

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛОПАСТНЫХ МАШИН**

*Методические указания к лабораторной работе  
по курсу «Основы виброакустики машин»*

С А М А Р А 2015

Составители: А.А. Иголкин, Л.В. Родионов, Гаспаров М.С., А.Б. Прокофьев.

УДК 681.8

**Виброакустическая диагностика лопастных машин:** Метод. указания к лаб. работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-та; Сост. *А.А. Иголкин, Л.В. Родионов, Гаспаров М.С., А.Б. Прокофьев.* – Самара, 2015. - 23 с.

Рассмотрены теоретические основы измерения вибраций. Дано описание лабораторного оборудования необходимого для, измерения и анализа вибраций вентиляторов.

Кратко представлено руководство по акустическому и вибрационному анализу.

Приведены примеры и описан порядок выполнения лабораторной работы.

Методические рекомендации предназначены для магистрантов.

## СОДЕРЖАНИЕ

<u>Введение</u> .....	4
1 <u>Теоретические основы лабораторной работы</u> .....	5
1.1 <u>Диагностика роторных агрегатов по вибрации</u> .....	5
1.2 <u>Балансировка в собственных опорах</u> .....	8
2 <u>LabVIEW. Руководство по акустическому и вибрационному анализу</u> .....	9
3 <u>Оборудование и программное обеспечение для выполнения виброакустической диагностики</u> .....	11
4 <u>Порядок выполнения работы</u> .....	16
<u>Контрольные вопросы</u> .....	21
<u>Список использованных источников</u> .....	22

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современный уровень развития промышленных предприятий предъявляет высокие требования к надежности оборудования и эффективности его работы. Он базируется на обязательном применении новейших средств контроля и накладке технологического оборудования и требует комплексного подхода к решению инженерно-технических проблем.

Исходной предпосылкой поиска неисправностей машины по параметрам вибрации является то, что вибросигнал работающей машины содержит большое количество информации о ее состоянии. Для эффективного использования виброконтроля в программе технического обслуживания необходимо, чтобы эта информация была должным образом извлечена из полученных вибросигналов.

В настоящее время автоматизация вибродиагностирования различного оборудования сдерживается главным образом отсутствием соответствующего программного обеспечения. Отсутствие программ, в свою очередь, объясняется не столько сложностью программной реализации определенных методик и алгоритмов вибродиагностирования, сколько их несовершенством и обязательным участием оператора в анализе диагностической информации.

В рамках выполнения национального проекта «Образование» закуплено лабораторное оборудование National Instruments и программное обеспечение Lab View. Данные методические рекомендации дают наглядное представление о вибропортрете лопастной машины и его изменении при поломке одной лопасти.

**Цель работы:** получение навыков виброакустической диагностики лопастных машин.

## **1 Теоретические основы лабораторной работы**

### **1.1 Диагностика роторных агрегатов по вибрации**

Одним из источников вибрации вращающихся приводов являются роторы, которых в одном агрегате может быть несколько. В качестве ротора можно рассматривать крыльчатки насосов, оси с зубчатыми колесами и другие вращающиеся конструктивные элементы агрегата. Причиной вибрации может быть статическая, моментная и динамическая неуравновешенность ротора. При статической неуравновешенности на ротор действует сила, вращающаяся синхронно с его оборотами. При моментной неуравновешенности – момент сил, при динамической – момент и сила, которые могут находиться в различных плоскостях. Схемы неуравновешенности ротора показаны на [рисунке 1.1](#) [1].

Неуравновешенность является следствием неточности изготовления деталей и узлов, неоднородности материала, упругих и остаточных деформаций, возникающих при сборке и работе машины, несовершенства технологии балансировки и т.д. В процессе работы неуравновешенность ротора изменяется под действием силового возмущения, температурных деформаций и износа. Эти факторы приводят к деформированию оси ротора и увеличению зазора в подшипниках, что, в конечном счете, ведет к изменению уровня и направления действия инерционных сил и моментов от неуравновешенных масс. Основная вибрация, обусловленная наличием дисбаланса от массы, возникает с частотой, равной частоте вращения ротора  $n$ , и она называется первой (основной) роторной гармоникой. Присущая любой реальной системе нелинейность приводит к появлению дополнительных вибрационных составляющих, частоты которых кратны частоте основной гармоники:

$$f = in,$$

где  $i$  – порядок гармоники ( $i = 1; 2; 3; \dots k$ ).

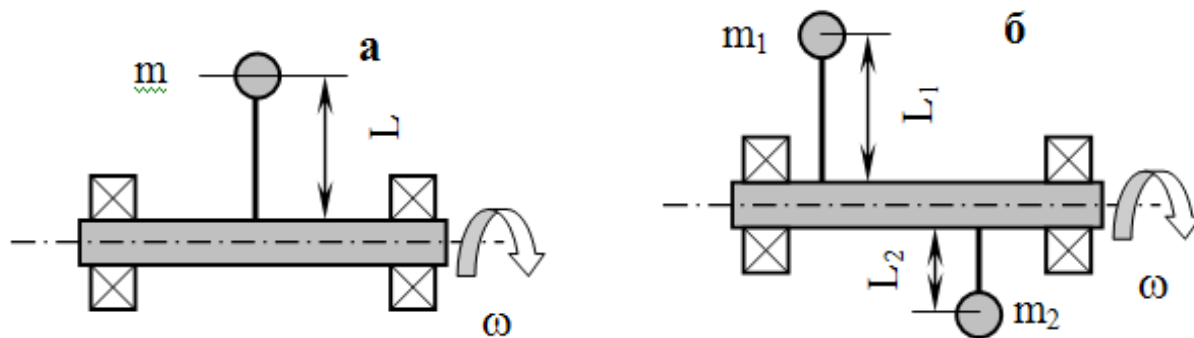


Рисунок 1.1 - Схема статической (а) и динамической (б) неуравновешенности ротора

Диагностика состояния ротора наиболее часто заключается в контроле уровня вибрации с частотой первой и последующих гармоник. Допустимая вибрация задается в единицах виброускорения или виброскорости. Повышенная вибрация может привести к возникновению трещин на крыльчатках насосов и других деталях ротора, повышенному износу в опорах, смещению деталей ротора, а также к выходу из строя подшипниковых узлов агрегата [2].

Для периодического контроля и анализа роторных вибраций применяются портативные микропроцессорные анализаторы. С их помощью можно провести измерение уровня вибрации, проанализировать состояния ротора, выявить дефекты подшипников.

Для механизмов роторного типа (турбины, турбокомпрессоры, электродвигатели, генераторы, насосы, вентиляторы, и т.д.) основными источниками диагностической информации, характеризующим текущее техническое состояние механизмов являются сигналы вибрации. Обусловлено это тем, что вибрация являясь следствием взаимодействия различных сил в самом механизме, несет в себе информацию о состоянии как механизма в целом, так и его отдельных кинематических связей, узлов и деталей. При этом теория и практика анализа вибросигналов к настоящему времени столь

отработана, что можно получить достоверную информацию практически по любому дефекту монтажа, изготовления или износа ([таблица 1.1](#)).

Таблица 1.1 - Дефекты механизмов выявляемые вибродиагностическими методами контроля

<b>Наименование дефекта</b>	<b>Возможная причина дефекта</b>
Дисбаланс	Ротора, рабочего колеса, системы « ротор электродвигателя – муфта – рабочее колесо» и т.д.
Несоосность валов	Излом и смещение валов. Изогнутый вал.
Не жесткое крепление	Трещины в раме или корпусе. Ослабление затяжки фундаментных или крепежных болтов. «Мягкая лапа».
Дефекты электродвигателей	Неравномерный воздушный зазор между статором и ротором. Повреждение обмоток статора или изоляции. Эксцентриситет ротора. Обрыв или ослабление крепления стержней в беличьей клетке. Ослабление крепления обмоток статора. Перекос напряжения по фазам и т.д.
Дефекты приводных муфт	Ослабление посадки на вал. Неравномерная передача крутящего момента элементами зацепления.
Дефекты компрессора, насоса, вентилятора	Кавитация. Помпаж. Срыв потока. Поломка лопаток и т.д.

Таблица 1.1 - продолжение

Дефекты зубчатых передач	Износ зуба. Поломка зуба. Ударное зацепление. Несоосность валов.
Дефекты ременных передач	Износ ремня. Ослабление натяжения. Несоосность шкивов. Эксцентриситет шкива. Резонанс ремня и т.д.
Дефекты подшипников скольжения	Износ. Задир. Эллипсность шейки вала. Продавливание масляной пленки, автоколебания и т.д.
Дефекты подшипников качения	Дефекты тел качения, сепаратора, внутреннего и наружного кольца. Все дефекты изготовления, монтажа и износа. Качество смазки.

## 1.2 Балансировка в собственных опорах

Неуравновешенность (дисбаланс) вращающихся масс и вызванные им центробежные силы резко увеличивают нагрузку на подшипниковые опоры, отдельные узлы и механизм в целом, что приводит к росту вибрации и существенному снижению ресурса механизма. В отдельных случаях вибрация столь велика, что вибрирует не только сам механизм, но и окружающее его оборудование, здания и сооружения. Колоссальное количество энергии при этом тратится не на выполнение работы, а на разрушение. Помимо всего прочего, энергия, которая израсходована на разрушение оборудования, оплачивается.

Если балансировка при серийном производстве решается использованием балансировочных станков, то вопросы балансировки при ремонте и эксплуатации долгое время оставались не решенными. Эксплуатирующие предприятия не могут позволить себе приобретение целой гаммы балансировочных станков, тем более загрузка и окупаемость их в большинстве случаев будет крайне низкой.



Решению данного вопроса способствовало развитие средств контроля технического состояния оборудования по сигналам вибрации. В настоящее время производится ряд портативных приборов, которые кроме основных функций по измерению, обработке и анализу сигналов вибрации предназначены для выполнения динамической балансировки «в собственных опорах». Суть технологии балансировки «в собственных опорах» заключается в том, что в механизм, работающий в нормальном эксплуатационном режиме, в одну или несколько плоскостей ротора устанавливают пробный груз (грузы), по реакции механизма (изменению вибрации), прибор рассчитывает массу необходимого корректирующего груза и угол его установки на роторе для компенсации дисбаланса.

## **2 LabVIEW. Руководство по акустическому и вибрационному анализу**

### **Измерения уровня вибрации**

Для измерения уровня вибрации можно использовать виртуальные приборы (ВП) Vibration Level Express и ВП Vibration Level [3]. Использование ВП Vibration Level Express, позволяет быстро создать и в интерактивном режиме сконфигурировать следующие измерения уровня вибрации:

- Среднеквадратичное значение;
- Скользящее среднеквадратичное значение;
- Пиковое значение;
- Максимальное - минимальное значения;
- Экспоненциальное усреднение.

Возможно также использование ВП Vibration Level Express, чтобы экспортировать сигнал после однократного или двойного интегрирования.

### **Измерение среднеквадратического уровня**

Основным требованием измерений уровня вибрации является измерение уровня сигналов, полученных с акселерометра. Уровень сигнала с акселерометра обычно выражается как среднеквадратическое ускорение.



**Примечание:** Необходимо установить входной параметр **restart averaging** прибора SVL RMS Level VI в значение TRUE. В противном случае, прибор SVL RMS Level VI будет накапливать промежуточные результаты, чтобы вычислить среднеквадратичное значение уровня вибрации для всех собранных данных, вместо того, чтобы вычислить его только по последнему блоку данных.

### **3 Оборудование и программное обеспечение для выполнения виброакустической диагностики**

Для выполнения виброакустической диагностики используется следующее оборудование и программное обеспечение:

- Программа: LabVIEW, sound and vibration toolset;
- Модуль NI usb-4431;
- Модуль для виброакустических исследований;
- Шумомер Октава 101 А (или 110 А);
- Программное обеспечение Октава.

Описание шумомеров и программного обеспечения приведено в изданных ранее материалах [4, 5].

На [рисунке 3.1](#) показан внешний вид модуля NI 4431.



Рисунок 3.1 – Модуль NI 4431

NI USB-4431 - пятиканальный модуль сбора динамических сигналов предназначенный для выполнения высокоточных измерений сигналов с интегральных электронных пьезоэлектрических датчиков (IEPE). Модуль имеет

в своём составе четыре одновременно работающих 24-разрядных дискретных каналов аналогового ввода и один 24-разрядный канал аналогового вывода. За счет своей портативности, NI USB-4431 также хорошо приспособлен для использования в широком диапазоне эксплуатационных испытаний, таких как исследование АЧХ аудио устройств или вибродиагностика.

На [рисунке 3.2](#) показан учебный модуль, содержащий сбалансированный и несбалансированный вентилятор.

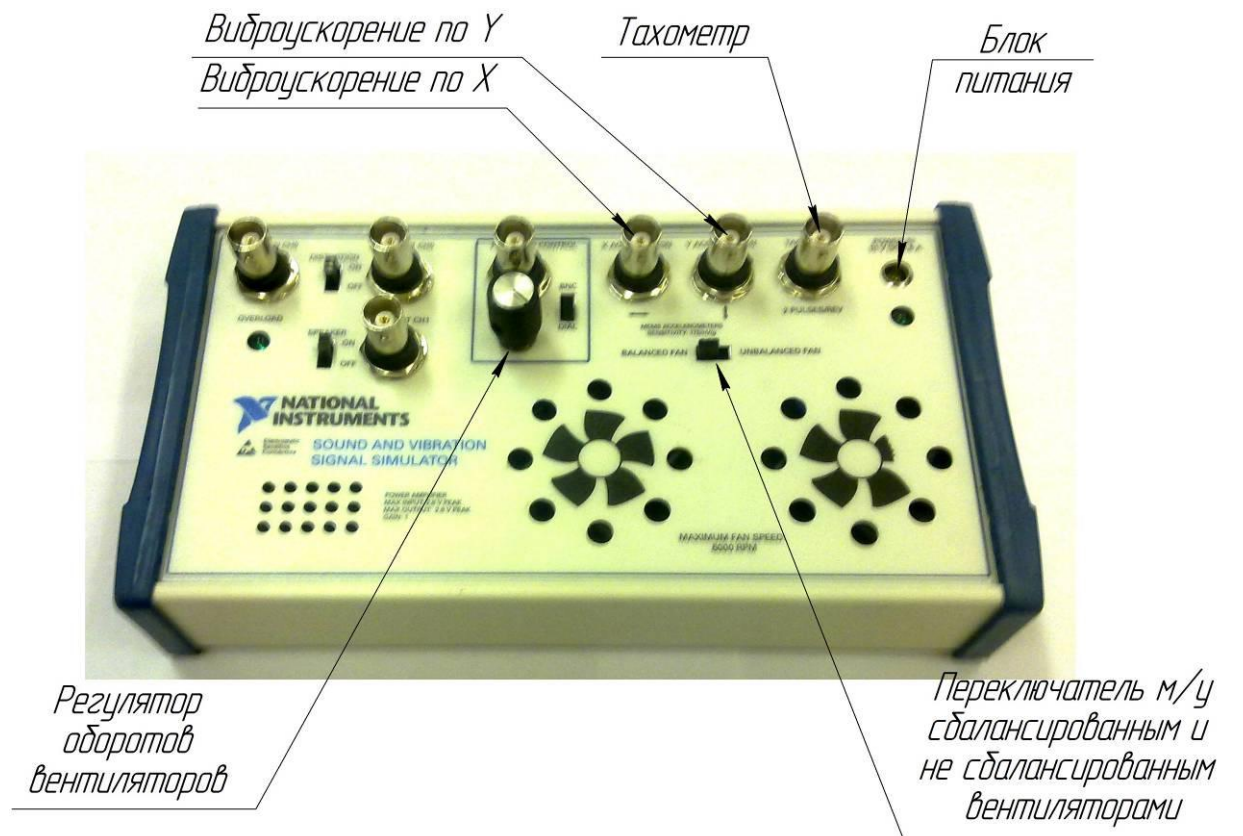


Рисунок 3.2 – Модуль для виброакустических исследований

Модуль имеет в своем составе сбалансированный и не сбалансированный вентилятор. Регулятор оборотов вентилятора, с помощью которого производится регулировка оборотов вентилятора. В модуле интегрированы три датчика: виброускорения по X, виброускорения по Y и датчик оборотов с помощью интегрированных датчиков производится исследование вентиляторов встроенных в данный модуль.

Схема подключения учебного модуля, модуля NI 4431 и персонального компьютера показана на [рисунке 3.3](#).

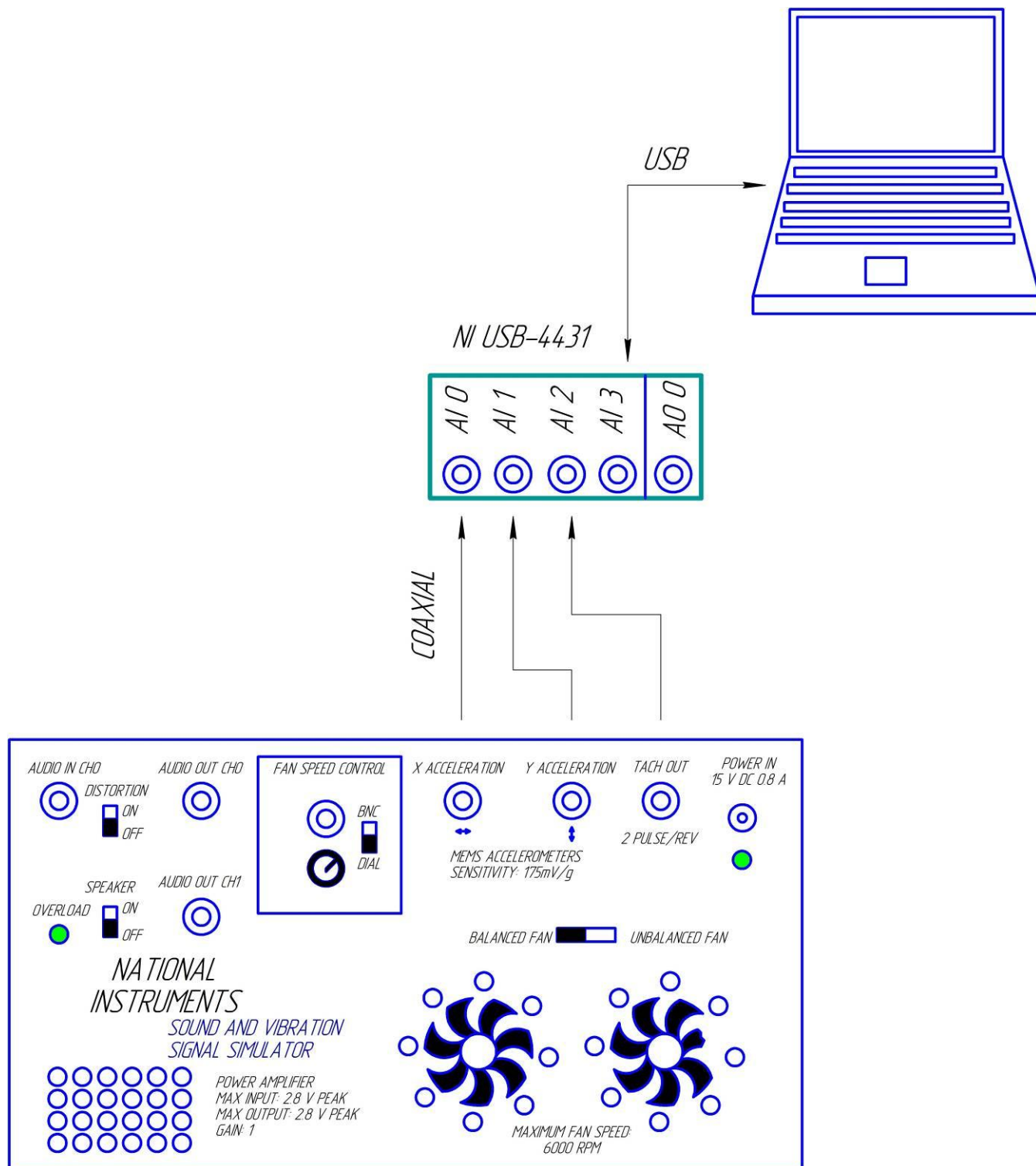


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка

Модуль для виброакустических исследований соединяется тремя COAXIAL проводами с модулем NI USB-4431 (см. [рисунок 3.3](#)). Модуль NI USB-4431 соединяется с персональным компьютером посредством интерфейсного кабеля через разъем USB. После сбора установки, автоматически устанавливаются драйвера для модуля NI USB-4431. После установки драйверов можно приступить к работе.

На [рисунке 3.4](#) представлен внешний вид программы, в котором изображены результаты измерений. При необходимости изменения внутреннего ядра программы, нужно перейти в окно **Block Diagram** (см. [рисунок 3.5](#)) сочетанием клавиш **Ctrl+E**.

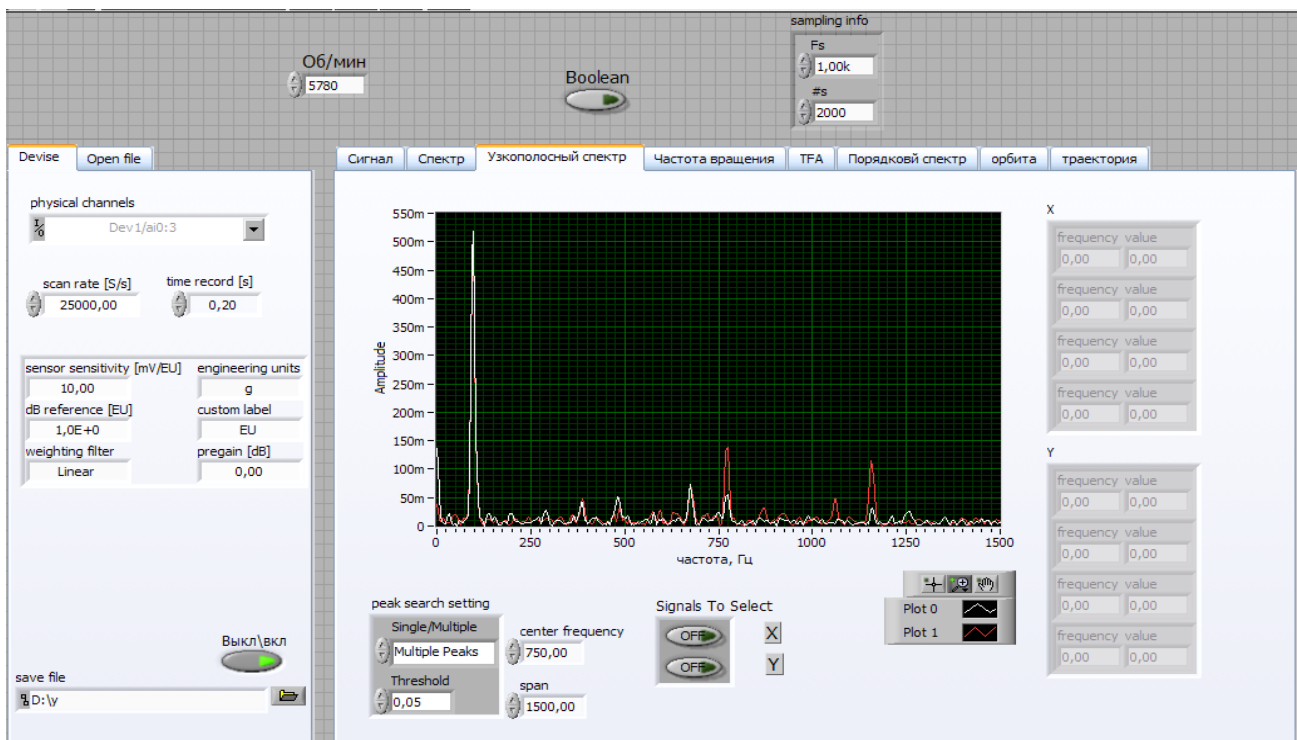
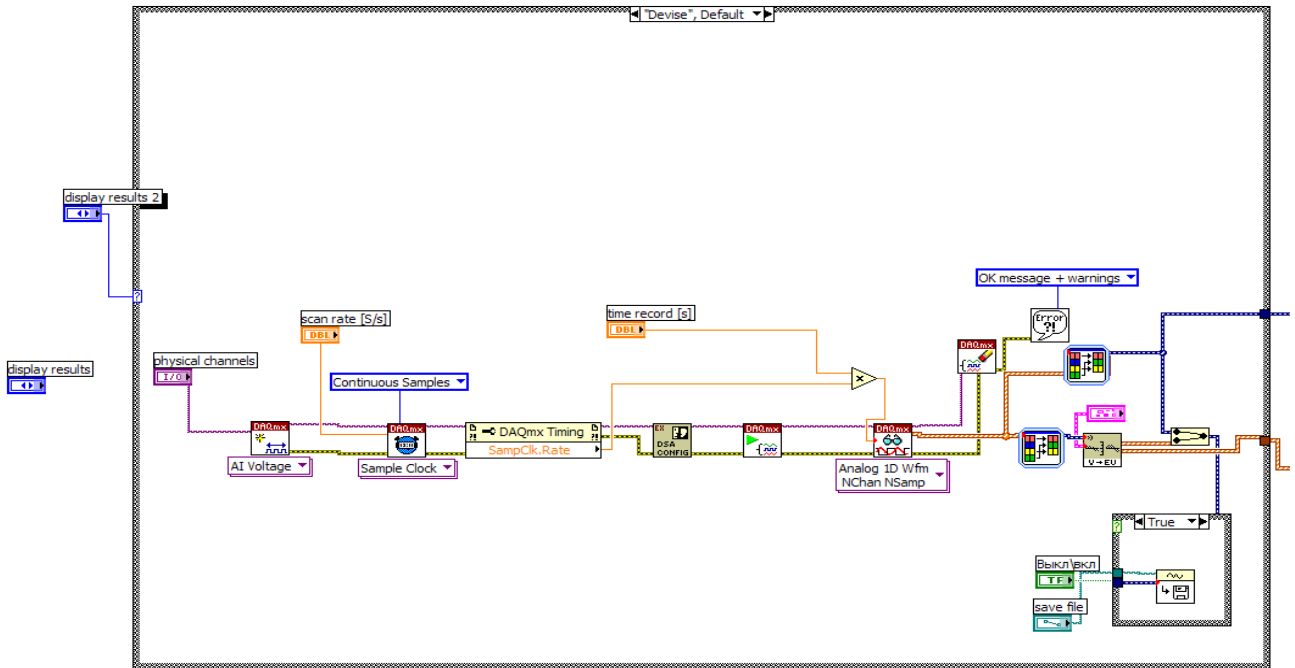
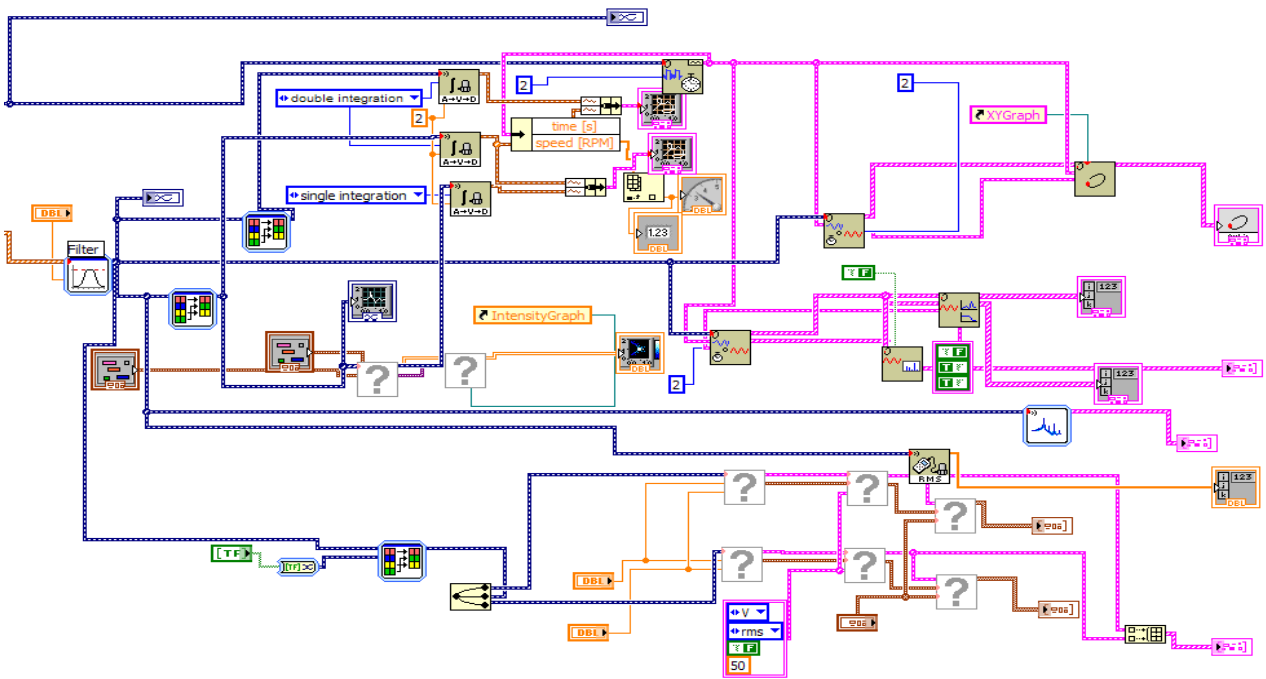


Рисунок 3.4 – Внешний вид программы

Данное программное обеспечение позволяет изменить блок схему под требования лабораторной работы и открыть ранее записанный сигнал. Благодаря модулю Active X есть возможность формировать отчет в Excel.



часть 1



часть 2

Рисунок 3.5 – Внутренний алгоритм программы

#### 4 Порядок выполнения работы

Для выполнения вибрационной диагностики:

1. Собрать установку (согласно [рисунку 3.3](#));
2. Запустить программу;
3. Включить учебный виброакустический модуль;
4. Начать сбор данных;
5. Оценить уровень вибраций по значениям виброускорений по осям OX и OY. Сравнить сбалансированный и несбалансированный вентилятор;
6. Оценить изменение виброускорений при установке вентиляторов на различные поверхности;
7. Сравнить спектры виброускорений сбалансированного и несбалансированного вентиляторов.
8. Составить диагностическую карту:
  - Заполнить [таблицу 4.1](#)

Таблица 4.1 – Протокол испытаний

		Сбалансированный вентилятор		Несбалансированный вентилятор	
		Lx	Ly	Lx	Ly
f, Гц	n, об/мин				

- Построить графики уровней вибраций на роторной частоте по осям OX и OY.
9. Сравнить характеристики сбалансированного и несбалансированного вентиляторов используя фазовый портрет.

Примеры построения зависимостей виброускорения от времени и фазовых портретов сбалансированного и несбалансированного вентиляторов представлены на рисунках [4.1](#), [4.2](#), [4.3](#).

**Фазовый портрет** – это совокупность фазовых траекторий при различных начальных условиях, составляющих фазовую картину. Точка на фазовой



плоскости называется изображающей, а траекторией движения характеризует динамику системы и называется **фазовой траекторией**.

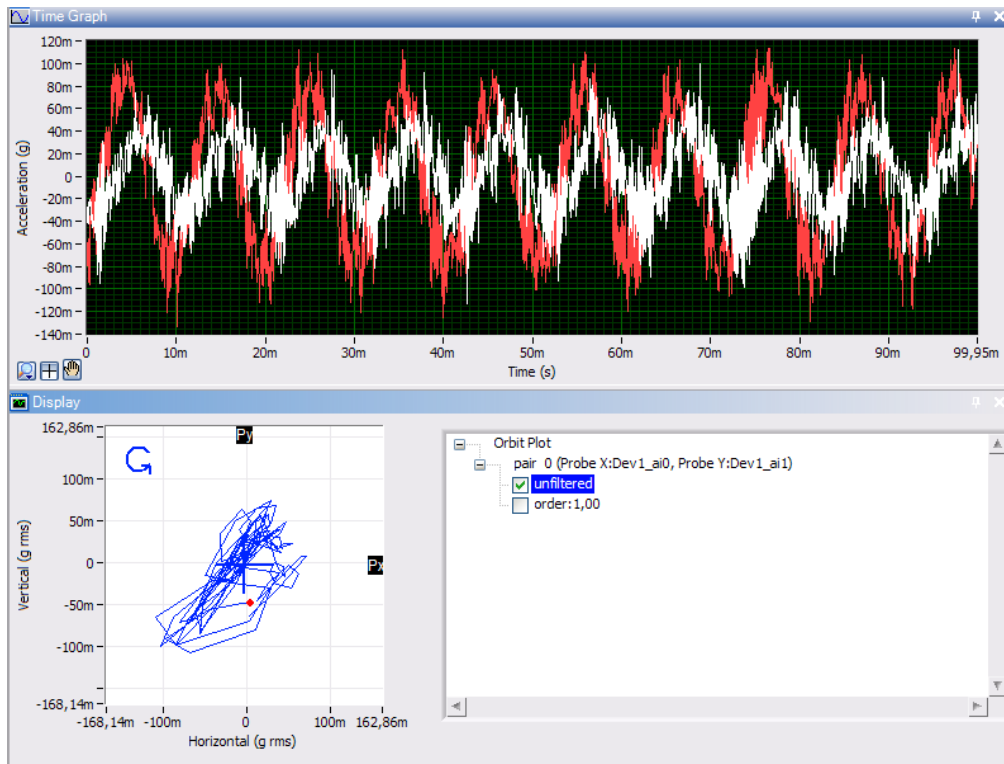


Рисунок 4.1 - Зависимость виброускорения от времени и фазовый портрет сбалансированного вентилятора

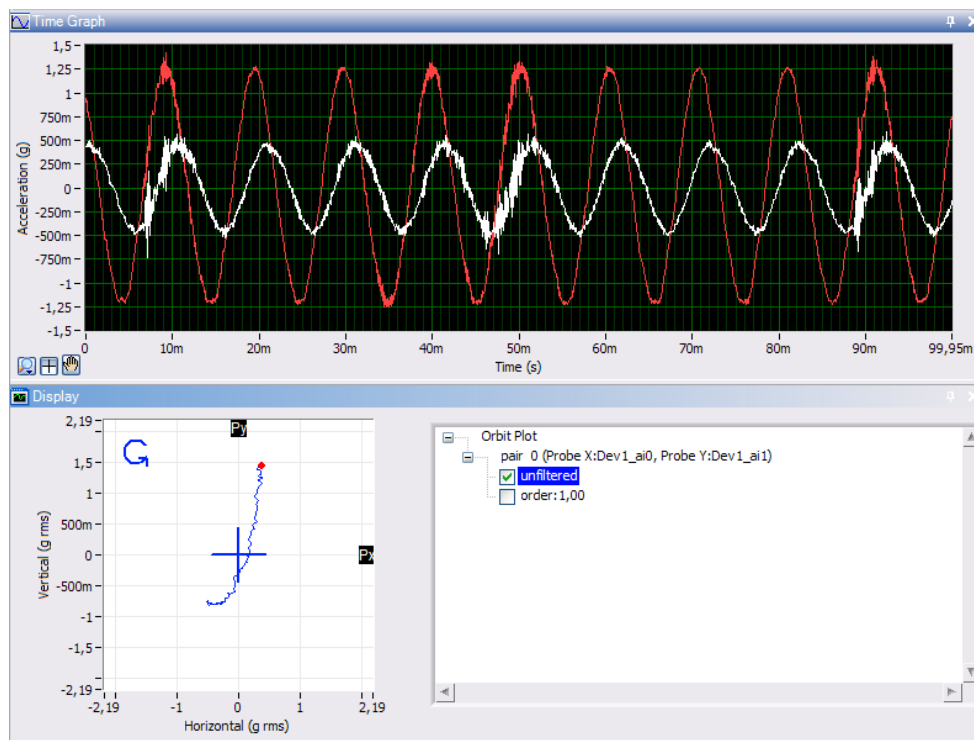


Рисунок 4.2 - Зависимость виброускорения от времени и фазовый портрет несбалансированного вентилятора

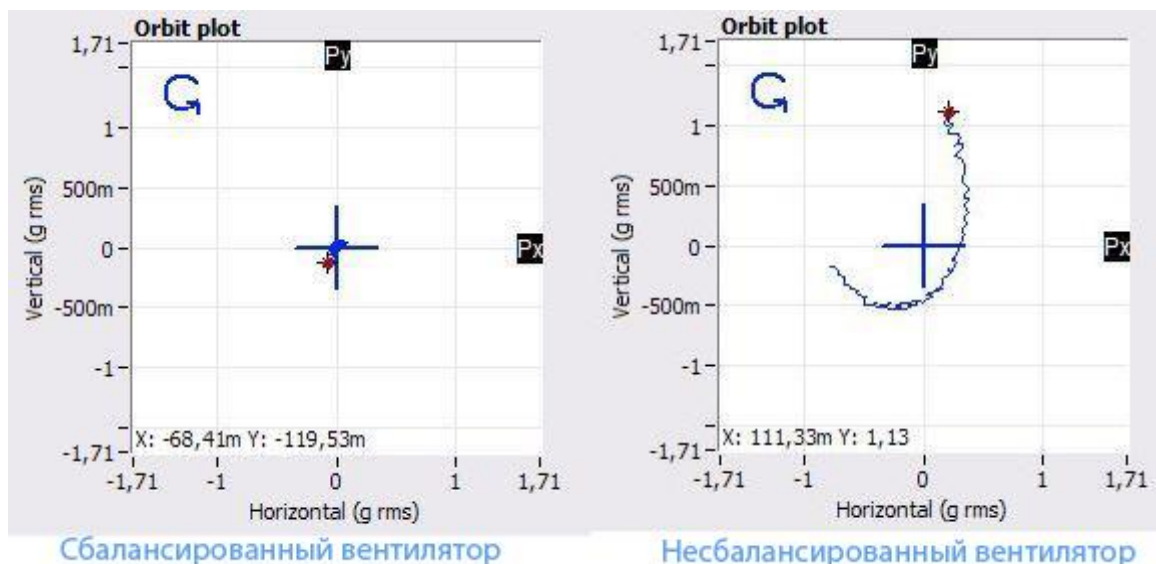


Рисунок 4.3 – Примеры построение фазовых портретов

Для измерения уровней звукового давления [4, 5]:

1. Включить прибор (ОКТАВА 110 А) нажатием клавиши «вкл».
2. Войти в меню прибора нажатием клавиши «меню».
3. Перемещение по меню прибора осуществляется при использовании клавиш « $\vee$ », « $\wedge$ », « $\langle$ », « $\rangle$ », «да», возврат в меню клавиша «меню».
4. В меню ПРИБОР→НАСТРОЙКИ установить следующие параметры:
5. НАЗВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ – определяется по желанию пользователя с помощью клавиш « $\vee$ », « $\wedge$ », « $\langle$ », « $\rangle$ », «да» и «нет».
6. Измеряемый параметр. – ЗВУК.
7. Напряжение на микрофоне. – 200В.
8. Спектр – ДА.
9. Так же устанавливается подсветка и контрастность дисплея, задается дата и время измерения, проверяется степень зарядки аккумулятора внизу окна НАСТРОЙКИ, она должна составлять от 4,2 В до 5,2 В.
10. В меню ПРИБОР→НАСТРОЙКИ→РЕЖИМЫ установить следующие настройки временной характеристики:
11. «ЗВУК» - Leq (эквивалентный по энергии за все время измерений).

12. В меню ПРИБОР→НАСТРОЙКИ→РЕЖИМЫ→УСИЛЕНИЕ установить рабочий диапазон измерений 35-115 дБ.
13. Провести измерение уровня звукового давления, нажав кнопку «Старт» на шумомере. Измерять давление в одной точке необходимо 8-10 сек, после чего нажать кнопки «Стоп» и «Запись» последовательно. Далее нажать кнопку «Сброс» и повторить замер для остальных 5 точек равномерно распределенных по помещению заранее. После проведения измерений выключить всю аппаратуру.
14. Обработку проводить на компьютере, где установлено специализированное программное обеспечение Октава 110 v.1.2.3 или непосредственно с шумомера.
15. По результатам измерений построить графики уровней звукового давления от частоты сбалансированного и несбалансированного вентиляторов (рисунки [4.4](#) и [4.5](#));

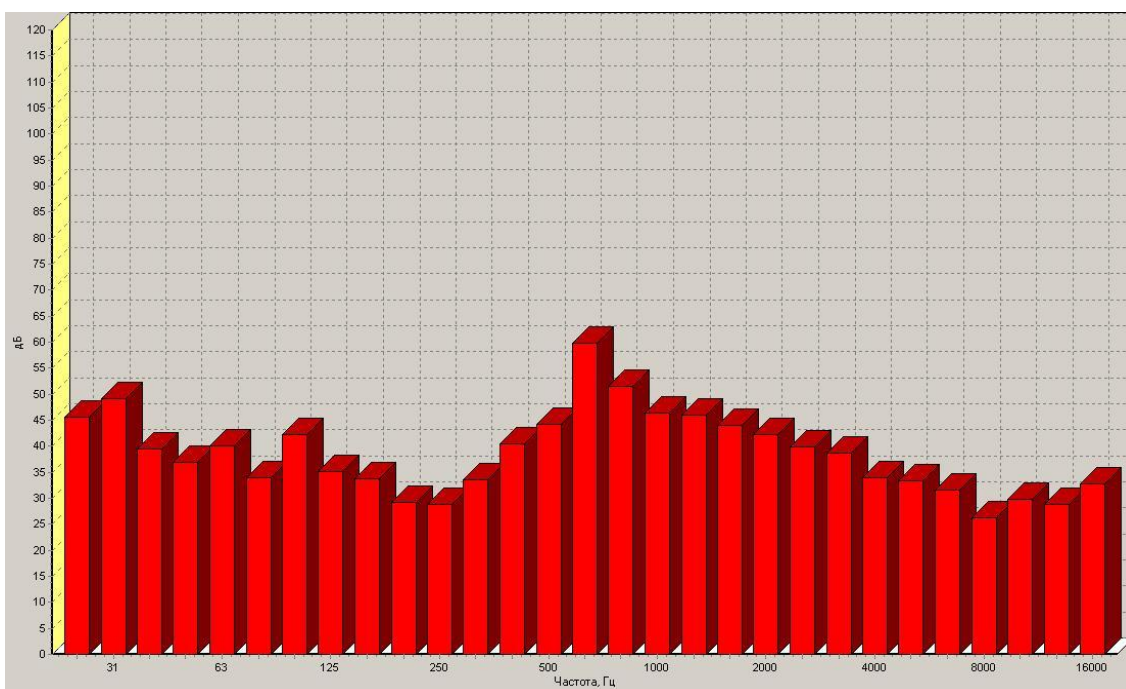


Рисунок 4.4 – Спектральная характеристика уровней звукового давления сбалансированного вентилятора

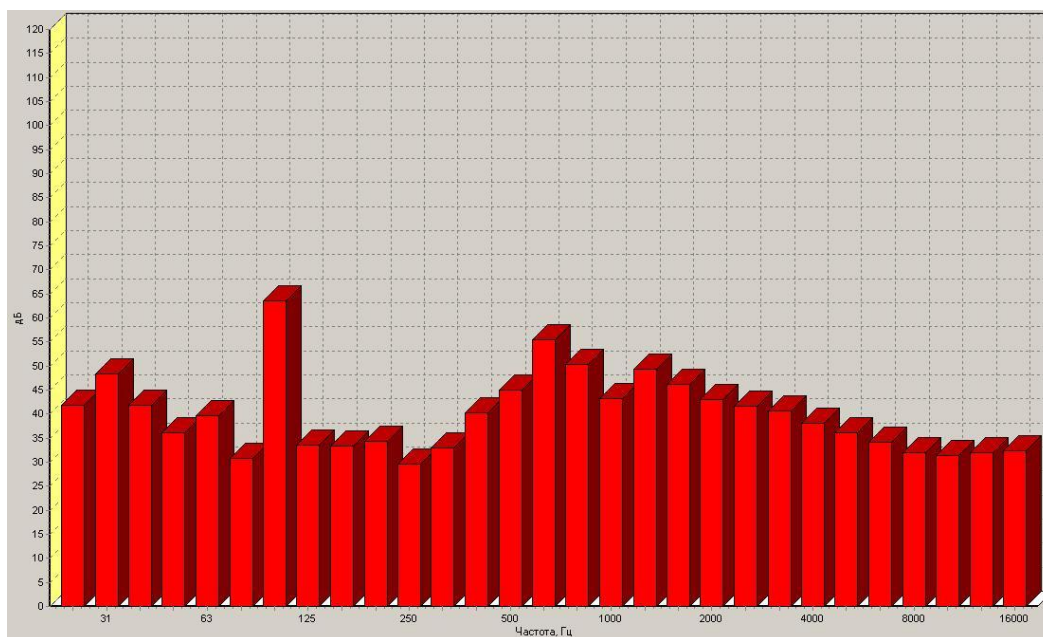


Рисунок 4.5 – Спектральная характеристика уровней звукового давления несбалансированного вентилятора

16. Наложить спектры, полученные в пункте 15 на один график (с помощью Excel). Провести их сравнение и сравнение уровней шума по шкале А.

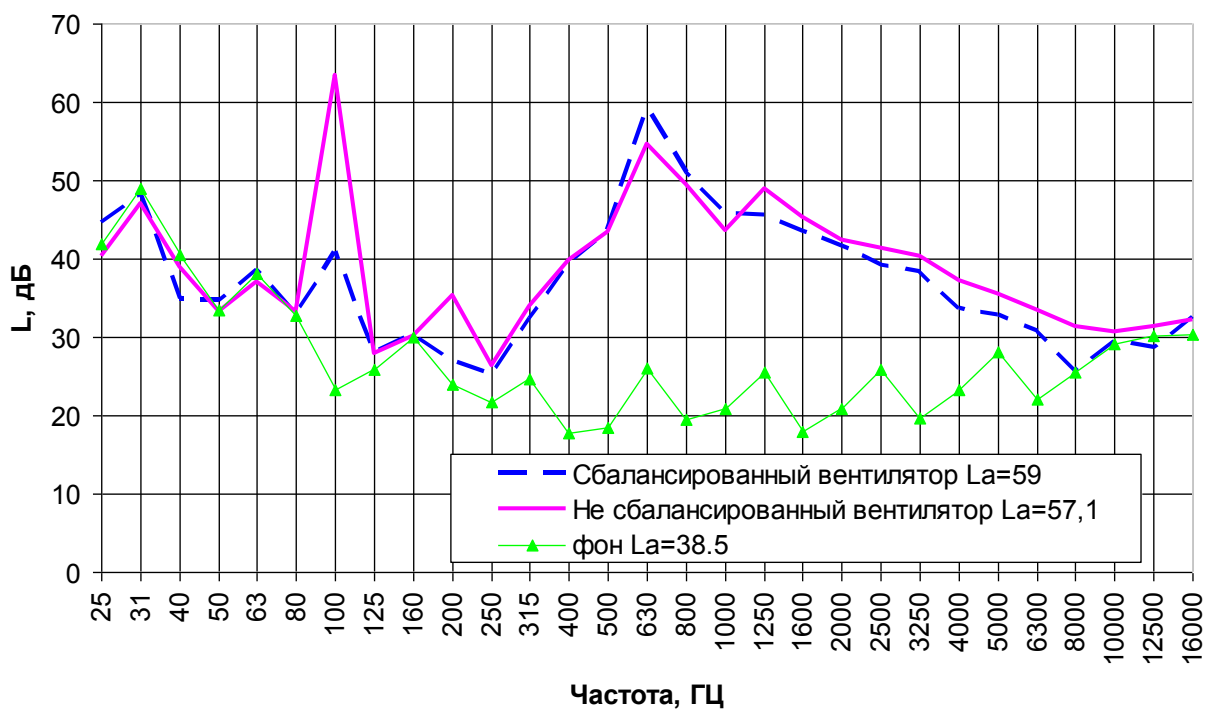


Рисунок 4.6 – Сравнение спектров уровней звукового давления сбалансированного и несбалансированного вентиляторов

Оформить протокол отчета в электронном виде. Протокол должен содержать:

- Ф.И.О. и номер группы студента, проводившего испытания;
- дату проведения испытаний;
- график сравнения уровней звукового давления сбалансированного и несбалансированного вентиляторов в зависимости от частоты (в том числе по шкале А);
- спектры виброускорений сбалансированного и несбалансированного вентиляторов;
- фазовые портреты сбалансированного и несбалансированного вентиляторов;
- выводы по результатам работы.

#### **Контрольные вопросы:**

1. В чем состоит сущность виброакустической диагностики?
2. Преимущества и недостатки виброакустической диагностики?
3. Что такое фазовый портрет?
4. Чем отличается фазовый портрет сбалансированного и несбалансированного вентилятора?
5. Чем отличаются спектры звукового давления и уровни шума сбалансированного и несбалансированного вентилятора?

## Список использованных источников

1. Акустическая и вибрационная диагностика пневмо - и гидросистем: учеб. пособие / *А.И. Кох, М.С. Гаспаров, С.А. Петренко* – Самара: Изд – во Самарского гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 84 с.
2. Колесников А.Е. Шум и вибрация. Учебник. Л.: Судостроение, 1988. – 248 с.
3. Руководство по акустическому и вибрационному анализу. Корпорация National Instruments.
4. Иголкин А.А. Измерение звукоизоляции ограждающих конструкций в натуральных условиях [Текст]: методические указания к лаб. работе / А.А. Иголкин, Л.В. Родионов, Е.В.Шахматов. – Самара; СГАУ, 2009. – 28 с.
5. Комплекс виброакустического мониторинга [Текст]: электронный ресурс / Г.О. Белов, А.А. Иголкин, Г.М. Макарьянц, Т.Б. Миронова, А.Б. Прокофьев, Л.В. Родионов. – Самара, СГАУ, 2010. – 63 с.

Учебное издание

**ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛОПАСТНЫХ МАШИН**

Методические указания

Составитель: *Иголкин Александр Алексеевич*

*Родионов Леонид Валерьевич*

*Гаспаров Маркар Сергеевич*

*Прокофьев Андрей Брониславович*

Компьютерная верстка Максимчик С.А., Сафин А.И.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет им. Академика С.П. Королева  
443086, Московское шоссе, 34.

