

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Контроль наличия повреждений авиационных  
конструкций из композиционных материалов с  
помощью вейвлет-анализа**

Электронные методические указания  
к лабораторным работам

САМАРА  
2010

УДК 629.7.658.004

Составитель: **Тиц Сергей Николаевич, Киселев Юрий Витальевич.**

В методических указаниях приводятся сведения о методах анализа сигналов вибрации, используемых при определении технического состояния авиационной техники (АТ).

Представленная лабораторная работа, посвящена изучению физических и математических основ вейвлет-преобразования.

Рассмотрена методика определения параметров вибрации, таких как собственная частота колебаний и коэффициент демпфирования, с помощью вейвлет-анализа свободных колебаний возбуждаемых механическим ударом в контрольных точках изделия.

Приведена методика контроля повреждений спойлера самолёта Як-42 с использованием вейвлет-анализа сигналов вибрации.

Указания разработаны на кафедре ЭАТ для магистерской программы «Контроль, динамика и испытания систем авиационной техники» по направлению 162300.68 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей», в качестве электронного ресурса.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2010

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	4
<b>Теоретическая часть</b> .....	5
<i>Методы анализа вибрации</i> .....	5
<i>Аппаратные и программные средства</i> .....	13
<i>Методика определения повреждений сотовых конструкций</i> .....	17
<b>Практическая часть</b> .....	22
<i>Методика контроля повреждений спойлера самолёта Як-42</i> .....	22
<b>Контрольные вопросы</b> .....	26
<b>Содержание отчета</b> .....	27
<b>Литература</b> .....	28

## **Введение**

Подавляющее большинство дефектов СК связано со сложностью обеспечения и контроля в процессе изготовления технологических параметров (нормативы чистоты поверхностей и помещений, качество и количество клея, температурные режимы и т.д.), к которым предъявляются очень жесткие требования в виду их значительного влияния на качество изделия.

Несмотря на наличие большого числа современных методов, таких как ультразвуковой, магнитный, радиационный, вихрековый, тепловой и др., и средств, способных выявить основные дефекты сотовых конструкций, на эксплуатирующихся предприятиях сотовые конструкции контролируются преимущественно при помощи метода свободных колебаний (простукивание изделия с регистрацией изменений характера звука на слух). Это связано с тем, что новейшие средства неразрушающего контроля (НК) требуют как значительных финансовых затрат, связанных с их приобретением, так и существенно увеличивают трудоёмкость выполняемых работ. В связи с этим современные средства используются лишь для уточнения размеров дефектов при ремонте. В результате из-за несовершенства методов и методик контроля технического состояния СК происходит увеличение простоев летательных аппаратов (ЛА) на техническом обслуживании, что значительно снижает эффективность их использования.

Исходя из выше сказанного, наиболее актуальным становится вопрос о необходимости применения при оперативном техническом обслуживании более эффективного метода диагностирования элементов планера, выполненных в виде СК. При оперативной диагностике важно иметь возможность быстро оценить либо наличие, либо отсутствие дефекта максимально допустимой величины, а также дать прогноз на период до следующей проверки. При этом необходимо принять решение о дальнейшей эксплуатации агрегата или же о его замене и отправке в ремонт. Точные размеры и расположение дефекта определяются при ремонте.

## *Цель работы.*

Освоение изучению физических и математических основ вейвлет-преобразования.; приобретение практических навыков анализа свободных колебаний возбуждаемых механическим ударом в контрольных точках изделий выполненных с применением сотовых конструкций.

## **1. Теоретическая часть**

### *Методы анализа вибрации*

Целью анализа вибрации является получение необходимой информации о характеристиках и параметрах вибрации и выдача на основе этой информации заключения о техническом состоянии изделия авиационной техники.

Основные виды анализа вибрации включают анализ вибрации во временной области и частотной области (рисунок 1).

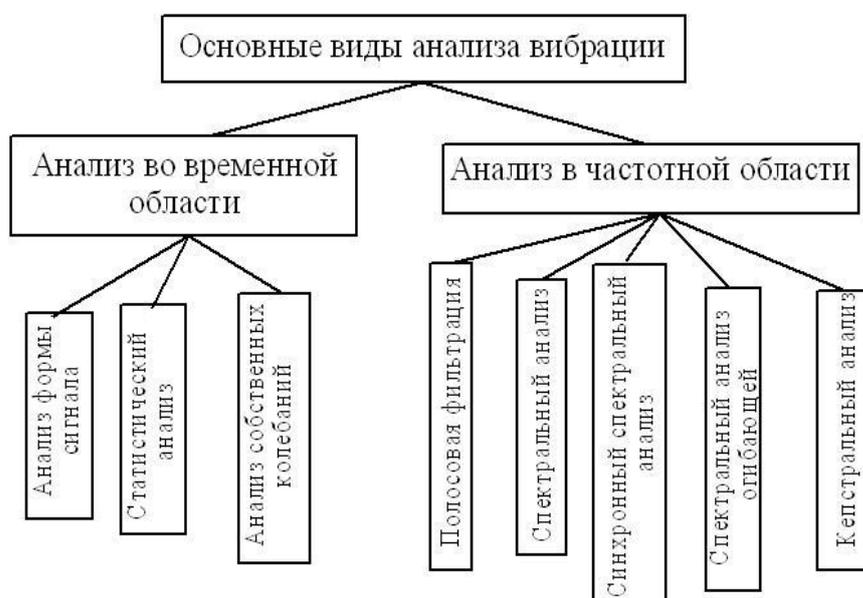


Рисунок 1 - Основные виды анализа вибрации

Анализ во временной области чаще всего реализуется в виде анализа формы сигнала, анализа плотности распределения сигнала или анализа затухающих колебаний системы.

Реальный вибрационный сигнал имеет весьма сложную форму, и анализировать его непосредственно достаточно сложно (рисунок 2). Однако, если из широкополосного вибрационного сигнала с помощью полосового частотного фильтра выделить информационный диапазон частот, то форма сигнала становится пригодной для обнаружения дефектного состояния. На рисунке 3, взятого из [1], приведен пример изменения временного сигнала вибрации, после выделения информационного диапазона частот, для исправного и дефектного подшипника.

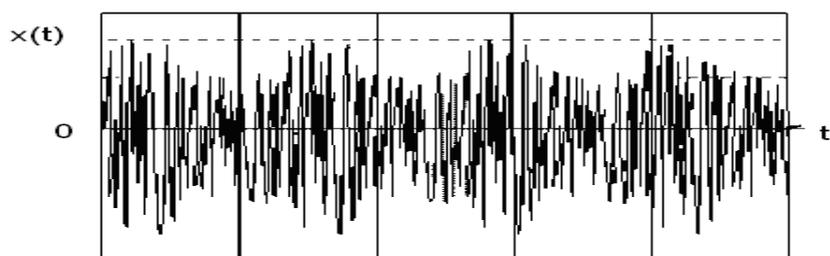


Рисунок 2 - Запись временного сигнала высокочастотной вибрации

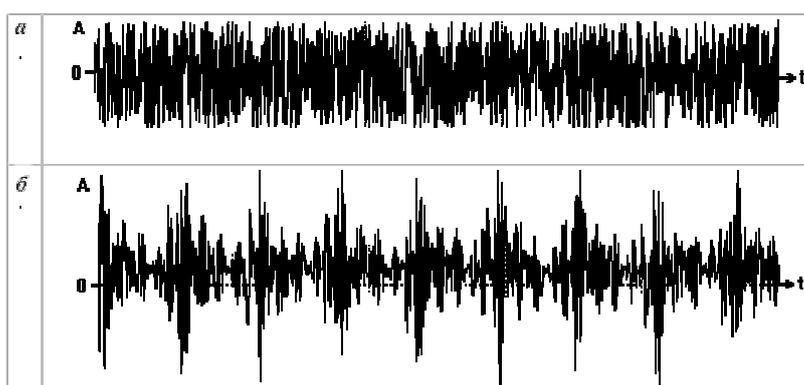


Рисунок 3 - Временные сигналы в информационном частотном диапазоне

а) исправный подшипник, б) подшипник с раковиной на поверхности качения

Считается, что информативность статистического анализа (анализа плотностей распределения) не велика. Одного как следует из предыдущего материала (рисунок 2), подобный анализ позволяет обнаружить в вибрационном сигнале доминирующих компонент (гармонических или ударных составляющих).

Если рассматривать возможности анализа собственных (свободных) затухающих колебаний, то он позволяет получить диагностическую информацию, которая влияет на частоту собственных колебаний системы и на скорость затухания этих колебаний, т.е. на демпфирующие свойства системы. Или другими словами, если неисправность повлияет на динамические (жесткостные, демпфирующие массовые) характеристики системы [2].

Методы анализа вибрации в частотной области применяются более широко, чем во временной.

Полосовая фильтрация, как правило, используется как предварительный этап анализа вибросигналов, выделения информативных частотных диапазонов. Отфильтрованный сигнал подвергается дальнейшей обработки для получения необходимых характеристик (формы временного сигнала, спектра огибающей и т.п.)

Спектральный анализ наиболее часто применяется для исследования структуры вибрации, как наиболее адекватный способ обнаружения составляющих вибрации. На рисунке 4 изображен спектр вибрации трех роторного двигателя.

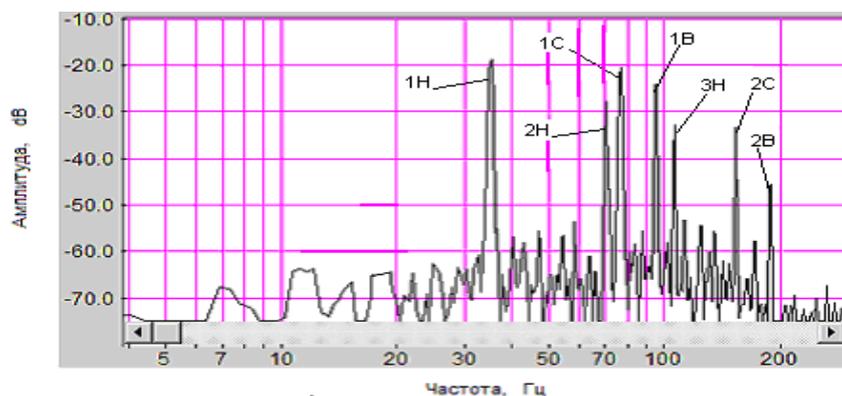


Рисунок 4 - Спектр роторной вибрации ГТД

Как видно из спектрограммы ротор низкого давления возбуждает составляющие с частотами  $f_{1H} = 35\text{Гц}$ ,  $f_{2H} = 70\text{Гц}$ ,  $f_{3H} = 105\text{Гц}$ . На спектре эти составляющие обозначены соответственно 1Н, 2Н, 3Н.

Ротор среднего давления возбуждает составляющие с частотами  $f_{1C} = 76\text{Гц}$ ,  $f_{2C} = 152\text{Гц}$ . На спектре эти составляющие обозначены 1С, 2С.

Ротор высокого давления возбуждает составляющие с частотами  $f_{1B} = 94\text{Гц}$ ,  $f_{2B} = 188\text{Гц}$ . На спектре эти составляющие обозначены 1В, 2В.

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.

В работе [3] показано, что многие дефекты роторных машин приводят изменению мощность вибрационного сигнала в определенных частотных полосах. На этом основании предложено применять спектральный анализ огибающей. Этот метод заключается в следующем.

С помощью полосового фильтра выделяют вибрационный сигнал в информативной частотной полосе. Далее с помощью детектора выделяют огибающую этого сигнала и проводят ее спектральный анализ. На основании проведенных исследований авторы работы [1] показали, что в спектре огибающей появляются дискретные составляющие, частоты которых соответствуют характерной частот дефекта. Для наглядности приведем пример, представленный в работе [1] (рисунок 5).

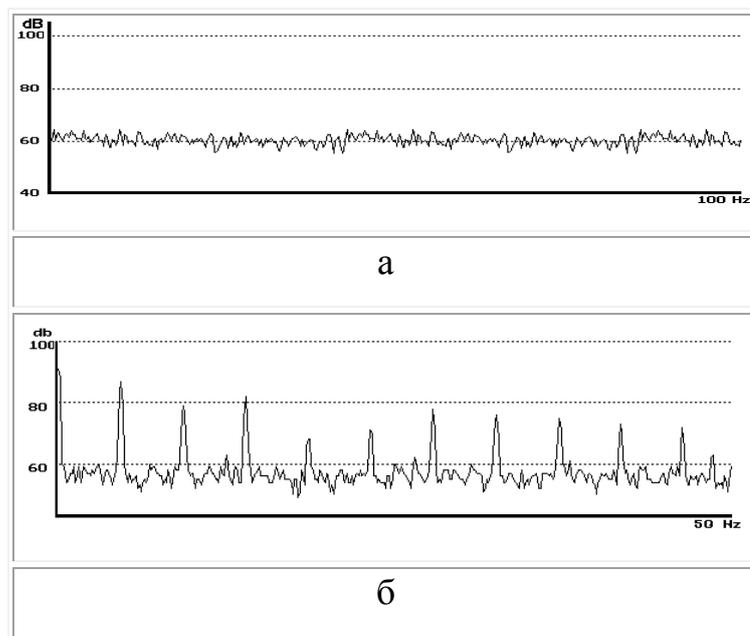


Рисунок 5 - Спектры огибающих сигналов высокочастотной вибрации, приведенных на рисунке 3.

а) подшипник без дефектов б) подшипник с раковинной на поверхности качения

Специфический вид анализа – кепстральный анализ это есть преобразование Фурье от спектра вибросигнала. Таким образом, кепстральный анализ следует применять тогда, когда необходимо выявить периодичность в спектре вибрации.

В последнее время для анализа нестационарных вибрационных процессов применяется так называемое вейвлет-преобразование [4]. Вейвлет-преобразование - это новый способ обработки и исследования сигналов, теория которого разработана совсем недавно, с появлением быстродействующих компьютеров, так как требует большого объема вычислений. Вейвлет можно считать трехмерным спектром, где по оси X - время, по оси Y - частота, а по оси Z - амплитуда гармоники с данной частотой в данный момент времени. Обычно на двухмерной плоскости (на экране, на бумаге) ось Z отображают в виде градаций черного цвета. При этом черный цвет - максимальная амплитуда, а белый - минимальная. Тогда самые интересные места сразу видно по черным пятнам.

Математически результатом вейвлет-преобразования сигнала  $f(t)$

является двумерная функция, зависящая от конкретного значения  $b$ , который характеризует сдвиг по времени, и масштаба  $a$ , который несет информацию о частоте:

$$Wf(a, b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (a, b \in \mathbf{R}, a > 0) \quad (1)$$

Ключевым моментом является выбор функции  $\psi(t)$ , которая называется вейвлетом. В принципе вейвлетом может быть любая функция, быстро спадающая и стремящаяся к нулю с увеличением времени, а ее среднее значение равно нулю. В настоящее время определен набор базовых вейвлетов, выбор которых зависит от конкретного вида обрабатываемого сигнала.

Поясним на примере принцип вейвлет-преобразования. На рисунке ба изображен сигнал во временной области. Видно, что он имеет разную частоту в различные моменты времени. На рисунке бб изображены вейвлеты с разной частотой и сдвигом по времени, с помощью которых производится обработка временного сигнала, в соответствии с выражением (1).

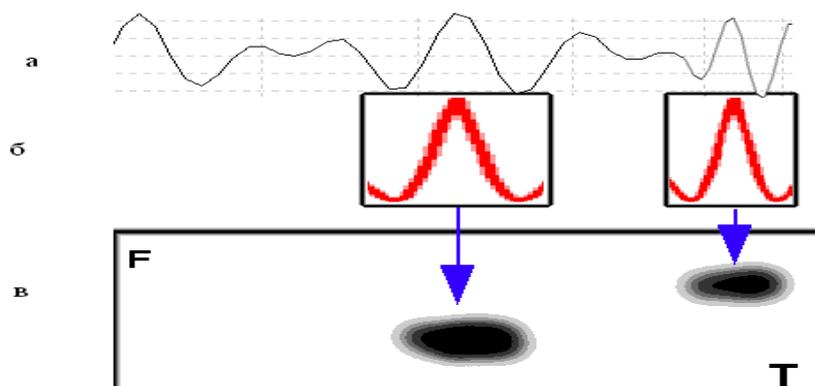


Рисунок 6 – Пояснение принципа вейвлет-преобразования

а- временной сигнал, б – вейвлеты с разной частотой и сдвигом по времени,  
в – модуль вейвлет-преобразования

На рисунке бв изображен модуль вейвлета, на котором четко видно (темные пятна) появление в сигнале максимумов с определенной частотой в соответствующие моменты времени.

Более наглядно возможности вейвлет-преобразование проиллюстрируем на следующем примере. На рисунок 7а изображена временная реализация сигнала, состоит из двух синусоид разной частоты. На графике вейвлет-преобразования (рисунок 7б) мы видим два ярко выраженных хребта на масштабных коэффициентах частот  $a_1=0,10$  и  $a_2=0,14$ . Но такой же результат дает и спектр, так что этот пример интересен только для показа связи вейвлет-преобразования со спектром.

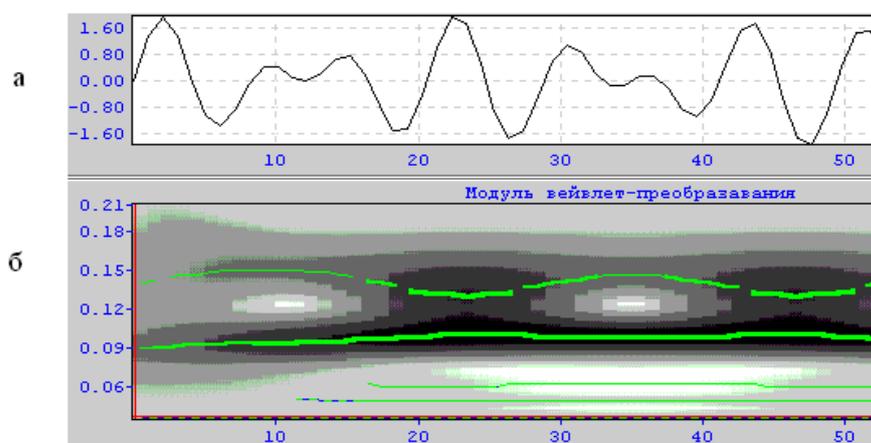
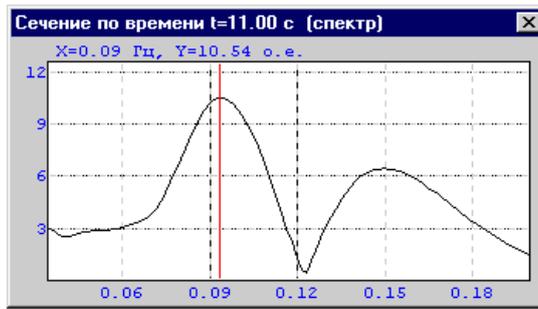


Рисунок 7 – Временное представление двухкомпонентного сигнала и его вейвлет-преобразование

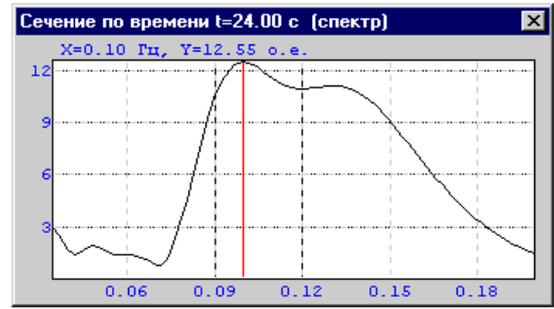
а – временное представление двухкомпонентного сигнала,

б – модуль вейвлет-преобразование двухкомпонентного сигнала

Если взять сечение модуля вейвлет-преобразование по времени, например, в момент времени 11 сек. (рисунок 8а), то увидим спектр сигнала в данный момент времени, где присутствуют ярко выраженными частотными коэффициентами 0,10 и 0,15. В другом сечении, для момента времени 24 сек. (рисунок 8б), - эти составляющих несколько сместились – 0,11 и 0,13.



а

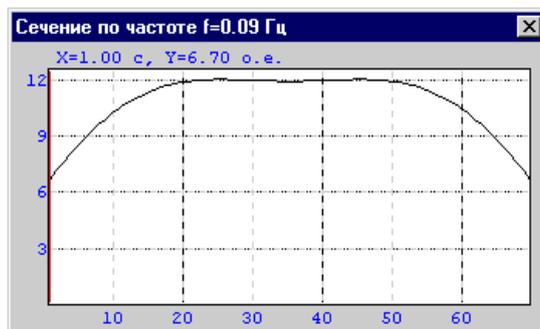


б

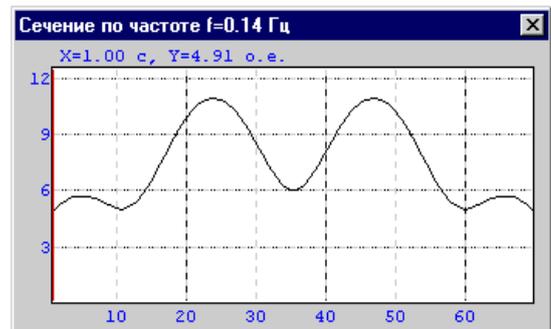
Рисунок 8 – Сечения модуля вейвлет-преобразование для различных моментов времени

а - сечение модуля вейвлет-преобразование для момента времени 11,  
 б - сечение модуля вейвлет-преобразование для момента времени 24

Если же производить сечение модуля вейвлет-преобразования не по времени, а по частоте, то можно оценить, как изменяется составляющая с выбранной частотой в зависимости от времени.



а



б

Рисунок 9 – Сечения модуля вейвлет-преобразование для различных частот

а- сечение модуля вейвлет-преобразование для частотного коэффициента 0,09,  
 б- сечение модуля вейвлет-преобразование для частотного коэффициента 0,14

Сечение по частоте 0,09 (рисунок 9а) показывает, что составляющая сигнала с этой частотой она сначала увеличивалась, затем оставалась

постоянной и потом уменьшалась. В тоже время составляющая с частотой 0,14 со временем изменялась значительно.

Приведенный пример показывает возможности вейвлет-преобразования для исследования нестационарных сигналов, которые затухают во времени или (и) меняют свою частоту. Такими сигналами могут быть вибрационные процессы, возбуждаемые ударными силами, в том числе и затухающие свободные колебания механических конструкций, когда надо оценить изменение частоты вибрации, и изменение демпфирования в системе. Вейвлет-преобразование свободных колебаний конструкции позволит автоматически выявить собственные частоты конструкции. Анализ сечений модуля вейвлет-преобразования на этих частотах позволит определить степень уменьшения амплитуды свободных колебаний в зависимости от времени, то есть оценит демпфирование в системе на этих частотах.

Все перечисленные виды анализа в настоящее время реализуются с помощью специализированных цифровых приборов или с помощью универсальных систем, созданных на базе ПВЭМ с использованием специализированного программного обеспечения.

#### *Аппаратные и программные средства.*

В качестве программно-аппаратного комплекса для проведения экспериментальной отработки методики был выбран многоканальный синхронный регистратор и анализатор вибросигналов «Атлант-8» с вибродатчиками ВК-310А [55].

Многоканальный синхронный регистратор и спектроанализатор АТЛАНТ, далее по тексту просто «регистратор, прибор АТЛАНТ», предназначен для:

- Синхронной регистрации, спектральной обработки и графического анализа сигналов с различных датчиков, имеющих выход по напряжению (по току). Количество синхронно регистрируемых сигналов может изменяться пользователем, при работе с прибором, в произвольной конфигурации от

одного до 8. В специальной поставке возможно использование 16 каналов, в зависимости от конкретной поставки прибора.

- Решения практических проблем оперативной диагностики состояния оборудования «на месте измерения и регистрации» при помощи встроенных в компьютер экспертных систем, поиска дефектов различных механизмов и конструкций. Стандартно прибор поставляется с системами «Паллада+» спектральной диагностики вращающегося оборудования и «Ариадна» диагностики состояния подшипников качения по спектру огибающей. Для использования пользователем собственных диагностических наработок в составе ПО Атлант поставляется язык написания диагностических правил «Паллада».

- Создания и «ведения» баз данных по зарегистрированным сигналам, сосредоточенным в специальных директориях программы, соответствующих конкретным станциям (цехам) и агрегатам. При помощи этой базы данных можно контролировать техническое состояние оборудования, выявлять тенденции изменения.

- Прибор комплектуется отметчиком фазы при помощи экспертной системой «Диана» позволяет выполнять балансировку и успокоение роторов в собственных подшипниках. «Диана» реализует алгоритм балансировки и успокоения для агрегатов с 14 плоскостями коррекции и 42 точками контроля вибрации.

АТЛАНТ является универсальным прибором, обладает широкими возможностями и позволяет легко изменять параметры и свойства регистрации сигналов. При его помощи можно синхронно, т. е. одновременно, регистрировать, обрабатывать и просматривать на экране “временные” сигналы от многих датчиков.

Конструктивно многоканальный синхронный регистратор АТЛАНТ состоит из:

- Блока регистрации и синхронизации сигналов. Он представляет собой небольшой модуль в состав, которого входят входные нормирующие

усилители, перестраиваемые фильтры и плата быстродействующего синхронного АЦП.

- Блока обработки и хранения сигналов. Он представляет собой переносной компьютер типа “Notebook” стандартной конфигурации. Единственным дополнительным требованием к компьютеру является наличие специальных протоколов обмена информацией через принтерный порт компьютера.
- Вибродатчиков - пьезоакселерометров с комплектом соединительных проводов и магнитами быстрого крепления.
- Стандартно блок регистрации АТЛАНТ поставляется с распайкой входных разъемов для использования вибродатчиков ВК-310А производства фирмы «ВиКонт». При необходимости использования для регистрации вибродатчиков других фирм - производителей необходимо, при заключении договора на поставку прибора, оговаривать распайку входных разъемов.

Таблица 1 - Основные технические параметры регистратора АТЛАНТ-8.

Количество каналов регистрации аналоговых сигналов	8 ( до 16* )
Частота опроса каналов при регистрации сигналов, Гц	1 ÷ 20 000
Частотный диапазон поставляемых вибродатчиков, Гц	5 ÷ 5 000
Длительность временных выборок сигналов	0,01 сек ÷ 2 час
Объем памяти для хранения сигналов, МБ	1 000
Частотное разрешение получаемых спектров, линий	50 ÷ 12800
Разрешение цветного жидкокристаллического дисплея, точек	600 x 800
Время работы от внутренних источников питания, час	2,5 ÷ 4,0
Вес прибора в упаковке без датчиков, кг	7,0

Спектроанализатор АТЛАНТ, благодаря эффективному использованию свойств переносного компьютера, имеет гибкую конфигурацию, обладает большими вычислительными возможностями. Он позволяет пользователю:

\* Изменять конфигурацию прибора, основные параметры регистрации сигналов:

- ◇ тип и частотный диапазон применяемых датчиков;
- ◇ количество каналов регистрации и “раскладку” датчиков по каналам;
- ◇ частоту синхронного опроса датчиков;
- ◇ длительность непрерывной регистрации сигналов.

\* Зарегистрированную с датчиков информацию, для визуального контроля и экспресс - анализа, можно просматривать на экране компьютера, который программно разбивается на нужное количество отдельных окон просмотра и позволяет в широком диапазоне изменять параметры просмотра - масштабирование и “временное” разрешение.

\* Вся информация по контролируемым агрегатам, выполненным замерам и рассчитанным параметрам состояния хранится во внутренней базе данных прибора.

\* Исходные вибросигналы можно подвергать дополнительной обработке. Это позволяет:

- ◇ осуществлять переходы между виброускорением, виброскоростью и виброперемещением;
- ◇ контролировать изменения параметров при пуске и выбеге оборудования практически на любом интервале времени, определять критические резонансные частоты оборудования;
- ◇ учитывать влияния режимов работы оборудования, устранять тепловые расцентровки;
- ◇ преобразовывать сигналы из временной области в частотную, для чего применяются процедуры БПФ или частотной фильтрации (для “узкого” временного интервала);

◇ выполнять специальные преобразования, такие, как расчет взаимных спектров, кепстров, вейвлет-анализ и т. д.

\* Кроме вибросигналов прибор позволяет регистрировать любые другие электрические сигналы в диапазоне  $0 \div 5$  В.

Вычислительная мощность применяемого в синхронном регистраторе АТЛАНТ переносного компьютера достаточна для того, чтобы в нем могла работать практически любая современная диагностическая экспертная система.

Совместное использование многоканальной регистрации вибросигналов и многомерного представления сигналов на экране компьютера позволяет использовать Атлант в самых сложных случаях диагностики оборудования. Опыт применения прибора Атлант в сложных случаях сотрудниками фирмы «Вибро-Центр» показал, что с его помощью удается за несколько часов диагностировать очень сложные и комплексные дефекты, которые при помощи обычных одноканальных приборов диагностировать не удается вообще.

#### *Методика определения повреждений сотовых конструкций*

В настоящее время в конструкциях воздушных судов нашли широкое применение (около 30% по площади фюзеляжа и крыла) сотовые конструкции (СК). Анализ статистики отказов и неисправностей отечественных типов ВС показал, что с увеличением наработки наблюдается рост количества дефектов СК. Большинство этих дефектов (до 80% ) обусловлены разрушением клеевого соединения элементов сотовых конструкций (так называемым отслоением) и нарушения герметичности последних. В ряде случаев отслоение СК приводило к разрушению этих конструкций в полете. Поэтому стал вопрос о диагностировании отслоения СК в эксплуатации.

В работе [70] на основании исследований ряда авторов было установлено, что при появлении отслоений в сотовых конструкциях

коэффициент демпфирования будет увеличиваться, а собственная частота колебаний - снижаться. Поэтому в работе [71] было предложено для обнаружения отслоения СК использовать комплексный параметр в виде отношения величины коэффициента демпфирования  $\xi$  к собственной частоте системы  $\omega$ , который можно записать в виде

$$K = \frac{\xi}{\omega}.$$

Критерием оценки состояния СК будет являться превышение данным параметром максимально допустимой величины:

$$K \leq [K],$$

где  $[K]$  - максимально допустимое значение комплексного параметра.

В разделе 2 было показано, что оценку величины демпфирования и собственной частоты системы можно произвести путем анализа свободных колебаний системы с помощью вейвлет-преобразования. В работе [5] был разработан метод диагностирования отслоения СК, основанный на этом подходе.

Алгоритм диагностирования следующий (рисунок 10).

Производится ударное возбуждение свободных колебаний конструкции объекта контроля. Свободные колебания регистрируются виброизмерительной аппаратурой. Проводится спектральный анализ свободных колебаний, с целью предварительного определения собственных частот конструкции. Далее делается вейвлет-преобразования, и определяют значения масштабных коэффициентов собственных частот  $a_j$ .

Строятся сечения модуля вейвлет-преобразования, соответствующие этим коэффициентам собственных частот, то есть строятся графики зависимости модуля вейвлет-преобразования от времени на этих частотах. Графики строятся в логарифмическом масштабе, в виде зависимости

$$\ln|Wf(a,b)| = m_i b.$$

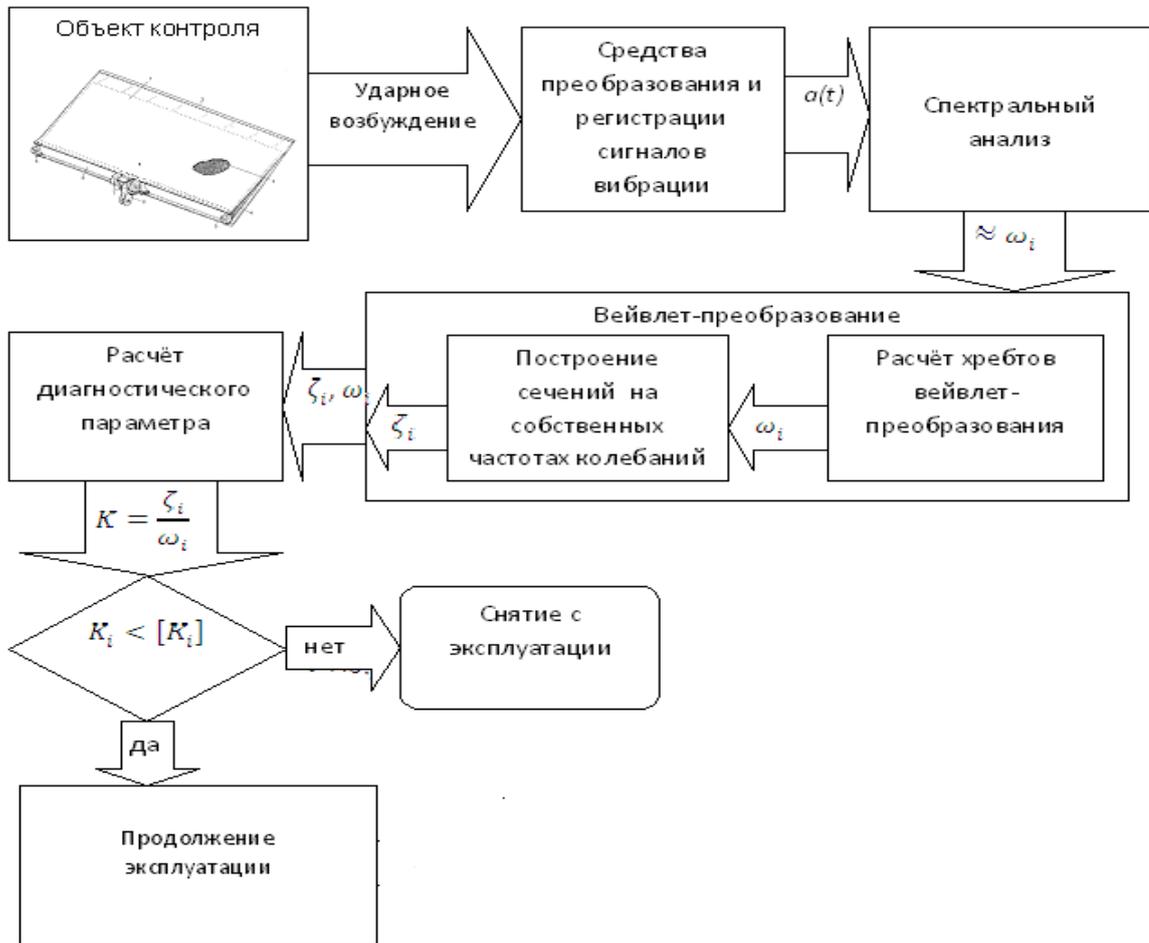


Рисунок 10 – Алгоритм проведения диагностирования

По полученным зависимостям определяют угловой коэффициент наклона графиков  $m_i$ . Угловой коэффициент  $m_i$ , масштабный коэффициент  $a_i$ , коэффициент демпфирования  $\xi_i$ , собственная частота  $\omega_i$  связаны следующими соотношениями [71]

$$a_i \sqrt{1 - \xi_i} \omega_i = \omega_0 \quad \xi_i \omega_i = -m_i \quad (2)$$

где  $\omega_0 = 5$  для материнского вейвлета «Мексиканская шляпа».

Пользуясь этими соотношениями определяют коэффициент демпфирования  $\xi_i$  и собственную частоту  $\omega_i$  и, далее, комплексный

параметр  $K$ , по величине которого судят о наличии и степени развития отслоения.

Проиллюстрируем применение этого метода на примере.

На рисунке 11 изображены свободные колебания системы с двумя степенями свободы, имеющей собственные частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$

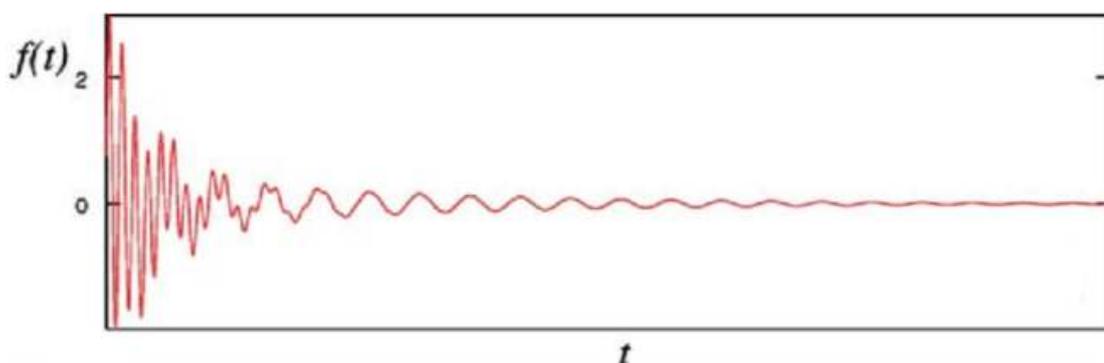


Рисунок 11 - Свободные колебания системы с двумя степенями свободы

После вычисления вейвлет-преобразования этих колебаний мы получаем модуль вейвлета, трехмерный график которого изображен на рисунке 12.

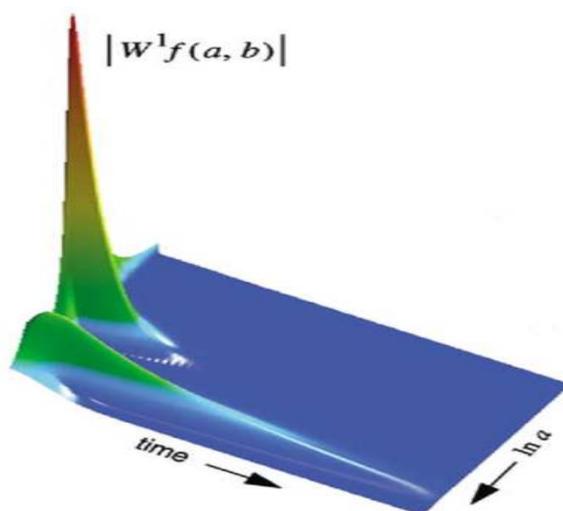


Рисунок 12 - Модуль вейвлет-преобразования колебаний системы с двумя степенями свободы

На рисунке видно, что вейвлет-преобразование четко выделяет две собственные частоты колебаний. Для определения масштабных

коэффициентов частоты  $a_1$  и  $a_2$  производим сечение модуля по масштабному коэффициенту частоты (по  $\ln a$ ). На рисунке 13 представлено график этого сечения. По этому графику определяются значения  $a_1$  и  $a_2$ .

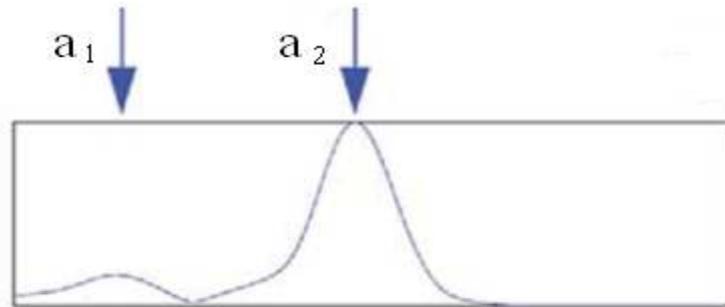


Рисунок 13 - График сечения модуля вейвлета по  $\ln a$

Для полученных значений  $a_1$  и  $a_2$  строят сечения модуля вейвлет-преобразования по времени « $b$ » (рисунок 14).

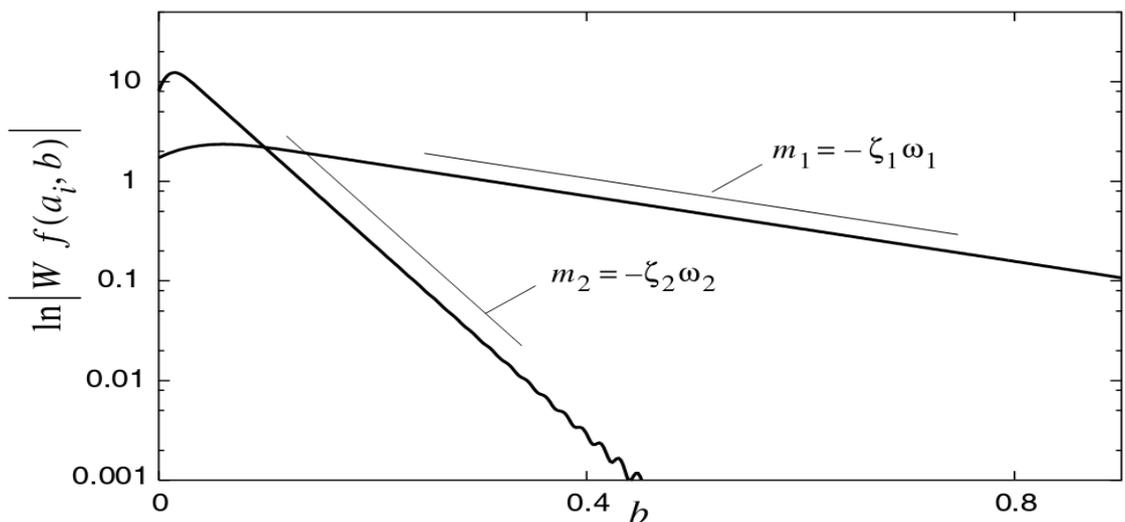


Рисунок 14 - Графики сечений модуля вейвлет-преобразования по времени для значений  $a_1$  и  $a_2$ .

На основании полученных зависимостей находят значения угловых коэффициентов наклона графиков соответственно  $-m_1 = \zeta_1 \omega_1$  и  $-m_2 = \zeta_2 \omega_2$ . Используя выражения (2) определяют значения собственных частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и

коэффициентов демпфирования  $\xi_1, \xi_2$ . По этим данным рассчитывают значения комплексных параметров  $K_1 = \frac{\xi_1}{\omega_1}, K_2 = \frac{\xi_2}{\omega_2}$  и сравнивают их с предельными значениями.

## 2. Практическая часть

### *Методика контроля повреждений спойлера самолёта Як-42.*

Алгоритм проведения диагностирования представлен на рисунке 16. Для проведения диагностирования на поверхности спойлера, как показано на рисунке 15, с помощью клея закрепляется вибродатчик ВК-310А. Блок регистрации и синхронизации сигналов прибора «Атлант» переводится в режим записи сигнала виброускорения. Запуск регистрации начинается при превышении сигнала с датчика вибрации общего акустического шума на 150%. В процессе регистрации записывается сигнал виброускорения в диапазоне частот от 0Гц до 780Гц, длительность выборки 4095,5 мс, число отсчётов 8192.

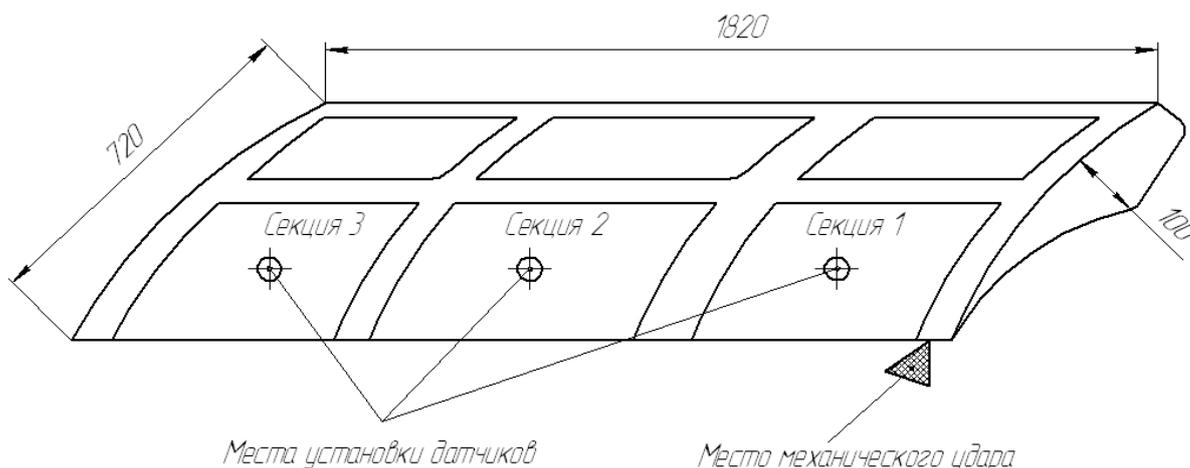


Рисунок 15 – Места установки датчиков вибрации

Затем контролируемый спойлер отклоняется в выпущенное положение штатной системой управления спойлерами самолёта Як-42. При постановке спойлера на упор выпущенного положения создаётся удар достаточный для

возбуждения свободных колебаний, необходимых для дальнейшего анализа. Результаты замера сохраняются в блоке обработки и хранения сигналов.

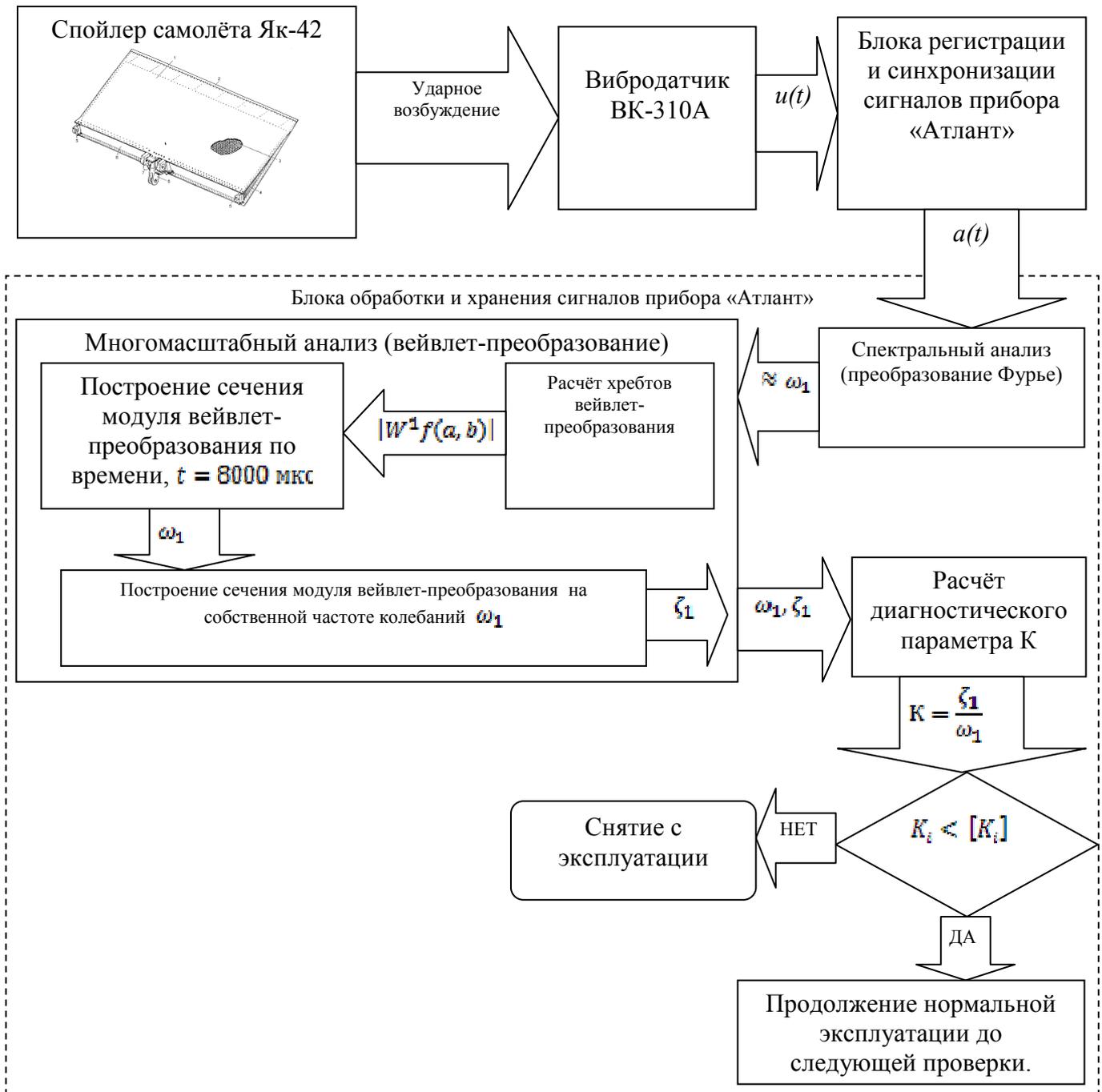


Рисунок 16 – Алгоритм проведения диагностирования спойлера самолёта Як-

Далее программными средствами виброанализатора «Атлант» проводится спектральный анализ полученного вибросигнала, что позволяет примерно оценить собственную частоту колебания спойлера по первой форме. Для спойлера самолёта Як-42 она составляет примерно 22Гц.

После этого проводится многомасштабный анализ сигнала вибрации с помощью встроенного программного модуля вейвлет-преобразования. На начальном этапе проводится расчёт модуля вейвлет-преобразования. Затем делается сечение модуля вейвлет-преобразования по времени  $t = 8000$  мкс. Максимум линии сечения будет являться действительной собственной частотой колебания контролируемого спойлера. Далее построение сечения на данной частоте позволяет определить коэффициент демпфирования. По найденным значениям частоты собственных колебаний и коэффициента демпфирования производится расчёт диагностического параметра  $K$ . После чего полученное в ходе эксперимента значение сравнивается с допустимым значением диагностического параметра  $[K]$ , которое соответствует максимально допустимой в эксплуатации величине отслоения. Расчётное значение диагностического параметра заносится в базу данных для формирования временного ряда и проведения статистического анализа изменения состояния контролируемого спойлера. В случае превышения допустимого значения диагностическим параметром спойлер снимается с эксплуатации и отправляется в ремонт для уточнения размеров и местоположения отслоения. Если полученное значение диагностического параметра находится в зоне допустимых значений продолжается нормальная эксплуатация исследуемого агрегата и делается прогноз о техническом состоянии до следующей проверки.

На рисунке 17 показан вид характерной зависимости виброускорения от времени при свободных колебаниях спойлера самолёта Як-42 в диапазоне частот от 0 до 900 Гц, число отсчётов 8192, длительность выборки 147,5 мс.

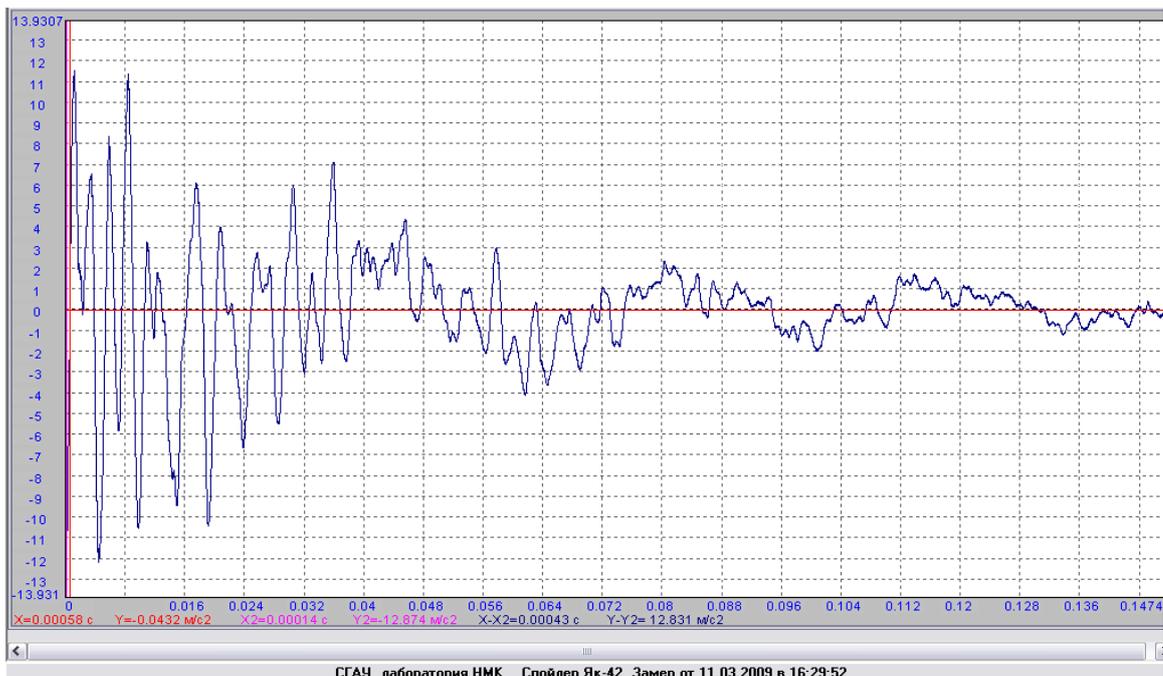


Рисунок 17- Характерная зависимость ускорения от времени при свободных колебаниях спойлера самолёта Як-42

На рисунке 18 показан модуль вейвлет-преобразования с изолиниями и линиями хребтов для сигнала, представленного на рисунке 17.

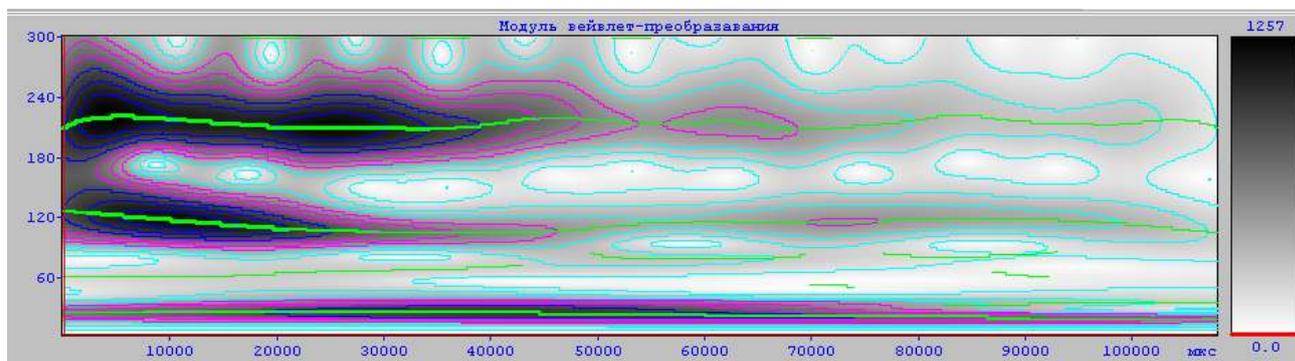


Рисунок 18 – Характерный вид модуля вейвлет-преобразования

На рисунке 19 показано характерное сечение модуля вейвлет-преобразования по времени. Здесь чётко видны три частоты собственных колебаний конструкции.

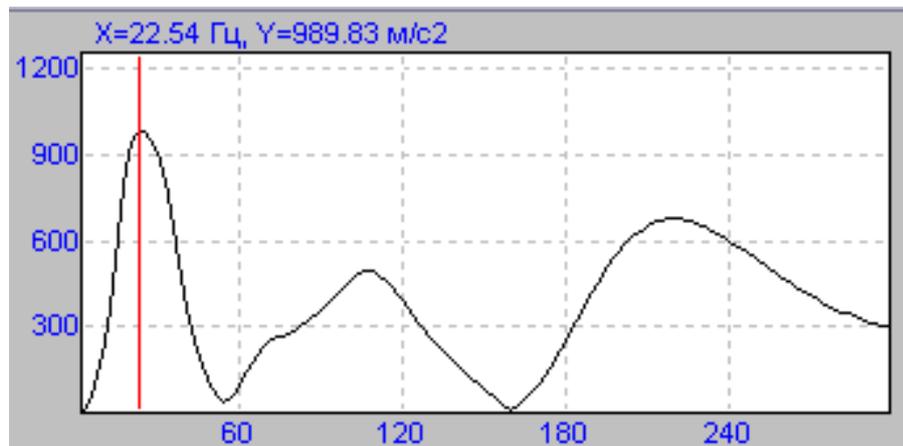


Рисунок 19 - Сечение модуля вейвлет-преобразования по времени

На рисунке 20 представлено сечение модуля вейвлет-преобразования по частоте на первой форме колебаний (22,54 Гц).

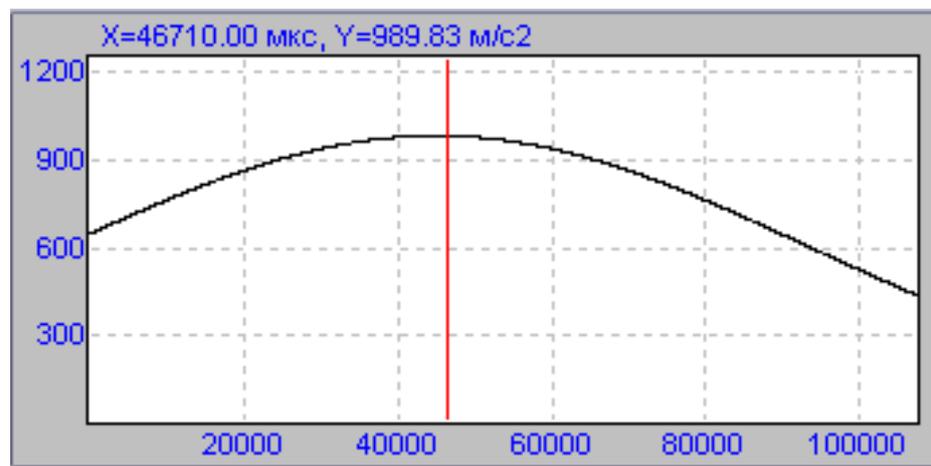


Рисунок 20 - Сечение модуля вейвлет-преобразования по частоте

### Контрольные вопросы

1. Какие виды анализа во временной области Вы знаете?
2. Какие виды анализа в частотной области Вы знаете?
3. Какие характеристики вибрации можно оценить при ее анализе во временной области?
4. Какую информацию можно получить при статистическом анализе вибрации?
5. Когда следует применять спектральный анализ вибрации?

6. Какую информацию можно получить при синхронном спектральном анализе вибрации?
7. Когда следует применять спектральный анализ огибающей?
8. Когда применяется кепстральный анализ?
9. Что такое вейвлет-преобразование?
10. Какую информацию можно получить при вейвлет-преобразовании вибрации?
11. Какие характеристики сотовой конструкции меняются при появлении отслоения?
12. Какой параметр можно использовать для обнаружения отслоения сотовых конструкций?
13. Опишите процедуру определения (алгоритм) диагностического параметра отслоения сотовых конструкций?
14. Какую информацию получают при анализе сечения модуля вейвлет-преобразования по масштабному коэффициенту частоты?
15. Какую информацию получают при анализе сечения модуля вейвлет-преобразования по времени?
16. Какие соотношения используются для определения собственных частот и коэффициентов демпфирования по данным, полученным из вейвлет-преобразования?

### **Содержание отчета**

1. Краткие сведения о назначении и методике металлографического контроля.
2. Основные технические спектроанализатора «Атлант-8».
3. Алгоритм проведения контроля повреждений сотовых конструкций.
4. Заключение о пригодности исследуемой конструкции к дальнейшей эксплуатации причине разрушения конструкции.

## Литература

1. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации [Текст]/ А.В. Барков, Н.А. Баркова//Учебное пособие.-Спб.,СпбГМТУ.-2004.-156с.
2. Баркова Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования [Текст]/Н.А. Баркова//Учебное пособие.-Спб, СпбГМТУ.-2003.-159с.
3. Воробьев, В.Г. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования [Текст]: Учеб. пособие для вузов гражд. авиации / Под ред. И.М. Синдеева. / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, Ю.В. Козлов и др. – М.: Транспорт, 1984. — 191с.
4. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов [Текст]/М.Д. Генкин, А.Г. Соколова.-М.: Машиностроение.-1987.-228с.
5. Григолюк Э.И. Устойчивость и колебания трёхслойных оболочек [Текст]/ Э.И. Григолюк, П.П. Чулков.- М.: Машиностроение.-1973.-170с.
  - а. Тиц, С.Н. Метод выявления дефектов авиационных конструкций основанный на анализе линий максимумов и хребтов непрерывного вейвлет-преобразования [Текст]/С.Н. Тиц, А.Н. Коптев, Ю.В. Киселёв//Авиационная промышленность. – Москва, 2009.- №6. – С.326-335.