

## Оглавление

1. Основные термины и определения.....	4
2. Лабораторная работа №1 .....	12
2.1. Введение.....	12
2.2. Практические сведения.....	12
2.3. Описание лабораторной установки.....	13
2.4. Этапы выполнения лабораторной работы.....	15
2.5. Методика выполнения работы.....	15
2.6. Содержание отчета.....	17
3. Лабораторная работа №2.....	18
3.1. Введение.....	18
3.2. Практические сведения.....	18
3.3. Описание лабораторной установки.....	19
3.4. Этапы выполнения лабораторной работы.....	21
3.5. Методика выполнения работы.....	22
3.6. Содержание отчета.....	24
Литература.....	25
Приложение 1.....	26
Приложение 2.....	32

## 1. Основные термины и определения

*Метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Современная метрология включает в себя три составляющих:

1. законодательная.
2. фундаментальная (теоретическая).
3. практическая (прикладная).

*Законодательная метрология* – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений.

*Фундаментальная метрология* – раздел метрологии, отвечающий за создание и разработку фундаментальных основ метрологии (систем единиц измерения, физических постоянных, новых методов измерений).

*Практическая метрология* – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

*Средство измерений* – техническое средство, предназначенное для измерения, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

*Измерение* – совокупность операций выполняющих с помощью технических средств, хранящих единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получения значения этой величины.

В простейшем случае, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути сравнивают ее размер с единицей, хранимой линейкой, и, произведя отсчет, получают значение величины (длины, высоты, толщины и других параметров детали).

С помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

Приведенное определение понятия «измерение» удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение в деле упорядочения системы понятий в метрологии. В нем учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины).

От термина «измерение» происходит термин «измерять», которым широко пользуются на практике. Все же нередко применяются такие термины, как «мерить», «обмерять», «замерять», «промерять», не вписывающиеся в систему метрологических терминов. Их применять не следует. Не следует также

применять такие выражения, как «измерение значения» (например, мгновенного значения напряжения или его среднего квадратического значения), так как значение величины – это уже результат измерений.

*Система единиц физических величин* - совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принципами для заданной системы физических величин.

Международная система единиц (СИ), принятая в 1960 г. XI ГКМВ и уточненная на последующих ГКМВ.

*Стандартизованное средство измерений* - средство измерений, изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта.

Обычно стандартизованные средства измерений подвергают испытаниям и вносят в Госреестр.

*Нестандартизованное средство измерений* - средство измерений, стандартизация требований к которому признана нецелесообразной.

*Стандартизованное средство измерений* - средство измерений, изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта.

Обычно стандартизованные средства измерений подвергают испытаниям и вносят в Госреестр.

*Нестандартизованное средство измерений* - средство измерений, стандартизация требований к которому признана нецелесообразной.

*Метрологическая характеристика средства измерений* - характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность. Для каждого типа средств измерений устанавливают свои метрологические характеристики.

Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называют *нормируемыми метрологическими характеристиками*, а определяемые экспериментально – *действительными метрологическими характеристиками*

*Тип средства измерений* - совокупность средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

Средства измерений одного типа могут иметь различные модификации (например, отличаться по диапазону измерений).

*Метрологическая надежность средства измерений* - надежность средства измерений в части сохранения его метрологической исправности.

*Погрешность результата измерения* - отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Истинное значение величины неизвестно, его применяют только в теоретических исследованиях. На практике используют действительное значение величины  $x_d$  в результате чего погрешность измерения  $\Delta x_{\text{изм}}$  определяют по формуле:

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}} \quad (1)$$

где  $x_{\text{изм}}$  – измеренное значение величины.

Синонимом термина *погрешность измерения* является термин *ошибка измерения*, применять который не рекомендуется как менее удачный

*Инструментальная погрешность измерения* - составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

*Погрешность метода измерений* - составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений. Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Погрешность метода иногда называют *теоретической погрешностью*. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная

*Погрешность (измерения) из-за изменений условий измерения* - составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся следствием неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточно учтенного действия той или иной влияющей величины (температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и др.), неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

*Субъективная погрешность измерения* - составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора.

Встречаются операторы, которые систематически опаздывают (или опережают) снимать отсчеты показаний средств измерений. Иногда субъективную погрешность называют *личной погрешностью* или *личной разностью*.

*Погрешность средства измерений* - разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

*Точность средства измерений* - характеристика качества средства измерений, отражающая близость его погрешности к нулю. Считается, что чем меньше погрешность, тем точнее средство измерений.

Для точных измерений величин в метрологии разработаны приемы использования принципов и средств измерений, применение которых позволяет исключить из результатов измерений ряд систематических погрешностей и тем самым освобождает экспериментатора от необходимости определять многочисленные поправки для их компенсации, а в некоторых случаях вообще является предпосылкой получения сколько-нибудь достоверных результатов. Многие из этих приемов используют при

измерении только определенных величин, однако существуют и некоторые общие приемы, названные *методами измерения*.

Наиболее просто реализуется метод непосредственной оценки, заключающийся в определении величины непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, например взвешивание на циферблатных весах, определение размера детали с помощью микрометра или измерение давления пружинным манометром.

Измерения с помощью этого метода проводятся очень быстро, просто и не требуют высокой квалификации оператора, поскольку не нужно создавать специальные измерительные установки и выполнять какие-либо сложные вычисления. Однако точность измерений чаще всего оказывается невысокой из-за погрешностей, связанных с необходимостью градуировки шкал приборов и воздействием влияющих величин (непостоянство температуры, нестабильность источников питания и пр.).

При проведении наиболее точных измерений предпочтение отдается различным модификациям метода сравнения с мерой, при котором измеряемую величину находят сравнением с величиной, воспроизводимой мерой. Результат измерения либо вычисляют как сумму значения используемой для сравнения меры и показания измерительного прибора, либо принимают равным значению меры.

Метод сравнения с мерой, заключающийся в том, что измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на измерительный прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между ними, называется *методом противопоставления*. Примером этого метода является взвешивание груза на равноплечих весах, когда измеряемая масса определяется как сумма массы гирь, ее уравнивающих. Применение метода противопоставления позволяет значительно уменьшить воздействие на результаты измерений влияющих величин, поскольку они более или менее одинаково искажают сигналы измерительной информации как в цепи преобразования измеряемой величины, так и в цепи преобразования величины, воспроизводимой мерой. Отсчетное устройство прибора сравнения реагирует на разность сигналов, вследствие чего эти искажения в некоторой степени компенсируют друг друга.

Разновидностью метода сравнения с мерой является также *нулевой метод измерения*, который состоит в том, что подбором размера воспроизводимой мерой величины или путем ее принудительного изменения эффект воздействия сравниваемых величин на прибор сравнения доводят до нуля. В этом случае компенсация воздействий влияющих величин оказывается более полной, а значение измеряемой величины принимается равным значению меры.

При дифференциальном методе измерения на измерительный прибор (не обязательно прибор сравнения) подается непосредственно разность измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой. Этот метод

может быть использован, конечно, только в тех случаях, когда просто и точно реализуется операция вычитания величин (длины, перемещения, электрические напряжения). Дифференциальный метод неприменим при измерении таких величин, как температура или твердость тел.

К разновидностям метода сравнения с мерой относится и *метод замещения*, широко применяемый в практике точных метрологических исследований. Сущность метода в том, что измеряемая величина замещается в измерительной установке некоторой известной величиной, воспроизводимой мерой. Замещение может быть полным или неполным, в зависимости от чего говорят о методе полного или неполного замещения. При *полном замещении* показания не изменяются и результат измерения принимается равным значению меры. При *неполном замещении* для получения значения измеряемой величины к значению меры следует прибавить величину, на которую изменилось показание прибора.

Преимущество метода замещения - в последовательном во времени сравнении измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой. Благодаря тому, что обе эти величины включаются одна за другой в одну и ту же часть измерительной цепи прибора, точностные возможности измерений значительно повышаются по сравнению с измерениями, проводящимися с помощью других разновидностей метода сравнения, где несимметрия цепей, в которые включаются сравниваемые величины, приводит к возникновению систематических погрешностей. Способ замещения применяется при электрических измерениях с помощью мостов переменного тока, условие равновесия которых определяется не только значениями величин, воспроизводимых элементами плеч моста, но также и влиянием паразитных токов, емкостей, индуктивностей и рядом других факторов. Эти причины вызывают появление погрешностей, которые могут быть исключены, если проводить измерения методом замещения. Для этого вначале мост уравнивается с включенной в его цепь измеряемой величиной, которая затем замещается известной величиной, и мост уравнивается вновь. Если при этом никаких изменений ни в мосте, ни во внешних условиях не происходит, то указанные выше погрешности исключаются почти полностью.

Одним из общих методов измерений является *метод совпадений*, представляющий собой разновидность метода сравнения с мерой. При проведении измерений методом совпадений разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

По принципу метода совпадений построен нониус, входящий в состав ряда измерительных приборов. Так, например, шкала нониуса штангенциркуля имеет десять делений через 0.9 мм. Когда нулевая отметка шкалы нониуса оказывается между отметками основной шкалы штангенциркуля, это означает, что к целому числу миллиметров необходимо

добавить число десятых долей миллиметра, равное порядковому номеру совпадающей отметки нониуса.

В рамках перечисленных выше методов измерений в метрологической практике и в общем приборостроении часто применяются специальные приемы для исключения самих источников систематических погрешностей или их компенсации. Рассмотрим наиболее употребительные из этих приемов.

Параметрическая стабилизация очень широко применяется при ответственных измерениях. Этот прием используют для поддержания в заданных пределах температуры и влажности окружающей среды, напряжения питания и других. Наиболее распространены такие способы параметрической стабилизации, как термостатирование приборов, защита от воздействия вибраций, использование эффективных стабилизаторов в цепях электропитания приборов, экранирование приборов для защиты их от воздействия посторонних электрических, магнитных, радиационных и других полей. Применение этих способов иногда позволяет избежать введения в результаты измерения поправок.

*Параметрическая стабилизация* очень широко применяется при ответственных измерениях. Этот прием используют для поддержания в заданных пределах температуры и влажности окружающей среды, напряжения питания и других. Наиболее распространены такие способы параметрической стабилизации, как термостатирование приборов, защита от воздействия вибраций, использование эффективных стабилизаторов в цепях электропитания приборов, экранирование приборов для защиты их от воздействия посторонних электрических, магнитных, радиационных и других полей. Применение этих способов иногда позволяет избежать введения в результаты измерения поправок.

*Способ компенсации постоянных и периодических погрешностей по знаку.* При реализации этого способа процесс измерения строится таким образом, что постоянная систематическая погрешность входит в результат измерения один раз с одним знаком, а другой раз - с другим. Тогда среднее из двух полученных результатов оказывается свободным от постоянной погрешности.

*Способ вспомогательных измерений* применяется в тех случаях, когда воздействие влияющих величин на результаты измерений вызывает большие погрешности измерений. Тогда идут на заведомое усложнение схемы измерительной установки, включая в нее элементы, воспринимающие значение влияющих величин, автоматически вычисляющие соответствующие поправки и вносящие их в полезные сигналы, которые поступают на отсчетные или регулирующие устройства.

Способ вспомогательных измерений в большой степени относится к инструментальным методам борьбы с систематическими погрешностями, поэтому в рамках настоящего курса не рассматривается.

Вообще следует заметить, что многие из приведенных методов и приемов исключения систематических погрешностей в настоящее время все в большей степени реализуются схемами самих измерительных средств. В результате разработка методологии измерений приобретает все большее значение непосредственно для проектирования измерительной аппаратуры.

*Калибровка средств измерений* - совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого средства измерений. Калибровке могут подвергаться средства измерений, не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору. Результаты калибровки позволяют определить действительные значения измеряемой величины, показываемые средством измерения, или поправки к его показаниям, или оценить погрешность этих средств. При калибровке могут быть определены и другие метрологические характеристики. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются *калибровочным знаком*, наносимым на средства измерений, или *сертификатом о калибровке*, а также записью в эксплуатационных документах. Сертификат о калибровке представляет собой документ, удостоверяющий факт и результаты калибровки средства измерений, который выдается организацией, осуществляющей калибровку.

*Поверка средств измерений* - установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям. Поверку исходных эталонов органов государственной метрологической службы и уникальных средств измерений (которые не могут быть поверены этими органами) осуществляет ГНМЦ (по специализации). Поверке подвергают средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору. При поверке используют эталон. Поверку проводят в соответствии с обязательными требованиями, установленными нормативными документами по поверке. Поверку проводят специально обученные специалисты, аттестованные в качестве поверителей органами Государственной метрологической службы. Результаты поверки средств измерений, признанных годными к применению, оформляют выдачей *свидетельства о поверке*, нанесением *поверительного клейма* или иными способами, установленными нормативными документами по поверке. Другими официально уполномоченными органами, которым может быть предоставлено право проведения поверки, являются аккредитованные метрологические службы юридических лиц. *Аккредитация на право поверки средств измерений* проводится уполномоченным на то государственным органом управления

*Первичная поверка средств измерений* - поверка, выполняемая при

выпуске средства измерений из производства или после ремонта, а также при ввозе средства измерений из-за границы, при продаже.

*Периодическая поверка средств измерений* - поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межповерочные интервалы времени.

*Межповерочные интервалы* для периодической поверки устанавливаются нормативными документами по поверке в зависимости от стабильности того или иного средства измерений и могут устанавливаться от нескольких месяцев до нескольких лет.

### **Контрольные вопросы:**

1. Назовите составляющие науки метрологии.
2. Дайте определение средства измерения.
3. Что обозначает термин «измерение»?
4. Каким видом метрологии является данная лабораторная работа?
5. Что понимается под метрологической характеристикой?
6. Что такое система единиц физических величин?
7. Дайте определение погрешности средства измерения.
8. Что такое метрологическая надежность средства измерений?
9. Присутствует ли в данной работе инструментальная погрешность?
10. Какая погрешность обусловлена особенностями оператора?
11. Что называют методом измерения?
12. Какие существуют методы измерения?
13. Какой метод измерения использован в данной работе?
14. Назовите приемы исключения систематических погрешностей?
15. В чем сущность параметрической стабилизации?
16. С какой целью применяют вспомогательные измерения?
17. Является ли микромеханический гироскоп средством измерения?
18. В чем различие поверки и калибровки?
19. Чем отличается первичная поверка от периодической?
20. От чего зависит величина межповерочного интервала?

## 2. Лабораторная работа №1

Исследование характеристик микромеханических акселерометров.

### 2.1. Введение

*Цель работы:* определение технических и метрологических характеристик микромеханического акселерометра.

*Используемое оборудование:* акселерометр ADXL203 с микроконтроллером, делительная головка ОДГ-60, компьютер.

*Задачи лабораторной работы:*

1. Определить коэффициент передачи акселерометра (В/г) .
2. Определить смещение нуля акселерометра (В).

### 2.2. Практические сведения

Области применения акселерометров:

- Системы динамического контроля транспортных средств
- Электронные блоки управления
- Охранные системы и датчики движения
- Навигационные системы
- Стабилизаторы платформ

Акселерометры серии ADXL находят широкое применение: при измерении углов наклона в автомобильных сигнализациях и прикроватных мониторах пациентов; при защите дисков компьютеров типа Notebook от вибрационных воздействий, в чувствительных элементах подушек безопасности, в системах навигации автомобиля, в системах контроля работы лифта; при наличии ударов и вибрации в системах управления станками и контроля вибростендов.

Схема кремниевого чувствительного элемента показана на рис. 1, а, а его конфигурация при действии ускорения - на рис. 1, б.

На неподвижные пластины конденсатора чувствительного элемента подаются противофазные прямоугольные импульсы: амплитуды обоих прямоугольных импульсов равны, но сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . В спокойном состоянии емкости  $C_1$ ,  $C_2$  двух конденсаторов одинаковы, поэтому выходное напряжение на их электрическом центре (т. е. на центральной пластине, присоединенной к подвижной балке) равно 0.

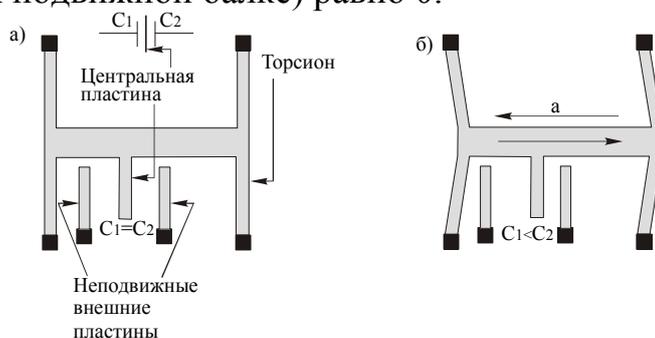


Рис.1. Схема работы акселерометра:  
а) в покое; б) при действии ускорения.

Когда балка начинает двигаться, разность емкостей приводит к появлению выходного сигнала на центральной пластине. Амплитуда сигнала будет увеличиваться с увеличением ускорения, приложенного к чувствительному элементу.

В работе предлагается исследовать микромеханический акселерометр ADXL203.

Расположение выводов ADXL203:

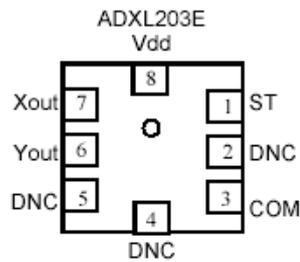


Рис.2. Выводы микросхемы акселерометра

### 2.3. Описание лабораторной установки

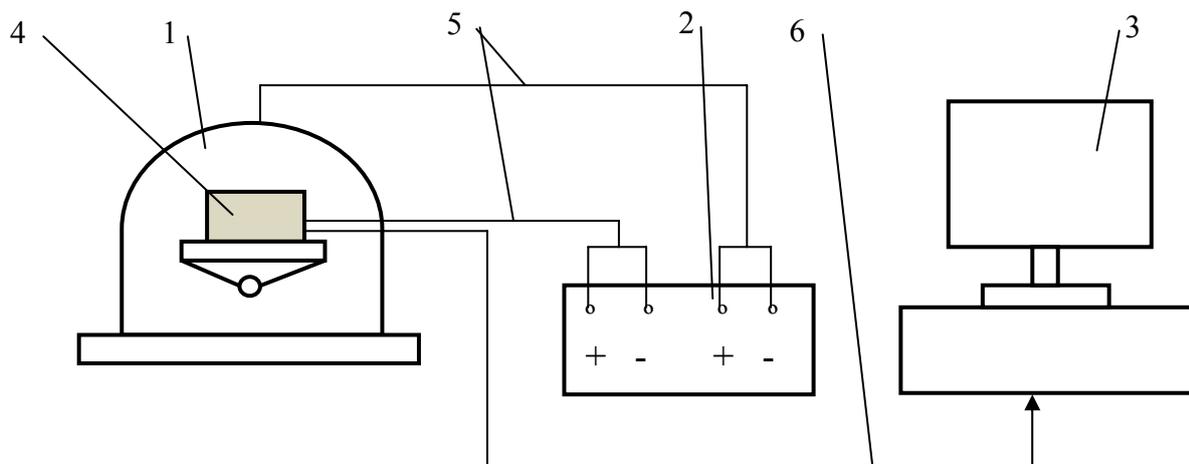


Рис. 3 . Лабораторная установка для исследования акселерометра: 1 – делительная головка ОДГ 60; 2 – блок питания; 3 – компьютер; 4 – блок акселерометра; 5 – кабели питания; 6 – интерфейсный кабель.

Лабораторная установка (рис. 3) состоит из следующих элементов:

Блок акселерометра 5 содержит акселерометр ADXL203, укреплен на наклонном столике оптической делительной головки ОДГ60 1, может фиксироваться в двух ортогональных положениях, соответствующих измерительным осям X и Y акселерометра. Поворот акселерометра относительно измерительной оси осуществляется при помощи ручки ОДГ 1.

Точное значение угла поворота снимается со шкалы окуляра ОДГ 1. Осветитель окуляра подключается к блоку питания 2.

Блок акселерометра через разъем и соединительный кабель 6 подключается к ЭВМ: интерфейсный разъем типа DB9 подключается к последовательному порту компьютера (COM1 или COM2).

В ЭВМ установлено программное обеспечение, позволяющее производить регистрацию выходных сигналов акселерометра и обработку результатов эксперимента.

Основным элементом схемы является микроконтроллер, осуществляющий управление всей схемой, а также прием команд и передачу данных на ЭВМ. Выходные сигналы акселерометров через усилитель и коммутатор подаются на АЦП и далее в цифровом виде из АЦП считываются микроконтроллером. Микроконтроллер имеет несколько режимов считывания данных. После считывания микроконтроллер формирует пакет и передает его ЭВМ посредством интерфейса RS232. Микроконтроллер может подавать сигнал самотестирования (ST) акселерометра. Для нагрева блока акселерометра предусмотрен нагреватель, управляемый микроконтроллером и датчик температуры. Микроконтроллер автоматически выключает нагрев при достижении температуры 49-50°C. Разъем программатора нужен для загрузки в микроконтроллер программы.

Внешний вид блока акселерометра представлен на рис.6. Нагреватель расположен под верхней платой и состоит из двух мощных резисторов.

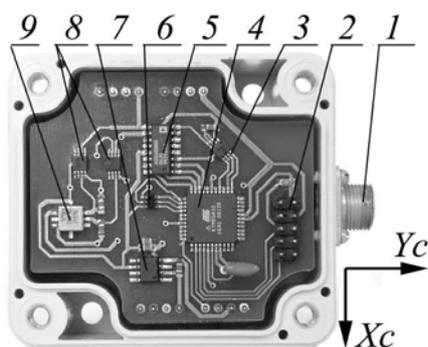


Рис.4. Внешний вид блока акселерометра: 1- входной разъем, 2-разъем программатора, 3- АЦП, 4-микроконтроллер, 5-коммутатор, 6-датчик температуры, 7-источник питания, 8- усилители, 9-акселерометр ADXL203.

Назначения контактов входного разъема блока акселерометра приведены в таблице 1.

Таблица 1

Назначения контактов входного разъема блока акселерометра.

№ п/п	Обозначение	Назначение
1	+12В	Питание блока акселерометра
2	COM	Общий провод
3	TxD	Данные, передаваемые блоком акселерометра на ЭВМ(13)
4	RxD	Команды, принимаемые блоком акселерометра от ЭВМ(13)

## 2.4. Этапы выполнения лабораторной работы

1. Сориентировать ось чувствительности акселерометра  $X$  перпендикулярно оси вращения делительной головки. Ось  $X$  направлена перпендикулярно оси разъема 1 (рис.4).
2. Включить ЭВМ.
3. На ЭВМ запустить программу ACCEL.EXE.
4. Перейти на вкладку "НАСТРОЙКИ" и установить номер COM порта, к которому подключен акселерометр.
5. Нажать кнопку "ТЕСТ СВЯЗИ". При правильной сборке через 1-2 секунды должен появиться ответ "Все ОК".
6. Выдержать паузу в течении 15мин. для прогрева элементов блока 5.
7. Выполнить задания согласно указаниям по выполнению работы.
8. Сориентировать оси чувствительности акселерометров  $Y$  перпендикулярно оси вращения делительной головки. Ось  $Y$  направлены параллельно оси разъема 1 (рис.4).
9. Выполнить пункты 2-7 для оси  $Y$ .
10. Указания по выполнению работы составлены для одной оси чувствительности одного акселерометра. В работе содержатся 2 акселерометра, каждый из которых имеет две оси чувствительности.

## 2.5. Методика выполнения работы

### 1. Коэффициент передачи акселерометра $K$ (В/г).

Коэффициент передачи  $K$  (В/г) определяется при помощи поворота акселерометра приблизительно на  $\pm 180$  градусов с регистрацией максимального  $U_{max}$  и минимального  $U_{min}$  значений напряжения по оси чувствительности. При этом в случае отсутствия вибрации и линейных ускорений на акселерометр действует только ускорение свободного падения  $g$ . Максимальное  $U_{max}$  и минимальное  $U_{min}$  значения напряжения на выходе акселерометра будут соответствовать ускорению  $\pm g$  то есть:

$$K = \frac{U_{max} - U_{min}}{2} \quad (2)$$

Порядок проведения эксперимента:

- Перейти на вкладку "ВОЛЬТМЕТР".
- Нажать кнопку "ВКЛЮЧИТЬ СТЕНД".
- Установить "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" равным 1с.
- Плавно вращая ручку 1 делительной головки, повернуть акселерометр на на угол при котором на выходе акселерометра напряжение максимально и занести его в таблицу 3 ( $U_{max}$ ).
- Аналогично определить минимальное  $U_{min}$  значение выходного сигнала датчика в вольтах. Опыт провести 3-5 раз.

Обработка экспериментальных данных:

- По значениям  $U_{max}$   $U_{min}$  вычислить  $K_i$ .
- Вычислить среднее значение:

$$\langle K \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где  $n$  – число опытов.

- Вычислить случайные отклонения

$$\Delta K_i = K_i - \langle K \rangle \quad (4)$$

- Вычислить среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta K_i)^2} \quad (5)$$

- Вычислить погрешность результата измерений:

$$\Delta K = t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где  $t_\alpha$  коэффициент Стьюдента выбираемый из приложения 1.

Сравнить полученный коэффициент передачи со значением, приведенным в технических характеристиках (приложение).

## 2. Смещение нуля акселерометра (В).

Смещение нуля акселерометра  $U_{CM}$  (В) также определяется поворотом акселерометра приблизительно на  $\pm 180$  градусов с регистрацией максимального  $U_{max}$  и минимального  $U_{min}$  значений напряжения по оси чувствительности. Паспортизованным значением смещения для акселерометра ADXL - 202 и ADXL 203 является  $U_{0П} = 2,5В$ . Смещение нуля показывает на сколько вольт показания акселерометра отличаются от паспортизованного значения при нулевом наклоне акселерометра (горизонтальном расположении акселерометра). Смещение нуля вычисляется по формуле:

$$U_{CM} = \frac{U_{max} + U_{min}}{2} - U_{0П}. \quad (7)$$

Порядок проведения опыта:

Необходимо воспользоваться результатами первого опыта.

Обработка экспериментальных данных:

- Вычислить  $U_{CM i}$ .

- Вычислить среднее значение:

$$\langle U_{CM} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{CM i} \quad (8)$$

- Вычислить случайные отклонения каждого измерения  $U_{CM}$

$$\Delta U_{CM i} = U_{CM i} - \langle U_{CM} \rangle \quad (9)$$

- Вычислить среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta U_{CM i})^2} \quad (10)$$

- Вычислить погрешность результата измерений:

$$\Delta U_{CM} = t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

где  $t_{\alpha}$  коэффициент Стьюдента выбираемый из приложения.

Сравнить полученное смещение нуля с диапазоном, приведенным в технических характеристиках.

## **2.6. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие материалы:

1. титульный лист (с обязательным указанием названия работы, Ф.И.О. студента);
2. схема лабораторной установки с описанием;
3. данные эксперимента (приложение 2, табл.4);
4. результаты обработки данных: СКО, погрешность (для 1 и 2 пункта работы).

## **Контрольные вопросы:**

1. Назовите области применения микромеханических акселерометров.
2. Объясните принцип работы микромеханического акселерометра.
3. Объясните следующие термины:
  - коэффициент передачи,
  - среднеквадратическое отклонение,
  - смещение нуля,
  - температурное смещение нуля.
4. Опишите методику определения смещения нуля.
5. Опишите методику определения коэффициента передачи.

## 3. Лабораторная работа №2

Исследование характеристик микромеханического гироскопа.

### 3.1. Введение

*Цель работы:* определение технических и метрологических характеристик гироскопа ADXRS 401.

*Используемое оборудование:* блок гироскопа ADXRS 401 с микроконтроллером, секундомер, вращающийся стенд, омметр, блок питания, ЭВМ.

*Задачи лабораторной работы:*

1. Определить смещение нуля гироскопа (В).
2. Определить нелинейность гироскопа (% от полной шкалы).
3. Определить уровень шума гироскопа( $^{\circ}/с$ ).

### 3.2. Практические сведения

Датчик угловой скорости – гироскоп ADXRS-401 представляет собой интегральную микросхему. Он выполнен на кристалле кремния и включает в себя все необходимые электронные схемы формирования сигнала.

Принцип работы гироскопа ADXRS-401 основан на измерении Кориолисова ускорения действующего на резонирующую массу. Чувствительный элемент гироскопа состоит из (рис.5): внутренней рамки, наружной рамки, чувствительной массы, упругих элементов резонирующей массы, упругих элементов внутренней рамки, гребенки.

Для измерения Кориолисова ускорения, резонирующая масса, укрепленная на упругих элементах, приводится в колебательное движение (направление движения указано стрелкой) во внутренней рамке. Внутренняя рамка при помощи упругих элементов установленных перпендикулярно направлению резонирующего движения чувствительной массы укреплена на наружной рамке. На внутренней и наружной рамках имеются гребенки, расположенные друг напротив друга. Штыри гребенок образуют емкостной датчик ускорения Кориолиса.



Рис. 5. Схема чувствительного элемента микромеханического гироскопа

Вращение чувствительного элемента заставляет резонирующую массу испытывать на себе Кориолисово ускорение. При этом как показано на рис. 6 внутренняя рамка также начинает совершать колебательные движения в направлении перпендикулярном движению чувствительной массы. Движение

внутренней рамки приводит к изменению взаимной емкости гребенок наружной и внутренней рамок. Чем больше угловая скорость вращения, тем больше амплитуда колебаний внутренней рамки и тем больше изменяется взаимная емкость гребенок. Электроника гироскопа ADXRS-401 может различать изменения емкости всего  $12 \cdot 10^{-21}$  (12 зептофарад) от отклонений микромеханического чувствительного элемента всего 0.00016 Ангстрем (16 фемтометров). Это достигается путем расположения блока электроники, на том же самом кристалле, что и микромеханический чувствительный элемент.

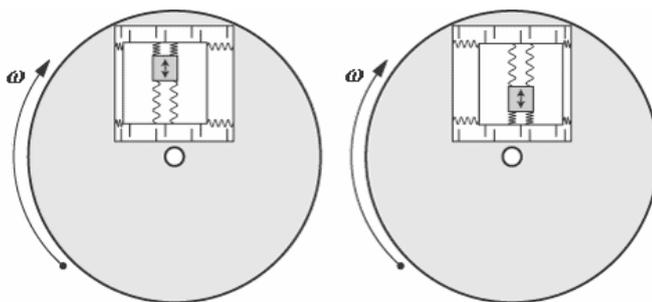


Рис. 6. Схема работы микромеханического чувствительного элемента ADXRS-401 при вращении основания.

Полученный с емкостного датчика высокочастотный сигнал поступает на каскады усиления и демодуляции, в итоге на выходе микросхемы мы получаем сигнал напряжения, пропорциональный угловой скорости. Максимальная детектируемая скорость вращения (т.е. динамический диапазон датчика угловой скорости) составляет у гироскопов ADXRS401 и ADXRS150 соответственно  $75^\circ/\text{с}$  и  $150^\circ/\text{с}$ .

Наличие внутри микросхемы ADXRS-401 двух перпендикулярно расположенных однотипных микромеханических чувствительных элементов позволяет избежать влияния на выходной сигнал гироскопа вибрации и ускорения. Схемы формирования сигнала, расположенные на этом же кристалле, позволяют сохранить качество сигнала в условиях "шумного" окружения (электромагнитных помех, шумов цифровых схем и т.д.).

Для схемы возбуждения чувствительных элементов (датчик угловой скорости) требуется напряжение питания 14–16 В. Так как на микросхему подается напряжение 5 В, для получения более высокого напряжения питания на кристалле имеется схема "зарядового насоса" с переключаемыми конденсаторами. Сигнал Кориолиса с чувствительных элементов усиливается и демодулируется и подается на выход сигнала угловой скорости (RATEOUT). Чувствительные элементы имеют схему автотестирования управляемую логическими сигналами ST1 и ST2.

### 3.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.7) состоит из блока гироскопа (гироскопа) 5 закрепленного при помощи винтов на вращающемся предметном столике 2.

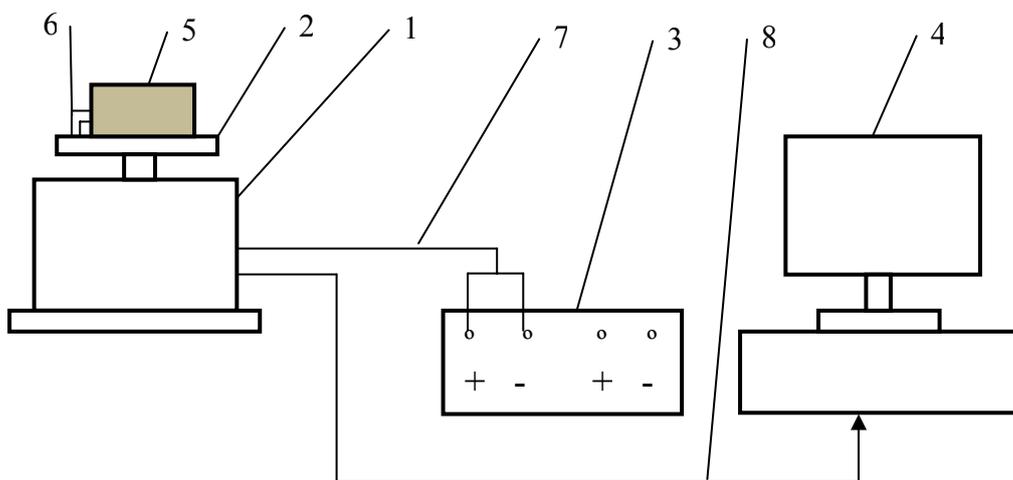


Рис.7. Лабораторная установка для исследования микромеханического гироскопа ADXRS-401:1 – вращающийся стенд; 2-предметный столик; 3 – блок питания; 4 – компьютер; 5 – блок гироскопа; 6 – коммутационный кабель; 7 – кабель питания; 8 – кабель связи.

Через разъем, кабель 6 и разъем на стенде гироскоп соединен с кольцами ротора коллектора вращающегося предметного столика 2. Контакты статора коллектора выведены на разъем. Кабели 7 и 8 подключаются к разъему блока питания в контакты согласованные по цвету с кабелем. Перед выбором контакта разъемов необходимо омметром убедиться в отсутствии обрыва внутри коллектора вращающегося основания. Кабель 8 служит для подключения гироскопа 5 к ЭВМ 4 через разъем RS-232 (COM-порт).

Перед началом работы вращающейся стенд 1 необходимо установить горизонтально при помощи регулируемых ножек. Контроль горизонтальности необходимо осуществлять по уровню. Включение стенда осуществляется переключателем. Скорость столика 2 стенда 1 устанавливается поворотом регулятора при работающем стенде. Скорость вращения предметного столика 2 можно контролировать по соответствующим шкалам вращающегося стенда (рис.7.).

Основным элементом схемы является микроконтроллер, осуществляющий управление всей схемой, а также прием команд и передачу данных на ЭВМ. Выходной сигнал, пропорциональный угловой скорости гироскопа через усилитель и коммутатор подаются на АЦП и далее в цифровом виде из АЦП считываются микроконтроллером. Гироскоп также имеет выход термодатчика TEMP и выход опорного напряжения 2.5В, которые также подаются на коммутатор.

Микроконтроллер имеет несколько режимов считывания данных. После считывания микроконтроллер формирует пакет и передает его ЭВМ посредством интерфейса RS232.

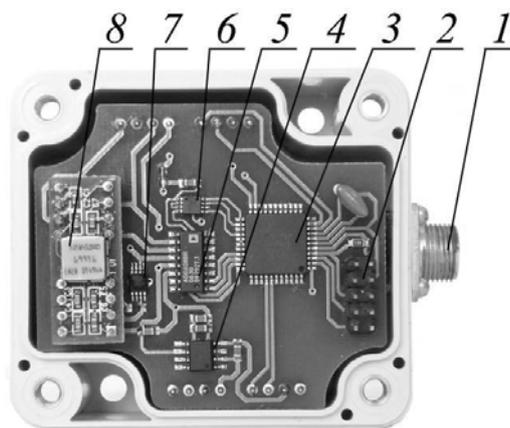


Рис.8. Внешний вид блока гироскопа: 1- входной разъем, 2-разъем программатора, 3-микроконтроллер, 4- источник питания, 5-коммутатор, 6- АЦП, 7- усилитель, 8-гироскоп ADXRS401.

Внешний вид блока гироскопа представлен на рис.8. Нагреватель расположен под верхней платой и состоит из двух мощных резисторов.

Внешний вид блока гироскопа представлен на рис.8. Нагреватель расположен под верхней платой и состоит из двух мощных резисторов.

Назначения контактов входного разъема блока гироскопа приведены в таблице 2.

Таблица 2

Назначения контактов входного разъема блока акселерометра.

№ п/п	Обозначение	Назначение
1	+12В	Питание блока акселерометра
2	COM	Общий провод
3	TxD	Данные, передаваемые блоком акселерометра на ЭВМ
4	RxD	Команды, принимаемые блоком акселерометра от ЭВМ

### 3.4. Этапы выполнения работы

1. Включить ЭВМ 16 и блок питания 12.
2. На ЭВМ 16 запустить программу GYRO.EXE.
3. Перейти на вкладку "НАСТРОЙКИ" и установить номер COM порта, к которому подключен блок гироскопа.
4. Нажать кнопку "ТЕСТ СВЯЗИ". При правильной сборке через 1-2 секунды должен появиться ответ "Все ОК".
5. Выдержать паузу в течении 15мин. для прогрева элементов блока 5.
6. Выполнить задания согласно указаниям по выполнению работы.

### 3.5. Методика выполнения работы

#### 1. Смещение нуля гироскопа $U_{CM}$ (В)

Смещение нуля гироскопа  $U_{CM}$  (В) может быть определено по осциллограмме напряжения. Осциллограмма снимается при отсутствии вращения стэнда и других внешних возмущений.

Порядок проведения опыта:

- Перейти на вкладку "ОСЦИЛЛОГРАФ".
- Нажать кнопку "ВКЛЮЧИТЬ СТЕНД".
- Установить "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" равным 10с.
- Подождать приблизительно 15-20 секунд и нажать кнопку "ФАЙЛ - СОХРАНИТЬ"

Обработка экспериментальных данных:

- Обработку данных удобно проводить в программе EXCEL.
- Запустить EXCEL.
- Выбрать пункт меню "ФАЙЛ – ОТКРЫТЬ" .
- В появившемся окне диалога указать тип файлов "ТЕКСТОВЫЙ ИЛИ ВСЕ ФАЙЛЫ" и выбрать файл сохраненный в пункте.
- Сформировать таблицу данных
- Вычислить среднее значение напряжения:  $\langle U \rangle$
- Вычислить случайные отклонения:

$$\Delta U_i = U_i - \langle U \rangle \quad (12)$$

- Вычислить среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta U_i)^2} . \quad (13)$$

- Определить погрешность результата измерений:

$$\Delta U = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

#### 2. Нелинейность гироскопа

Линейность зависимости выходного напряжения от угловой скорости вращения  $U(\omega)$  является одной из важнейших характеристик гироскопа. Основным параметром, характеризующим погрешность этой зависимости реального гироскопа является, интегральная нелинейность (% от полной шкалы). Интегральная нелинейность определяется как максимальное отклонение фактической характеристики преобразователя от прямой линии. В общем случае, она выражается в процентах от полной шкалы.

Задачей работы является определение погрешности линейности в диапазоне изменения угловых скоростей от  $-150^\circ/\text{с}$  до  $+150^\circ/\text{с}$ . Погрешность линейности путем построения графика зависимости выходного напряжения гироскопа от угловой скорости, которая устанавливается по откалиброванным в задании 1 значениям угловой скорости. За начало отсчета необходимо взять напряжение  $U_0 = U_{CM}$ , соответствующее отсутствию

вращения стенда. Для определения нелинейности необходимо воспользоваться методом конечных точек.

Порядок проведения опыта:

- Перейти на вкладку "ВОЛЬТМЕТР".
- Установить "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" равным 1с.
- Изменяя скорость вращения стенда регистрировать выходное напряжение.

Обработка экспериментальных данных:

- Экспериментальные данные свести в таблицу и построить график зависимости  $U(\omega)$
- Определить интегральную нелинейность по методу конечных точек (конечные точки это точки соответствующие угловой скорости  $\pm 75^\circ/\text{с}$ .) ответ выразить в % от динамического диапазона.

### 3. Уровень шума гироскопа

Уровень шума гироскопа  $\Delta\omega$  ( $^\circ/\text{с}$ ) может быть определен по осциллограмме напряжения. При этом напряжение необходимо с помощью  $K$  пересчитать напряжение в угловую скорость:

$$\omega = \frac{U - U_{\text{см}}}{K}. \quad (15)$$

Осциллограмма снимается при произвольной скорости вращения основания. Обработку осциллограммы удобно проводить в программе EXCEL.

Порядок проведения опыта:

- Перейти на вкладку "ОСЦИЛЛОГРАФ".
- Нажать кнопку "ВКЛЮЧИТЬ СТЕНД".
- Включить вращение стенда с произвольной угловой скоростью
- Установить "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ" равным 0,2 с.
- Подождать приблизительно 15-20 секунд и нажать кнопку "ФАЙЛ - СОХРАНИТЬ"

Обработка экспериментальных данных:

- Экспериментальные данные свести в таблицу и построить график  $\omega(t)$ .
- Вычислить среднее значение угловой скорости:  $\langle\omega\rangle$
- Вычислить случайные отклонения:

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \langle\omega\rangle \quad (16)$$

- Определить уровень шума гироскопа как среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta\omega_i)^2}. \quad (17)$$

### **3.6. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие материалы:

1. титульный лист (с обязательным указанием названия работы, Ф.И.О. студента);
2. схема лабораторной установки с описанием;
3. данные эксперимента (приложение 2, табл.5, табл.6, табл.7);
4. результаты обработки данных: СКО, погрешность (для 1, 2 и 3 пункта работы).

### **Контрольные вопросы:**

1. Какая процедура производилась в данной работе: поверка или калибровка?
2. Назовите основные конструктивные элементы микромеханического гироскопа.
3. На измерении какого ускорения основан принцип работы микромеханического гироскопа?
4. Из каких элементов состоит чувствительный элемент микромеханического гироскопа?
5. Объясните следующие термины (в контексте данной работы):
  - коэффициент передачи,
  - отношение сигнал-шум,
  - среднеквадратическое отклонение,
  - интегральная нелинейность.
6. Объясните принцип работы микромеханического гироскопа.
7. Объясните методы определения нелинейности.
8. Опишите методику определения смещения нуля.
9. Опишите методику определения коэффициента передачи.

## **Литература**

1. Иванов В.А., Марусина М.Я., Ткалич В.Л. Прикладная метрология. Учебное пособие. – СПб.:СПбГУИТМО, 2003. -104с.
2. Подмастерьев К.В. Точность измерительных устройств: Учебное пособие. –Орел: ОрелГТУ, 2004. -140с.
3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. -М.: Машиностроение, 2007.-400с.
4. Методические указания к лабораторным работам МЭМС.

Значения коэффициента Стьюдента

Коэффициенты Стьюдента					
n	Значения Р				
	0.6	0.8	0.95	0.99	0.999
2	1.376	3.078	12.706	63.657	636.61
3	1.061	1.886	4.303	9.925	31.598
4	0.978	1.638	3.182	5.841	12.941
5	0.941	1.533	2.776	4.604	8.610
6	0.920	1.476	2.571	4.032	6.859
7	0.906	1.440	2.447	3.707	5.959
8	0.896	1.415	2.365	3.499	5.405
9	0.889	1.397	2.306	3.355	5.041
10	0.883	1.383	2.262	3.250	4.781
11	0.879	1.372	2.228	3.169	4.587
12	0.876	1.363	2.201	3.106	4.437
13	0.873	1.356	2.179	3.055	4.318
14	0.870	1.350	2.160	3.012	4.221
15	0.868	1.345	2.145	2.977	4.140
16	0.866	1.341	2.131	2.947	4.073
17	0.865	1.337	2.120	2.921	4.015
18	0.863	1.333	2.110	2.898	3.965
19	0.862	1.330	2.101	2.878	3.922
20	0.861	1.328	2.093	2.861	3.883
21	0.860	1.325	2.086	2.845	3.850
22	0.859	1.323	2.080	2.831	3.819
23	0.858	1.321	2.074	2.819	3.792
24	0.858	1.319	2.069	2.807	3.767
25	0.857	1.318	2.064	2.797	3.745
26	0.856	1.316	2.060	2.787	3.725
27	0.856	1.315	2.056	2.779	3.707
28	0.855	1.314	2.052	2.771	3.690
29	0.855	1.313	2.048	2.763	3.674
30	0.854	1.311	2.045	2.756	3.659
31	0.854	1.310	2.042	2.750	3.646
40	0.851	1.303	2.021	2.704	3.551
60	0.848	1.296	2.000	2.660	3.460
120	0.845	1.289	1.980	2.617	3.373
∞	0.842	1.282	1.960	2.576	3.291

Таблица 2

## Технические характеристики ADXL203.

Параметр	Ед. Изм.	ADXL 203			Примечание
		Мин.	Ном.	Макс	
Чувствительный элемент					
Диапазон измерений	g	±1,7			
Нелинейность	%		±0,5	±2,5	По методу наилучшей прямой
Ошибка ориентации чувствительного элемента	°		±1		
Ошибка взаимной ориентации осей	°		±0,1		Между X и Y датчиками
Перекрестные связи между осями	%		±2	±5	
Чувствительность					
Широтно-импульсного (ШИМ) сигнала. Выводы X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub>	%/g	-	-	-	при V <sub>dd</sub> =5В (T1/T2)
Широтно-импульсного (ШИМ) сигнала. Выводы X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub>	%/g	-	-	-	при V <sub>dd</sub> =3В (T1/T2)
Коэффициент передачи Выводы X <sub>filt</sub> , Y <sub>filt</sub> (ADXL202) X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub> (ADXL203)	мВ/g	940	1000	1060	при V <sub>dd</sub> =5В (T1/T2)
Коэффициент передачи Выводы X <sub>filt</sub> , Y <sub>filt</sub> (ADXL202) X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub> (ADXL203)	мВ/g	-	-	-	при V <sub>dd</sub> =3В (T1/T2)
Температурный дрейф чувствительности	%		0,3		От температуры 25°С
Нулевой сигнал					
0g ШИМ	%	-	-	-	при V <sub>dd</sub> =5В (T1/T2)

Продолжение табл. 2

Параметр	Ед. Изм.	ADXL 203			Примечание
		Мин.	Ном.	Макс	
Смещение нуля (0g). Выводы $X_{\text{filt}}$ , $Y_{\text{filt}}$ (ADXL202) $X_{\text{out}}$ , $Y_{\text{out}}$ (ADXL203)	В	2,4	2,5	2,6	при $V_{\text{dd}}=5\text{В}$
Смещение нуля (0g). Выводы $X_{\text{filt}}$ , $Y_{\text{filt}}$ (ADXL202) $X_{\text{out}}$ , $Y_{\text{out}}$ (ADXL203)	В				при $V_{\text{dd}}=3\text{В}$
0g ШИМ при изменении $V_{\text{dd}}$	%/В				
Смещение нуля от температуры	mg/° С		±0,1		
Плотность шума					
Среднеквадратическое значение плотности мощности шума	$\mu\text{г}/\sqrt{\text{Гц}}$		110		При 25°С
Выходной шум	мВ (СКО )		1	6	<4кГц, 25°С, $V_{\text{s}}=5\text{В}$
Параметры частотной характеристики					
Частота среза АЧХ по уровню 3дБ	кГц				Выводы $X_{\text{filt}}$ , $Y_{\text{filt}}$
Резонансная частота микромеханического датчика	кГц		5,5		
Параметры фильтра					
Допуск на резистор $R_{\text{filt}}$	%		±25		Номинальное значение 32кОм
Минимальная емкость конденсаторов $C_{\text{filt}}$	пФ	2000		$10 \cdot 10^6$	Выводы $X_{\text{filt}}$ , $Y_{\text{filt}}$

Самотестирование					
Параметр	Ед.	ADXL 203			Примечание
	Изм.	Мин.	Ном.	Макс	
	мВ	400	750	1100	Смещение нуля при подаче сигнала ST
Параметры цифрового выхода					
Частота ШИМ	кГц	-	-	-	При Rset=125кОм
Уровень логической 1	В	-	-	-	
Уровень логическ. 0	В	--	-	-	
Дрейф периода ШИМ от температуры	ppm /°C	-	-	-	
Время нарастания (спада)	нс	-	-	-	
Параметры питания					
Напряжение питания	В	3		6	
Потребляемый ток	мА		0.7	1,5	
Время включения	с			0.02	
Температурный диапазон	°C	-55		125	

Таблица 3

## Технические характеристики гироскопа ADXRS 401

Параметр	Примечание	Значение			Ед. Изм.
		Мин.	Ном.	Макс.	
<b>Чувствительность</b>					
Динамический диапазон	(Диапазон измерений)	$\pm 75$			°/с
Чувствительность		12,75	15	17,25	мВ/°/с
Нелинейность	По методу наилучшей прямой		0,1		%
<b>Нулевой сигнал</b>					
Нулевой сигнал	При 25°C ( <i>Uсм</i> )		2,5		В
Время включения	От подачи питания до достижения на выходе сигнала 0,5Vs		35		мс
Чувствительность к линейному ускорению	по любой оси		0,2		°/с/g
<b>Шумовые характеристики</b>					
Плотность шума	При 25°C на частоте 10Гц (СКО)		3		мВ
<b>Параметры частотной характеристики</b>					
Частота среза АЧХ по уровню 3дБ	может быть изменена при помощи внешнего конденсатора		40		Гц
Резонансная частота микромеханического чувствительного элемента			14		КГц
<b>Параметры самотестирования</b>					
Функция самотестирования ST1	активизируется подачей логической 1 на ST1		-800		мВ
Функция самотестирования ST2	активизируется подачей логической 1 на ST2		800		мВ

Параметр	Примечание	Значение			Ед. Изм.
		Мин.	Ном.	Макс.	
Параметры температурного датчика					
Нулевой сигнал	при 25°C		2,5		В
Выходной ток датчика				50	мкА
Коэффициент передачи датчика			8,4		мВ/°К
Параметры встроенного источника опорного напряжения					
Встроенный источник опорного напряжения (ИОН)	Номинальное напряжение	2,45	2.5	2,55	В
Выходной ток ИОН			200		мкА
Коэффициент нагрузочной прямой ИОН			5		мВ /мА
Параметры питания					
Рабочее напряжение питания		4,75	5	5,25	В
Потребляемый ток			6	8	мА
Диапазон рабочих температур					
Диапазон рабочих температур		-40		+85	°С

**Приложение 2**  
 Формы для оформления отчета

Таблица 4

Результаты измерения максимального  $U_{max}$  и минимального  $U_{min}$  сигнала акселерометра \_\_\_\_\_ по оси \_\_\_\_\_

№	$U_{max}$	$U_{min}$	$K_i$	$U_{cmi}$
1				
2				
3				
4				
...				
n				

Таблица 5

Смещение нуля гироскопа

№	Время ( $t$ )	Выходное напряжение $U_{rateout i}$	$\Delta U_i$
1			
2			
3			
4			
...			
n			

Таблица 6

Зависимость выходного напряжения от угловой скорости стэнда

Номера опытов ( $i$ )	Угловая скорость по шкале ( $\omega_{шк}, град/с$ )	Измеренная угловая скорость ( $\omega, град/с$ )	Выходное напряжение по оси чувствительности ( $U(\omega), В$ )
1	-75		
2	-70		
...	...	...	...
4	-5		
5	0		
6	5		
...	...	...	...
8	70		
9	75		

Таблица 7

## Уровень шума

№	Время t (с)	Выходное напряжение $U_{rateout\ i}$	Угловая скорость $\omega_i = \frac{U_{RATEOUT\ i} - \langle U \rangle}{K}$ (°/с.)	Случайные отклонения $\Delta\omega_i = \omega_i - \langle \omega \rangle$ (°/с.)
1				
2				
3				
4				
...				
n				