

3 Измерительное устройство механических колебаний

В настоящее время одним из направлений технического развития автоматизированного мониторинга состояния сооружений является миниатюризацией сенсорных систем, использование современных технологий беспроводной связи и снижение стоимости цифровых вычислительных аппаратных средств (рисунок 10); все это способствует снижению стоимости систем мониторинга состояния инженерных сооружений в целом. Обзор существующих беспроводных систем можно получить в [16].

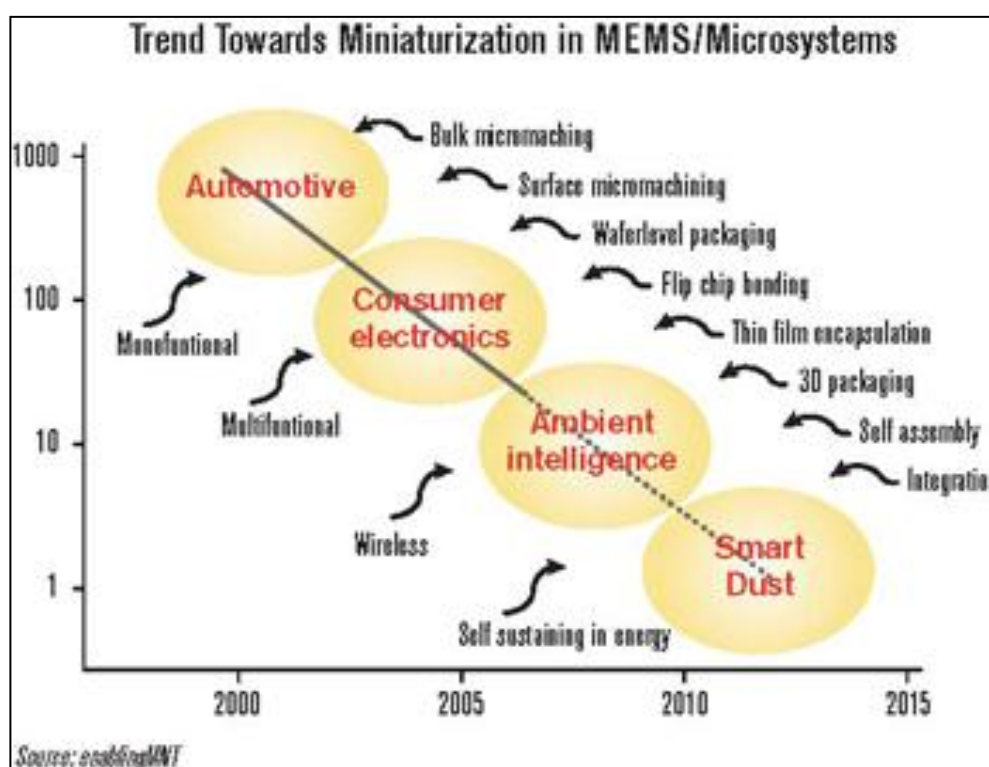


Рисунок 10 – Направление развития сенсорных технологий мониторинга [17]

Сенсорные системы мониторинга сооружений могут состоять из датчиков различных типов. Одним из типов подобных датчиков являются МЭМС (микроэлектромеханические системы, англ. MEMS – microelectromechanical systems) акселерометры. Данные датчики предназначены для измерения механических колебаний (проекций ускорения) объектов, на которых они установлены. Чувствительным элементом простейшего акселерометра является инерционная масса (m), которая приобретает ускорение (рисунок 11). Согласно второму закону Ньютона, такое ускорение возникает под действием силы. При этом, сила на инерционную массу действует через соединение (на рисунке соединение выглядит в виде пружины). Если соединение выполнено в форме гибкого элемента, деформация

которого происходит в линейной области, смещение массы будет пропорционально ускорению. Измеряя смещение в этом случае, можно оценить ускорение. Среди методов детектирования смещения применяются методы: тензорезистивный, емкостной, пьезоэлектрический, резонансный и метод уравнивающей силы [13].

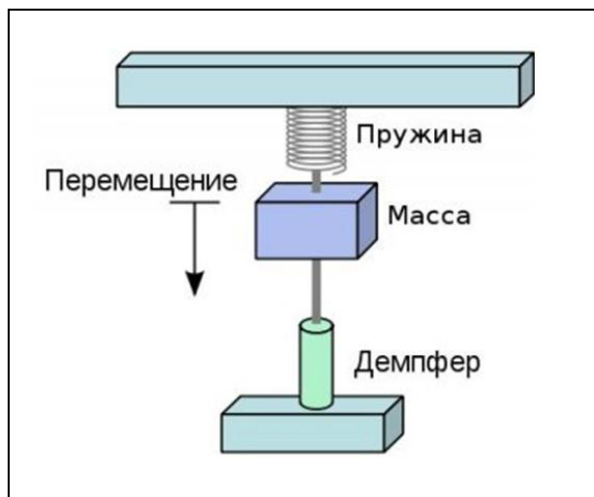


Рисунок 11 – Схема акселерометра с инерционной массой

В данной главе будет приведено описание:

- разрабатываемого измерительного устройства механических колебаний, чувствительным элементом которого является МЭМС акселерометр инерционного действия;
- разрабатываемого стенда для испытания акселерометров;
- применяемой процедуры обработки и анализа измерительных данных.

3.1 Теория датчиков вибрации инерционного действия

Вибрация твердого тела в выбранной неподвижной системе координат может быть представлена через поступательные перемещения по трем взаимно-перпендикулярным осям, проходящим через выбранную точку, и вращательных вокруг этих же осей. Вибрация может характеризоваться несколькими колебательными величинами:

- *виброперемещением* $s(t)$ – мгновенное значение координаты положения точки при механической вибрации;
- *виброскоростью*, которая является первой производной виброперемещения по времени $v = ds(t)/dt$;
- *виброускорением*, которое является второй производной виброперемещения $a = d^2s(t)/dt^2$.

Виброперемещение в большинстве случаев измеряется в микрометрах (мкм); виброскорость измеряется в мм/с, м/с; виброускорение измеряется в м/с² или долях $1g \sim 9,81 \text{ м/с}^2$. Частоту вибрации измеряют в герцах (Гц).

Твердое тело, которое может свободно двигаться в пространстве, имеет шесть степеней свободы: три, определяемых поступательными перемещениями, и три, определяемых тремя вращательными движениями. Рассмотрим простой случай системы с одной степенью свободы – груз, подвешенный на пружине (система груз-пружина, изображенная на рисунке 11). Если в такой системе масса M выведена из положения равновесия или ей сообщена некоторая скорость, то возникнут свободные (собственные) колебания массы на пружине. Согласно закону Ньютона, равновесия, к которому стремится выведенная из состояния покоя система, определяется равенством нулю суммы трех сил: силы инерции $M\ddot{y}$, действующей на массу M ; силы упругости k_y и силы сопротивления $h\dot{y}$, т.е. $M\ddot{y} + h\dot{y} + ky = 0$, где M – масса груза, k – коэффициент упругости пружины; h – коэффициент демпфирования, y – координаты движения центра масс груза M . Разделив все члены уравнения на M , получим:

$$\ddot{y} + 2v\dot{y} + \omega_0^2 y = 0,$$

где $v = h/2M$ – коэффициент затухания, $[v] = T^{-1}$; $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ – частота собственных колебаний системы, $[\omega_0] = T^{-1}$.

В основе действия виброизмерительных приборов инерционного действия лежит принцип кинематического возбуждения. Кинематическим называется возбуждение системы груз-пружина, когда колебания возбуждаются в точке крепления пружины к основанию. Уравнение движения датчика инерционного действия идентично уравнению движения системы с одной степенью свободы, возбуждаемой кинематически, т.е. уравнение имеет следующий вид:

$$\ddot{y} + 2v\dot{y} + \omega_0^2 y = -\ddot{s}, \quad (8)$$

где s – перемещение. По аналогии: $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ – частота собственных колебаний датчика, а также можно получить $\epsilon = h/M\omega_0$ – безразмерный показатель затухания.

Рассмотрим режим работы датчика вибрации инерционного действия. Относительное перемещение $y(t)$ инерционного элемента и массы в зависимости от отношения частоты измеряемой вибрации и собственной частоты датчика пропорционально либо виброперемещению, либо виброскорости, либо виброускорению. В зависимости от того, какую колебательную величину требуется измерить, параметры колебательной системы M , h , y или ω_0 , ϵ должны удовлетворять определенным требованиям. Если эти условия таковы, что y –

относительное перемещение основания и центра тяжести масс пропорционально виброперемещению, то датчик работает в режиме виброметр, если виброскорости – в режиме велосиметра, если виброускорению – в режиме акселерометра [14].

3.2 Архитектура измерительного устройства

Приведено описание устройства для снятия измерительных данных с акселерометров инерционного действия и их передачи на персональный компьютер. Архитектура измерительного устройства изображена на рис. 12.

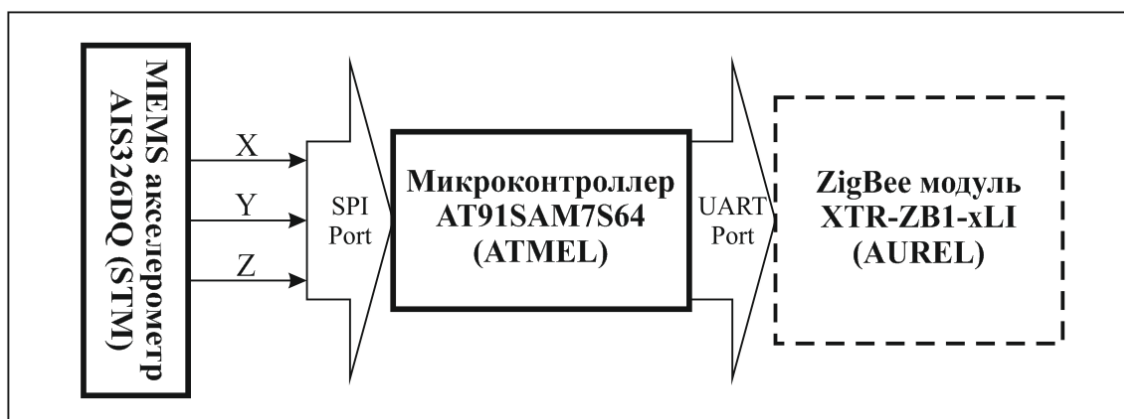


Рис. 12 Архитектура измерительного устройства

Используются следующие акселерометры:

- AIS326DQ (трехосный МЭМС акселерометр, динамический диапазон $\pm 2g/\pm 6g$, частотный диапазон до 640 Гц, производитель STMicroelectronics);
- LIS244AL (двухосный МЭМС акселерометр, динамический диапазон $\pm 2g$, частотный диапазон до 1 кГц, производитель STMicroelectronics).

За основу устройства принята отладочная плата с микроконтроллером AT91SAM7S64 (архитектура ARM7, производитель ATMEL). Для передачи измерительных данных на персональный компьютер планируется использовать беспроводные модули XTR-ZB1-xLI (производитель Aurel), поддерживающие стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee).

На настоящий момент выполнено следующее:

- изготовлены интегральные платы для акселерометров;
- выполнено программирование микроконтроллера AT91SAM7S64 с помощью открытой среды разработки WinARM и программного обеспечения SAM-PROG v2.4;

- выполнено подключение акселерометра AIS326DQ к микроконтроллеру AT91SAM7S64 через SPI порт (электронная схема представлена в приложении А);
- выполнена организация обмена данными между микроконтроллером AT91SAM7S64 и персональным компьютером через соединение USB A/USB B с помощью открытого программного обеспечения Terminal v1.9 b;
- изготовлен стенд-макет для испытания и демонстрации работы акселерометров (подробнее информация изложена в п.3.3);
- в системе LabView разработан виртуальный прибор для обработки и анализа данных, реализующий быстрое преобразование Фурье.

3.2.1 Микроконтроллер AT91SAM7S64

Микроконтроллеры (МК) семейства AT91SAM7 с ядром ARM7 производится компанией Atmel для встраиваемых приложений, и создания на их основе пользовательских проектов. К основным областям применения МК с ядром ARM7 относятся: телекоммуникации, портативные измерительные устройства, автомобильная техника и прочее.

Некоторые характеристики микроконтроллера AT91SAM7S64:

- процессорное ядро ARM7, обеспечивающее 32-битную RISC-архитектуру;
- встроенная высокоскоростная флэш-память (Flash) 64 Кбайт;
- встроенная высокоскоростная оперативная память (SRAM) 16Кбайт;
- универсальные синхронно-асинхронный приемопередатчик (USART);
- последовательный периферийный интерфейс (SPI).

Общая блок-схема микроконтроллера представлена в приложении Б.

Средства разработки приложений для МК

Средства разработки можно разделить на открытые и коммерческие, при этом функциональные возможности у программных продуктов примерно одинаковые.

IAR. Существует несколько версий среды разработки, которые значительно отличаются функциональными возможностями. Существует открытая версия IAR Kickstart, ограниченная на максимальную длину выходного бинарного файла – до 32 Кбайт.

WinARM. Открытая среда разработки на основе компилятора GNU C/C++. К преимуществам можно отнести отсутствие ограничений на размер файла и другие. К недостаткам – более сложную процедуру настройки.

В данной работе использовалась открытая среда разработки WinARM.

Подключение акселерометра выполнялось через последовательный периферийный интерфейс (Serial Peripheral Interface, SPI). Приведем описание данного интерфейса МК.

Последовательный периферийный интерфейс (SPI)

Последовательный периферийный интерфейс реализует синхронный последовательный канал связи, который обеспечивает обмен данными МК с внешними устройствами в ведущем или ведомом режиме. По существу SPI представляет собой сдвиговый регистр, который последовательно передает биты другим (удаленным) SPI. Во время передачи данных одно устройство действует как ведущее (Master), которое управляет потоком данных, в то время как другие устройства действуют как ведомые (Slave), которые используют сдвиг данных ведущим устройством.

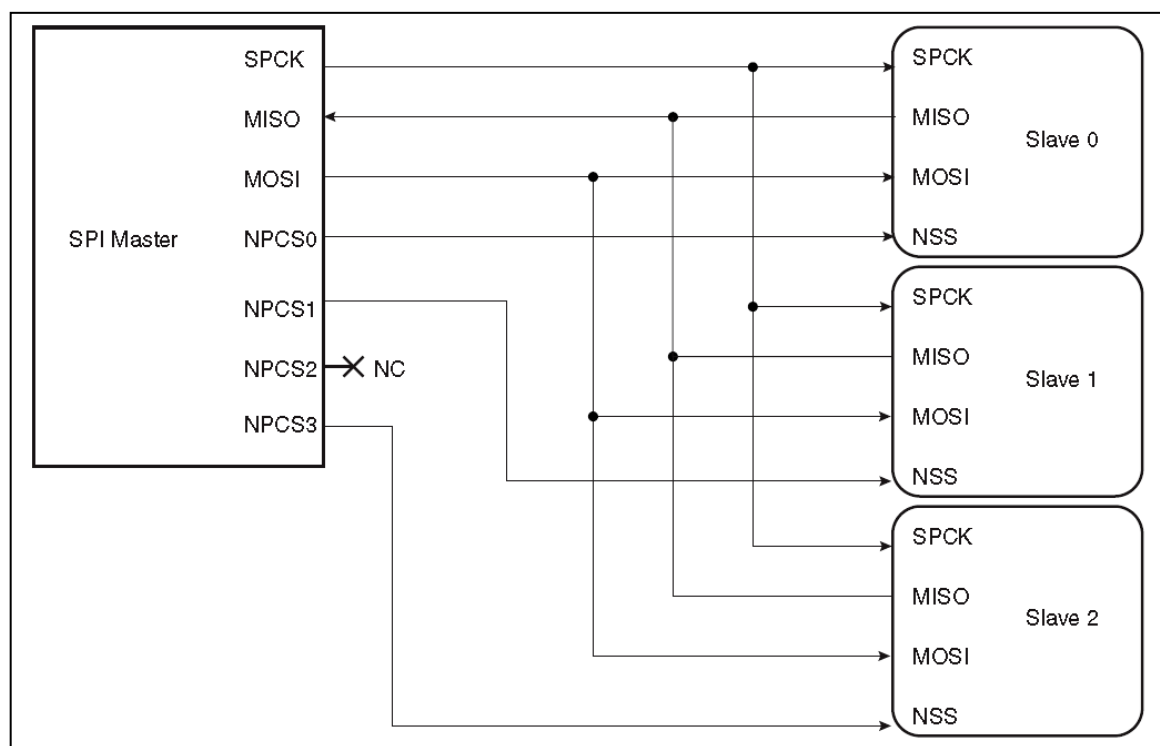


Рисунок 13 – Система с одним ведущим (МК) и несколькими ведомыми устройствами SPI

Интерфейс SPI состоит из двух линий передачи данных и двух линий управления (рисунок 13), описание которых приведено ниже.

- Выход ведущего-вход ведомого (MOSI). Линия передачи данных выдает данные от ведущего, сдвигая их на вход ведомого/ведомых.

- Вход ведущего-выход ведомого (MISO). Линия передачи данных выдает данные от ведомого на вход ведущего по сдвигу последнего. В каждый момент времени передавать данные может не более чем один ведомый.
- Последовательный синхросигнал (SPCK). Эта линия тактирования управляется ведущим и задает сдвиг информационных битов.
- Выбор ведомого устройства (NSS). Линия управления, которая позволяет аппаратным средствам ведущего включать и выключать подключенные к шине SPI ведомые устройства [18].

3.2.2 МЭМС акселерометры STMicroelectronics

Приведено описание акселерометров LIS244AL и AIS326DQ производства STMicroelectronics.

STMicroelectronics — европейская компания, одна из крупнейших, занимающихся разработкой, изготовлением и реализацией различных полупроводниковых электронных и микросистемных компонентов.

Акселерометр LIS244AL

Компактный (4x4x1,5 мм, масса 0,040 грамма) двухосный МЭМС акселерометр. Датчик имеет аналоговый выход, что делает удобным обработку его сигналов с использования осциллографа.

Акселерометр способен фиксировать механические колебания до 1 кГц, при этом фиксируемая частота зависит от используемых на выходах датчика конденсаторов (например, для получения выходной частоты 1 Гц требуется установить на выходах X и Y датчиков 5 мкФ, а для 500 Гц – 10 нФ).

Рабочий диапазон температур составляет от -40 °C до +85 °C. Внешний вид, расположение осей и схема контактов датчика представлена на рисунок 14. Схема подключения акселерометра приведена в приложении В.

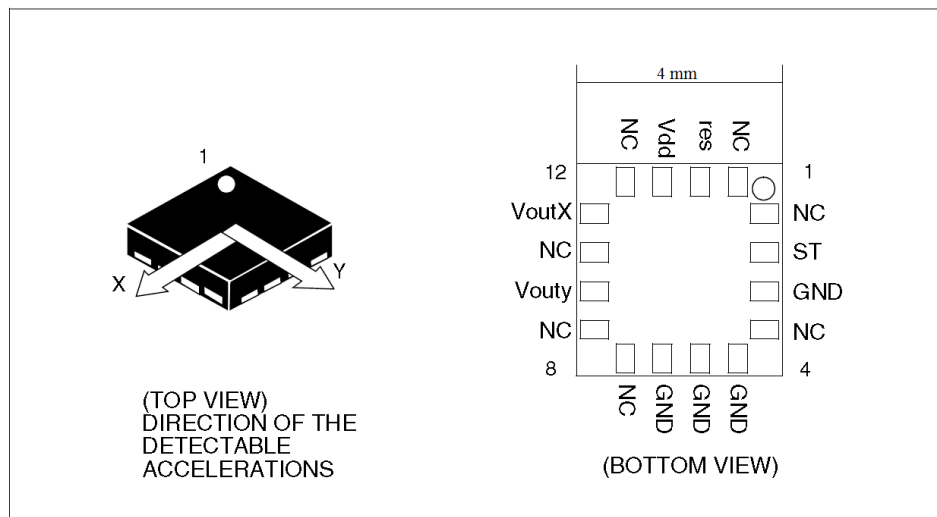


Рисунок 14 – Двухосный акселерометр LIS244AL

Необходимо отметить вопрос о терминологии, применяемой к характеристикам датчика.

Динамический диапазон – это максимальная амплитуда, которую акселерометр может измерить без искажения или потери выходного сигнала. Для LIS244AL динамический диапазон составляет $\pm 2g$.

Чувствительность акселерометра – это коэффициент преобразования выходного сигнала датчика относительно входного сигнала. Чувствительность измеряется в величинах В/г (отношение выходного напряжения к ускорению). Определяется путем применения известного ускорения 1g. Это может быть сделано указанием одной из осей (X или Y) на центр Земли, фиксируя при этом выходное значение сигнала, затем повернув датчик на 180 градусов необходимо снова зафиксировать выходное значение сигнала. В результате вычитания большего выходного значения из меньшего и деления полученного результата на 2 можно получить реальное значение чувствительности датчика, соответствующее приложенному ускорению в 1g. Чувствительность LIS244AL определяется следующим образом

$$Sensitivity = 0.140 \cdot Vdd, [Sensitivity] = B/g,$$

где Vdd – напряжение питания датчика, которое составляет 3 В.

Частотный диапазон – диапазон частот, в котором датчик обнаруживает движение и выдает действительный выходной сигнал. Иногда называется частотным откликом, измеряется в Гц. Более подробное описание акселерометра можно получить в [19].

Акселерометр AIS326DQ

Компактный (7x7x1,8 мм, масса 0,2 грамма) трехосный МЭМС акселерометр. Датчик имеет цифровой SPI выход, что делает его удобным для подключения к МК и дальнейшей обработки данных на персональном компьютере.

Датчик может работать в двух динамических диапазонах $\pm 2g$ и $\pm 6g$, фиксирует механические колебания в частотном диапазоне до 640 Гц. Рабочий диапазон температур составляет от -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$. Внешний вид, расположение осей и схема контактов датчика представлена на рисунок 15. Схема подключения акселерометра приведена в приложении В.

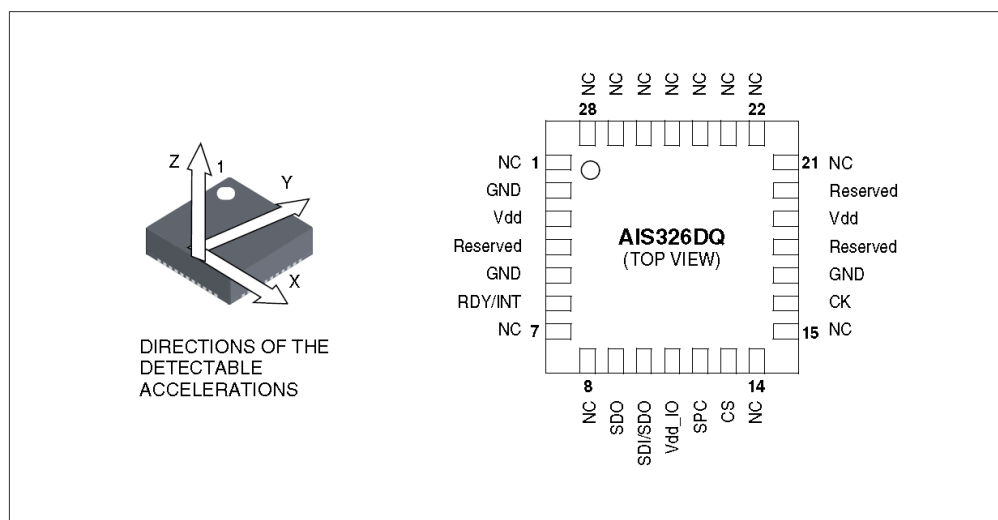


Рисунок 15 – Трехосный акселерометр AIS326DQ

Чувствительность акселерометра различная для разных динамических диапазонов: для $\pm 2g$ чувствительность колеблется от 952 до 1096 LSb/g; для $\pm 6g$ от 316 до 362 LSb/g. LSB – Last Significant Bit (последний значащий бит). Такое представление чувствительности связано со следующей особенностью акселерометра: выходные данные с датчика поступают в цифровом 12 битном виде, т.е. проходят через аналого-цифровой преобразователь, расположенный в акселерометре. Поэтому на выходах датчика нельзя получить значение напряжения, а можно получить цифровое 12 битное представление LSB, с помощью которого и определяется чувствительность [20].

3.3 Стенд-макет для изучения работы акселерометров

Для испытания измерительного устройства изготовлен стенд-макет сооружения. Источником механических колебаний стенда служит металлический эксцентрик (в виде эллипса), который приводится в действие электродвигателем

низкого напряжения. На макете установлены двухосные акселерометры LIS244AL с аналоговым выходом, трехосные акселерометры AIS326DQ с цифровым выходом, модули мониторинга механических колебаний MotionBee (рисунки 16,17).

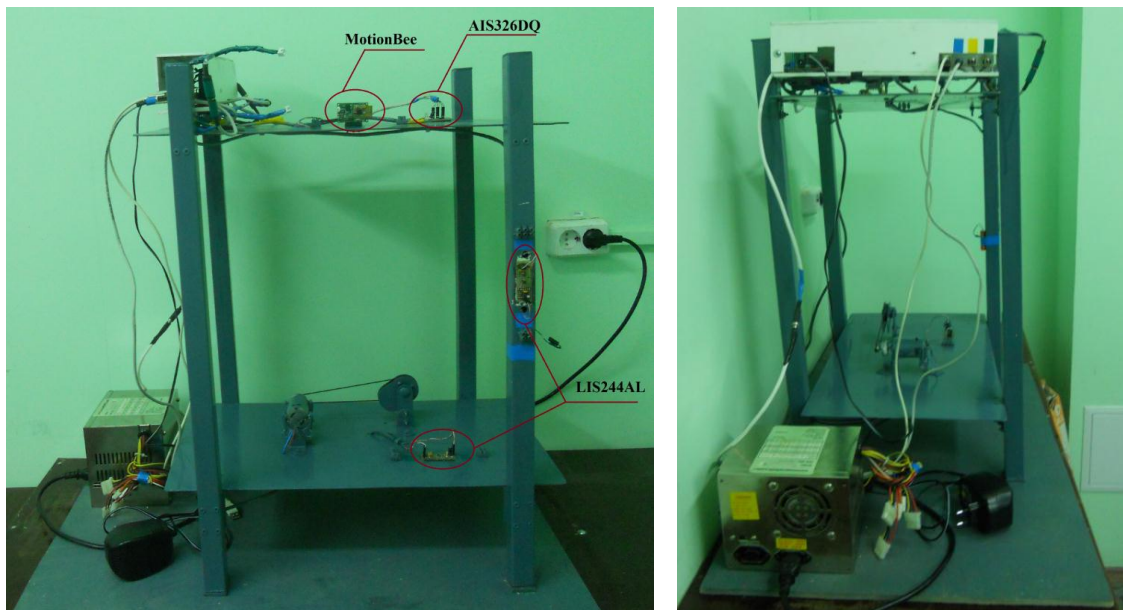


Рисунок 16 – Стенд-макет с металлическим эксцентриком

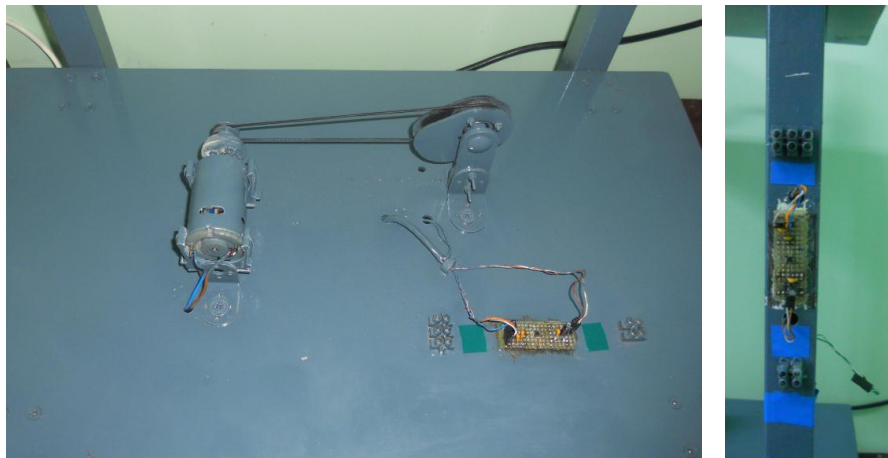


Рисунок 17 – МЭМС акселерометры STMicroelectronics на стенде

Основными функциями стенда являются:

- испытание работы двухосных акселерометров LIS244AL с аналоговым выходом с целью изучения выходных сигналов на осциллографе;
- испытание трехосных акселерометров AIS326DQ с цифровым SPI выходом с целью обработки и изучения выходных данных на персональном компьютере;
- испытание работы модуля механических колебаний MotionBee.

На сегодняшний момент функционал стенда обеспечивает:

- возбуждение механических колебаний стенда с использованием металлического эксцентрика;
- автоматический запуск и регулировку режима работы двигателя, приводящего во вращение эксцентрик;
- передачу данных от акселерометров следующими способами: проводная передача аналоговых данных на осциллограф, проводная передача аналоговых данных на персональный компьютер, передача цифровых данных от МК с помощью проводного соединения USB A/USB B на персональный компьютер.

3.4 Беспроводной модуль мониторинга механических колебаний MotionBee

MotionBee обеспечивает сбор измерительной информации с встроенного трехосного МЭМС акселерометра и беспроводную передачу на персональный компьютер, используя протокол IEEE 802.15.4 (ZigBee). Модуль состоит из устройств двух видов:

1 Измерительное устройство SPMB250-A1 (размер 49x27x5 мм), представлено на рисунок 18.

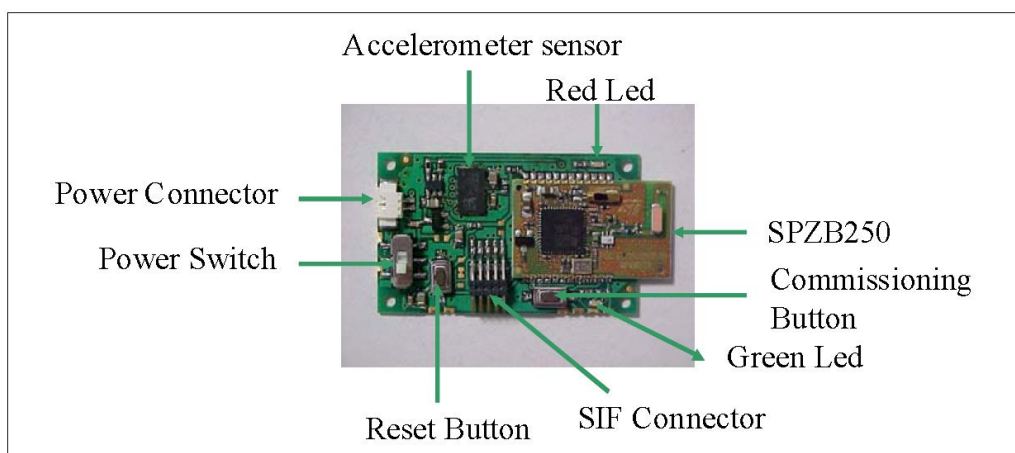


Рисунок 18 – Измерительное устройство механических колебаний

Основным чувствительным элементом устройства является трехосный акселерометр LIS3LV02DL, имеющий два динамических диапазона $\pm 2g$ и $\pm 6g$ и фиксирующий механические колебания с частотой до 640 Гц. Устройство предназначен для мониторинга механических колебаний и беспроводной передачи данных на устройство сбора данных.

2 Устройство сбора данных, представлено на рисунок 19.

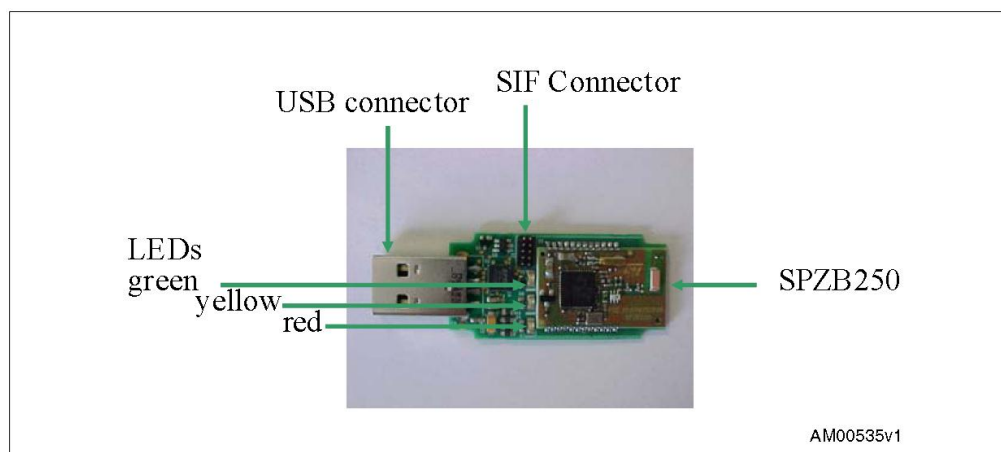


Рисунок 19 – Устройство сбора данных

Устройство обеспечивает сбор измерительных данных от нескольких устройств SPMB250-A1 и их передачу на персональный компьютер [21].

4 Обработка и анализ измерительных данных механических колебаний

Под анализом механических колебаний понимается исследование функциональных зависимостей измеряемых параметров колебаний от переменных. В качестве переменных наиболее часто используют время, частоту, пространственную координату и другие переменные. При исследовании колебаний как функции времени анализируют форму временного сигнала, а также параметры распределения плотности распределения вероятностей мгновенных значений. При частотном анализе используют спектральный анализ механических колебаний.

Механические колебания оборудования и инженерных сооружений содержит большое количество компонент разного происхождения, это объясняется тем, что в каждом объекте существует много разных источников колебательных сил разной природы и с разными свойствами. Поэтому результат мониторинга деформаций по измерениям механических колебаний напрямую зависит от того, насколько успешно решена задача разделения колебательного сигнала на компоненты различной природы.

В данной главе рассматривается частотный (спектральный) анализ механических колебаний, а именно преобразование Фурье. Приводится описание разработанного инструмента для анализа и обработки данных, получаемых с МЭМС акселерометров LIS244AL.

4.1 Определение деформаций по измерениям механических колебаний

Методы определения деформаций инженерных сооружений и промышленного оборудования по механическим колебаниям во многом основаны на методах виброакустической диагностики (описание общего подхода, применяемого в вибродиагностике приведено в пункте 2.3.4).

Необходимо отметить, что не существует универсальных методов анализа механических колебаний для определения деформаций оборудования и сооружений. Необходима оптимизация совокупности используемых методов анализа для решения конкретной диагностической задачи для конкретного вида сооружений и оборудования. Задача определения деформаций по механическим колебаниям сводится к выявлению и анализу параметров колебаний, чувствительных к деформациям и дефектам. Среди методов анализ механических колебаний можно выделить следующие.

- Анализ механических колебаний во временной области:

- анализ формы сигнала (определение формы отдельных компонентов колебательного процесса, которые выделяются среди остальных);
- статистический анализ (оценка отличия параметров реального распределения плотности вероятности сигнала от нормального закона распределения, определение пороговых значений для параметров колебательного процесса и их изменение во времени, установление статистических связей между компонентами колебаний);
- корреляционный анализ (выявление статистических характеристик в сигнале, описывающем колебательный процесс);
- анализ собственных колебаний (набор собственных колебаний называется модой (характеризуется частотой, формой и коэффициентом потерь), таким образом анализ собственных колебаний сводится к модальному анализу).
 - Анализ механических колебаний в частотной области:
 - спектральный анализ (используется для разделения сигналов на простейшие составляющие в частотной области, данный вид анализа эффективен в случаях, когда сигналы имеют аддитивные периодические компоненты);
 - и другие методы [14].

Необходимо отметить, что за рубежом в рамках развивающегося направления *Structural Health Monitoring* (определение и основные принципы изложены в пункте 2.1), для определения деформаций инженерных сооружений получили распространение методы анализа временных рядов вибрационного сигнала [22].

В данной работе для анализа измерительных данных с акселерометров используется быстрое фурье-преобразование.

4.2 Преобразование Фурье

Частотный анализ механических колебаний позволяет разделить колебания на компоненты разной частоты, возбуждаемые разными источниками колебательных сил и имеющие разную природу и разные свойства. Частотный анализ во многом основан на применении преобразования Фурье, описание которого приведено ниже.

Любая функция, периодически воспроизводящая свои значения, может быть представлена в виде суммы синусов и/или косинусов различных частот, умноженных на некоторые коэффициенты (эта сумма носит название *ряд Фурье*). Сложность поведения функции при этом не имеет значения. Данный метод в 1822 году предложил французский математик Жан Батист Жозеф Фурье.

Когда функция не является периодической (но площадь под ее графиком конечна), она может быть выражена в виде интеграла от синусов и/или косинусов, умноженных на некоторую весовую функцию. В таком случае мы имеем дело с преобразованием Фурье.

Оба представления обладают важной характерной особенностью. Функция, заданная как рядом, так и преобразованием Фурье, может быть полностью восстановлена (реконструирована) при помощи некоторой процедуры обращения.

Одномерное преобразование Фурье

Прямое фурье-преобразование $F(u)$ непрерывной функции одной переменной $f(x)$ определяется равенством

$$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-i2\pi ux} dx,$$

где i – мнимая единица. Наоборот, по заданному фурье-преобразованию $F(u)$ можно получить исходную функцию $f(x)$ при помощи обратного преобразования Фурье

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u)e^{i2\pi ux} du.$$

Эти преобразования составляют пару преобразований Фурье, а входящие в них функции образуют фурье-пару. Указанные выше преобразования можно легко распространить на функции двух переменных.

Прямое преобразование Фурье дискретной функции одной переменной $f(x), x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, задается равенством

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x)e^{-\frac{i2\pi ux}{M}}, u = 0, 1, 2, \dots, M - 1. \quad (9)$$

Также по заданному фурье-преобразованию $F(u)$ можно восстановить исходную функцию при помощи обратного дискретного преобразования Фурье

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u)e^{\frac{i2\pi ux}{M}}, x = 0, 1, 2, \dots, M - 1.$$

Вычисление фурье-преобразования $F(u)$ по формуле (9) осуществляется следующим образом. Вначале необходимо подставить значение $u = 0$ в показатель экспоненты и произвести суммирование по всем значениям переменной x . Для получения полного фурье-образа мы повторяем этот процесс для всех M значений

переменной u . Как и исходная функция $f(x)$, фурье-образ является дискретной величиной и содержит то же количество компонент (элементов). Аналогичные замечания следует отнести и к вычислению обратного преобразования Фурье.

Используя формулу Эйлера $e^{i\theta} = \cos\theta + i \sin\theta$, получаем

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\cos \frac{2\pi ux}{M} - i \sin \frac{2\pi ux}{M} \right], u = 0, 1, 2, \dots, (M-1). \quad (10)$$

Таким образом, каждый элемент фурье-преобразования (т.е. значение $F(u)$ для каждого значения u) состоит из суммы по всем значениям функции $f(x)$. Значения функции $f(x)$, в свою очередь, умножаются на синусы и косинусы разных частот. Область значений переменной u , на которой принимает свои значения функция $F(u)$ называют частотной областью, поскольку значение переменной u определяет частоты слагаемых, составляющих преобразование (значения переменной x также влияют на частоты, но поскольку по этой переменной производится суммирование, это влияние одинаково для всех значений переменной u). Каждый из M элементов функции $F(u)$ называется частотной компонентой преобразования. Использование терминов частотная область и частотные компоненты по существу не отличаются от использования терминов временная область и временные компоненты, которые обозначают область определения и значения функции $f(x)$ в случае, когда x – временная переменная.

Для прямого вычисления одномерного преобразования Фурье с использованием выражения (9) для массива, состоящего из M точек, требуется порядка M^2 операций умножения/сложения.

Быстрое преобразование Фурье

Одной из главных причин, способствующих превращению дискретного преобразования Фурье в инструмент обработки сигналов, стало создание алгоритма быстрого преобразования Фурье. Приведем основные выражения этого метода.

Запишем формулу (9) в виде

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) W_M^{ux}, \text{ где } W_M = e^{-i2\pi/M}.$$

Относительно числа M предполагается, что $M = 2^n$, где n – целое положительное число, откуда следует, что $M = 2K$, где K – целое положительное число. Таким образом, можно получить

$$F(u) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{K} \sum_{x=0}^{K-1} f(2x) W_K^{ux} + \frac{1}{K} \sum_{x=0}^{K-1} f(2x+1) W_K^{ux} W_{2K}^u \right].$$

Приняв по определению

$$F_{even}(u) = \frac{1}{K} \sum_{x=0}^{K-1} f(2x) W_K^{ux}, \text{ где } u = 0, 1, 2, \dots, K-1 \text{ и}$$

$$F_{odd}(u) = \frac{1}{K} \sum_{x=0}^{K-1} f(2x+1) W_K^{ux}, \text{ где } u = 0, 1, 2, \dots, K-1,$$

можно получить

$$F(u+K) = \frac{1}{2} [F_{even}(u) - F_{odd}(u) W_{2K}^u].$$

Отличительной особенностью такого представления преобразования Фурье является число выполняемых операций:

- число операций умножения $m(n) = \frac{1}{2} M \log_2 M$;
- число операций сложения $3a(n) = M \log_2 M$.

Таким образом, вычисление, проводимое с использованием быстрого преобразования Фурье, требует операций порядка $M \log_2 M$. Данное обстоятельство позволяет производить вычисления с существенным увеличением скорости вычисления по сравнению с дискретным преобразованием Фурье [23].

4.3 Виртуальный прибор для обработки измерительных данных

Для обработки измерительных данных, получаемых от акселерометров, использовалась система LabView.

LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) — это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments. В работе использовалась студенческая версия LabVIEW Student Edition.

В данной системе был разработан виртуальный прибор (рисунок 20), который обеспечивает быстрое фурье-преобразование (англ. Fast Fourier Transform – FFT) измерительных данных от акселерометров.

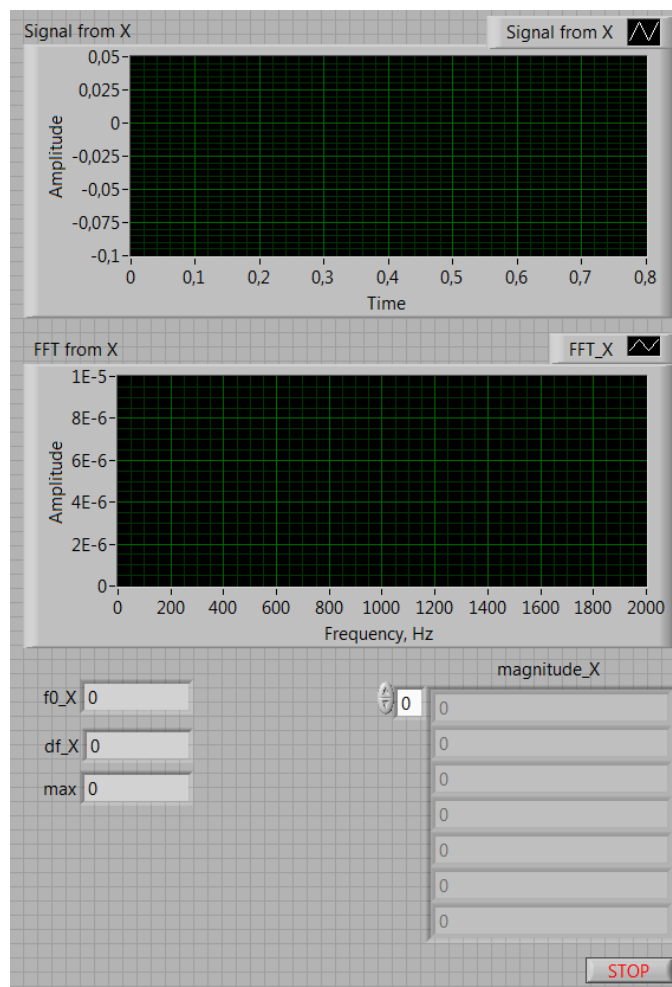


Рисунок 20 – Панель виртуального прибора

Блок-диаграмма виртуального прибора представлена в приложении Г.

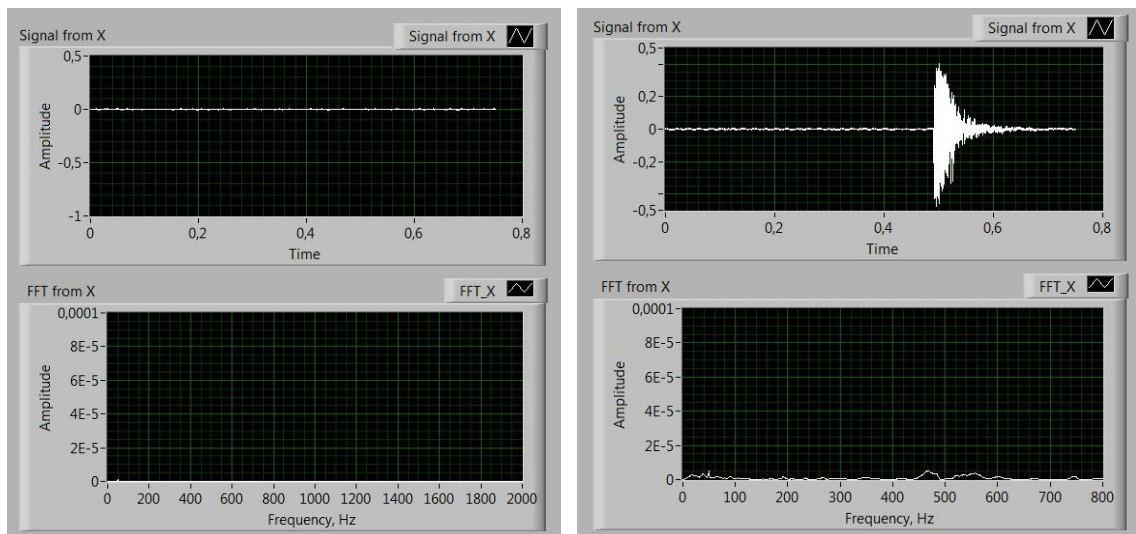
4.4 Анализ измерительных данных от акселерометра LIS244AL

С использованием разработанного стенда и виртуального прибора была проведена обработка измерительных данных с акселерометров LIS244AL. Обработка данных состояла в получении преобразования Фурье для определения набора частот, на которых происходят колебания.

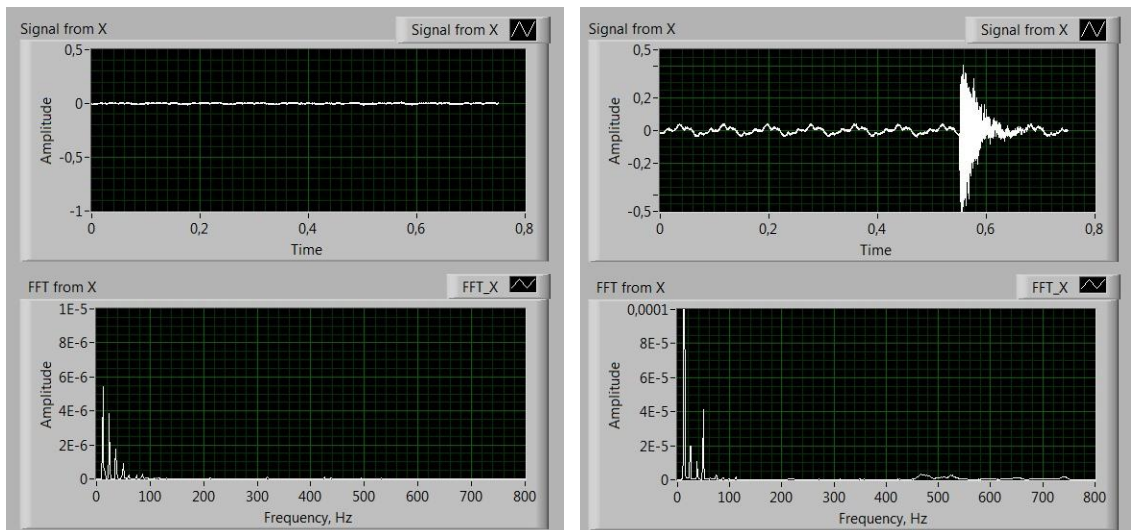
Для анализа работы стенда и акселерометров был поставлен эксперимент, основными этапами которого являлось:

1. получение данных при различных режимах работы возбудителя механических колебаний (возбудитель выключен, работает на низких, средних и высоких частотах);
2. оказание ударного воздействия на элемент стенда при различных режимах работы и получение данных об изменении частотного спектра.

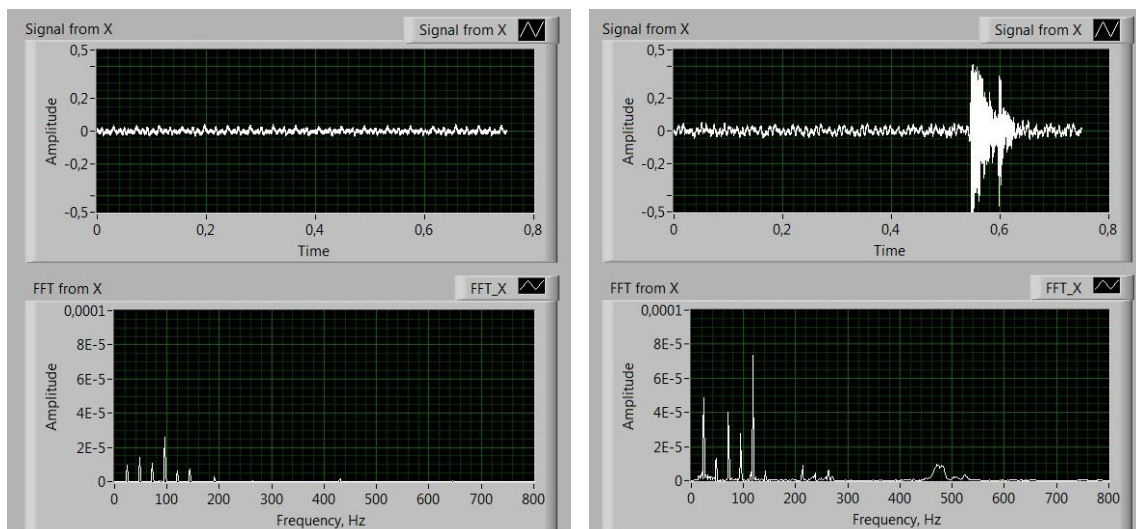
Результаты полученные с использованием виртуального прибора представлены на рисунке 21.



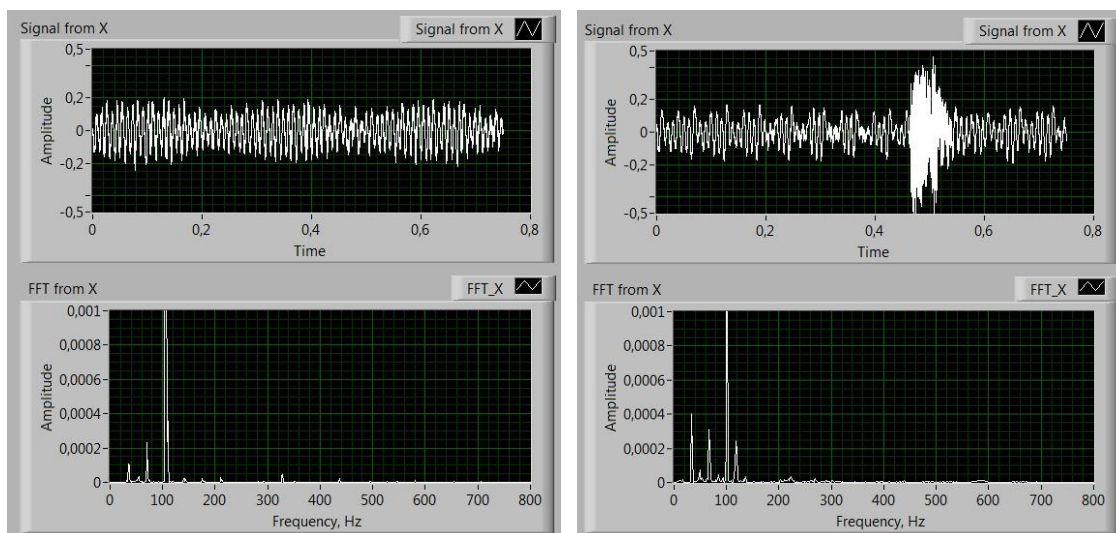
а) возбудитель мех. колебаний выключен



б) возбудитель мех. колебаний работает в режиме с низкими оборотами



в) возбудитель мех. колебаний работает в режиме со средними оборотами



г) возбудитель мех. колебаний работает в режиме с высокими оборотами

Рисунок 21 – Результаты, полученные от акселерометра LIS244AL

Примечание: на рисунке слева представлен виртуальный прибор, получающий и обрабатывающий данные с датчика в 4-х режимах работы возбудителя; на рисунке справа виртуальный прибор, обрабатывающий данные при оказании ударного воздействия в 4-х режимах работы возбудителя.

Из полученных данных можно сделать вывод, что с использованием акселерометра LIS244AL ударные воздействия на стенд можно зафиксировать на частотах от 400 до 600 Гц.