

12, декабрь 2015

УДК 620.178.5

Методы и алгоритмы построения контроля и диагностики оборудования бумагоделательной машины

Столяров К.И., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»*

Научный руководитель: Овсянников М.В., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»*

mvo50@bmstu.ru

В данной статье рассматриваются методы диагностики и - технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) бумагоделательной машины (БДМ), которая предназначена для выработки из волокнистой массы бумаги путем образования (отлива) слоя волокон с последующим его обезвоживанием, сушкой и намоткой в рулон, а также каландрированием, поверхностной обработкой и резкой.

Как показывает практика, наиболее часты поломки в сушильной части БДМ, так как из-за высокой температуры и влажности воздуха подшипники Янки-цилиндра и сушильных цилиндров выходят из строя вследствие перегрева и коррозии, а также выход из строя подшипников электродвигателей.

Выход из строя оборудования зачастую ведет к аварийному останову машины или неизбежно влияет на качество продукции, так, например, повышение вибрации на формирующих валах снижает плотность бумаги или может стать причиной обрыва сетки БДМ.

Структура системы контроля и диагностики ТОиР БДМ

Система контроля и диагностики в рамках ТОиР БДМ имеет иерархическую структуру и включает ряд этапов (рис. 1).



Рис. 1. Структура системы контроля и диагностики БМД

Первый этап алгоритма – каталогизация диагностируемого оборудования. На данном этапе формируется иерархия оборудования, формируются группы оборудования и точки мониторинга, определяются даты их запуска. Второй шаг алгоритма — это загрузка нормативной информации (база дефектов, их причин и последствий, граничные значения параметров).

На втором этапе происходит составление матрицы критичности (рис. 2) [26].

Класс	Безопасность/ Экология	Потеря производительности (Отказ технологической позиции влияет на цель комбината по производительности)	Степень эксплуатации (Нахождение Технологической позиции в режиме работы)	Качество	Частота отказов (Количество отказов за определенный период эксплуатации)	Состояние ТО (Время и стоимость устранения отказа)
9	Поломка оборудования может привести к травме (смерте), экологической катастрофе	Необратимо влияет на годовые цели комбината по производительности	24 часа в сутки	Влияет на качество конечного продукта (не отвечает техническим условиям внешнего покупателя)	< 6 месяцев	На ремонт затрачивается более 4 дней или более \$25,000,00 (750 000 руб.) (не включаются потери в связи с простоем производства) Или эффект текущих расходов > \$100 000 (3 000 000 руб.)
5		Обратимо влияет на цели комбината по производительности	Более 8, но менее 16 часов/сутки (включая установленный резерв)	Влияет на продукт для внутреннего покупателя (не влияет на внешнего покупателя)	Один раз в год	На ремонт затрачивается 1 - 2 дня и \$5,000 - \$25,000 (не включаются потери в связи с простоем производства) Или эффект текущих расходов > \$ 50 000(1 500 000 руб.)
1		Не влияет на цели по производительности	Менее 8 часов/сутки, или не является частью производственного процесса	Не влияет на качество или технические условия продукта	Редко	На ремонт затрачивается менее 2 дня и менее \$10,000(300 000 руб.) (не включаются потери в связи с простоем производства)

Рис. 2. Пример матрицы критичности

В заполнении матрицы обязательно должно принимать участие руководство предприятия, а также эксперты в области ТОиР, технологии данного производства. От матрицы и решающих правил зачастую зависит адекватность оценки критичности. Именно по критериям данной матрицы будет происходить сортировка всех точек диагностики по уровню критичности оборудования.

В алгоритме предусмотрено 3 уровня критичности: 1- не критичное оборудование; 5- ответственное оборудование; 9 - критичное оборудование[26]. В зависимости от уровня критичности выбирается стратегия ТОиР.

Первый уровень соответствует стратегии «Реактивное ТОиР». К основным достоинствам данной стратегии ТОиР следует отнести наибольшую длительность межремонтного периода, соответствующую сроку службы оборудования, и минимальные затраты на содержание ремонтной службы, доминирующей функцией которой в этом случае становится восстановление работоспособности оборудования после выхода его из строя. С другой стороны, отсутствие возможности планирования ресурсов (финансовых, временных, рабочей силы и прочих), необходимых для выполнения ТОиР, приводит к значительному увеличению продолжительности последних и к повышенным издержкам на ликвидацию аварий, в том числе к потерям производства. Объем таких запасов в ряде случаев (особенно в отраслях, где используется уникальное единичное оборудование) превышает экономически обоснованные пределы. Несмотря на указанные недостатки, в случае недорого резервируемого, а также типового оборудования, отказ которого не оказывает критического влияния на технологический процесс, не представляет опасность для окружающей среды, здоровья и жизни человека, данная стратегия успешно применяется.

На следующем этапе определяются параметры кривой распределения интенсивности отказов для каждой группы оборудования. После чего оценивается наработка узла, и определяются параметры его надежности.

Оборудование с оценкой критичности 5 и 9 предлагается обслуживать по двум стратегиям соответственно: ODR инспекция и онлайн мониторинг. При выборе стратегии «ODR инспекция» группой экспертов (технологи, инженеры, сотрудники службы ТОиР, эксперты в данной области производства) составляется план профилактических и диагностических мер ТОиР и их периодичность для каждого узла.

На следующем шаге алгоритма проверяется время внедрения инспекции/онлайн измерения если оно входит расчетный интервал функционирования системы контроля и диагностики, то начинается сбор данных инспекций/измерений, в противном случае

инициализируется выход из цикла. Все результаты измерений заносятся в базы данных «Измерение/Проверка». Информация из данной БД также используется для нахождения интенсивности отказов P_i в алгоритме построения кривой распределения интенсивности отказов.

Если во время инспекций обнаружен отказ, то производится анализ неполадки, а далее формируется заказ наряд на выполнение службой ТОиР работ по устранению отказа.

Если нужна корректировка ТОиР данного узла, то инициализируется блок определение критичности узла, после чего происходит переназначение уровня критичности, сроков выполнения и выполняется следующая инспекция, иначе «следующая инспекция».

При выборе режима «Онлайн мониторинг» для каждой точки измерения подбираются параметры измерения, а также уровни тревог, для этого пользуются стандартами: ГОСТ 10816, ISO 10816 или зачастую уровни тревог устанавливаются индивидуально в зависимости от состояния оборудования.

Результаты измерения обрабатываются АСУ БДМ, при превышении значений измерений уровня тревог, системой управления формируется сигнал «Аварийный останов» или меняется режим работы (например: сбрасывается рабочая скорость машины при обнаружении повышенного уровня вибрации)

Расчет остаточного ресурса технического узла

БДМ-машина в которой много групп элементов, условия работы которых уникальны для каждой машины. Для таких элементов информация о надежности не может быть полной и достаточно определенной. За определенный период накапливается статистика отказов, а также количество узлов исправно работающих. Это позволит в процессе эксплуатации БМД получить начальную оценочную функцию распределения потока отказов, которая уточняется с каждым следующим отказом.

В работе используется оригинальный метод определения остаточного ресурса на основе цензурирующих выборок [25]. В результате применения метода определяются параметры функции распределения плотности вероятности отказов, на основе которых рассчитывается остаточный ресурс узла с заданным уровнем надежности.

Плотность потока отказов определяется по следующей формуле.

$$p_i = (m_i^{отк}) / (m_i^{отк} + m_i^{цен*}), \quad (1.1)$$

где $m_i^{отк}$ – количество изделий отказавших при наработке меньшей q_i ;

$m_i^{цен*}$ – количество изделий проработавших больше q_i .

Параметры функции распределения определяются с использованием метода наименьших квадратов.

Для расчетов показателей качества и надежности техники, как правило, используются следующие непрерывные двухпараметрические распределения:

1. нормальное распределение (распределение Гаусса);
2. логарифмически нормальное распределение;
3. распределение Вейбулла.

Логнормальное распределение, как правило, обеспечивает лучшее и более устойчивое приближение к экспериментальным данным, но распределение Вейбулла является наиболее востребованным распределением при исследовании надежности техники во всех отраслях промышленности и транспорта из-за простоты определения параметров.

Преимущества данного метода определения остаточного ресурса заключается в том, что оценка остаточного ресурса возможна даже при очень малой входной выборке. Объем выборки будет влиять на точность определения остаточного ресурса.

Метод был апробирован на двух выборках отказов однотипных узлов (электродвигателей и подшипниках сукноведущих валов), предоставленных ЦБК. Ниже (табл. 1, 2 и рис. 3) представлены результаты параметров функции распределения логнормального закона в зависимости от количества отказов.

Таблица 1

Результаты апробирования алгоритма определения остаточного ресурса на выборке отказов подшипников сукноведущих валов

Количество отказавших узлов	Параметр функции распределения логнормального закона: μ	Параметр функции распределения логнормального закона: σ	Остаточный ресурс при 95% отказе, часов
1	5.40	0.27	396.5
2	7.30	0.32	1215
3	7.30	0.40	1246
4	7.30	0.51	1298
5	7.95	0.36	1298

Результаты апробирования алгоритма определения остаточного ресурса на выборке отказов электродвигателей ДАЗО4-400Х-4МУ1.

Количество отказавших узлов	Параметр функции распределения логнормального закона: μ	Параметр функции распределения логнормального закона: σ	Остаточный ресурс при 95% отказе, часов
1	9,00	0,20	1115.5
2	8.89	0.08	1115.5
3	8.93	0.19	1115.5
4	7.30	0.51	1115.5

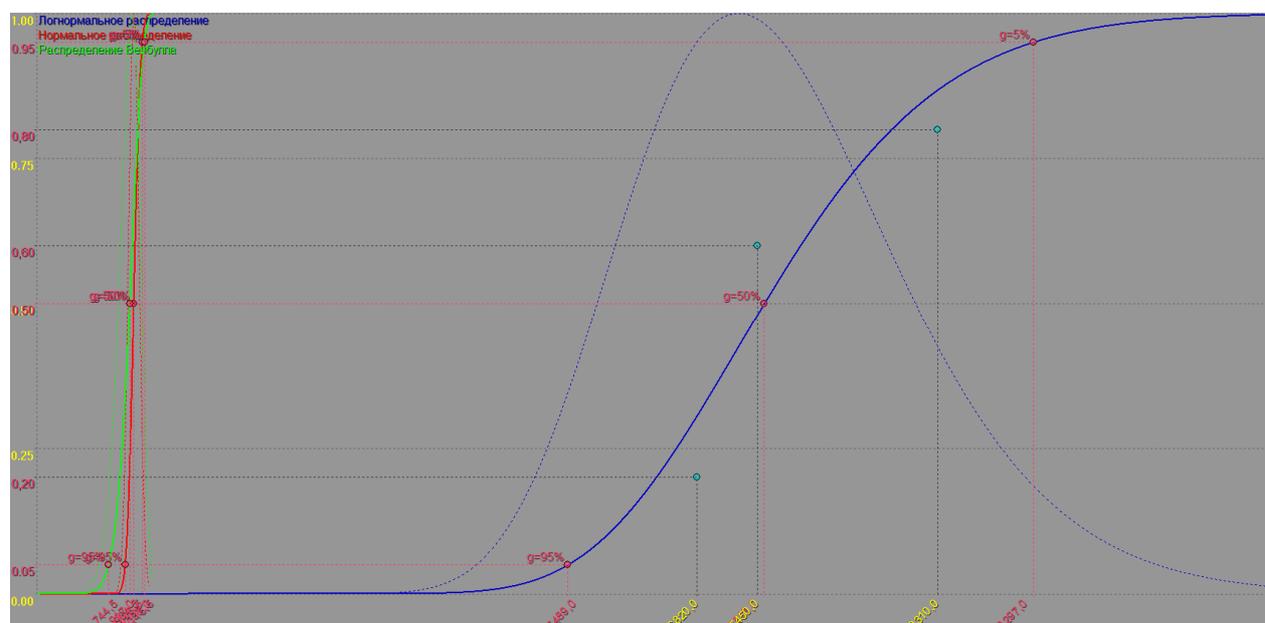


Рис. 3. Расчетная функция распределения плотности вероятности отказов электродвигателей ДАЗО4-400Х-4МУ1

Вывод: Как видно из результатов построения кривых распределения, метод обеспечивает определение остаточного ресурса с погрешностью 4% уже при 3-м отказе узлов данного типа. Результаты эксперимента были проведены на выборке из 18 подшипников сукноведущих валов и 5 электродвигателях. Результаты эксперимента подтверждают адекватность метода, с помощью которого можно дополнить матрицу критичности дополнительным параметром “Прогнозируемый остаточный ресурс узла”, для более точной корректировки списка работ ТОРО и периода обхода узла.

Диагностика потенциальных дефектов узлов БДМ

Рассмотрим методы диагностики потенциальных дефектов элементов БДМ на примере подшипниковых узлов. Существует M видов подшипниковых узлов с различными подшипниками качения. А также $def_j; j = 1 \dots m$, известных типов дефектов подшипников, представленных в виде типовых спектральных картин вибрации. В качестве второго входного параметра используется рабочая частота вращения агрегата $\omega, Гц$. Имеются K измерений (с рабочих и дефектных подшипниковых узлов) виброускорения который представляет из себя одномерный ряд значений амплитуд виброускорения $y_i; i = 1 \dots N$, где N число сэмплов в разбиении сигнала.

Постановка задачи звучит следующим образом:

Определить исправность подшипника по его временному сигналу и возможный дефект подшипника из списка def_j в случае неисправности.

Решение задачи включает следующие этапы:

1. Провести анализ временного сигнала.
2. Разложить сигнал в спектр
3. Сформировать правила и алгоритм определения причины по спектру
4. Определить причину применяя решения правила

Анализ критичности позволяет снизить расходы на ТОиР за счет минимизации ненужного ремонта и частых проверок исправности оборудования.

Выбор метода анализа вибросигнала

Основные виды анализа вибрации [8,9,22] (см рис. 4) включают анализ вибрации во временной области и частотной области.

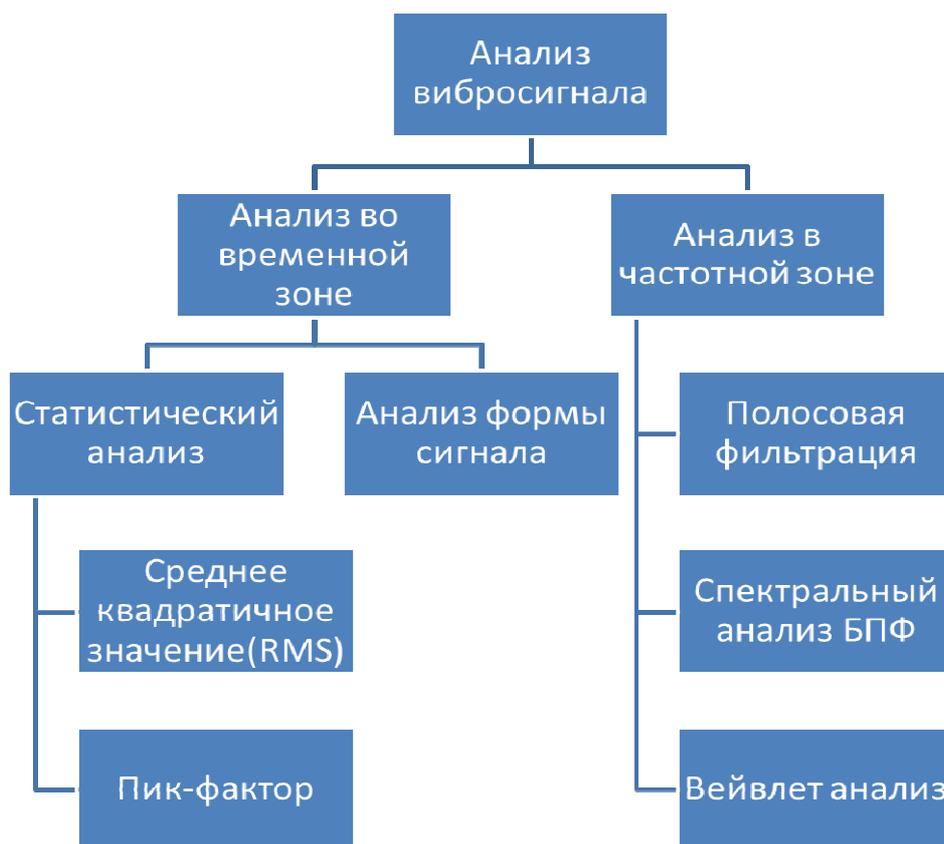


Рис. 4. Методы анализа вибросигнала

Метод измерения среднего квадратичного значения временного сигнала вибрации

Среднее квадратичное значение (СКЗ) временного сигнала вибрации – является функцией временного анализа вибрации, которая характеризует мощность сигнала вибрации.[8,9,19]

Для временного сигнала вибрации y_i записанного с частотой n -сэмплов СКЗ вычисляется по следующей формуле:

$$СКЗ = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (y_i^2)} \quad (1.2)$$

Данный метод дает хорошее представление об общем уровне вибрации агрегата, но при этом с помощью него невозможно определить какой именно неисправен узел и какой у него дефект. Существуют стандарты [19], которые регламентируют упреждающие допуски – ГОСТ 10816, ISO 10816 (рис. 5).

Уровень, мм/с СКЗ (от 10-1000Гц)	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
0,71				
1,12		Хорошо		
1,80				
2,80		Допустимо		
4,50				
7,10		Кратковременная эксплуатация		
11,2				
18		Опасно		
28				

Рис. 5. Допустимые уровни вибрации машин согласно ГОСТ ИСО 10816 [19]

Метод измерения Пик-фактора

Т.к. метод среднего квадратичного значения не способно отследить развитие дефектов на ранних стадиях его развития, то зачастую используют метод анализа временного сигнала вибрации с помощью метода пик- фактора.

Суть метода Пик-Фактора(ПФ)[24] состоит в том, что наличие даже зарождающихся дефектов в подшипнике приводит к появлению высокочастотных ударных импульсов и, следовательно, к увеличению уровней пиков амплитуд в высокочастотном сигнале вибрации, при этом его среднеквадратичные уровни, в общем случае, могут даже оставаться неизменными.

Рост значения ПФ, превышающий некоторый пороговый уровень, свидетельствует о возникновении единичных ударных импульсов (например: микроудары тел качения о раковину на внутренней кольце подшипника), а последующее снижение уровня ПФ говорит о появлении большого количества ударных импульсов, опасных для дальнейшей эксплуатации подшипника.

Для временного сигнала вибрации u_i записанного с частотой n -сэмплов Пик-фактор вычисляется по следующей формуле:

$$\text{ПИК - ФАКТОР} = \frac{\max(y_i)}{\sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (y_i^2)}} \quad (1.3)$$

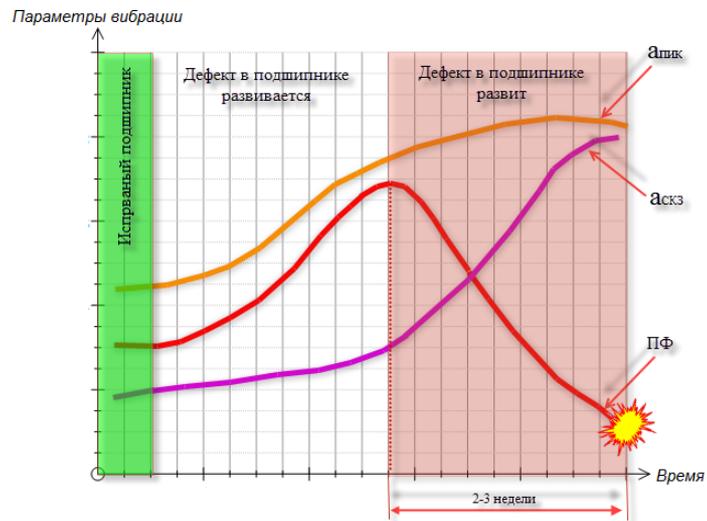


Рис. 6. Изменение параметров ПФ и СКЗ по мере развития дефекта в подшипнике [24]

Достоинство метода — простота. Для реализации нужен обычный простой виброметр.

Недостатки – слабая помехозащищенность метода, необходимость проводить многократные измерения в процессе эксплуатации оборудования. Кроме того, метод ПФ не позволяет осуществлять долгосрочный прогноз в виду невозможности определять вид дефекта.

Метод подсчета пик-фактора целесообразно использовать для предварительной оценки состояния подшипника.

Вейвлет анализ вибрации

Термин «вейвлет» (дословный перевод с английского языка – маленькая волна) появился сравнительно недавно: его ввели Гроссман и Морле (A.Grossman и J. Morlet)[20] в середине 80-х г. в связи с анализом свойств сейсмических и акустических сигналов. В настоящее время семейство анализаторов, названных вейвлетами, применяется при решении задач распознавания образов, при обработке и синтезе различных сигналов, при анализе изображений самой различной природы, для изучения свойств турбулентных полей, для упаковки больших объемов информации и во многих других случаях. Однако во всех этих случаях общим является то, что результат анализа некоего сигнала должен

содержать в себе не только перечисление его характерных частот (спектр), но и сведения об определенных временных координатах, в которых эти частоты проявляют себя.

Преимущество метода состоит в том, что он позволяет анализировать локализованные области в сигналах, большая информативность при обработке сигнала, возможность определения конкретной неполадки. 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 (Частота и время). [21]

К недостаткам метода можно отнести, сложность интерпретации результатов, сложные математические вычисления при преобразовании, большие временные затраты на обработку сигнала вибрации.

Спектральный анализ с помощью преобразования Фурье

Спектральный анализ наиболее часто применяется для исследования структуры вибрации, как наиболее адекватный способ обнаружения составляющих вибрации.[22] Применение спектрального анализа возможно, если частоты вращения роторов постоянны, однако это не всегда соблюдается. При нестабильной частоте вращения следует применять синхронный спектральный анализ. Для этого анализа необходимо регистрировать и сигнал вибрации, и сигнал с датчика частоты вращения. При выполнении спектрального анализа каждый из фильтров, используемых для анализа, должен иметь частоту, кратную мгновенной частоте сигнала с датчика частоты вращения. В этом случае сигнал на выходе любого фильтра соответствует той составляющей вибрации, частота которой кратна мгновенной частоте вращения ротора

Таким образом зная характеристические частоты конкретного подшипника, выявлять повышенные амплитуды вибрации на частотах, совпадающих с частотами возможных повреждений элементов, резонансных частотах деталей, на частотах протекания рабочего процесса помогает, тем самым метод может обнаружить и идентифицировать неисправность на различных стадиях его развития.

Достоинства данного метода:

- 1) достаточно высокая помехозащищенность;
- 2) высокая информативность метода, существует возможность получить дифференцированную оценку состояния агрегата отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.
- 3) возможность локализовать дефект.

4) высокая чувствительность, высокая достоверность определения вида и величины каждого из дефектов.

К недостаткам данного метода можно отнести высокую стоимость аппаратуры и сложность реализации, а также некорректность результатов при обработке нестационарных сигналов.[10]

Выбор метода распознавания спектра вибросигнала

Важным моментом в вибродиагностике является правильная интерпретация результатов измерения. Рационально использовать методы анализа спектра вибросигнала после проведения диагностики одним из статистических методов, в случаях, когда диагностируемые параметры заметно превышают допустимые уровни. Это объясняется существенными временными затратами на распознавания образов спектров службой ТОиР. Для сокращения этих затрат предлагается рассмотреть автоматизированные методы принятия решения.

Диагностика на основе нейронных сетей

Методы анализа прямого спектра и спектра огибающей могут быть реализованы с применением теории искусственных нейронных сетей. Применение математического аппарата нейронных сетей обеспечивает повышение точности процесса диагностики путем применения 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 [23].

Достоинствами применения данной технологии является 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 её обучать).

Диагностика на основе решающих правил

Наиболее частая поломка электродвигателей – выход из строя подшипников. Для анализа спектра вибрации подшипников необходимо знать гармоники характеристических частот подшипника, которые зависят от геометрических параметров изделий. На рис. 7

представлена типовая конструкция подшипника с указанием параметров. Которые определяют гармоники вибрации. Ниже приведен их расчет:

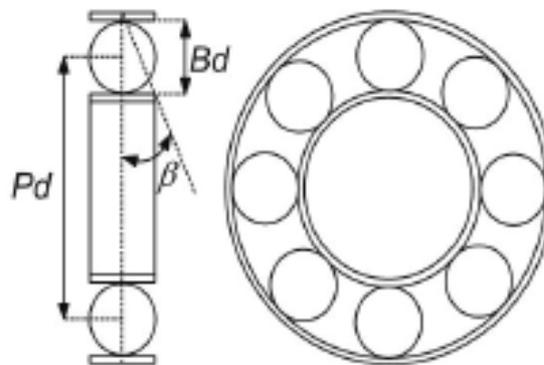


Рис. 7. Геометрические параметры подшипника

$$P_d = \frac{D + d}{2}, \text{мм} - \text{делительный диаметр. (1.4)}$$

$$FTF = \frac{S}{2} * \left[1 - \frac{B_d}{P_d} * \cos\theta \right], \text{Гц} - \text{частота сепаратора. (1.5)}$$

$$BSF = \frac{P_d}{2 * B_d} * S * \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} * \cos\theta \right)^2 \right], \text{Гц} - \text{частота вращения тел качения (1.6)}$$

$$BPFO = \frac{N_b}{2} * S * \left[1 - \frac{B_d}{P_d} * \cos\theta \right], \text{Гц} (1.7)$$

—частота прохождения тел качения по внешней дорожке качения.

$$BPF1 = \frac{N_b}{2} * S * \left[1 + \frac{B_d}{P_d} * \cos\theta \right], \text{Гц} (1.8)$$

—частота прохождения тел качения по внутренней дорожке качения.

где S- скорость вращения вала (Гц), D – диаметр наружного кольца (мм), d- диаметр внутреннего кольца (мм), Bd – диаметр тел качения (мм), Nb – количество тел качения, θ - угол контакта (град.).

Рассмотрим типовой спектр вибросигнала (рис. 8) дефектных подшипников[1]:

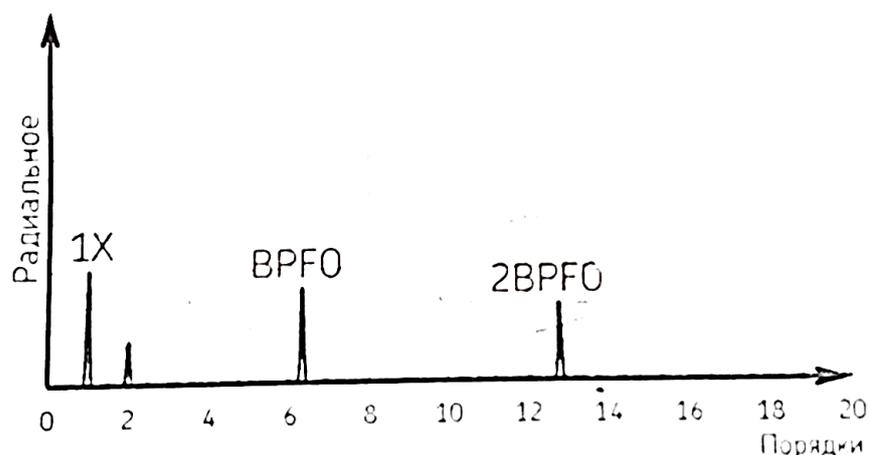


Рис. 8. Типовой спектр вибрации подшипника с дефектом наружного кольца

Так как в зависимости от применяемой оконной функции ширина пиков может отличаться заранее определим параметры погрешности частоты $\Delta \leq 1.5 \Gamma_{\text{ц}}$ (для окна Ханнинга), и $\Delta \leq 3 \Gamma_{\text{ц}}$ (для остальных оконных функций). Следует иметь в виду, что при малом разрешении спектра шаг дискретизации довольно большой, поэтому следует округлять погрешность Δ в большую сторону в зависимости от шага дискретизации вашего измерения. Спектр является набором дельта функцией амплитуд гармоник $AMP(\omega_i)$, от их частоты, поэтому сформулируем следующие решающие правила.

$$\begin{aligned} &\text{Если} \left(\exists AMP(BPFO - \Delta; BPFO + \Delta) > 4 * \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)} \text{ и } \exists AMP(2 * BPFO - \right. \\ &\Delta; 2 * BPFO + \Delta) > 4 * \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)} \text{ и} \left\{ \exists AMP(3 * BPFO - \Delta; 3 * BPFO + \Delta) > \right. \\ &3 * \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)} \text{ или } \exists AMP(4 * BPFO - \Delta; 4 * BPFO + \Delta) > 3 * \\ &\sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)} \text{ или } \exists AMP(5 * BPFO - \Delta; 5 * BPFO + \Delta) > 3 * \\ &\left. \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)} \right\}, \text{ ТО "Возможен дефект наружного кольца подшипника"} \end{aligned}$$

Рассмотрим еще одно производственное правило:

$$\text{Если } AMP(50) > 3 * \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)} \text{ ИЛИ } AMP(100) > 3 * \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=0}^{n-1} (AMP_i^2)}, \text{ ТО "Возможен ток в подшипнике"}$$

В данном правиле проверяется значение амплитуды гармоники на частоте 50 Гц (что соответствует частоте переменного тока) и если значение превышает утроенное значение среднеквадратичного значения всего спектра или же это значение превышает вторая гармоника на частоте 100 Гц, то возможен пробой электрического тока через тела качения.

Для апробирования производственных правил была написана программа в среде Matlab. На вход программы подается запись временного сигнала виброускорения в виде файла .xlsx.

Далее из файла считываются параметры длины вибросигнала, количества сэмплов, рабочей скорости машины во время измерения вибрации коэффициентов дефектных частот диагностируемого объекта. Следующим шагом определяется частота дискретизации. После чего происходит разложение сигнала в спектр с помощью стандартной функции быстрого преобразования Фурье fft. Следующим шагом подсчитываются результаты среднего квадратичного значения виброускорения и пик-фактор. По окончании этого процесса производится подсчет среднего квадратичного значения спектра и анализ спектра с помощью производственных правил реализованных на языке Matlab. После запуска программы на выходе мы видим результаты представления вибросигнала из исходного массива, представление этого сигнала в виде спектра, а также окна с результатами анализа спектра с помощью производственных правил.

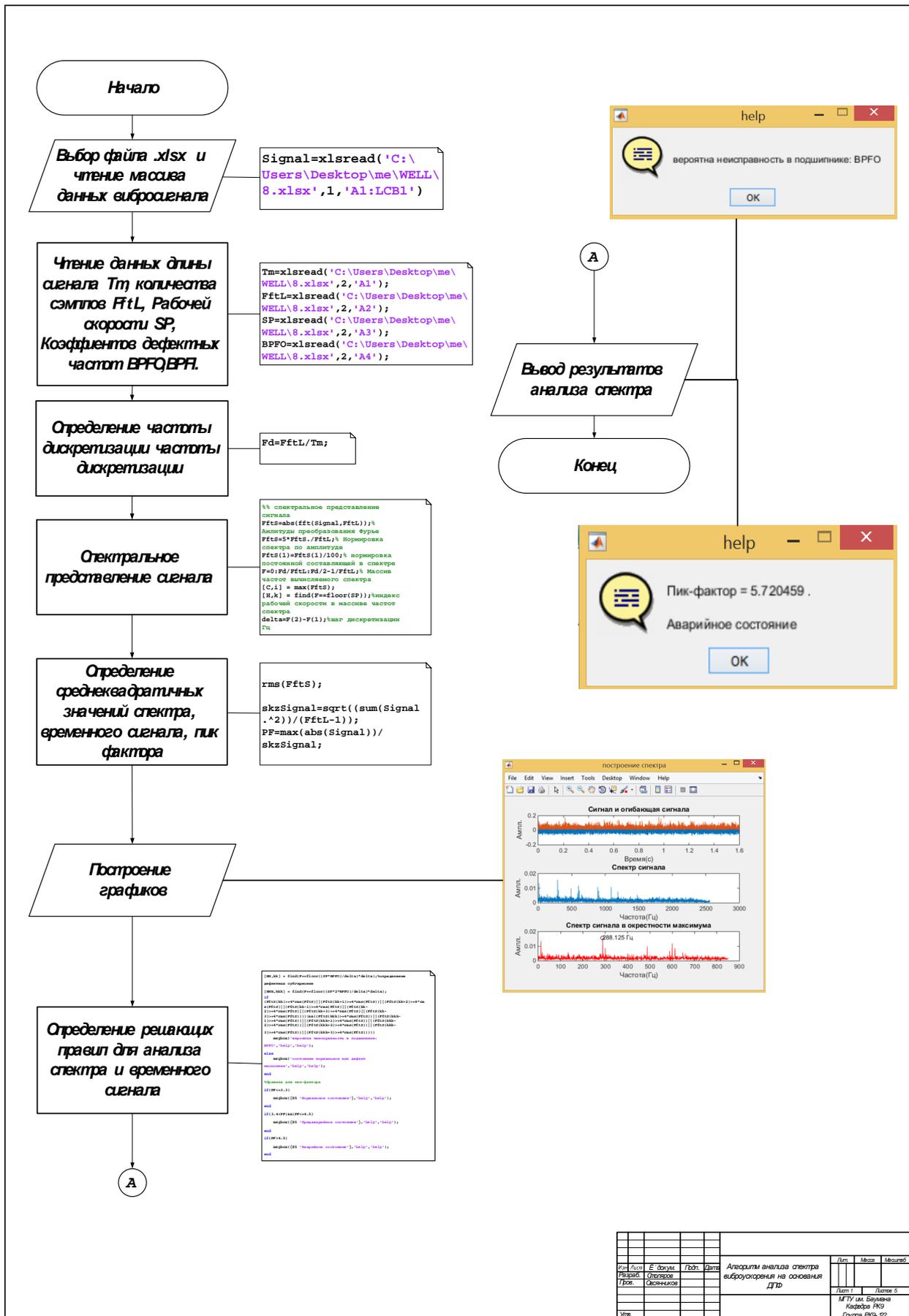


Рис. 9. Алгоритм анализа спектра виброускорения на основании ДПФ

Методы, разработанные в данной статье, были апробированы на диагностических данных узлов (временных сигналов вибрации) БДМ одного из крупнейших ЦБК России. Диагностировалась плоскосеточная машина четвертого поколения. Данная машина является одной из самых производительных в России на сегодняшний день (>130 тысяч тонн офисной бумаги, >60 тысяч тонн чистоцеллюлозной мелованной бумаги в год).

Данные правила были апробированы на 18 временных сигналах вибрации, снятых с подшипниковых узлов БДМ. Обработка сигналов происходила в программном комплексе MatLab, после чего результаты программы сравнивались с результатами анализа сигнала экспертом-вибродиагностом. В 96% результат обработки сигнала и определённый программой дефект совпал с экспертным решением. В 4% результаты программы определили предаварийное состояние узла, но причина неполадки не совпала с экспертным решением. Полученные на основе использования решающих правил результаты дают основание сделать вывод о положительном эффекте применения этих методик, при не высоком уровне зашумлённости сигнала.

Список литературы

1. Simon RW Mills. Vibration Monitoring & Analysis Handbook. The British Institute of Non-Destructive Testing Publ., 2010. 340 p.
2. Bengtsson M. On condition based maintenance and its implementation in industrial settings. Sweden: Mälardalens högskola, 2007. 103 p.
3. NASA. Reliability centered maintenance guide for facilities and collateral equipment. Available at: <http://www.hq.nasa.gov/office/codej/codejx/Assets/Docs/NASARCMGuide.pdf>, accessed 01.02.2010.
4. Официальный сайт общества автомобильных и авиационных инженеров. Режим доступа: <http://www.sae.org> (дата обращения 02.12.2012).
5. Фёдоров В.П., Нагоркин М.Н. Прикладная теория надежности технических объектов: учебное пособие для студентов. Брянск: ИЗДАТЕЛЬСТВО БГТУ, 2006. 330 с.
6. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М.: ИД «Спектр», 1996. 276 с.
7. Барков А.В., Баркова Н.А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Семинар «Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок»: сборник трудов. СПб: Изд-во СПбГМТУ, 1999. С. 115-156.

8. Тэтгэр В.Ю., Тэтгэр А.Ю., Барайшук В.С. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2005. В 2 ч. Ч.2. №8(90) С. 236-239.
9. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь, 1996. 176 с.
10. Вибродиагностика подшипников качения. «МНЕНИЯ» ООО «Витэк». Режим доступа: www.vitec.ru/upload/iblock/e4d/diagnostika_podshipnikov.pdf (дата обращения 24.04.2015).
11. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004. 152 с.
12. Азовцев Ю.А., Баркова Н.А., Доронин В.А. Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях // Бумага, картон, целлюлоза. 1999. № 5. С.102-105.
13. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы: методические указания к лабораторным работам по диагностике электрических машин. СПб: Северо-Западный учебный центр, 2006. 145 с.
14. Техническое диагностирование механического оборудования: учебник. В 2 ч. Ч. 2. Практика технического диагностирования / ред. Сидоров В.А. Донецк: Новый мир, 2006. 125 с.
15. Сотников А.Л., Сидоров В.А., Лукичев А.В. Внедрение систем диагностирования // Машинознание і деталі машин: Матеріали 4-ої регіональної науково-методичної конференції. Донецк: ДонГТУ, 2002.
16. Смирнов В.И. Методы и средства функциональной диагностики и контроля технологических процессов на основе электромагнитных датчиков. Ульяновский государственный технический университет. Ульяновск: УлГТУ, 2001. 190 с.
17. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
18. Основы измерения вибрации - по материалам фирмы DLI / под ред. В.А. Смирнова. Режим доступа: http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml. (дата обращения 24.05.2015).
19. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. Введ. 1999-01-07. ИПК Издательство стандартов, 1998. 18 с.
20. Корепанов В.В., Кулеш М.А., Шардаков И.Н. Использование вейвлет-анализа для обработки экспериментальных вибродиагностических данных: метод. материал к спец. курсу «Современные проблемы механики». Пермь: Перм. ун-т., 2007. 64 с.

21. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145-1170.
22. Киселев Ю.В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники: электронное учебное пособие. Режим доступа:
http://www.ssau.ru/files/education/uch_posob/%D0%92%D0%B8%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0-%D0%9A%D0%B8%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B2%20%D0%AE%D0%92.pdf (дата обращения 24.05.2015).
23. Семенченко А.В. Применение искусственных нейронных сетей для создания экспертной системы диагностирования технологического оборудования // Сборник статей Энергосбережение, автоматизация в промышленности, интеллектуальные здания и АСУТП. Режим доступа: <http://d.17-71.com/2007/04/06/primenenie-iskusstvennyih-neyronnyih-setey-dlya-sozdaniya-ekspertnoy-sistemyi-diagnostirovaniya-tehnologicheskogo-oborudovaniya> (дата обращения 24.05.2015).
24. Методы контроля состояния подшипников качения. Режим доступа: <http://blog.vibroexpert.ru/?tag=amplitudnye-piki> (дата обращения 24.05.2015).
25. Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Овсянников М.В., Ташкинов А.Б., Арбузов А.А., Щенятский И.А. Способ определения остаточного ресурса технических объектов: пат. 2502974 Российская Федерация, 2012.
26. McDermott, Robin E., Mikulak, Raymond J., Beauregard Michael R. The Basics of FMEA. Mishawaka: Productivity Press, 1996. 80 p.