

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.42

Ширай  
Дмитрий Сергеевич

Алгоритмы и программные средства исследования  
периодических и шумоподобных компонент вибрационных сигналов

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание академической степени  
магистра технических наук

по специальности 1-40 80 05 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Научный руководитель  
Бранцевич П. Ю.  
к.т.н., доцент

Минск 2014

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация оборудования была тесно связана с оценкой его технического состояния на всех стадиях развития науки и техники. На первых этапах диагностика различных механизмов осуществлялась обслуживающим их персоналом только на основе своих ощущений, прежде всего слуховых и зрительных. Второй этап развития диагностики связан с появлением первых измерительных приборов, ряд характеристик которых стал превышать возможности слуха. Третий этап развития диагностики характеризуется активным развитием работ по созданию математического и программного обеспечения, заменяющего эксперта в задачах интерпретации результатов, получаемых системами мониторинга. Эти результаты могут быть использованы для принятия решения об остановке или задействовании оборудования, проведении профилактических работ или ремонта.

В различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, нефтепереработка, энергетика, используются устройства с вращательным движением. Для такого рода оборудования применяются системы, решающие перечисленные выше задачи на основе параметров вибрационного состояния. При оценке технического состояния диагностируемого оборудования с помощью специальных устройств собирается информация, содержащаяся в вибрационных сигналах. Данная информация обычно присутствует в амплитуде сигнала (абсолютной или относительной), в частоте или в спектральном составе, в фазе или в относительных временных зависимостях нескольких сигналов.

На практике встречающиеся вибрации обычно являются сложными механическими колебаниями со многими составляющими на разных частотах, поэтому только на основе измеренной величины вибрационного параметра или амплитудно-временной диаграммы нельзя определить ни число, ни частоты отдельных составляющих сложного колебательного процесса. Разложение механических колебаний в индивидуальные частотные составляющие называется частотным анализом, который является основным методом диагностики и позволяет обнаружить ряд выраженных частотных составляющих периодического характера, непосредственно связанных с основными движениями отдельных узлов и деталей исследуемой машины или механизма. Это в свою очередь дает возможность обнаружения отдельных источников механических колебаний и их особенностей, соответствующих определенным дефектам машины, а также развития этих дефектов.

Диссертационная работа посвящена исследованию алгоритмов и программных средств анализа периодических и шумоподобных компонент вибрационных сигналов с целью улучшения анализа вибрационных процессов, происходящих в оборудовании с вращательным движением.

# **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является исследование алгоритмов и программных средств анализа вибрационных сигналов, их периодических и шумоподобных компонент для решения задач вибрационного контроля с определением информативно-значимых параметров и обработки виброметрических данных для систем поддержки принятия решений по оценке технического состояния механизмов с вращательным движением на базе персональных компьютеров общего назначения и мобильных устройств таких, как смартфоны и планшеты.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методы и алгоритмы обработки виброметрических данных, определения информативно-значимых параметров.

2. Разработать архитектуру программного средства с функциями разложения исходного вибрационного сигнала на периодическую и шумоподобную составляющие, определения информативно-значимых параметров и размещающегося на веб-сервере с целью поддержки работы с мобильными устройствами.

3. Реализовать программное средство в виде веб-ориентированного приложения.

4. Выполнить экспериментальные исследования на реальных данных и привести сравнительный анализ разработанных методов выявления информативно-значимых параметров вибрационных сигналов на основе спектрального эксцесса и S-дискриминанта.

Объектом исследования являются системы цифровой обработки сигналов и данных.

Предметом исследования является математическое и программное обеспечение компьютерных систем для решения задач вибрационного контроля, методы и алгоритмы анализа вибрационных данных для поддержки принятия решений.

## **Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики**

Работа выполнялась в соответствии с научно-техническим заданием и планом работ кафедры «Программное обеспечение информационных технологий» по теме «Алгоритмы и программные средства исследования периодических и шумоподобных компонент вибрационных сигналов» (ГБ № 11-2004, № ГР 20111065, научный руководитель НИР – П.Ю. Бранцевич).

### **Личный вклад соискателя**

Результаты, приведенные в диссертации, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя П. Ю. Бранцевича заключается в формулировке целей и задач исследования, предоставлении реальных виброметрических данных для проведения исследований.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов (Брест, Беларусь, 2013); 50-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Минск, Беларусь, 2014).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 2 печатных работы в сборниках трудов и материалов конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. В первой главе представлен анализ предметной области, выявлены основные существующие проблемы в рамках тематики исследования, показаны направления их решения. Во второй главе предложены методы выявления информативно-значимых признаков на основе статистических величин, спектрального эксцесса и S-дискриминанта. Третья глава посвящена разработке архитектуры и алгоритмов для программного средства исследования вибрационного сигнала и его периодических и шумоподобных компонент. В четвертой главе предложена практическая реализация ПС, представлены результаты экспериментальных исследований методов выявления информативно-значимых признаков и их практического применения.

Общий объем работы составляет 100 страниц, из которых основного текста – 61 страница, 20 рисунков на 18 страницах, список использованных источников из 42 наименований на 3 страницах, список публикаций соискателя из 2 наименований на 1 странице и 3 приложения на 17 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

Во **введении** определена область и указаны основные направления исследования, показана актуальность темы диссертационной работы, дана краткая

характеристика исследуемых вопросов, обозначена практическая ценность работы.

В **первой главе** проведен анализ используемых методов и программных средств для обработки виброметрических данных. Такими методами являются спектральный анализ, полосовой спектральный анализ, цифровая фильтрация, интегрирование и двойное интегрирование, удаление низкочастотных дрейфов, выделение огибающих, вычисление моментных характеристик, построение гистограмм распределения, вейвлет-анализ. В процессе работы оборудования могут возникать явления изменения параметров вибрации. В этих случаях средства диагностики позволяют зафиксировать подобные изменения с помощью вибродатчиков для дальнейшей обработки, а программное средство – провести исследования. Анализ вибрационных сигналов является одним из наиболее широко используемых методов технической диагностики, имеющий ряд преимуществ. На данный момент существует множество алгоритмов исследования вибросигналов, однако по-прежнему является актуальной разработка новых методов анализа вибраций и принятия диагностических решений, поскольку за последние десятилетия сложность оборудования возросла, были созданы компактные высокопроизводительные электронные устройства, которые позволяют обрабатывать большие объемы информации за короткий промежуток времени. Также были разработаны новые методы обработки сигналов, в частности, теория вейвлет-анализа.

Во **второй главе** предложены методы формирования диагностических признаков и определения информативно значимых параметров вибрационных сигналов на основе статистических величин, таких как пик-фактор, размах колебаний, среднее квадратическое значение и спектральный эксцесс. Также приведено описание S-дискриминанта.

Спектральный эксцесс является статистической величиной, применяемой к временной области, которая позволяет определить импульсную характеристику сигнала. Он является безразмерной величиной и определяется как четвертый статистический момент. Он сравнивает распределение данных, к примеру, значения ускорения с распределением Гаусса:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 - 3, \quad (1)$$

где  $K$  – величина эксцесса,  
 $\sigma$  – среднеквадратическое значение,  
 $\mu$  – математическое ожидание,  
 $N$  – количество значений,  
 $x_i$  – амплитуда колебаний.

Достоинствами использования эксцесса для анализа являются следующие:

– высокая чувствительность эксцесса к сотрясениям и ударам. Это особенно подходит для подшипников с низкой скоростью вращения, когда спосо-

бы анализа, основанные на частоте, ограничены. Эксцесс также широко используется для определения непериодических сотрясений;

– на практике эксцесс часто вычисляется после фильтрации. Он может достигать значений, больших 100, особенно когда выбранный диапазон частот совпадает со структурой резонанса. Также он часто связан с анализом методом огибающей для определения области модуляции.

Недостатки использования эксцесса для анализа:

– как и для пик-фактора существует один главный недостаток: эксцесс уменьшается, когда дефекты становятся значительными;

– он может быть ошибочным. К примеру, если рассмотреть случайный сигнал, под воздействием сильного импульса значение эксцесса начинает резко возрастать. После окончания воздействия и в момент его окончания дальнейшие импульсы отсутствуют, в то же время амплитуда сигнала продолжает возрастать до окончания измерений.

S-дискриминант – безразмерный индекс превышения сигналом порога клиппирования  $P$  по дисперсии, или же, другими словами, по энергии выбросов, либо по амплитуде, либо по мощности.

S-дискриминант по дисперсии определяется по формуле:

$$I_d = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i^t - P]^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [x_j^n - P]^2} * \frac{K^t}{K^n}, \quad (2)$$

где  $x_i^t$  и  $x_j^n$  – отсчеты дискретных значений амплитуд текущего и опорного сигналов,

$K^t$  и  $K^n$  – количество выбросов, превышающих порог клиппирования  $P$ , для текущего и опорного сигналов,

$P$  – порог клиппирования амплитуд сигналов, который определяется следующим соотношением:

$$P = \lambda \sigma_n \quad (3)$$

где  $\lambda = 0,5..3$  – коэффициент пропорциональности, определяющий чувствительность дискриминантов к отклонениям технического состояния от нормы,

$\sigma_n$  – стандартное отклонение (СКЗ) сигнала, соответствующее эталонному состоянию сигнала.

Близость значения S-дискриминанта к единице характеризует отсутствие отклонений в сигнале, в то время как нарастание значений со временем говорит о развитии отклонения в текущем сигнале в сравнении с опорным, что может говорить о наличии эксплуатационного повреждения оборудования.

**Третья глава** посвящена проектированию программного средства, размещаемого на веб-сервере, для анализа периодических и шумоподобных компонент вибрационных сигналов, определения информативно-значимых параметров для проведения исследования.

Предложена архитектура веб-ориентированного приложения. Программное средство построено по модульному принципу с использованием шаблона проектирования MVC(Model-View-Controller), с помощью которого модель данных приложения, пользовательский интерфейс и взаимодействие с пользователем разделены на три отдельных компонента так, что модификация одного из компонентов оказывает минимальное воздействие на остальные. Разработаны общий алгоритм работы и алгоритмы разложения сигнала на периодическую и шумоподобную компоненты.

В четвертой главе рассмотрена программная реализация, представлены результаты экспериментального исследования методов анализа вибрационных сигналов. Основные функциональные действия реализуются отдельными классами. Диаграмма классов программного средства приведена на рисунке 1.

Экспериментальные исследования с помощью разработанного программного средства выполнены на реальных данных, предоставленных лабораторией систем вибродиагностики БГУИР. Проведен анализ полученных результатов, даны рекомендации и сделаны выводы.

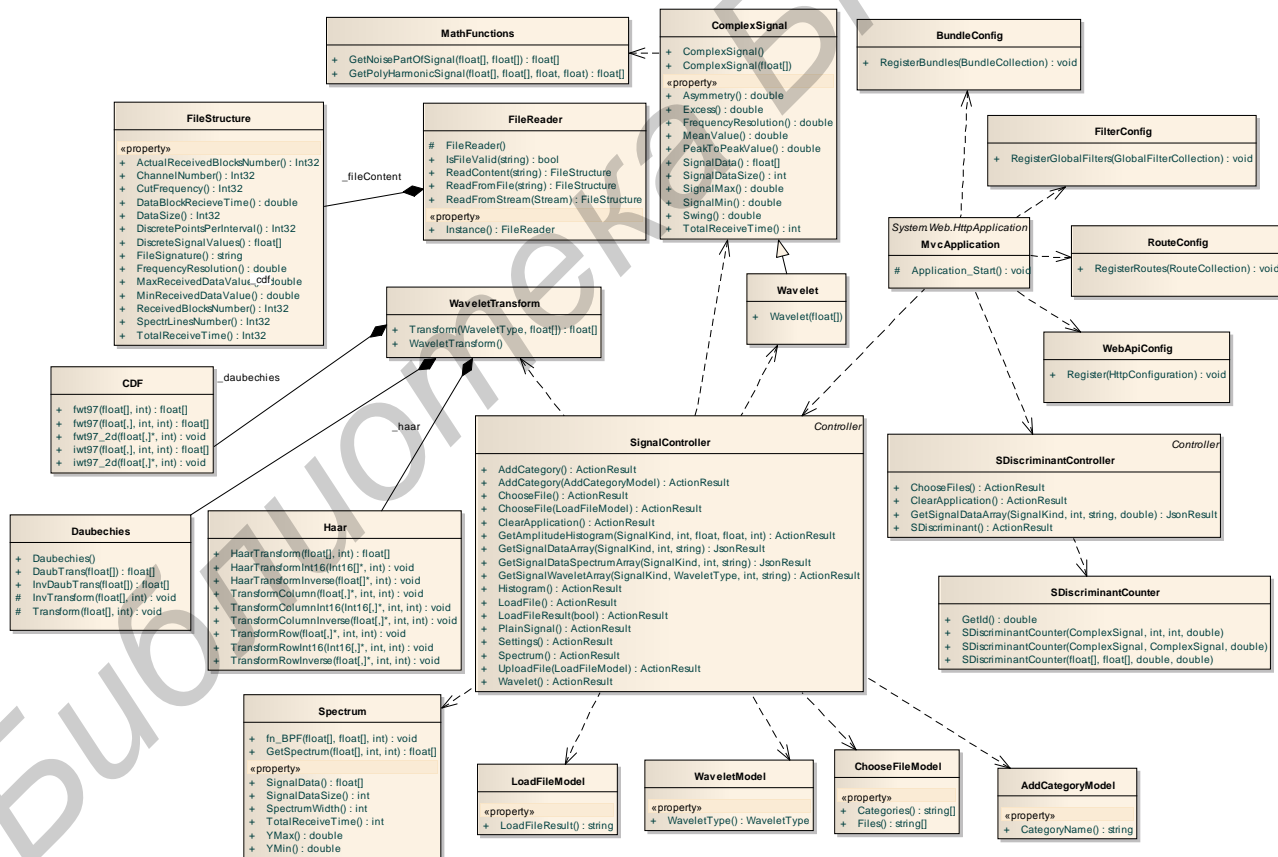


Рисунок 1 – Диаграмма классов программного средства

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Используются современные исследования в области вибрационной диагностики.

2. Разработан алгоритм разложения сигнала на периодическую и шумоподобную составляющую для последующей обработки в программном средстве для исследования методов и алгоритмов анализа вибрационных сигналов.

3. Разработаны алгоритмы вычисления спектрального эксцесса и S-дискриминанта при скольжении временным окном.

4. Исследованы эффективность формул S-дискриминанта по дисперсии и амплитуде, проведен анализ зависимости чувствительности данного параметра от показателя степени. Даны рекомендации по выбору его оптимального значения, а также величины порога клипирования.

5. Проведено исследование возможности использования спектрального эксцесса при анализе вибрационного сигнала и его периодических и шумоподобных компонент.

6. Представлен сравнительный анализ спектрального эксцесса и S-дискриминанта. Показаны ситуации, когда один из параметров оказывается не пригодным для использования. Рекомендовано использовать параметры совместно для повышения результативности анализа.

7. Представлена архитектура программного средства, обеспечивающая выполнение основных функций обработки больших объемов виброметрических данных: преобразование бинарного потока данных, получаемого при работе датчиков виброконтроля, во внутренний формат для дальнейшей обработки; сама обработка большого объема данных, например, выделение периодической и шумоподобной составляющих, определение основных характеристик сигнала; представление на экране в графической форме результатов обработки; дополнительные функции по настройке параметров отображения результатов.

8. При разработке программного средства применены новейшие и прогрессивные подходы в проектировании, современные технологии разработки программного обеспечения и визуализации графического материала, что в результате позволяет:

- удаленно следить за текущим состоянием промышленного оборудования, что важно, так как при возникновении аварийной ситуации специалисту не нужно находиться непосредственно вблизи технологического оборудования, которое может представлять опасность для жизни и здоровья сотрудника;

- контролировать состояние механизмов и заранее производить профилактические и ремонтные работы;

- задействовать большее число специалистов, что позволит улучшить диагностику;

- производить удаленную консультацию у более квалифицированных специалистов при особых ситуациях во время эксплуатации нового оборудования;

- обеспечить более комфортные условия работы специалистов, занимающихся исследованием вибросигналов;



– производить обучение специалистов с использованием реальных данных, не прибегая к специальному моделированию сигналов.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Полученные результаты формируют теоретическую и практическую базу для разработки программного обеспечения компьютерных систем, включающих модули вибрационного контроля, персональные компьютеры, ноутбуки, смартфоны, планшеты или иные устройства, обладающие доступом в сеть интернет и возможностью отображения веб-страниц.

2. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для модернизации и дальнейшего развития существующих систем.

3. Разработанные методы и алгоритмы обработки данных могут применяться в отделе технического сервиса для проведения планово-профилактических работ, технического обслуживания и ремонта.

4. Последующая интеграция с системой поддержки принятия решения позволит эффективнее выполнять функции планирования работ по техническому обслуживанию оборудования с вращательным движением.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. Ширай, Д.С. Анализ периодической и шумоподобной составляющих вибрационных сигналов / Д.С. Ширай // Современные проблемы математики и вычислительной техники: сборник материалов VIII Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов, Брест, 21-23 ноября 2013 г. / Брестский государственный технический университет; под ред. В.С. Рубанова [и др.]. - Брест: изд-во БрГТУ, 2013. – с.88-89.

2. Ширай, Д. С. Использование спектрального эксцесса при анализе периодической и шумоподобной составляющих вибрационного сигнала/ Д.С. Ширай // Компьютерные системы и сети: материалы 50-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 24-28 марта 2014 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники: под редакцией В.А. Прыткова [и др.] - Минск: изд-во БГУИР, 2014 - с.38-39.