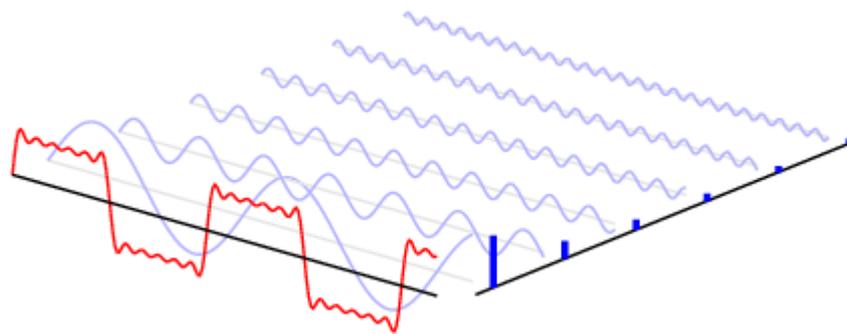


# Руководство к лабораторному практикуму:

## Измерения и измерительные приборы

С использованием набора Measurements Part для NI ELVIS III



Лабораторная работа 8:  
Проект системы измерения вибраций

© 2018 National Instruments

All rights reserved. Данный ресурс и любые его части не могут быть скопированы или в любой форме воспроизведены иным способом без письменного разрешения издателя.

National Instruments относится с уважением к чужой интеллектуальной собственности и призывает к этому же своих читателей. Данный ресурс защищен законами об охране авторских прав и прав на интеллектуальную собственность. Вы имеете право передавать программное обеспечение и прочие материалы, разработанные с помощью описанного в данном ресурсе программного обеспечения, третьим лицам в соответствии с условиями приобретенной вами лицензии и другими законодательными ограничениями.

LabVIEW и National Instruments являются торговыми марками National Instruments.

Названия других упомянутых торговых марок и изделий являются собственностью их правообладателей.

**Дополнительные ограничения ответственности:** Читатель принимает все риски от использования данного ресурса и всей информации, теорий и программ, содержащихся или описанных в нем. Данный ресурс может содержать технические неточности, типографические ошибки, прочие ошибки и упущения, и устаревшую информацию. Ни автор, ни издатель не несут ответственности за любые ошибки или неточности, за обновление любой информации и за любые нарушения патентного права и прочих прав на интеллектуальную собственность.

Ни автор, ни издатель не дают никаких гарантий, включая, но не ограничиваясь, любую гарантию на достаточность ресурса и любой информации, теорий или программ, содержащихся или описанных в нем, и любую гарантию, что использование любой информации, теорий или программ, содержащихся или описанных в ресурсе, не нарушит любое патентное право или иное право на интеллектуальную собственность. РЕСУРС ПОСТАВЛЯЕТСЯ "КАК ЕСТЬ". ИЗДАТЕЛЬ ЗАЯВЛЯЕТ ОБ ОТКАЗЕ ОТ ЛЮБЫХ ГАРАНТИЙ, ЯВНО ВЫРАЖЕННЫЕ ИЛИ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫХ, ВКЛЮЧАЯ, НО НЕ ОГРАНИЧИВАЯСЬ, ЛЮБЫЕ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫЕ ГАРАНТИИ ТОВАРНОГО СОСТОЯНИЯ, ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ЦЕЛИ И НЕНАРУШЕНИЯ ПРАВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ.

Издатель или автор не предоставляют прав или лицензий под любым патентным правом или иным правом на интеллектуальную собственность прямо, косвенно или лишением права на возражение.

НИ ПРИ КАКИХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ ИЗДАТЕЛЬ ИЛИ АВТОР НЕ НЕСУТ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЗА ПРЯМЫЕ, КОСВЕННЫЕ, ОСОБЫЕ, СЛУЧАЙНЫЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИЛИ ВТОРИЧНЫЕ УБЫТКИ, ПОНЕСЕННЫЕ ИЗ-ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭТОГО РЕСУРСА ИЛИ ЛЮБОЙ ИНФОРМАЦИИ, ТЕОРИЙ ИЛИ ПРОГРАММ, СОДЕРЖАЩИХСЯ ИЛИ ОПИСАННЫХ В НЕМ, ДАЖЕ БУДУЧИ ПРЕДУПРЕЖДЕННЫ О ВОЗМОЖНОСТИ ПОДОБНЫХ УБЫТКОВ, И ДАЖЕ ЕСЛИ УБЫТКИ ВЫЗВАНЫ НЕБРЕЖНОСТЬЮ ИЗДАТЕЛЯ, АВТОРА ИЛИ ИНЫХ ЛИЦ, Применимое законодательство может не разрешить исключение или ограничение случайных или косвенных убытков, поэтому приведенные выше ограничения или исключения могут вас не касаться.

## Лабораторная работа 8: Проект системы измерения вибраций

В этой лабораторной работе вы воспользуетесь методами, описанными в предыдущих работах, разработаете и реализуете систему измерения вибраций.

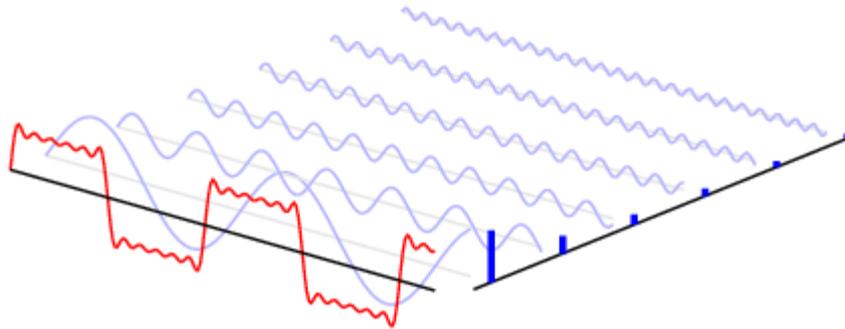


Рисунок 1

### Цель работы

После выполнения данной лабораторной работы вы сможете:

1. Объяснять характеристики сигнала и датчика, соответствующие заданию на разработку системы измерения вибраций
2. Разрабатывать и реализовывать схему кондиционирования сигнала для измерения вибраций
3. Обсуждать разрешающую способность и частоту дискретизации
4. Выполнять измерение вибрации и анализировать измеренный сигнал

## Необходимые инструментальные средства и технологии

Платформа: NI ELVIS III

- Используйте необходимые измерительные приборы NI ELVIS III

**Примечание:** для работы с приборами NI ELVIS III требуется комплект кабелей и аксессуаров (приобретается отдельно).

✓ Руководство пользователя:

<http://www.ni.com/en-us/support/model.ni-elvis-iii.html>

✓ Учебные пособия:

[https://www.youtube.com/playlist?list=PLvcPIuVaUMIWm8ziaSxv0gwtshBA2dh\\_M](https://www.youtube.com/playlist?list=PLvcPIuVaUMIWm8ziaSxv0gwtshBA2dh_M)

Технические средства:  
Макетная плата NI ELVIS III

Учебное пособие по макетной плате:

<http://www.ni.com/tutorial/54749/en>

Компоненты измерительных систем:  
Комплект Measurements Part Kit

Компоненты, используемые в этой лабораторной работе:

- Датчик вибраций MiniSense 100
- Устройство для генерации вибраций
- Различные дискретные компоненты для сборки схем преобразования сигналов

Программное обеспечение:  
NI Multisim Live

- Вы можете использовать Multisim для моделирования схем прежде, чем реализовывать их из реальных компонентов.

✓ Онлайн-доступ: <http://multisim.com>

✓ Справка по Multisim:

<http://multisim.com/help/>

Программное обеспечение: LabVIEW

Версия 18.0 или выше

Тулкиты и модули

- Модуль LabVIEW Real-Time
- Туллит NI ELVIS III

✓ Перед загрузкой и установкой программного обеспечения обратитесь к преподавателю или лаборанту за информацией о лицензиях на программное обеспечение и об инфраструктуре вашей лаборатории

✓ Загрузка и установка

для NI ELVIS III:

<http://www.ni.com/academic/download>

✓ Учебные пособия:

<http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/>

## Ожидаемые результаты:

В этой лабораторной работе вы должны спроектировать и реализовать измерительную систему, соответствующую требованиям конкретного задания. Вам придется неоднократно выбирать и принимать решения, а затем вы должны будете протестировать разработанную систему, чтобы убедиться, что она удовлетворяет требованиям задания.

В данной работе будут реализованы 4 операции из последовательности преобразований сигналов, рассмотренные в предыдущих лабораторных работах:

- Сигналы и датчики
- Преобразование (кондиционирование) сигналов
- Аналого-цифровое преобразование и дискретизация сигналов
- Программное обеспечение и обработка данных

Вы можете обращаться к предыдущим лабораторным работам за информацией. В ходе выполнения данной работы вам будут задаваться вопросы, ответы на которые помогут вам в процессе проектирования и реализации системы.

В конечном счете вы реализуете измерительную систему и предоставите документацию, детально описывающую ваши решения в ходе проектирования и окончательный вариант спроектированной системы. Преподавателю, скорее всего, необходимо предъявить полный отчет о работе. Узнайте у вашего преподавателя, есть ли конкретные требования к отчету или шаблон для его оформления.

## 1.1 Задание на проектирование системы измерения вибраций

### Исходные данные

Инженеры оценивают, какие движущиеся части нуждаются в замене или техобслуживании, сравнивая изменение характеристик вибраций. Это называется прогнозированным техническим обслуживанием. Вы можете узнать больше здесь: [https://en.wikipedia.org/wiki/Predictive\\_maintenance](https://en.wikipedia.org/wiki/Predictive_maintenance)

Разрабатываемая система должна измерять параметры вибрации механической системы и выполнять быстрое преобразование Фурье результатов измерений для последующего анализа.

Для тестирования вам потребуются вибрирующие устройства, такие как сотовые телефоны, камертоны, упругие элементы и т.п. Вам нужно будет создать программу тестирования, соответствующую особенностям выбранного "тестируемого устройства". Проанализировав вибрации тестируемого устройства в режиме нормального функционирования и приняв параметры этих вибраций за "эталон", вы должны контролировать вибрацию в течение 5 минут.

Вы должны подтверждать, что пики в спектре частот вибрации остаются неизменными, а также сохранять результаты тестирования для любого 30-секундного интервала времени, в котором частота любого пика смещена более чем на 2 Гц от пика "эталона" или если амплитуда пика превышает амплитуду пика "эталона" более чем на 20%.

Ваша система должна удовлетворять следующим требованиям:

- Гарантировать, что частота дискретизации (а также любая реализованная фильтрация) достаточна, чтобы избежать нежелательных эффектов алиазинга.
- Диапазон обрабатываемых частот зависит от тестируемых устройств. Убедитесь, что ваша система может измерять в диапазоне частот до 40 Гц.

Прочтите здесь больше об пьезоэлектрических акселерометрах, которые будете использовать: <https://www.digikey.ca/product-detail/en/te-connectivity-measurement-specialties/1006015-1/223-1306-ND/5277266%C2%A0>

## 1.2 Сведения из теории

# Project Lab Vibration

## Introduction Video

Рисунок 1-1 Скриншот видео. Просмотр видео здесь: [https://youtu.be/hrM\\_Hn-l4Us](https://youtu.be/hrM_Hn-l4Us)



### Краткое содержание видео

- Вибрация – это перемещения или механические колебания механизма или его компонента относительно положения равновесия.
- Свободные вибрации возникают, когда по объекту ударяют, а затем дают ему возможность колебаться естественным образом. Вынужденные вибрации возникает при приложении изменяющейся силы.

### Что такое вибрация?

Вибрация – это перемещения или механические колебания механизма или его компонента относительно положения равновесия. Вибрация может быть периодической, например, вызываемая движением маятника, или случайной, например, при движении шины по дороге с гравийным покрытием. Вибрация может выражаться в метрических единицах ( $m/c^2$ ) или единицах

гравитационной постоянной "g", где  $1 g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Существует два вида вибраций объекта: свободная вибрация и вынужденная вибрация.

Свободная вибрация возникает, когда объект или конструкция смещаются или подвергаются воздействию, а затем ему позволяют колебаться естественным образом. Например, при ударе по камертону он звучит и, в конце концов, затухает. Частота, с которой структура "хочет" колебаться после удара или перемещения, называется собственной частотой. Резонанс – это тенденция системы к колебаниям на одних частотах сильнее, чем на других. Вынужденная вибрация на собственной частоте объекта или вблизи нее вызывает нарастание энергии внутри конструкции. Со временем такая вибрация может стать весьма большой даже при очень малой вынужденной вибрации, которая инициировала резонанс. Если собственные частоты системы соответствуют нормальной вибрации окружающей среды, система вибрирует сильнее и преждевременно выходит из строя.

Вынужденная вибрация возникает из-за приложенной изменяющейся силы. Вращательное или переменное движение может заставить объект вибрировать с неестественными частотами. Например, при дисбалансе в стиральной машине она трясется с частотой, равной частоте вращения барабана. При мониторинге состояния измерение вибрации используются для определения работоспособности вращающихся механизмов, таких как компрессоры, турбины или насосы. Они содержат множество деталей, и у каждой детали своя уникальная схема или характеристика вибрации. Отслеживая изменение характеристик вибрации во времени, вы можете предсказать, когда механизм выйдет из строя, и составить правильный график технического обслуживания для повышения безопасности и снижения затрат.

Высокая частота дискретизации при измерениях позволяет получить больше точек за определенный интервал времени и сформировать лучшее представление исходного сигнала, чем низкая частота.

Базовое уравнение для частоты дискретизации приведено ниже:

$$F_s \geq 2 * f_{\max}$$

*Уравнение 1-1*

где

$F_s$  = частота дискретизации в герцах

$f_{\max}$  = максимальная интересующая частота сигнала в герцах

При исследовании вращающегося механизма используют два ключевых параметра для расчета частоты дискретизации – максимальную анализируемую скорость вращения и максимальный анализируемый порядок. При измерении акустических сигналов и сигналов вибраций выберите частоту дискретизации в соответствии со следующим уравнением:

$$\text{sampling rate}_{\text{ sound and vibration}} \geq 2 * \text{max order} * \text{max speed (RPM)}/60$$

Частота дискретизации <sub>звук и вибрации</sub>  $\geq 2 * \text{максимальный порядок} * \text{максимальная скорость (об/мин)}/60$

**Примечание:** Сигналы вибрации обладают общими характеристиками, такими как:

- период
- частота
- перемещение
- скорость
- ускорение
- амплитуда
- фаза

## Преобразование Фурье

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) отображает функции, определенные во временной области, в частотную область. БПФ получают из уравнения преобразования Фурье:

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt ,$$

*Уравнение 1-2*

где  $x(t)$  - сигнал во временной области,  $X(f)$  – БПФ, а  $f$  – анализируемая частота.

Аналогично, дискретное преобразование Фурье (ДПФ) отображает последовательности с дискретным временем в представление с дискретной частотой. ДПФ задается следующим уравнением:

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi ik/n} \quad \text{for } k = 0, 1, 2, \dots, n-1 ,$$

*Уравнение 1-3*

где  $x$  - входная последовательность,  $X$  - ДПФ,  $n$  - количество отсчетов, как в дискретно-временной, так и в дискретно-частотной областях.

Прямая реализация ДПФ, как показано в уравнении 3, требует примерно  $n^2$  сложных операций. Однако для эффективных с точки зрения вычислений алгоритмов хватает всего  $n \log_2(n)$  операций. Это алгоритмы БПФ, как показано в уравнениях 4,5 и 6.

При использовании ДПФ, преобразование Фурье любой последовательности  $x$ , действительной или комплексной, всегда приводит к комплексной выходной последовательности  $X$  следующего вида:

$$F\{x\} = X = X_{\text{Re}} + j X_{\text{Im}} = \text{Re}\{X\} + j \text{Im}\{X\}.$$

*Уравнение 1-4*

ДПФ присуще следующее свойство:

$$X_{n-i} = X_i^*,$$

*Уравнение 1-5*

где  $(n-i)$ -й элемент  $X$  содержит результат  $-i$ -ой гармоники. Кроме того, если  $x$  является действительным,  $i$ -я и  $-i$ -я гармоники являются комплексно сопряженными:

$$X_{n-i} = X_i = X_i^*.$$

*Уравнение 1-6*

Следовательно,

$$\text{Re}\{X_i\} = \text{Re}\{X_{n-i}\},$$

*Уравнение 1-7*

и

$$\text{Im}\{X_i\} = -\text{Im}\{X_{n-i}\}.$$

*Уравнение 1-8*

являются сопряженно симметричными, симметричными или четно-симметричными и асимметричными или нечетно-симметричными.

### 1.3 Сигналы и датчики

Учитывая требования к заданию на проектирование, рассмотрите основные свойства измеряемого сигнала. Вспомните лабораторную работу *Сигналы и датчики* и подумайте, какие характеристики сигнала наиболее важны для реализации проекта. Рассмотрите основные этапы технического проектирования системы, приведенные ниже:

1. Постановка задачи
2. Сбор информации о задаче
3. Мозговой штурм и анализ возможных решений
4. Решение задачи
5. Тестирование проекта
6. Доработка проекта

1-1 Какие характеристики сигнала наиболее важны для выполнения задания и как его характеристики отражают измеряемую физическую величину?

---

---

- В имеющемся комплекте есть специальные датчики. Это означает, что фактически вы не сможете выбирать из всего многообразия существующих датчиков. Однако важно помнить, что в реальных условиях вам придется выбирать из множества датчиков, пригодных для решения задачи измерений.
- В нашем случае необходимо оценить, соответствуют ли датчик из предоставленного вам комплекта требованиям технического задания.

1-2 Какие характеристики выбранного вами датчика значительно превосходят требования задания?

---

---

---

---

1-3 Какие характеристики выбранного вами наиболее критичны для заданных требований?

---

---

---

---

## 1.4 Преобразование (кондиционирование) сигналов

Учитывая требования к заданию на проектирование, вы должны теперь определить, какой тип преобразования сигнала необходимо будет реализовать.

Вспомните из лабораторной работы *Преобразование сигналов*, что существует множество различных схем кондиционирования, соответствующих желаемому результату. Вы должны решить, какие схемы лучше всего подходят для реализации проекта.

1-4 Какое свойство выбранного датчика изменяется при изменении физического явления?

---

---

---

---

1-5 Как это изменение может быть передано в систему сбора данных через датчик?

---

---

---

---

1-6 Какой тип кондиционирования сигналов понадобится для выполнения задания?

---

---

---

---

- Пришло время спроектировать и реализовать схему кондиционирования сигнала, используя ваши ответы на приведенные выше вопросы.
- Не забудьте учесть условия измерений при сборке схемы.

1-7 Прикрепите к отчету документацию по вашему проекту. Это могут быть эскизы, скриншоты или любая другая имеющаяся у вас документация.

- Когда закончите сборку схемы, протестируйте ее.

1-8 Потребовалось ли внести какие-либо усовершенствования в ваш проект по результатам тестирования схемы кондиционирования?

---

---

---

---

## 1.5 Аналого-цифровой преобразователь и дискретизация

Учитывая требования к заданию на проектирование, теперь вы можете рассмотреть влияние АЦП и дискретизации на качество измерений.

**Примечание:** Вы можете найти дополнительную информацию в выполненной вами лабораторной работе *АЦП и дискретизация*.

1-9 Какое наименьшее изменение физической величины можно измерить с помощью АЦП (в единицах измерения физической величины)?

**Примечание:** Вы должны также учесть используемый тип кондиционирования сигнала.

---

---

1-10 Какая частота дискретизации требуется для решения поставленной задачи, и что необходимо учесть при выборе частоты дискретизации?

---

---

---

---

- Теперь разработайте простую программу сбора данных для измерения сигнала, получаемого после схемы кондиционирования.

1-11 Как формируется сигнал? Объясните ваши результаты. Нужно ли что-то изменить в схеме кондиционирования сигнала?

---

---

---

---

1-12 Изменяется ли результат измерения при изменении физической величины так, как предполагалось?

---

---

---

---

## 1.6 Программное обеспечение и обработка данных

Учитывая требования к заданию на проектирование, теперь вы должны разработать программное обеспечение и проанализировать результаты проектирования. Если нужна дополнительная информация, вернитесь к отчету выполненной вами лабораторной работы *Программное обеспечение и обработка данных*.

1-13 Какие методы сбора данных необходимы для выполнения задания?

---

---

1-14 Какие методы обработки данных лучше всего подойдут для выполнения задания?

---

---

1-15 Как вы преобразуете результаты измерения сигнала в инженерные единицы? Учтите чувствительность датчика, влияние схемы кондиционирования сигнала и нелинейность датчика.

---

---

- Разработайте программу сбора и обработки данных.
- Примите во внимание этапы процесса проектирования, а также ваши предыдущие проекты.

1-16 Опишите программное обеспечение и реализованный алгоритм обработки данных. Нужно было программно выполнять калибровку и/или линеаризацию?

---

---

---

---

- Теперь протестируйте вашу программу сбора и обработки данных.

1-17 Как вы можете улучшить программное обеспечение? Какие новые функции могут быть полезны для этой измерительной системы?

---

---

---

---

## 1.7 Тестирование системы

Настало время протестировать разработанную вами систему. Рассмотрите методологию подтверждения правильности измерений. Вам понадобится симулировать изменения физической величины в соответствии с исходными данными задания на проектирование.

1-18 ЗадOCUMENTИРУЙТЕ условия, при которых выполнялись измерение и тестирование, а также критерии, используемые для подтверждения корректности результатов. Как вы симулировали изменения физической величины? Как подтвердите, что ваша система измеряет вибрацию?

---

---

---

---

1-19 Удовлетворяет ли ваша система требованиям задания? Объясните, почему. Если система не удовлетворяет требованиям, как вы можете улучшить ваш проект?

---

---

---

---

1-20 Предоставьте доказательства соответствия требованиям задания окончательного варианта реализованной вами системы. Доказательства должны быть подкреплены схемами и/или скриншотами окончательного варианта измерительной системы.

## 1.8 Заключение

1-21 Какой этап проектирования и реализации вашей измерительной системы был самым трудным?

---

---

---

---

1-22 Как можно усовершенствовать вашу измерительную систему? Рассмотрите характеристики и надежность.

---

---

---

---