв, Е.А. Абидова

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

Дизель-генераторная установка является важнейшим элементом системы безопасности АЭС. НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в рамках договора со Смоленской АЭС разработал рабочую программу диагностирования дизель-генератора 15Д100 энергоблоков АЭС по показателям вибрации и тепловизионного контроля. В статье изложены основные положения этой программы, касающиеся виброакустического анализа.

При разработке подходов к диагностированию авторы учитывают нормативные документы, особенности эксплуатации дизель-генераторного оборудования в условиях АЭС, обобщают опыт диагностирования аналогичного оборудования в транспортной сфере. Диагностика по показателям вибрации включает всё вращающееся оборудование (насосы), входящее в группу дизель-генераторной установки.

Большое внимание в статье уделяется выбору мест установки датчиков вибрации. В качестве методов обработки диагностических данных предпочтение отдается спектральному и кепстральному анализу, также используется пик-фактор и трендовые характеристики. По огибающей сигнала вибрации предлагается оценить отклонение фактического угла впрыска топлива, износ уплотнительных колец, увеличение зазора в сочленении поршня.

Предлагаемые авторами методы должны обеспечить достоверное диагностирование оборудования, выявление дефектов на ранних стадиях развития, определение тенденции изменения состояния оборудования.

Ключевые слова: безопасность АЭС, диагностика дизель-генератора, диагностика насосов, датчики вибрации, точки измерения вибрации, спектр, кепстр, пик-фактор, тренд, отклонение фактического угла впрыска топлива.

Поступила в редакцию 26.05.2014 г.

Дизель-генераторные установки (ДГУ) обеспечивают безопасное расхолаживание реактора в случае внезапного обесточения систем безопасности АЭС. ДГУ предусмотрены на АЭС всех типов. На каждом блоке ВВЭР они входят в состав резервной дизельной электростанции. Основной функцией каждой ДГУ является питание трех насосов: насоса аварийной подачи раствора бора; спринклерного насоса; насоса аварийного расхолаживания. Так, после землетрясения на АЭС Фокусима-1 дизель-генераторы обеспечивали аварийное охлаждение реактора в течение трех дней. Однако после прохождения цунами ДГУ АЭС Фокусима-1 вышли из строя, что привело к расплавлению активной зоны и дальнейшим непоправимым последствиям.

Таким образом, ДГУ является важнейшим элементом систем безопасности АЭС. Регламент действующих АЭС предусматривает контроль состояния ДГУ для поддержания их в работоспособном и исправном состоянии. С этой целью проводятся поочередные контрольные пуски дизелей в соответствии с программой ступенчатого пуска. После пусков согласно регламенту и по результатам контроля проводятся ремонтные работы.

Конструктивно ДГУ представляет собой комплекс дизельного и электрического

оборудования – **основное оборудование**. А также оборудования обеспечивающего рабочий цикл дизеля: топливный насос, компрессор, воздухоподка и др. – так называемое **навешанное оборудование**, которое приводится в действие коленвалом дизеля через зубчатый редуктор. **Вспомогательное (автономное)** оборудование служит для пуска дизеля и частично дублирует функции навешанного оборудования для обеспечения надежности работы ДГУ. Вспомогательное (автономное) оборудование работает от электродвигателей, питающихся от автономных источников.

Контроль состояния ДГУ АЭС проводится в настоящее время по следующим направлениям:

- проверка соответствия частоты вращения, тока, напряжения, мощности значениям, предусмотренным программой ступенчатого пуска;
- измерение давления в цилиндрах на протяжении рабочего цикла;
- химический анализ отработавшего масла на предмет обнаружения следов разрушения;
- химический анализ сажи на предмет нахождения продуктов неполного сгорания.

Таким образом, проверяется фактическая работоспособность ДГУ, равномерность вращения коленвала и выявляются грубые дефекты. Однако, учитывая высокие требования к надежности ДГУ, необходимо решение следующих задач:

- выявление дефектов на ранних стадиях развития;
- определение тенденции состояния;
- прогнозирование состояния.

Для решения данных задач широко применяются методы вибродиагностики, и (реже) тепловизионный контроль [1,2]. Вибрационные испытания ДГУ проводятся на стадии приёмо-сдаточных испытаний. Целесообразным с точки зрения обеспечения надежности оборудования является проведение вибрационного контроля, виброналадки в течение всего периода эксплуатации. Вибрационными методами можно обследовать большую часть основного, навешанного и вспомогательного оборудования, которое можно отнести к вращающимся механизмам. НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в рамках договора со Смоленской АЭС была разработана «Рабочая программа диагностирования дизель-генератора 15Д-100 энергоблоков АЭС по показателям вибрации и тепловизионного контроля».

Таблица 1. – Методы диагностирования ДГУ

Метод диагностирования	Решаемые задачи
1	2
Проверка соответствия частоты вращения, тока, напряжения, мощности значениям предусмотренным программой ступенчатого пуска	Выявление грубых эксплуатационных дефектов
Измерение давления в цилиндрах на протяжении рабочего цикла	Определение отклонения ФУОВТ. Определение степени неравномерности вращения коленвала. Определение зазоров в сочленении поршня (косвенно).
Химический анализ сажи (на предмет наличия продуктов неполного сгорания)	Определение отклонения ФУОВТ (косвенно) Определение износа уплотнительных колец поршневых цилиндров (косвенно)

Продолжение таблицы 1

1	2
Тепловизионный контроль	Выявление дефектов отдельных узлов и деталей
Спектральный анализ отработанного масла (на предмет обнаружения следов разрушения)	Выявление дефектов отдельных узлов и деталей
Вибродиагностика	Выявление грубых эксплуатационных дефектов. Определение отклонения ФУОВТ. Определение степени неравномерности вращения коленвала. Определение износа уплотнительных колец поршневых цилиндров. Определение зазоров в сочленении поршня. Выявление дефектов отдельных узлов и деталей. Выявление дефектов на ранних стадиях развития. Определение тенденции состояния. Прогнозирование состояния.

В соответствии с программой на оборудовании согласно нормативным документам (ISO 10816-6:1995) устанавливаются вибродатчики [3,4]. Датчики измеряют уровень вибрации в осевом, вертикальном, горизонтальном направлениях (соответственно – x, y и z), как показано на рисунке 1.

На ДГУ вибрация измеряется в соответствии с нормативами для мощных электрических машин (более 100 кВт). На возбудителе вибрация измеряется как для машин малой мощности (менее 100 кВт). Воздуходувки, топливоподкачивающие насосы, газотурбо-нагнетатели, водяные и масляные насосы рассматриваются как винтовые, шестерные и центробежные насосы – для них предусматривается общая схема установки датчиков. Причем, навешанное оборудование, приводимое в действие от вала ДГУ, диагностируется по показаниям датчиков x1, y1, y2, z1-z4. Автономное оборудование предусматривает наличие электродвигателей, которые диагностируются по показаниям датчиков x2, y3-y5, z5-z8. Топливный насос является поршневым и для него предусматривается своя схема установки датчиков.

Общее вибрационное состояние оценивается по измеренным значениям вибросмещения, виброскорости, виброускорения согласно ISO 10816-6:1995. Так при достижении виброскорости 17,8 мм/с эксплуатация машин с уровнем мощности как у 15Д-100 возможна ограниченное время, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ. Следует отметить, что датчики, установленные непосредственно на генераторе и вблизи генератора, регистрируют более высокие уровни вибрации. Также наблюдается рост вибрации с ростом мощности. Данные особенности наблюдались при проведении приёмо-сдаточных испытаний ДГУ.

Таким образом, по общему уровню вибрации определяется работоспособность ДГУ. Для более глубокого анализа предлагается использование пик-факторного анализа, спектрального и кепстрального анализа.

Пик-фактор определяется отношением амплитуды (максимального значения) сигнала к действующему (среднеквадратичному) значению сигнала:

$$П = \frac{A_{max}}{A_{СКЗ}}$$

Превышение пик-фактором среднего значения для данной точки измерения

требует поиска дефектов с использованием спектрального и кепстрального анализа. При анализе спектра выявляется наличие гармоник на частотах вращения валов, подшипников, шестеренных деталей; оценивается тенденция роста или снижения гармоник, учитывается направление вибрации. Кепстральный анализ в нашей методике применяется для повышения чувствительности с целью выявления гармоник на частотах подшипников и шестеренчатых деталей.

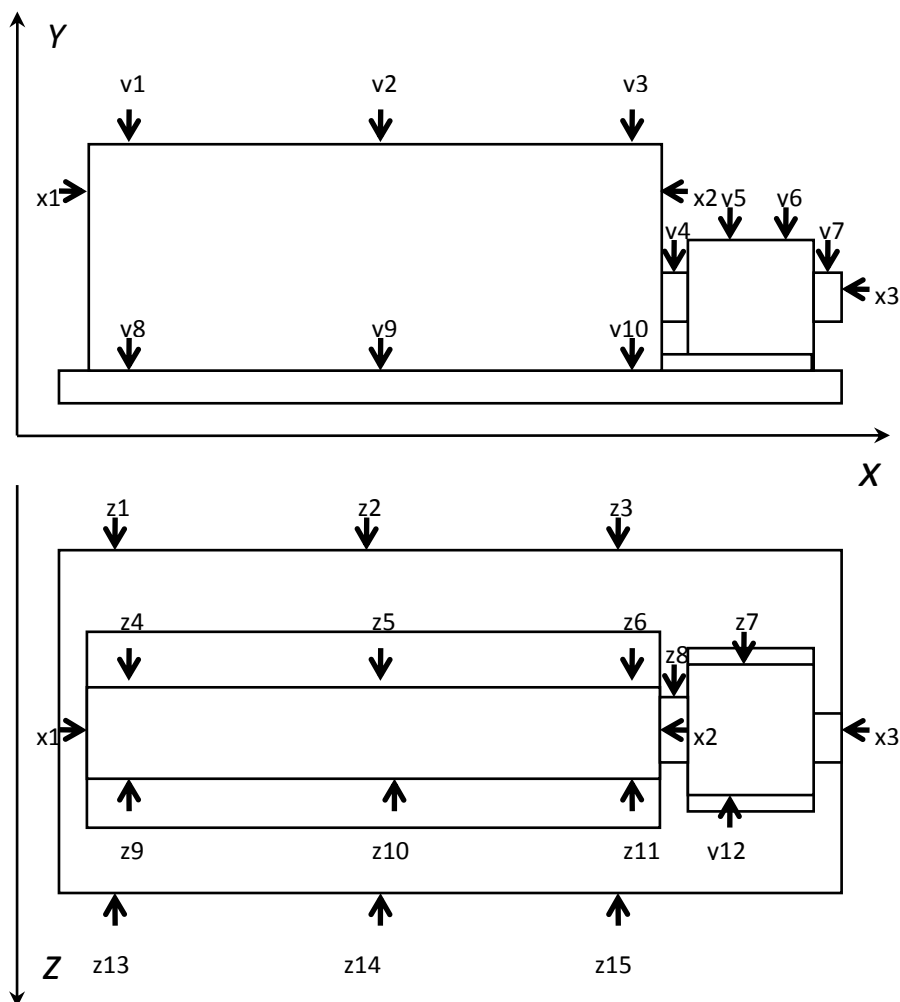


Рис. 1. Установка датчиков на ДГУ

Диагностирование ЦПГ требует особого подхода, связанного с анализом огибающей (СКЗ) сигнала вибрации [5]. При работе дизеля циклически и в неизменном порядке повторяются следующие шесть событий: 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. Каждый поршень проходит по три впускных и по три выпускных окна. Данные события жестко привязаны к углу поворота коленвала. При известной частоте вращения вала (для 15Д-100 – 12,5 Гц) можно привязать события ЦПГ ко времени. В огибающей сигнала вибрации каждому событию соответствует всплеск амплитуды. Связав пики на огибающей с известными частотами, можно получить эталонную огибающую сигнала вибрации для одного из поршней дизеля 15Д-100 (см. рисунок 2). Обозначим события, связанные с работой одного поршня (с учетом прохождения всех впускных и выпускных окон) $N_{п}=12$.

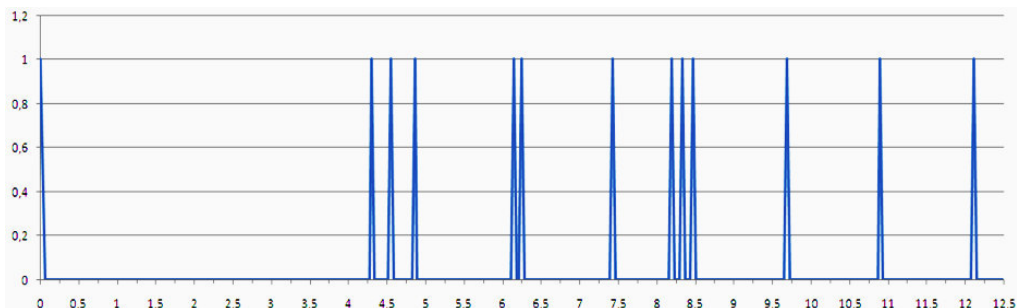


Рис. 2. – Пики огибающей вибрации, соответствующие срабатыванию одного поршня ДГУ 15Д-100

Учитывая, что в дизель-генераторе конструкции 15Д-100 два поршня движутся навстречу друг другу, то известные события, начиная от достижения поршнем внутренней мертвой точки до начала впрыска топлива, происходят дважды со сдвигом по углу поворота вала 12° . Обозначим число событий, происходящих за один период работы поршня $N_{ц}=2N_{п}=24$. Таким образом, эталонная огибающая сигнала вибрации, отображающая работу двух поршней одного из цилиндров дизеля должна содержать уже двенадцать пиков, и принимает вид, представленный на рисунке 3.

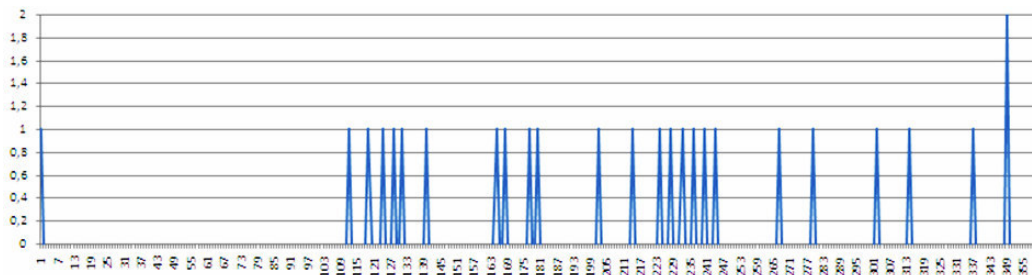


Рис. 3. – Пики огибающей вибрации, соответствующие срабатыванию одного цилиндра ДГУ 15Д-100

Поскольку датчики установлены на корпусе дизеля, то они улавливают изменение вибрации, связанные с работой всех десяти цилиндров дизеля 15Д-100, события в которых происходят со сдвигом по времени, соответствующем углу поворота вала 360° . При этом число событий всей цилиндро-поршневой группы определяется соотношением $N_{цпг}=20N_{ц}=2*10N_{п}=110$. Это значит, что в сигналах датчиков $x_1, x_2, y_1-y_3, y_8-y_{10}, z_4-z_6, z_9-z_{11}$ должны наблюдаться сто двадцать пиков за цикл, как показано в эталонной огибающей на рисунке 4.

С целью диагностики ЦПГ мы предлагаем сравнение эталонной огибающей с усредненной огибающей сигналов вибрации. Под усредненной огибающей мы понимаем усредненные по всем датчикам на периоде обращения вала среднеквадратичные значения.

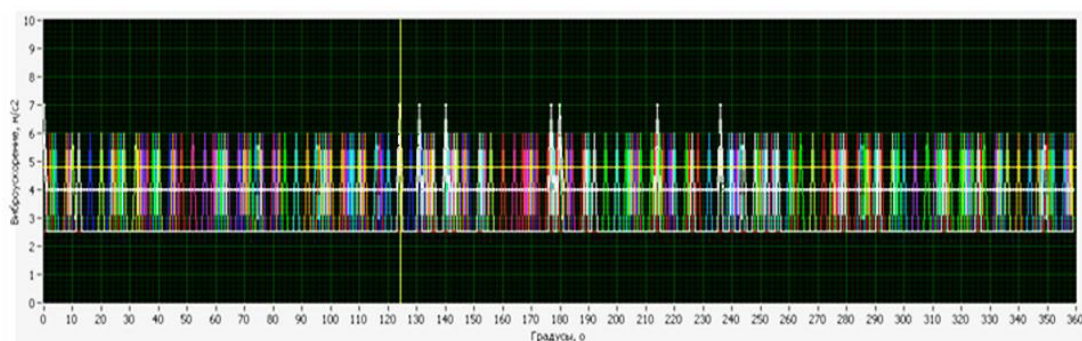


Рис. 4 – Наложение эталонной и усредненной огибающих сигнала вибрации ЦПГ ДГУ 15Д-100

Сравнение предполагает наложение усреднённой и эталонной огибающей.

Выявленное при наложении несовпадение пиков является признаком неравномерности вращения колен вала. Несовпадение пиков в момент впрыска топлива является специфическим признаком отклонения фактического угла впрыска топлива (ФУВТ). Несовпадение пиков в моменты прохождения нижней и верхней мертвых точек мы связываем с увеличением зазоров в сочленении поршня. Повышение амплитуды относительно среднего значения в моменты открытия и закрытия впускных или выпускных окон свидетельствует об износе уплотнительных колец впускных или выпускных окон. Выявляемые дефекты, – отклонение ФУВТ, увеличение зазоров в сочленении, износ уплотнительных колец, – однозначно на основании известной очередности событий связываются с конкретными цилиндрами.

В рамках программы диагностики была разработана подсистема, которая оценивает отклонения времен наступления событий и амплитуд в измеренном сигнале. Таким образом, предлагаемый анализ СКЗ сигналов вибродатчиков, устанавливаемых на корпус (картер) дизеля, позволяет выявить три группы дефектов ЦПГ, и указать цилиндр, в котором наблюдается дефект автоматически.

Выявленные дефекты дизель-генератора необходимо классифицировать согласно ГОСТ 15467-79 с целью принятия решения о возможности продолжения работы дизеля до плановой остановки или немедленного прекращения его работы. Например, код Д45 соответствует задеванию вращающихся деталей воздухоудовки это значительный дефект и частично неработоспособное состояние. В этом случае желательно остановить работу ДГУ для устранения неисправности.

Результаты диагностики предлагается оформить в виде протокола, который отображает соответствие (или не соответствие) диагностических параметров нормативным значениям; комментарии к графикам огибающей, спектра, кепстра. На втором листе протокола прилагаются огибающая, спектр и кепстр. Форма протокола отличается для генератора, ЦПГ, навешанного и вспомогательного (автономного) оборудования.

Таким образом, внедрение диагностики по показателям вибрации позволяет обследовать вращающееся оборудование, входящее в группу ДГУ АЭС. Вибродиагностика обеспечивает глубину поиска дефектов, которую невозможно достичь, используя другие методы. При этом выявляются дефекты на ранних стадиях развития, определяется тенденции и прогнозируется состояние оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Насибуллин, Ф.Ф.* Основы технической диагностики вагонов [Текст] / Ф.Ф. Насибуллин : учебное пособие для студентов 4 курса специальности «Вагоны». – Кировский филиал российского государственного открытого технического университета путей сообщения, 2004.
2. *Кононова, Е.А. и др.* Выбор обобщенного диагностического параметра для оценки технического состояния дизель-генератора [Текст] / Е.А. Кононова, А.А. Нечаус, А.П. Серпутыко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – Випуск 3(25).
3. ISO 10816-6:1995 Вибрация механическая. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 6. Машины с возвратно-поступательным движением номинальной мощностью свыше 100 квт.
4. *Розенберг, Г.Ш. и др.* Вибродиагностика [Текст] / Г.Ш. Розенберг, Е.З. Мадорский, Е.С. Голуб. / Под ред. Г.Ш. Розенберга. – СПб.: ПЭИПК, 2003..
5. *Пугачёв, А.К.* Метод вибродиагностики привода системы управления и защиты реактора АЭС [Текст] А.К. Пугачев : дис. канд. тех. наук. – М., 1990.

15D-100 Diesel Generator Diagnostics on Vibration Indicators

O.J. Pugachyova, A.K. Pugachyov, V.I. Soloviev, E.A. Abidova

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

Abstract – The research tells about diesel-generator installation as the most important element of nuclear power plant safety system. Scientific research institute "Nuclear Power Mechanical Engineering" of Volgodonsk Engineering Technical Institute of National Nuclear Center of Moscow State Engineering Physics Institute within the contract with the Smolensk Nuclear Power Plant developed the working program of diagnosing of the diesel generator 15D100. In article the basic provisions of this program concerning the vibroacoustic analysis are stated.

When developing approaches to diagnosing authors consider normative documents, features of operation of the diesel-generator equipment in the conditions of the nuclear power plant, generalize experience of diagnosing of the similar equipment in the transport sphere. Diagnostics on indicators of vibration covers all rotating equipment (pumps) entering into group of diesel-generator installation.

Much attention in the article is paid to a choice of installation sites of vibration sensors. As methods of diagnostic data processing the preference is given to the spectral and cepstral analysis, the peak-factor and trend characteristics also are used. It is offered to estimate a deviation of the actual corner of fuel injection, wear of sealing rings, increase in a gap in a piston joint on bending around a vibration signal.

Methods offered by authors have to provide reliable diagnosing of the equipment, detection of defects at early stages of development, forecasting of the diesel generator condition.

Keywords: safety of the nuclear power plant, diesel generator diagnostics, diagnostics of pumps, vibration sensors, points of measurement of vibration, spectrum, cepstrum, peak-factor, trend, the actual corner of fuel injection deviation.

REFERENCES

- [1] Nasibullin, F.F. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki vagonov [Bases of railcar technical diagnostics] : uchebnoye posobiye dlya studentov 4 kursa spetsialnosti «Vagony»[manual for students 4 courses of the specialty "Railcars"]. Pub. Kirovsky filial rossyskogo gosudarstvennogo otkrytogo tekhnicheskogo universiteta putey soobshcheniya [Kirov branch Russian state open technical university of railway transport], 2004. (in Russian)
- [2] Kononova Ye.A., Nechaus A.A., Serputko A.P. Vybor obobshchennogo diagnosticheskogo parametra dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya dizel-generatora [Choice of the generalized diagnostic parameter for an assessment of diesel generator technical condition]. Zbirnik naukovikh prats Kharkivskogo universitetu Povitryanikh Sil [collection of scientific works Kharkov university of Air Forces]. 2010. Vipusk [Vol.] 3(25). (in Russian)
- [3] ISO 10816-6:1995 Vibratsiya mekhanicheskaya. Otsenka sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereny vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh [ISO 10816-6:1995 Vibration mechanical. Machine condition assessment of by results of measurements vibrations on unrotative parts.]. Chast 6 [Part 6]. Mashiny s vozvratno-postupatel'nyy dvizheniyem nominalnoy moshchnostyu svyshe 100 kvv [Reciprocating movement machine with a rated power over 100 kw], 2004. (in Russian)
- [4] Rozenberg G.Sh., Madorsky Ye.Z., Golub Ye.S. Vibrodiagnostika [Vibration diagnostics] / Pod red. G.Sh. Rozenberga [Edited by G.Sh. Rosenberg]. SPb. Pub. PEIPK [Petersburg Power Institute of Professional Development], 2003, ISBN 978-5-9729-0026-8, 284 p. (in Russian)
- [1] Pugachev, A.K. Metod vibrodiagnostiki privoda sistemy upravleniya i zashchity reaktora AES [Method of vibration diagnostics of the drive of a control system and protection of the reactor of the NPP] : dis. kand. tekhn. Nauk [PhD thesis in Engineering]. M., 1990. (in Russian)