

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Канд. техн. наук, доц. КАЛИНОВ А. П., асп. БРАТАШ О. В.

*Кременчугский национальный университет имени М. Остроградского*

На предприятиях различных отраслей в подавляющем большинстве используются электроприводы на базе асинхронных двигателей (АД). На сегодняшний день одной из актуальных проблем является повышение надежности эксплуатации электромеханического оборудования на базе АД. Большинство предприятий не имеет возможности своевременного обновления оборудования, и соответственно актуальным становится вопрос о повышении эффективности эксплуатации уже имеющегося. Поэтому на смену планово-предупредительным ремонтам приходит диагностика по фактическому техническому состоянию объекта.

Анализ источников [1–13] показал, что большинство современных методов диагностики технического состояния электрических машин и оборудования базируется на обработке и анализе вибрационных параметров. Эти методы являются основой функциональной (рабочей) диагностики. Комплекс параметров вибрации практически полностью характеризует техническое состояние работающего агрегата и позволяет прогнозировать возникновение неисправностей и аварий АД и электромеханического оборудования. В последние десятилетия в отечественной и зарубежной литературе опубликованы результаты многочисленных исследований по диагностированию дефектов зубчатых зацеплений, подшипников, электромагнитных дефектов электрических машин [1–19]. Однако при наличии большого количества методов вибрационной диагностики отсутствует их четкая систематизация. Поэтому возникает вопрос о необходимости разработки классификации этих методов для определения достоинств и недостатков с целью поиска путей их развития и совершенствования.

**Материал и результаты исследований.** Существует ряд факторов, влияющих на обоснованность применения какого-либо из методов вибродиагностики (ВД) в каждом конкретном случае: режим работы АД, требуемая точность диагностики, условия, в которых проводятся операции диагностики, требования к виброизмерительной и виброанализирующей аппаратуре, качество электроэнергии. Для анализа и классификации методов ВД выделены следующие критерии, с помощью которых оценивается эффективность применения этих методов.

*Критерий 1.* Объем входной информации для постановки диагноза. Критерий определяет трудоемкость проведения экспериментальных исследований. Чем меньшее количество информации необходимо для определения дефекта, тем эффективнее метод.

*Критерий 2.* Информативность. Критерий определяет точность постановки диагноза и возможность (невозможность) локализации дефекта.

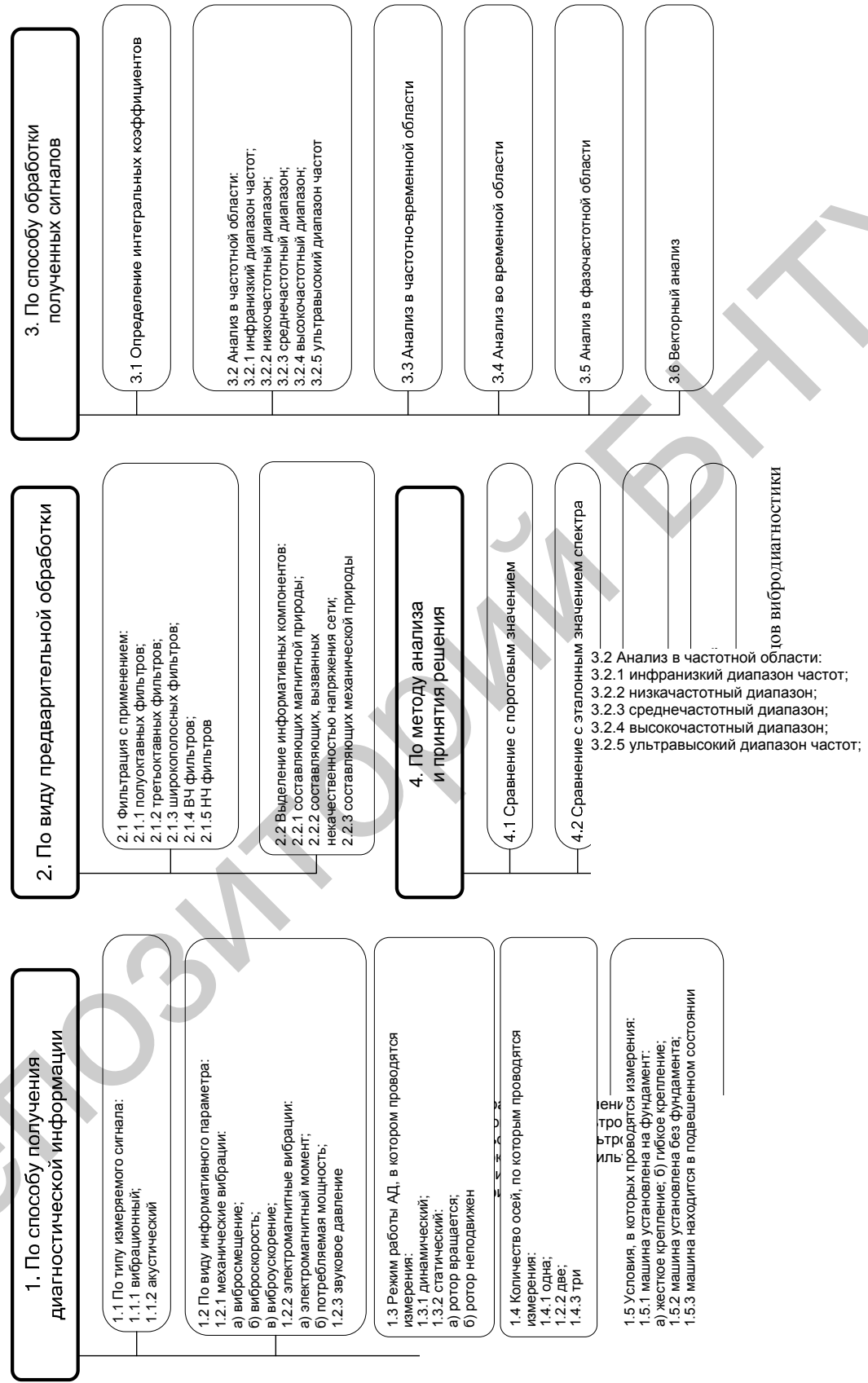
Увеличение количества выходной информации повышает точность постановки диагноза и соответственно эффективность метода.

*Критерий 3.* Уровень программного обеспечения (ПО) и аппаратной реализации. Критерий определяет уровень сложности аппаратуры и ПО, применяемого для измерения параметров и проведения операций диагностики, и объемы капиталовложений. Этот критерий включает в себя также и уровень защищенности результатов ВД от влияния различных внешних возмущений.

*Критерий 4.* Временные затраты на проведение операций ВД: подготовка к проведению ВД, интерпретация результатов и т. д.

Классификацию методов ВД можно представить в виде, приведенном на рис. 1.

Ниже дано описание наиболее распространенных групп методов вибродиагностики АД. В виде «шифра» указывается место каждой группы методов в предложенной классификации.



*Группа 1.* Диагностика АД по среднеквадратичному значению (СКЗ) вибросигнала. Уже в течение многих лет и по настоящее время вибрационное состояние машин широкого класса успешно оценивают путем измерения СКЗ виброскорости (реже – виброускорения) [2, 3, 18].

Достоинствами этого метода являются простота реализации и низкая стоимость за счет использования элементарной портативной виброизмеряющей аппаратуры. Среди недостатков стоит выделить невозможность точного определения природы дефекта.

1-1.1-1.1.1; 1-1.2-(1.2.1, 1.2.2); 1-1.3-1.3.2; 1-1.4-(1.4.1-1.4.3); 1-1.5-(1.5.1-1.5.3); 2-2.1-2.1.3; 3-3.1; 4-4.1.

*Группа 2.* Вибродиагностика АД с помощью фазовых портретов (траекторий колебаний).

Для оценки технического состояния АД может быть применен метод, основанный на анализе реконструированных фазовых портретов вибросигналов с использованием теории детерминированного хаоса для достоверного определения таких дефектов, как дисбаланс, несоосность валов, потеря жесткости опор. На фазовом портрете отображаются сразу две характеристики движения, что дает возможность получить больше информации о поведении системы, чем при спектральном анализе, где используется только одна составляющая движения [2, 13].

Достоинство: высокая информативность.

Недостатками этого метода являются сложность аппаратной реализации и ПО, а также сложность интерпретации результатов.

1-1.1-1.1.1; 1-1.2-1.2.1-а; 1-1.3-(1.3.1, 1.3.2); 1-1.4-1.4.2; 1-1.5-1.5.1; 2-2.1-2.1.3; 3-3.4.

*Группа 3.* Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, позволяющий выявить частотный состав сигнала. Выявление повышенных амплитуд вибрации на частотах, совпадающих с частотами возможных повреждений элементов, на резонансных частотах деталей, на частотах протекания рабочего процесса помогает обнаружить и идентифицировать неисправность на различных стадиях его развития [1-5, 9-12].

Достоинства:

- достаточно высокая помехозащищенность;
- высокая информативность метода: существует возможность получить дифференцированную оценку состояния АД отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Основные недостатки, присущие диагностике по составляющим спектра вибрации:

- сложность в аппаратной реализации – необходимо использовать дорогостоящий спектроанализатор, имеющий качественное ПО;
- метод малочувствителен к зарождающимся и слабым дефектам;
- некорректность результатов при обработке нестационарных сигналов.

1-1.1-1.1.1; 1-1.2-(1.2.1, 1.2.2); 1-1.3-1.3.2; 1-1.4-(1.4.1-1.4.3); 1-1.5-(1.5.1-1.5.3); 2-(2.1, 2.2); 3-3.2; 4-(4.1-4.3).

*Группа 4.* Спектральный анализ огибающей – метод, в котором анализируются не сама высокочастотная вибрация, а низкочастотные колебания ее мощности.

Глубину модуляции случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации можно определить в процентах, используя среднее значение огибающей. При изменении вида дефекта частота модуляции изменяется. Чем больше степень развития дефекта, тем больше становится глубина модуляции. Следовательно, частота модуляции определяет вид дефекта, а глубина модуляции – степень его развития [1–3, 5, 6, 12].

В ряде литературных источников указаны его достоинства. К ним относятся:

- возможность локализовать дефект;
- высокие чувствительность и достоверность определения вида и величины каждого из дефектов.

Основные недостатки – высокая стоимость аппаратуры и сложность реализации. Как правило, алгоритм обработки и анализа реализуется с использованием компьютерной техники.

1–1.1–1.1.1; 1–1.2–(1.2.1, 1.2.2); 1–1.3–1.3.2; 1–1.4–(1.4.1–1.4.3); 1–1.5–(1.5.1–1.5.3); 2–2.1; 3–3.2; 4–(4.1–4.3).

*Группа 5.* Кепстральный анализ. В роторных машинах очень часто можно наблюдать обилие гармонических составляющих, каждая из которых имеет отношение к некоторому важному возмущению (дефекту). Среди них трудно выделить одну или несколько составляющих, на которых можно было бы построить диагностический алгоритм. Это замечание относится, прежде всего, к машинам с зубчатыми редукторами либо подшипниками качения. Для сжатия информации, содержащейся в спектре, в этих случаях используют кепстр – преобразование Фурье от логарифмического спектра мощности [1, 9, 10, 12, 14, 18].

Достоинства: кепстральный анализ в значительной степени нечувствителен к изменениям фазы исследуемых сигналов и к особенностям путей распространения механических, следовательно, имеет высокую помехозащищенность.

Недостаток: сложность интерпретации результатов.

1–1.1–1.1.1; 1–1.2–(1.2.1, 1.2.2); 1–1.3–1.3.2; 1–1.4–(1.4.1–1.4.3); 1–1.5–(1.5.1–1.5.3); 2–2.1–2.1.3; 3–3.2; 4–(4.1, 4.3).

*Группа 6.* Ультразвуковая дефектоскопия и акустическая диагностика. Объектами дефектоскопии являются отдельные элементы машин, оборудования, конструкций и сооружений, как правило, находящихся в стадии изготовления или восстановления. Средства дефектоскопии, использующие внешние источники ультразвуковой вибрации, по своей структуре и назначению похожи на средства модального анализа «в миниатюре», но в них есть и другие отличительные черты, кроме области частот измеряемой вибрации. Так, дефектоскопия использует волновые свойства вибрации, в частности ее отражение от различных неоднородностей и потери при распространении. Это позволяет обнаружить и локализовать дефектные участки внутри деталей или их заготовок, что и является основным назначением средств ультразвуковой дефектоскопии. Подобные средства, как и средства модального анализа, весьма редко используются для диагностики машин в процессе эксплуатации. Одной из причин этого является высокая эффективность методов и средств дефектоскопии, использующих другие виды излучений, например электромагнитное, рентгеновское и т. д. [2, 3, 5].

Достоинство: высокая информативность.

Недостатки: сложность аппаратной реализации и соответственно высокая стоимость аппаратуры и применение, как правило, только для определения целостности металлических узлов.

1-1.1-1.1.2; 1-1.3-(1.3.1, 1.3.2); 1-1.5-(1.5.1-1.5.3); 2-2.1; 3-3.2-3.2.5; 4-(4.2, 4.3).

*Группа 7.* Специальные диагностические параметры. Очень часто в различных источниках отдельно выделяются методы ВД для подшипников качения, так как это один из наиболее часто встречающихся дефектов АД. В качестве критериев при диагностировании состояния подшипников качения эффективно применение значений особых параметров, которые наилучшим образом учитывают долю высокочастотных составляющих. Таковыми параметрами являются пик-фактор, резкость, относительная глубина модуляции высокочастотного сигнала виброускорения (реже – виброскорости), относительная величина ударных импульсов [1, 5, 11, 12].

Достоинство: простота реализации.

Недостатки: низкая помехозащищенность и отсутствие четких границ для значений этих параметров.

1-1.1-1.1.1; 1-1.2-1.2.1б, в; 1-1.3-1.3.2; 1-1.4-(1.4.1-1.4.3); 1-1.5-(1.5.1-1.5.3); 2-2.1-2.1.3; 3-3.4; 4-(4.1, 4.3).

*Группа 8.* Вейвлет-анализ. Как отдельный метод обработки вибрационных сигналов выделяют вейвлет-преобразование. Различают дискретный и непрерывный вейвлет-анализ, аппарат которых можно применять как для непрерывных, так и для дискретных сигналов. Сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Функция-прототип называется анализирующим (материнским) вейвлетом. Теория вейвлетов дает удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. В отличие от преобразований Фурье вейвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерное развертывание, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализировать сигнал сразу в двух пространствах [12, 15].

Метод открывает новые возможности акустической диагностики машин и конструкций, базирующихся на его основных достоинствах, к которым относится высокая информативность метода.

Основными недостатками вейвлет-анализа являются:

- трудоемкость;
- сложность в интерпретации результатов.

1-1.1-1.1.1; 1-1.2-(1.2.1, 1.2.2); 1-1.3-(1.3.1, 1.3.2); 1-1.4-(1.4.1-1.4.3); 1-1.5-(1.5.1-1.5.3); 2-2.1; 3-3.3; 4-4.3.

Следующие две группы методов относятся к методам принятия решения.

*Группа 9.* Статистические методы обработки сигналов вибрации. Необходимость использования статистических методов в диагностике электрических машин обоснована изменчивостью, наблюдаемой в процессе работы и влияющей на результаты производственной деятельности даже при условии кажущейся стабильности. Такая изменчивость может проявляться в измерении характеристик процессов на различных этапах жизненного цикла двигателей.

Статистические методы помогают измерить, описать, проанализировать и смоделировать подобную изменчивость и при наличии ограниченного объема данных. Статистический анализ данных может помочь при формировании лучшего понимания работы привода, сроков и причин изменчивости, а в дальнейшем – при решении и даже предупреждении проблем, связанных с такого рода изменчивостью [16].

Таким образом, статистические методы позволяют наилучшим образом использовать имеющиеся в распоряжении данные при принятии решений на стадиях проектирования, разработки, производства, поставки и технического обслуживания.

Достоинство: достаточно высокая информативность.

Недостатки: большой объем входной информации и большие временные затраты.

*Группа 10.* Диагностика на основе нейронных сетей. Методы анализа прямого спектра и спектра огибающей могут быть реализованы с использованием теории искусственных нейронных сетей. Применение математического аппарата нейронных сетей обеспечивает повышение точности процесса диагностики путем использования имеющихся знаний о работе аналогичных агрегатов. Кроме того, результаты измерения вибрации, как и любые другие физические измерения, подвержены некоторой случайности. А аппарат нейронных сетей относится к статистическим математическим методам, что позволяет ставить диагноз при значительных случайных составляющих обрабатываемого сигнала [17].

Достоинствами применения данной технологии являются высокая точность определения дефекта, а также высокий уровень автоматизации процесса.

К недостаткам же можно отнести сложность реализации и обучения нейросети, кроме того, стоит выделить низкую степень унификации (для каждого нового узла необходимо создавать новую сеть и ее обучать).

Все вышеперечисленные методы оценивались по пятибалльной системе в соответствии с критериями, определяющими эффективность применения методов. Результаты оценки эффективности применения этих методов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительная оценка методов вибродиагностики**

Метод	Критерий				Суммарная оценка
	1	2	3	4	
Группа 1	4	2	4	4	14
Группа 2	3	5	3	2	13
Группа 3	3	4	4	4	15
Группа 4	3	5	3	4	15
Группа 5	3	3	3	3	12
Группа 6	3	4	2	3	12
Группа 7	4	3	4	3	14
Группа 8	3	4	3	4	14
Группа 9	2	5	3	2	12
Группа 10	2	4	4	2	12

В статье рассмотрены наиболее широко применяемые методы обработки и анализа данных с целью вибрационного контроля состояния и диагностирования машин. Однако в отдельных случаях используют методы, специально разработанные для решения конкретных задач. Объектами исследования в этих методах могут быть, например:

- функция автокорреляции;
- функция взаимной корреляции;
- коэффициент эксцесса;
- композитный спектр;
- интенсивность вибрации;
- форма пиков сигнала;
- векторы составляющих вибрации;
- энергия импульсов в подшипнике качения.

### ВЫВОДЫ

Проведенный анализ и оценка методов вибродиагностики асинхронных двигателей показали, что наиболее эффективными являются методы спектрального анализа и спектрального анализа огибающей. Эффективно также применение специальных диагностических параметров, вейвлет-анализа и нейронных сетей.

В качестве неисследованных или недостаточно исследованных вопросов вибродиагностики асинхронных двигателей можно выделить:

- вибродиагностику при использовании нескольких частот вращения асинхронного двигателя;
- вибродиагностику при неподвижном роторе асинхронного двигателя;
- вибродиагностику асинхронного двигателя при его полигармоническом питании;
- комплексный анализ электромагнитных и механических вибраций;
- оценку мощности и энергии вибраций;
- влияние некачественности питающей сети на результаты вибродиагностики;
- влияние вибраций на ресурс изоляции асинхронного двигателя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ш и р м а н, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М., 1996. – 276 с.
2. Б а р к о в, А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова // Сборник трудов семинара «Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок». – СПб., 1999. – С. 115–156.
3. Т э т т э р, В. Ю. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах / В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер, В. С. Барайшук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2005. – Ч. 2, № 8 (90).
4. Р у с с о в, В. А. Спектральная вибродиагностика / В. А. Руссов. – Пермь, 1996. – Вып. 1. – 176 с.



5. В и б р о д и а г н о с т и к а подшипников качения. «МНЕНИЯ» ООО «Витэк» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.vitec.ru/upload/iblock/e4d/diagnostika\\_podshipnikov.pdf](http://www.vitec.ru/upload/iblock/e4d/diagnostika_podshipnikov.pdf)
6. Б а р к о в, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004. – 152 с.
7. А з о в ц е в, Ю. А. Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях / Ю. А. Азовцев, Н. А. Баркова, В. А. Доронин // Бумага, картон, целлюлоза. – 1999. – Май.
8. Б а р к о в, А. В. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. А. Борисов // Методические указания к лабораторным работам по диагностике электрических машин. – СПб., 2006.
9. К р а в ч е н к о, В. М. Техническое диагностирование механического оборудования: учебн. – Ч. 2: Практика технического диагностирования / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров. – Донецк, 2006.
10. С о т н и к о в, А. Л. Внедрение систем диагностирования / А. Л. Сотников, В. А. Сидоров, А. В. Лукичев // Машинознавство і деталі машин: Матеріали 4-ї регіональної науково-методичної конференції. – Донецк: ДонГТУ, 2002. – С. 81–87.
11. Н е р а з р у ш а ю щ и й контроль: справ. в 7 т. / Ф. Я. Балицкий [и др.]; под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – Т. 7: в 2 кн. – Кн. 2: Вибродиагностика. – 829 с.
12. Г о л ь д и н, А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
13. В и б р а ц и я. Системы измерений вибрации вращающихся валов. – Ч. 1: Устройство для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации (ISO 10817-1:1998); ГОСТ ИСО 10817-1–2002. – Введ. 01.11.2007. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2007. – 19 с.
14. Р а к, А. Н. Кепстральный анализ сигнала вибрации в диагностировании неисправностей электрических двигателей. Машиностроение и техносфера XXI века / А. Н. Рак, А. В. Лукичев // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конференции в г. Севастополе 13–18 сентября 2004 г.: в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – Т. 3. – С. 56.
15. Д о б е ш и, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
16. С т а т и с т и ч е с к и е методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО–9001 (Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000 (IDT)); ГОСТ Р ИСО/ТО10017–2005. – Введ. 31.05.2005. – М., 2005. – 50 с.
17. П р и м е н е н и е искусственных нейронных сетей для создания экспертной системы диагностирования технологического оборудования (Сб. ст. «Энергосбережение, автоматизация в промышленности, интеллектуальные здания и АСУТП», опуб. 06.04.2007) [Электронный ресурс] / А. В. Семенченко. – Режим доступа: <http://d.17-71.com/2007/04/06/primenenie-iskusstvennyih-neyronnyih-setey-dlya-sozdaniya-ekspertnoy-sistemy-diagnostirovaniya-the-nologicheskogo-oborudovaniya>.
18. М а ш и н о с т р о е н и е: энциклопедия / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение. Измерения, контроль, испытания и диагностика. – Т. П1-7 / В. З. Клюев [и др.]; под общ. ред. В. В. Клюева. – 464 с.
19. В и б р а ц и я энергетических машин: справ. пособие; под ред. Н. В. Григорьева. – Л.: Машиностроение, 1974. – 464 с.

Представлена кафедрой САУЕ

Поступила 25.04.2012