

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки приборостроение
Кафедра точного приборостроения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
МЭМС датчики системы позиционирования пространственного положения человека УДК 681.586`32-022.23

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Ефремова Мария Валерьевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Нестеренко Т.Г.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

По разделу «Вопросы технологии»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гормаков А.Н.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПС	Бориков В.Н.	Д.Т.Н.		

Томск – 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт неразрушающего контроля
Направление подготовки (специальность) приборостроение
Кафедра точного приборостроения

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Бориков В.Н.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5В	Ефремова Мария Валерьевна

Тема работы:

МЭМС датчики системы позиционирования пространственного положения человека	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№643/с от 03.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Потребители: гражданские пользователи, экстренные службы (пожарные, спасатели). 2. Точность < 3 м (< 30 м при недоступности спутниковых навигационных систем в течение 30 минут). 3. Длина траектории до 100 м.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Аналитический обзор существующих методов персональной навигации с целью выяснения достижений мировой науки и техники в рассматриваемой области. 2. Структура системы персональной навигации. 3. Выбор датчиков, сравнение достоинств и недостатков основных типов навигационных датчиков. 4. Анализ погрешностей системы персональной навигации. 5. Алгоритм фильтрации и объединения показаний

	сенсоров ИИУ для определения положения объекта в трехмерном пространстве. 6. Моделирование системы персональной навигации для различных траекторий. 7. Виртуальный прибор с использованием LabVIEW для снятия данных. 8. Разработка экспериментального макета системы персональной навигации.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Чертежи общего вида измерительного блока – 2 листа формата А3. 2. Чертежи корпусов измерительного блока – 4 листа формата А4. 3. Спецификация – 2 листа формата А4 4. Схема электрическая принципиальная – 1 лист.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Вопросы технологии	Гормаков А.Н.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко В.С.
Социальная ответственность	Мезенцева И.Л.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Анализ погрешностей системы персональной навигации.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.03.2017 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Нестеренко Т.Г.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Ефремова М.В.		

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ5В	Ефремова Мария Валерьевна

Институт	ИНК	Кафедра	ТПС
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ)	Расчет бюджета научно-исследовательской работы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение анализ: Потенциальные потребители результатов исследования, конкурентные технические решения с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, FAST-анализ, определение возможных альтернатив проведения НИИ.
Планирование проведения и формирование бюджета научных исследований	Определение структуры плана проекта и трудоёмкости работ, разработка графика проведения НИИ, бюджет НИИ.
Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение интегрального показателя финансовой эффективности, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя эффективности и сравнительной эффективности вариантов исполнения.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Альтернативы проведения НИ
3. Планирование управления научно-техническим проектом
4. Определение ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко В.С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ5В	Ефремова М.В.		

Запланированные результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность совершенствовать и повышать свои специальные знания в области математических, физических, естественных, гуманитарных и экономических наук в комплексной инженерной деятельности на основе целостной системы научных знаний об окружающем мире;
P2	Способность адаптироваться к новым ситуациям, переоценивать накопленный опыт, анализировать свои возможности в понимании сущности и значения информации в развитии современного общества, владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации; использование для решения задач современных технических средств и информационных технологий в профессиональной области.
P3	Способность использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом; эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды, демонстрируя навыки руководства отдельными группами исполнителей; в том числе над междисциплинарными проектами, уметь проявлять личную ответственность, приверженность профессиональной этике и нормам ведения профессиональной деятельности.
P4	Способность к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности; разрабатывать самостоятельно техническую документацию; четко излагать и защищать результаты инженерной деятельности в областях контроля деформации измерительной техники и точного приборостроения; приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности умения непосредственно не связанных со сферой деятельности.
P5	Умение использовать основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, основы теоретического и экспериментального исследования в инженерной деятельности при разработке средств измерения и контроля, используя макеты и средства автоматизированного проектирования в приборостроении.
P6	Умение профессионально эксплуатировать современное оборудование и приборы в соответствии с целями магистерской программы, организовывать технологическую подготовку производства приборных систем различного назначения и принципа действия, разрабатывать и внедрять новые технологические процессы с использованием гибких САПР и оценивать их экономическую эффективность и социальную ответственность.
P7	Способность проектировать приборные системы и технологические процессы с использованием средств САПР и опыта разработки конкурентоспособных изделий; осуществлять проектную деятельность в профессиональной сфере на основе системного подхода.
P8	Умение разрабатывать результаты исследований по анализу; способность разработать и проводить оптимизацию натурных экспериментальных исследований приборных систем с учётом критериев надёжности; использовать результаты научно-исследовательской деятельности.

P9	Умение организовывать современное обеспечение технологических процессов производства приборных систем; решать экономические и организационные задачи технологической подготовки приборных систем и выбирать системы обеспечения экологической безопасности в производстве и при технологическом контроле.
P10	Способность проектировать математические модели анализа и оптимизации объектов исследования, выбирать численные методы их моделирования или разработать новый алгоритм решения задачи; выбирать оптимальные методы и программы экспериментальных исследований и испытаний, проводить измерения с выбором современных технических средств и обработкой результатов измерений.
P11	Способность формулировать цели, определять задачи, выбирать методы исследования в области приборостроения на основе подбора и изучения литературных и патентных и других источников; разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию на объекты приборостроения, а также осуществлять системные мероприятия по реализации разработанных проектов и программ; составлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам исследовательской деятельности

Реферат

Выпускная квалификационная работа 158 с., 59 рис., 26 табл., 32 источника, 4 прил.

Ключевые слова: микроэлектромеханическая системы, смещение нуля, микроконтроллер, гироскоп, акселерометр, угловая скорость, персональная навигация, бесплатформенная инерциальная система, ускорение.

Объектом исследования являются МЭМС датчики системы позиционирования пространственного положения человека.

Цель работы – знакомство с существующими методами определения местоположения тела в пространстве, анализ погрешностей МЭМС датчиков, моделирование системы позиционирования пространственного положения человека, создание макета системы персональной навигации.

В процессе исследования проводился обзор существующих систем персональной навигации, создавалась структура системы, выбирались МЭМС датчики, анализировались погрешности выбранных датчиков, проводилось моделирование данной системы.

В результате исследования был создан макет микроэлектромеханической системы позиционирования пространственного положения человека, откалиброваны МЭМС датчики, создан корпус для данной системы. Результат исследования показал, что все расчеты сделаны верно, и система правильно работает.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: создание конструкции системы персональной навигации, анализ технологических показателей системы, создание опытного образца.

Степень внедрения: на основании моделирования и расчетов создан макет системы персональной навигации, проведены испытания.

Область применения: определение пространственного положения людей, особенно важно для спасателей МЧС и пожарных.

Экономическая эффективность/значимость работы составляет около 190 000 рублей, с учетом заработной платы, специального оборудования и накладных расходов.

В будущем планируется усовершенствовать систему персональной навигации с целью повышения точности, уменьшения габаритов конструкции, усовершенствования технологии.

Определения

Микроэлектромеханические системы – устройства, объединяющие в себе микромеханические и микроэлектронные компоненты.

Датчик – это элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства, преобразующий контролируемую величину (температуру, давление, частоту, силу света, электрическое напряжение, ток и т.д.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы.

Инерциальная система отсчета - система, в которой все свободные тела движутся прямолинейно и равномерно, либо находятся в состоянии покоя.

Система ориентации - система, обеспечивающая определенное положение осей аппарата относительно некоторых заданных направлений.

Гироскоп - устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета.

Акселерометр - устройство, измеряющее проекцию кажущегося ускорения.

Инерциальная навигация - метод определения параметров движения и координат объекта, не нуждающийся во внешних ориентирах или сигналах.

Калибровка - определение погрешностей или поправок одной (многозначной) меры, например, или совокупности мер, необходимых для получения правильных результатов измерений.

Бесплатформенная система - система, не имеющая гиростабилизированной платформы.

Сила Кориолиса - одна из сил инерции, использующаяся при рассмотрении движения материальной точки относительно вращающейся системы отсчёта.

Перечень сокращений

МЭМС	- Микроэлектромеханическая система;
БИНС	- Бесплатформенная инерциальная навигационная система;
ММГ	- Микромеханический гироскоп;
ИНС	- Инерциальная навигационная система;
СО	- Система ориентации;
ЧЭ	- Чувствительный элемент;
АЦП	- Аналого-цифровой преобразователь;
ВП	- Виртуальный прибор;
ИИБ	- Измерительный инерциальный блок;
ФНЧ	- Фильтр низких частот;
ФВЧ	- Фильтр верхних частот;
СПМ	- Спектральная плотность мощности;
БЧЭ	- Блок чувствительных элементов.

Оглавление

Введение.....	15
1. Аналитический обзор существующих методов персональной навигации с целью выяснения достижений мировой науки и техники в рассматриваемой области.....	17
1.1 Как раньше определяли местоположение.....	17
1.2 Виды современных систем позиционирования.....	21
1.3 Бесплатформенная инерциальная система.....	28
2. Структура системы персональной навигации.....	30
2.1 Реализация системы.....	30
2.2 МЭМС датчики.....	32
3. Выбор датчиков, сравнение достоинств и недостатков основных типов навигационных датчиков.....	42
4. Анализ погрешностей системы персональной навигации.....	51
4.1 Стабильные погрешности.....	51
4.2 Нестабильная погрешность.....	52
5. Алгоритм фильтрации и объединения показаний сенсоров ИИУ для определения положения объекта в трехмерном пространстве.....	57
6. Моделирование системы персональной навигации для различных траекторий.....	61
7. Виртуальный прибор с использованием LabVIEW для снятия данных.....	64
8. Разработка экспериментального макета системы персональной навигации.....	65
9. Вопросы технологии.....	69
9.1 Разработка конструкции блока МЭМС датчиков системы позиционирования пространственного положения человека.....	69
9.1.1 Компоновка всех элементов системы в корпус с учетом эргономических требований.....	69
9.1.2 Обоснование выбора материала корпуса.....	69
9.1.3 Проверка корпуса на прочность.....	70
9.1.4 Оценка технологичности блока как сборочной единицы.....	81
9.2 Технологический процесс сборки поясного и наколенного модулей системы.....	84
9.3 Технологический процесс изготовления корпуса.....	86

10. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	88
10.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	88
10.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	88
10.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	89
10.1.3 FAST-анализ.....	90
10.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	92
10.2 Инициация проекта.....	93
10.2.1 Цели и результат проекта.....	93
10.2.2 Организационная структура проекта.....	94
10.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	94
10.3.1 Иерархическая структура работ проекта.....	94
10.3.2 Контрольные события проекта.....	95
10.3.3 План проекта.....	95
10.3.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	97
10.3.5 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	100
10.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	102
11.1 Социальная ответственность.....	104
11.1.1 Производственная безопасность.....	104
11.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований.....	105
11.1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	109
11.2 Экологическая безопасность.....	111
11.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	112
11.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	113
11.4.1 Правовые вопросы обеспечения безопасности.....	113
11.4.2 Организационные вопросы обеспечения безопасности.....	114

Заключение.....	117
Список публикаций.....	118
Список используемых источников.....	119
Приложение А.....	121
Приложение Б.....	139
Приложение В.....	149
Приложение Г.....	157

Введение

Современные системы позиционирования являются громоздкими и имеют слабую помехозащищенность, поэтому использовать их неудобно и ненадежно. Обеспечить высокую точность определения местоположения человека от наличия внешних сигналов возможно за счет использования инерциальных микроэлектромеханических систем (МЭМС), компоненты которых имеют размеры от 1 до 100 микрометров.

Востребованность в МЭМС постоянно растет в связи с ростом рыночных потребностей, на сегодняшний день МЭМС-устройства применяются практически повсюду. В России данная область находится на пути становления.

МЭМС - это устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. МЭМС состоят из механических микроструктур, микродатчиков, микроактюаторов и микроэлектроники, объединенных на одном кремниевом чипе.

Научно-техническая значимость и актуальность проекта обусловлена появлением и постоянным возрастанием множества объектов, требующих решения навигационных задач, что обуславливает необходимость создания малогабаритных автономных или ограниченно автономных навигационных систем среднего класса точности (до единиц метров). В частности, система предназначена для обеспечения действий спасателей внутри закрытых помещений в сложных условиях: внутри зданий, в подвалах, в завалах, в тоннелях, в подземельях, под водой и т.п.

Цель диссертационного исследования состоит в создании миниатюрной системы позиционирования пространственного положения человека для МЧС России.

Современные действия МЧС России характеризуются решительностью целей, высокой динамичностью и маневренностью сил, широким применением новых технических средств. В настоящее время состояние и перспективы развития системы управления являются

важнейшим показателем готовности МЧС России, уровня их организационного и технического совершенства. Повышение качества, методов и организационных структур управления невозможно без использования последних достижений науки и техники. Основным направлением совершенствования управления является широкое использование современных средств для определения ориентации и навигации.

1. Аналитический обзор существующих методов персональной навигации с целью выяснения достижений мировой науки и техники в рассматриваемой области.

1.1 Как раньше определяли местоположение

Даже в Древней Греции умели определять географические координаты, широту и долготу, для определения положения точки на земной поверхности. Теперь мы определяем долготу от какого-то условно выбранного меридиана, например, от Гринвича, а широту в градусах от экватора.

Древние не знали о системе меридианов и параллелей на географических картах и глобусах, и определяли широту либо по высоте Полярной звезды, либо по длительности самого длинного светового дня в году, либо по длине самой короткой тени. Сложнее было с долготой или разностью долгот, которую можно определить лишь как разность местных времен, отсчитанных в двух точках в один и тот же физический момент.

Была проблема в том, чтобы либо доставить время из одного пункта в другой, либо зарегистрировать одно явление в разных пунктах. В качестве такого явления Гиппарх предложил использовать лунные затмения, но, к сожалению, не указал методы измерения местного времени. Нельзя было использовать солнечные часы непосредственно для этой цели, потому что во время лунного затмения Солнце находится ниже горизонта. Точность определения одной и той же фазы затмения также была очень низкой.

Прошло около тысячелетия, прежде чем люди научились определять широту и долготу с довольно высокой точностью. Сложнее всего в то время было мореплавателям, когда они не знали координаты своих кораблей.

В 1567 году испанский король Филипп II назначил награду за решение проблемы определения долготы в открытом море.

Объединенные провинции Голландии назначили премию в размере 30 000 флоринов. Награду также обещали Португалия и Венеция. Одним из самых известных претендентов на этот приз был Галилей Галилей.

Используя разработанный им телескоп, Галилей наблюдал затмения спутников Юпитера, составлял таблицы, которые предсказывали эти затмения и предлагали использовать моменты затмений для определения долготы наблюдателя.

Моряки, имеющие свое местное время, определенному, например, по Солнцу, и, зная из таблиц, время, когда затмения спутников Юпитера происходят на каком-то меридиане, могли рассчитать разницу во времени, то есть долготу своего корабля от нулевого меридиана.

Другой метод, также астрономический, был предложен для определения долготы: согласно наблюдениям положения Луны среди звезд. Этот метод, в принципе, аналогичен методу Галилея, только в нем наблюдались не затмения спутников Юпитера, а были определены расстояния от Луны до эталонных, известных звезд.

К сожалению, оба астрономических метода не нашли широкого применения в морской навигации. Во-первых, это возможно только в ясные ночи. Во-вторых, они требуют хороших знаний теории движения спутников Юпитера и Луны. Теория, особенно для Луны, в XVII-XVIII веках отсутствовала. В-третьих, моменты затмения спутников со стороны корабля определяются с большими ошибками. Это также относится к положению Луны среди звезд. В-четвертых, астрономические наблюдения требуют высокой подготовки штурмана, что в то время было редкостью.

Поэтому ученые усердно искали другой, более простой способ определения долготы. Идея этого метода была очевидна - нужно создать часы, с помощью которых время нулевого меридиана может быть перенесено на корабль. Часы с маятником для этой цели были непригодны, потому что они не терпели качки.

В 1714 году парламент Англии принял законопроект, предусматривающий присуждение вознаграждения лицу или группе лиц, которые смогут определять долготу на море. Приз, хотя и не полностью, был получен изобретателем хронометра, лондонского часовщика Джона

Харрисона. Его первый хронометр был сделан в 1735 году, затем несколько десятилетний Харрисон усовершенствовал свое потомство.

С появлением хронометра, метод определения координат с помощью хронометра позволил найти положение корабля с точностью порядка 1 км. Этой точности было достаточно морякам в открытом море, но была недостаточной вблизи побережья, поэтому маяки снабжались световыми и звуковыми сигналами.

Реальная революция в определении координат была сделана изобретением телеграфа, а затем радио. Теперь сигналы о точном времени от Гринвича, или от точки с известной долготой, могут быть взяты в любой точке мира. Все зависит от мощности передатчика и чувствительности приемника.

Проблема определения долготы была решена на протяжении многих десятилетий. Однако не всегда возможно производить астрономические наблюдения, им требуются специальные навыки, они очень неудобны для самолета, качающегося корабля, а на Земле без стационарных полюсов тоже нельзя получить хорошие результаты.

Во второй половине этого столетия возникла новая идея определения координат на поверхности Земли. Три радиостанции передают сигналы точного времени в один и тот же физический момент. Затем навигатор корабля привязывает эти сигналы к часам, которые синхронизированы с часами питающих станций, и находит временные задержки сигналов t_1 , t_2 , t_3 . Другими словами, время, в течение которого радиоволна должна пройти от станции передатчика до приемника. Умножая затем данные времени со скоростью света, навигатор находит расстояние l_1 , l_2 , l_3 со всех трех станций. Рисуя круги на карте вокруг станции с радиусами l_1 , l_2 , l_3 , навигатор на своем пересечении определяет свое место на карте. На самом деле все намного сложнее, потому что нужно учитывать кривизну земного шара, скорость распространения радиоволн, ошибки в приемном оборудовании и многое

другое. Особенно сложно синхронизировать часы судна и поддерживать эту синхронизацию в течение некоторого времени.

Однако с появлением компьютеров и атомных часов, с точностью 10^{-12} секунд все эти задачи были решены. Если точность синхронизации часов и ошибок составляет 3-5 микросекунд, то бортовой компьютер может найти место в космосе или самолет с погрешностью около 1 км. И эти данные с большим количеством специальных радиостанций могли издаваться непрерывно. Такие системы, как американский Logan и советская радионавигационная система, полностью решают задачи с точностью до нескольких сотен метров.

Изобретение спутников Земли помогло намного облегчить задачу в определении координат. Если на спутник установить атомные часы, он может выполнять задачи передающей станции. Преимущества очевидны - влияние атмосферы при получении сигналов со спутника минимально, ошибки приема малы.

Несущественным недостатком такого определения является то, что спутник подвижен, но эта проблема решается. На бортовом компьютере спутника строятся данные о его траектории, то есть его координаты, которые передаются вместе с сигналами времени в специальном коде. Код необходим, чтобы сообщить, с какого спутника приходит информация.

Если получить сигналы от четырех спутников, то можно составить и решить систему уравнений, и определить координаты местонахождения и ошибку синхронизации местных часов. Учитывая, что стабильность современных атомных часов резко возросла (стабильность сейчас составляет около $5 \cdot 10^{-14}$), можно получить координаты положения на земной поверхности с помощью навигационных спутников с точностью до нескольких метров. Специальное, более совершенное оборудование позволяет говорить о сантиметровой точности. Для определения координат спутника требуются специальные измерения траектории, а также центр их

обработки. В США есть GPS-навигационная система, у нас есть такая система в России, она называется ГЛОНАСС.

Эта система должна состоять из 24 спутников, расположенных на разных орбитах, так что по меньшей мере четыре спутника могут быть видны друг от друга.

Приемное оборудование компактно, его можно встроить даже в мобильный телефон. Пользователь может видеть карту местности на компьютере и точку на нем. Таким образом любой человек может не заблудиться даже в чужой стране.

1.2 Виды современных систем позиционирования

Современные системы позиционирования используют для определения местоположения несколько групп технологий. Прежде всего, это спутниковые навигационные системы - GPS, GLONASS, Beidou, Galileo и другие.

Самая многочисленная группа радиочастотных технологий, включая RFID-метки. В отдельной группе можно выделить технологию инфракрасного и ультразвукового позиционирования. Среди радиочастотных технологий можно выделить технологии, изначально предназначенные для оказания услуг связи, приспособленные для позиционирования (Wi-Fi, Bluetooth, сотовая связь), и те, которые по физическим свойствам модуляции в наибольшей мере подходят для позиционирования – это CSS (ISO24730-5), UWB, NFER и другие.

1.2.1 Глобальные навигационные системы

Точность позиционирования менее 6 метров обеспечивает GPS. Новое поколение, запускаемых спутников обеспечивает точность более 60-90 см. Общий недостаток глобальных навигационных систем – это отсутствие сигнала в подвалах, туннелях, метро. На прием сигналов GPS влияют помехи от наземных источников. Поскольку орбиты GPS имеют наклон около 55°,

точность в высоких широтах значительно снижается, поскольку спутники GPS видны низко над горизонтом. В этом отношении спутники ГЛОНАСС имеют преимущество наклона своих орбит около 65° (рассчитанных для всей территории России).

1.2.2 Позиционирование в сотовых сетях

Одним из первых появилось позиционирование в сотовых сетях, задолго до глобального. Это объясняется широким распространением сотовой связи и относительной простотой метода Cell Of Origin - в месте расположения соты, к которой подключен абонент. Точность этого позиционирования определяется радиусом соты. Для «пикосека» он составляет 100-150 метров, для большинства базовых станций - километр или больше.

Существуют методы для более точного определения координат, с использованием нескольких базовых станций.

Angle of arrival - направление к абоненту. Способ основан на том факте, что базовая станция имеет 3-6 антенных решеток, каждая из которых обслуживает свой сектор (на его частоте). Местоположение определяется на пересечении секторов нескольких станций. Чем больше секторов в соте, тем меньше сектор, следовательно, меньше пересечение секторов и выше точность. В среднем точность составляет 100-200 метров.

Time of arrival - время прибытия. Этот метод измеряет время прибытия сигнала от абонента до минимум 3 базовых станций. Для достижения точности требуется синхронизация базовых станций с атомными часами или сигналами со спутника. Точность метода составляет около 100 метров.

Гибридный метод сводится к оснащению мобильного телефона GPS-приемником.

В дополнение к этому существует ряд фирменных технологий:

Мобильная система позиционирования (Ericsson) - точность 100 м;

RadioCameraTM - точность 50 м;

SnapTrackTM (Wireless Assistant GPS) - точность до 15 м;

CursorTM (CPS) - точность 50 м;

Finder (CellPoint) - точность 75 м.

Стоимость метода зависит от точности определения координат. Идентификация объекта в сотовых сетях возможна, но обычно это не является главной задачей.

1.2.3 WiFi позиционирование

Самый простой способ позиционирования в сетях Wi-Fi. Этот метод используется для предоставления различных услуг в зависимости от типа подключенного устройства и его местоположения. Диапазон точек доступа WiFi обычно составляет от 30 до 200 метров, от этого зависит точность позиционирования. Для повышения точности необходимо увеличить мощность радиосигнала, время прохождения от абонента до точки доступа и направление. Точность таких систем в идеальных условиях 3-5 м., в реальности в 3 раза ниже. Также, как и в позиционировании в сотовых сетях идентификация объекта возможна.

1.2.4 Локальные системы позиционирования

К локальным системам позиционирования относятся оптические (обычно инфракрасные) и ультразвуковые системы. Их радиус действия составляет примерно 3-10 метров. Поскольку свет и звук практически не проходят через стену, то это гарантирует нахождение объекта в конкретном помещении.

Инфракрасное позиционирование

Мобильная метка в системе инфракрасного позиционирования испускает инфракрасные импульсы, которые принимаются приемниками системы, имеющими фиксированные координаты. Местонахождение метки рассчитывается по Time-of-flight (ToF) – времени распространения сигнала от источника до приемника. Недостаток метода – чувствительность к помехам

от солнечного света. Применение инфракрасного лазера повышает дальность, точность, но к сожалению, и стоимость. Точность позиционирования этим методом 10-30 сантиметров.

Ультразвуковое позиционирование

В ультразвуковых системах позиционирования используются частоты от 40 до 130 кГц. Чтобы определить координаты метки, Time-of-flight обычно измеряется четырьмя приемниками. Основной недостаток - чувствительность к потере сигнала. Такую систему нужно тщательно планировать, чтобы устранить недостатки. Преимущество ультразвуковых систем - самая высокая точность позиционирования, достигающая трех сантиметров.

1.2.5 Системы позиционирования с использованием пассивных радиочастотных идентификаторов (RFID)

Системы с пассивными метками RFID используются, в основном, для идентификации, в основном с использованием штрих-кодов или магнитных карт. Система включает RFID-метки с уникальными кодами и считывателем. Считыватель непрерывно генерирует радиоизлучение определенной частоты, чип метки, попадающие в радиус считывателя, используют это излучение в качестве источника питания и передает идентификационный код считывателю. Диапазон считывателя составляет около одного метра. Стоимость систем с пассивными метками RFID выше стоимости систем со штрих-кодами или магнитными картами, но использование пассивной RFID существенно разгружает операторов.

1.2.6 Системы позиционирования с использованием активных RFID

Активные радиочастотные метки используются, когда необходимо отслеживать объекты на относительно больших расстояниях. Рабочие частоты активной RFID составляют 455 МГц, 2,4 ГГц или 5,8 ГГц, а диапазон - до 100 метров. Приводятся активные метки от встроенной батареи.

Существуют активные ярлыки двух типов: радиомаяки и транспондеры. Транспондеры включаются, получая сигнал считывателя. Они

используются для оплаты поездок, контрольно-пропускных пунктов, входных порталов и других подобных систем.

Маяки используются в системах позиционирования в реальном времени. Маяк отправляет пакеты с уникальным идентификационным кодом по команде или с определенной периодичностью. Пакеты принимаются по меньшей мере тремя приемниками, расположенными по периметру контролируемой зоны. Расстояние от маяка до приемников с фиксированной координатой определяется углом направления к маяку угла приема (AoA), временем прибытия сигнала времени прибытия (ToA) или временем распространения сигнала от маяка до приемника времени (ToF).

Инфраструктура системы построена на основе проводной сети, и в последних двух случаях она требует синхронизации.

Термин «активная RFID» охватывает обширный класс различных продуктов. Большинство радиочастотных систем позиционирования используют активные RFID для идентификации и размещения объектов. Поэтому характеристики активных радиочастотных меток, включая точность позиционирования и стоимость, сильно различаются в зависимости от конкретного производителя.

1.2.7 Позиционирование по технологии «ближнего поля»

Технология дистанционных измерений в ближнем электромагнитном поле (вблизи поля электромагнитного диапазона - NFER) использует марк-передатчики и один или несколько приемников. В системах NFER приемник используется для определения расстояния между различными электромагнитными полями. Поскольку это различие колеблется от 90° вблизи излучающей антенны до нуля на расстоянии полуволны, то длина полуволны определяет диапазон системы. На частоте 1 МГц длина волны составляет 300 м, а диапазон составляет -150 м при частоте 10 МГц - 30 и 15 м соответственно.

Точность позиционирования в реальных условиях составляет около метра на расстоянии до 30 метров. Относительно низкая частота радиоволн

облегчает их прохождение в сложных производственных средах. Радиоволны охватывают препятствия, не отражаются. Поэтому технология NFER имеет преимущества в сложной конфигурации помещений с большим количеством препятствий. Недостаток системы NFER связан с низкой эффективностью антенны. Для эффективной работы антенна должна быть соизмерима с длиной волны. Фактически, он в сотни раз меньше, что требует увеличения передатчика и, соответственно, размеров и веса меток.

1.2.8 Ultra Wideband (UWB) позиционирование

Технология UWB (Ultra Wideband) использует короткие импульсы с максимальной полосой пропускания на минимальной центральной частоте. Для большинства производителей центральная частота составляет несколько ГГц относительная ширина полосы составляет 25-100%. Технология используется для связи, радиолокации, измерения расстояния и позиционирования.

Это происходит при передаче коротких импульсов, широкополосных по своей природе. Идеальный импульс, как показывает анализ Фурье, обеспечивает бесконечную полосу пропускания. Сигнал UWB не похож на модулированные синусоидальные волны, но напоминает последовательность импульсов.

Производители предлагают различные варианты технологии UWB. Различают формы импульсов. В некоторых случаях, от мощных одиночных импульсов, в других - сотни миллионов маломощных импульсов в секунду. Он используется в качестве последовательной обработки сигналов и не является когерентным. Все это приводит к существенной разнице в характеристиках UWB-систем от разных производителей.

Преимущества технологии: надежная работа, высокая точность, устойчивость к многолучевому замиранию. Ограничения: сложность создания передатчика значительной мощности (типичная мощность - 50 мкВт, самая мощная - 10 мВт).

Кроме того, существуют ограничения со стороны органов управления частотой (система, как правило, от использования в помещениях, где их маломощный сигнал практически не обнаружен на фоне шума). Инфраструктура системы построена на основе проводной сети и требует синхронизации.

1.2.9 Инерциальная система позиционирования

Инерционная навигация - это метод навигации для определения координат и параметров движения различных объектов - кораблей, самолетов, ракет. Суть метода в том, что для этого не требуются внешние ориентиры или сигналы.

Сущность инерциальной навигации состоит в определении ускорения объекта и его угловых скоростей с помощью установленных на движущемся объекте приборов и устройств. По данным с этих устройств можно определять координаты этого объекта, его курс, скорость, пройденный путь и др. Это делается с использованием:

- линейные датчики ускорения (акселерометры);
- гироскопические устройства, воспроизводящие объект опорной системы (например, с использованием гиростабилизированной платформы) и позволяющие определять углы поворота и наклона объекта, используемые для стабилизации и управления движением.
- вычислительные устройства, которые посредством их интеграции находят скорость объекта, его координаты и т. д.;

Преимущества методов инерциальной навигации состоят в автономности, помехоустойчивости и возможной полной автоматизации всех навигационных процессов. Благодаря этим методам инерциальной навигации все чаще используется при решении задач навигации на подводных и воздушных судах, космических аппаратах и транспортных средствах и других движущихся объектах.

1.3 Бесплатформенная инерциальная система

Базовым компонентом системы является бесплатформенная инерциальная система (БИНС), т. е. не имеющая гиростабилизированной платформы.

Бесплатформенный принцип организации инерциальных навигационных систем и систем ориентации основывается на интегрировании угловых скоростей и ускорений. В системах ориентации используются три метода: на основе углов Эйлера-Крылова, на основе направляющих косинусов и на основе параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов).

При составлении алгоритмов функционирования инерциальных систем активно используется избыточность информации, получаемая с МЭМС приборов – микрогироскопов, микроакселерометров, магнитометров для компенсации опасной погрешности – дрейфа гироскопов.

Основным источником информации инерциального алгоритма ориентации являются проекции относительной угловой скорости, получаемые на основе сигналов трех датчиков угловых скоростей (ДУС) и проекции угловой скорости географического трехгранника, получаемые вычислительным путем. Выходом алгоритма ориентации являются оценки углов тангажа, крена и рыскания: ν , γ , ψ . В алгоритме БИНС используется интегрирование сигналов ускорений относительно земной системы координат, выделенных из показаний акселерометров с целью получения координат объекта – высоты полета и углов широты и долготы местоположения.

В БИНС акселерометры и гироскопы жестко связаны с корпусом прибора. Особенностью БИНС является использование гироскопов, как датчиков угловой скорости, и переход в географическую систему координат осуществляется алгоритмически, путем интегрирования этих скоростей. Для компенсации накапливающихся погрешностей в углах ориентации и координатах, свойственных ИНС, используются данные других

навигационных систем, в частности глобальных навигационных спутниковых систем, систем радионавигации, магнитометров (для получения данных по курсу), одометров (для получения данных о пройденном пути в наземном применении). Комплексование данных от различных навигационных систем осуществляется, как правило, за пределами БИНС.

В БИНС данные инерциальных измерителей дополняются данными магнитометра в тех случаях, когда отсутствуют воздействия сильных магнитных полей от сильноточных цепей или металлических конструкций, приводящих к возможности появления ошибок.

В общем случае система позиционирования личного состава сил реагирования функционирует вне зависимости от мест ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе в закрытых помещениях, адаптируется к условиям проведения операции и обеспечивает оператора Единой системы управления силами и средствами навигационными данными о перемещениях личного состава по территории и (или) внутри объекта.

2. Структура системы персональной навигации

2.1 Реализация системы

Задача МЭМС датчиков системы позиционирования пространственного положения человека состоит в определении координат человека внутри помещений или в местах, где глобальная система не работает, и в случае падения сигнализировать об этом. Разрабатываемая система персональной навигации включает в себя датчики первичной информации:

- гироскопические датчики угловой скорости (ГДУС);
- акселерометры.

Гироскопы используются для определения параметров углового движения объекта, акселерометры - для определения параметров поступательного движения объекта.

Система персональной навигации размещается на теле человека, поэтому ее габариты должны быть небольшими, для этого акселерометры и гироскопы должны быть выполнены по технологии микроэлектромеханики (МЭМС). Отечественный и зарубежный опыт разработки МЭМС предполагает три концепции конструктивного исполнения устройства:

- размещение в обуви, вблизи стопы человека;
- размещение на одежде человека, на талии или поясе;
- размещение на ноге человека, выше коленного сустава.

Способ размещения датчика в обуви, вблизи стопы человека не практичен, потому что в этом случае требуется специальная обувь для спасателя. Способ размещения на одежде человека более удобный, потому что для этого не требуются никакие дополнительные элементы одежды. Для нашей системы датчики будем размещать на ноге, выше коленного сустава и на поясе человека.



Рисунок 1 - Расположение датчиков на теле человека

Конструкция разрабатываемой системы персональной навигации показана на рисунке 2, в ней можно выделить основные блоки:

- Блок чувствительных элементов, в котором находятся три одноосевых микромеханических гироскопа и акселерометр, которые предназначены для определения проекции абсолютной угловой скорости и ускорения;
- Блок аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для преобразования аналогового сигнала измерения гироскопов и акселерометра в цифровой;
- Блок микроконтроллера для сбора и первичной обработки данных вычислителя с алгоритмом навигации, ориентации для выработки пройденного пути и направления движения;
- Блок радиопередачи и приемник информации;
- Блок питания (аккумулятор).



Рисунок 2 - Функциональная схема системы персональной навигации

Блок чувствительных элементов соединен с блоком АЦП. Измеренные сигналы через блок АЦП преобразуются в цифровой сигнал и подаются на вход вычислителя. Выход от микроконтроллера подключен в входу модуля радиопередачи. С помощью антенны сигнал усиливается и передается на приемник, который соединен с компьютером, на котором установлена программа LabVIEW, с помощью которой сигнал отображается на экране.

2.2 МЭМС датчики

2.2.1 МЭМС гироскоп

Предназначение гироскопа заключается в измерении угловых скоростей относительно одной или нескольких осей. Отслеживать и фиксировать движение в трехмерном пространстве можно в совместном использовании гироскопа и акселерометра.

Большинство МЭМС гироскопов являются вибрационными. Внутри гироскопа есть рабочее тело, совершающее в одной плоскости возвратно-

поступательное движение. Если поставить это тело на вращающуюся платформу, плоскость которой совпадает с плоскостью колебаний, то на колеблющуюся массу начнет действовать сила Кориолиса. Эта сила направлена перпендикулярно направлению колебаний (рис.3а) и оси вращения. Определив силу Кориолиса и зная линейную скорость тела, вычисляется угловая скорость и ее угловое ускорение.

Все вибрационные гироскопы можно разделить на:

- балочные;
- биморфные.

Принцип работы балочных гироскопов (рис.3б): консольную балку или пластину заставляют колебаться с помощью пьезоэлементов в направлении оси X . Под действием силы Кориолиса при вращении относительно оси Z , параллельной продольной оси балки, возбуждаются колебания вдоль оси Y . Они регистрируются другими пьезоэлементами.

На нижней стороне балки приклеен пьезоэлемент, возбуждающий вибрацию, на боковых гранях также есть пьезоэлемент для измерения. Так как сложно обеспечить стабильные параметры клеевого соединения металла и пьезокермики, то такие гироскопы считаются низкотехнологичными.

В биморфных гироскопах резонатор представляет собой две склеенные пьезопластины, поляризованные в противоположных направлениях. Для возникновения колебаний к пластинам (или к одной из них) прикладывают напряжение, в результате одна пластина начинает сжиматься, другая растягиваться. Под действием силы Кориолиса при вращении возбуждаются вторичные колебания, которые можно распознать теми же электродами.

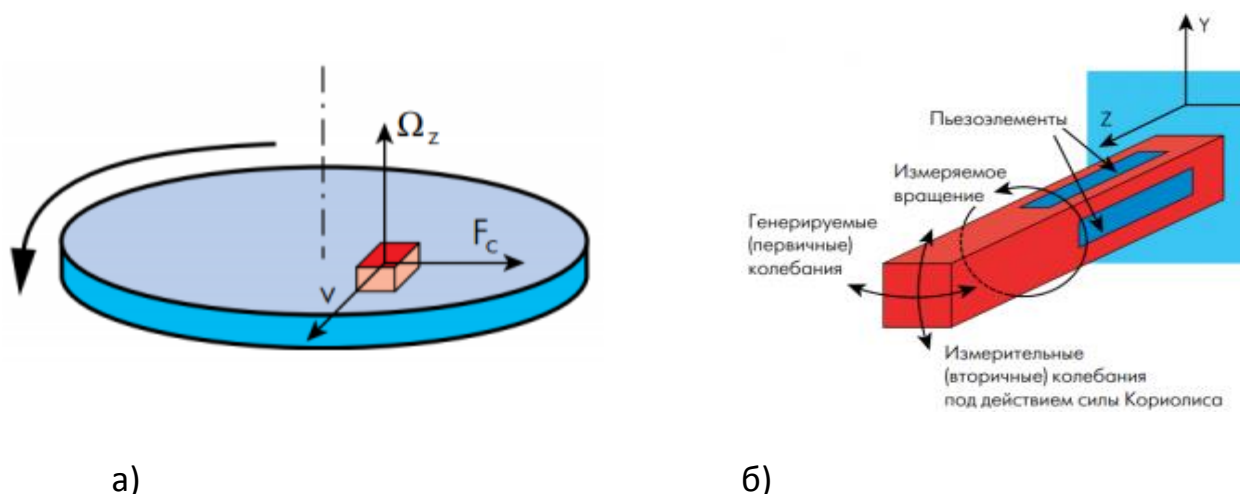


Рисунок 3 - Принцип действия
а) вибрационного гироскопа, б) балочного вибрационного гироскопа

В зависимости от типа движения чувствительного элемента в подвесе, МЭМС гироскопы можно разделить на три группы:

- RR-типа — с вращательным движением чувствительного элемента по обеим степеням свободы;
- RL-типа — с вращательным движением по одной степени свободы и с поступательным — по другой;
- LL-типа — с поступательными движениями по обеим степеням свободы.

Конструкция МЭМС гироскопа RL-типа представлена на рисунке 4. В этом гироскопе вынужденное движение чувствительного элемента, обеспечиваемое вибрационным двигателем, является поступательным; другое движение, являющееся информационным — вращательное. Конструкция выполнена из монокристаллического кремния и представляет собой камертон, реализованный в виде двух инерционных масс 1, закрепленных с помощью упругих элементов 2 во внешней рамке 3. Рамка связана с основанием также через упругие элементы 4, обеспечивающие ей

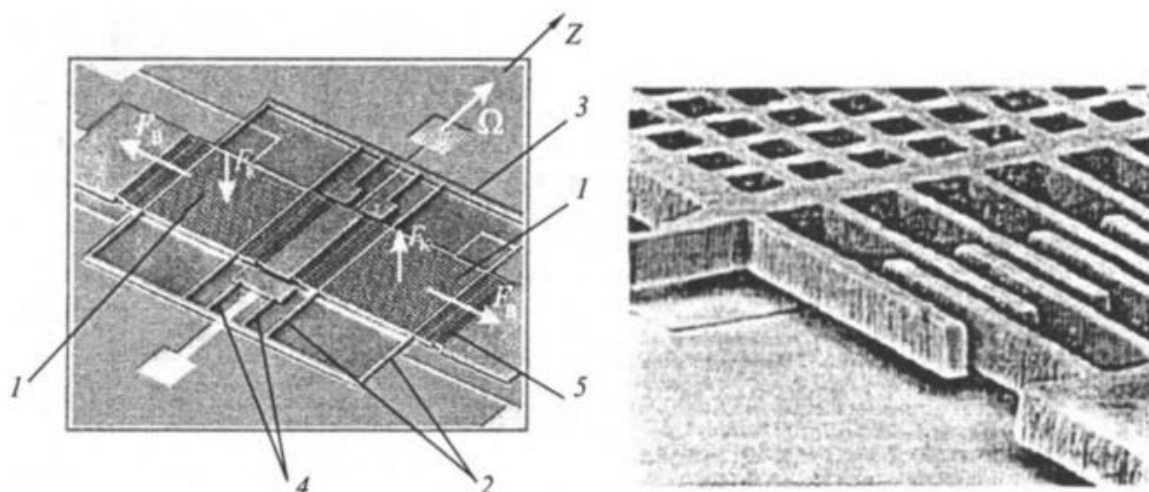


Рисунок 4 – Конструкция микромеханического гироскопа RL-типа

С помощью электростатического вибрационного двигателя, выполненного в виде «гребенчатой» структуры (рис. 5), силами возбуждаются противофазные поступательные колебания масс. При наличии угловой скорости основания Ω , вектор которой совпадает с измерительной осью 2 вращения рамки, возникают силы Кориолиса создающие переменный момент, приводящий к угловым колебаниям рамки вокруг оси 2 с частотой, равной частоте двигателя. Амплитуда колебаний рамки является мерой измеряемой угловой скорости. Измерение колебаний рамки осуществляется с помощью емкостного датчика, электроды которого расположены на подложке под инерционными массами. Номинальная величина емкостей между электродами и инерционной массой ~ 1 пФ. Характерный размер инерционной массы в плане ~ 1 мм. Толщина подвеса с целью увеличения жесткости его конструкции и увеличения чувствительности МЭМС гироскопа доведена до 400 мкм.

В конструкциях МЭМС гироскопов RR-типа реализован упругий карданный подвес чувствительного элемента. Инерционная масса чувствительного элемента расположена симметрично относительно плоскости механической структуры. Вокруг оси внутренней рамки с помощью электростатического вибрационного двигателя, реализованного в

виде пары электродов, расположенных на диэлектрической подложке под внутренней рамкой, создается переменный кинетический момент. При появлении измеряемой угловой скорости, перпендикулярной плоскости механической структуры подвеса, возникает переменный гироскопический момент, приводящий к колебаниям внешней рамки. Амплитуда этих колебаний пропорциональна измеряемой угловой скорости. Съём колебаний осуществляется с помощью емкостного датчика, пара электродов которого расположена под внешней рамкой.

ММГ LL-типа (гироскопы с сосредоточенной массой,)

В основу конструктивной схемы МЭМС гироскопов LL-типа положен выполненный из поликристаллического кремния упругий подвес чувствительный элемент с двумя поступательными степенями свободы в плоскости подвеса. В конструкции гироскопа используются два независимых упругих подвеса двух чувствительных элементов на одной подложке, возбуждаемых с помощью гребенчатого электростатического вибрационного двигателя и объединенных дифференциальной системой емкостного съема, образованной каждым из чувствительных элементов его системой гребенчатых электродов емкостного датчика и системой электродов, расположенных на подложке.

Такая конструкция МЭМС гироскопов обеспечивает снижение погрешности гироскопа от линейных ускорений, а также от ударов и линейных вибраций основания. Толщина механической структуры подвеса — 6 мкм. Корпус МЭМС гироскопа не вакуумируется, поэтому, несмотря на невысокую жесткость подвеса из-за его малой толщины и относительно большой площади, устойчивость к воздействию ударов и вибраций в направлении, перпендикулярном плоскости подложки, обеспечивается воздушной «подушкой», возникающей в зазоре между подложкой и поверхностью чувствительного элемента. Прибор размещается в керамическом корпусе размером 7х7х3 мм и имеет массу менее 1 г.

Достоинством этого МЭМС гироскопа является его высокая защищенность от линейных перегрузок, вибраций и ударов, обеспечиваемая воздушным демпфированием в подвесе и дифференциальными структурами подвеса и системы съема. Другое важное достоинство — расположение сервисной электроники в интегральном исполнении на одной подложке с механической структурой в одном чипе, что существенно снижает уровень паразитных и шумовых сигналов в системе съема. В качестве достоинства МЭМС гироскопов следует также отметить отсутствие необходимости в обеспечении вакуума в корпусе гироскопа. Величина случайного дрейфа составляет $\sim 0,3$ град/с.

МЭМС гироскоп LL-типа (гироскоп с кольцевым резонатором)

В этом гироскопе в качестве чувствительного элемента используется кольцевой резонатор. Достоинством подобных МЭМС гироскопов является их устойчивость к внешним механическим воздействиям, что обеспечивается симметрией конструкции кольцевого резонатора и его подвеса. Конструкция обеспечивает минимизацию влияния паразитных степеней свободы, а также температурную стабильность собственной частоты резонатора и его добротности. В известных МЭМС гироскопах с кольцевым резонатором, как правило, реализуется схема компенсационного типа. Случайный дрейф гироскопа составляет величину порядка 0,2 град/с. На рисунке 6 представлен внешний вид варианта МЭМС гироскопа с кольцевым резонатором.

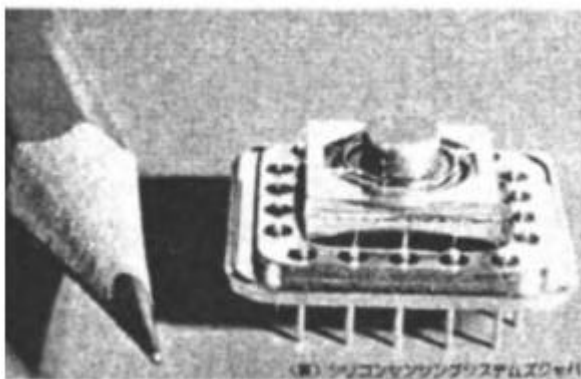


Рисунок 6 – Внешний вид МЭМС гироскопа с кольцевым резонатором

В другом варианте конструкции МЭМС гироскопа с кольцевым резонатором фирмы BAE Systems применяется электростатическая система

возбуждения и емкостная система съема сигнала. Такой вариант конструкции существенно упрощает изготовление и сборку МЭМС гироскопов, обеспечивает возможность балансировки параметров кольцевого резонатора с помощью электростатического привода, уменьшает габариты и массу, позволяет избавиться от проблем, связанных с нестабильностью его магнитных компонент, повысить его устойчивость по отношению к внешним механическим и температурным воздействиям и снизить стоимость МЭМС гироскопа.

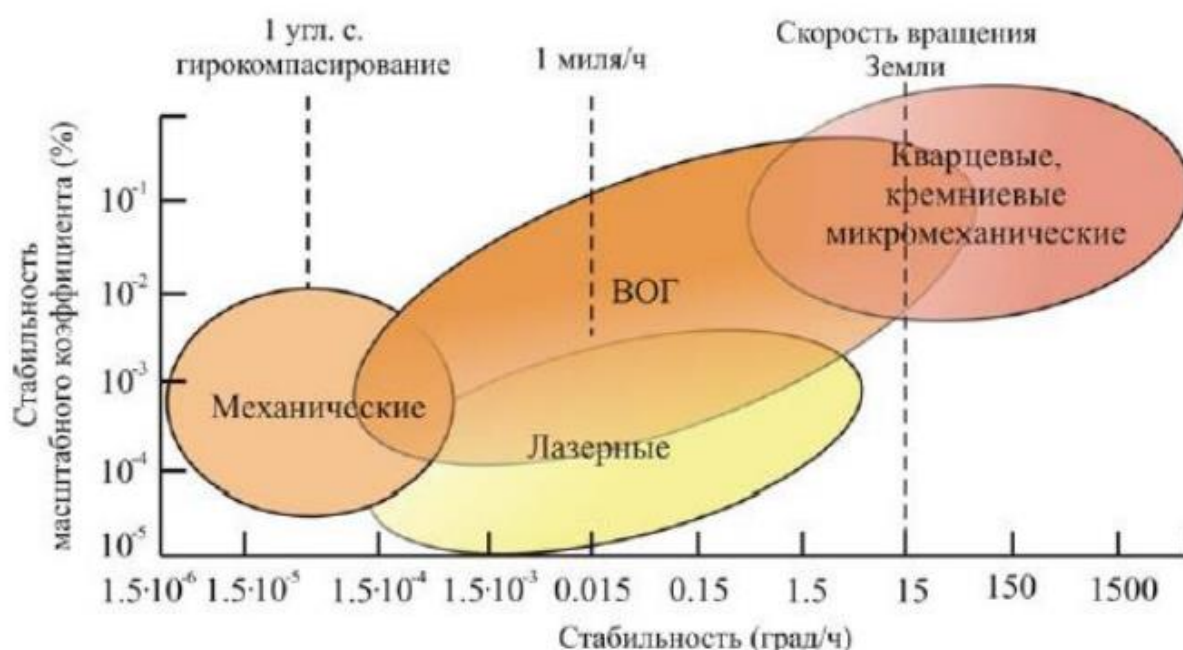
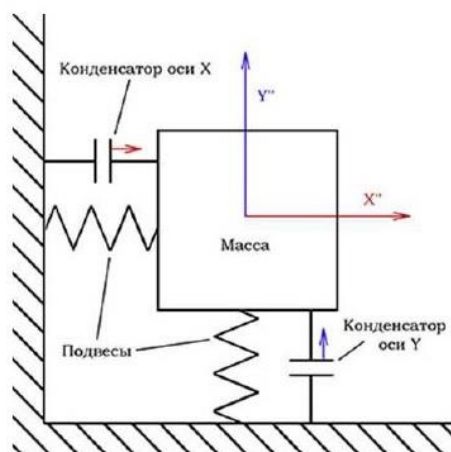


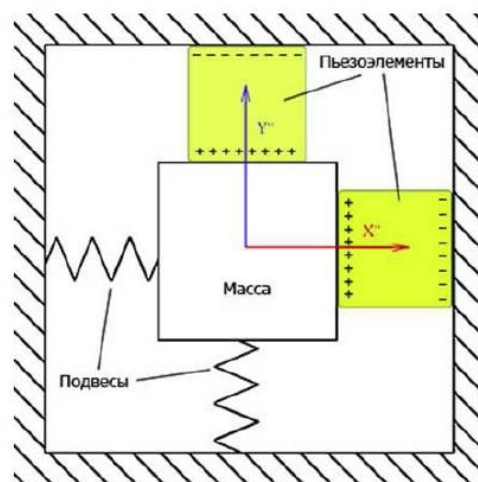
Рисунок 7 – Области распределения характеристик, определяющих класс точности гироскопов различного типа

2.2.2 МЭМС акселерометр

Акселерометр - это устройство, которое измеряет проекцию кажущегося ускорения, то есть разницу между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением. Подвижная часть такой системы, работающая на конденсаторном принципе представляет собой обыкновенный грузик, который смещается в зависимости от наклона прибора. В зависимости от смещения изменяется емкость конденсатора. Определить ускорение можно зная смещение грузика.



а)



б)

Рисунок 8 - Основной принцип работы акселерометров.

а) конденсаторных; б) на пьезоэлементах

В пьезоэлектрических системах имеется грузик, который воздействует на пьезокристалл и вырабатывает электрический ток. Рассчитать ускорение можно зная параметры всей системы.

Существует и еще один тип акселерометров, который в корне отличается от конденсаторного и пьезоэлектрического. Такие акселерометры называются термальными. Их архитектура предусматривает использование пузырька воздуха. При ускорении пузырек отклоняется от своего начального положения, и это фиксируется датчиками. Зная, на сколько сместился пузырек при движении, можно рассчитать величину ускорения.

В микромеханическом исполнении реализуются в основном три схемы акселерометров с упругими повесами чувствительного элемента как прямого, так и компенсационного преобразования:

- МЭМС акселерометр с поступательным перемещением чувствительного элемента;
- МЭМС акселерометр с упругим подвесом маятникового типа;
- вибрационный МЭМС акселерометр.

В качестве датчиков перемещения чувствительного элемента используются емкостные, а также тензорезистивные и пьезоэлектрические датчики. Компенсация измеряемых инерционных сил и моментов

осуществляется с помощью датчиков силы или момента магнитоэлектрического или электростатического типов. Диапазон максимальных ускорений, измеряемых с помощью МЭМС акселерометра может достигать величины порядка 105 g. На рис. 9 (а, б) показаны маятниковые МЭМС акселерометры. Конструкция на рис. 9 (а) предназначена для использования в специальных боеприпасах, испытывающих очень высокие ударные перегрузки, и позволяет измерять ускорения до 105 g. МЭМС акселерометр, конструкция которого представлена на рис. 9 (б), предназначен для использования в системах ориентации и навигации разнообразных подвижных объектов; погрешность этого МЭМС акселерометра составляет $(10^{-4} - 10^{-3})$ g.

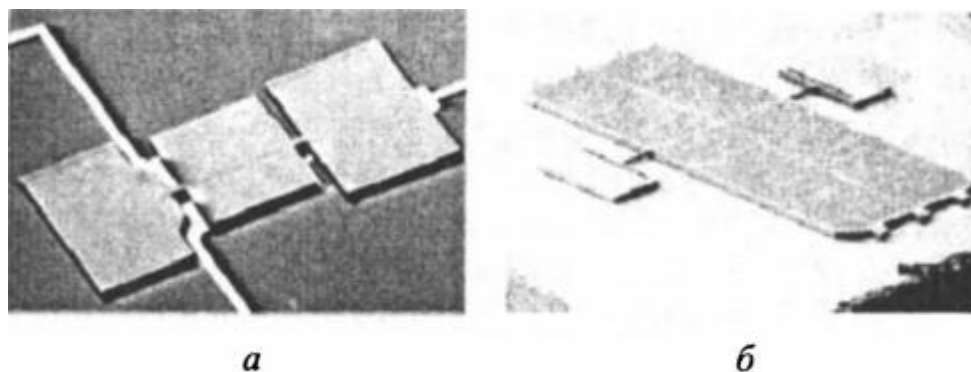


Рисунок 9 – МЭМС акселерометр маятникового типа

Больших успехов в разработке ММА добилась компания Analog Devices, чьи МЭМС акселерометры стали практически первыми массово выпускаемыми инерциальными МЭМС-датчиками. В основе МЭМС акселерометра — одно — либо двухкомпонентный упругий подвес, поступательно перемещающийся в плоскости подложки чувствительный элемент. В качестве системы съема применяется емкостной датчик, выполненный в виде гребенчатой структуры. Подвес изготовлен методом поверхностной микромеханической обработки в поликремнии толщиной 2 мкм. В объеме кристалла кремния и в поверхностных поликремниевых слоях помимо чувствительного элемента размещены усилители сигналов с выхода первичного преобразователя информации, аналогово-цифровые и

цифроаналоговые преобразователи, демодулятор, источник опорного напряжения, схемы самодиагностики и термостабилизации параметров.

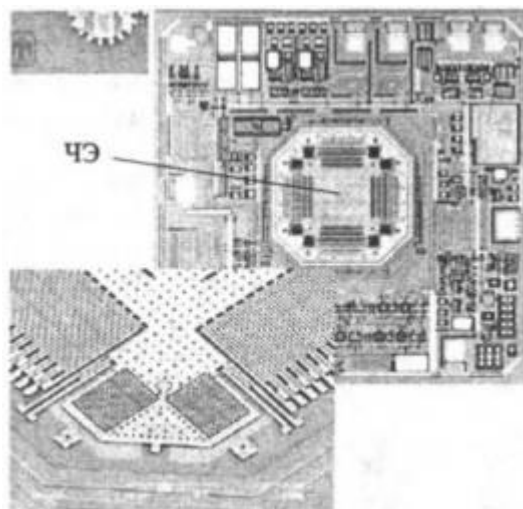


Рисунок 10 – МЭМС акселерометр, разработанный компанией Analog Devices

На рисунке 11 показаны области, образованные двумя важнейшими характеристиками акселерометров, определяющих их класс точности: чувствительность и стабильность масштабного коэффициента.

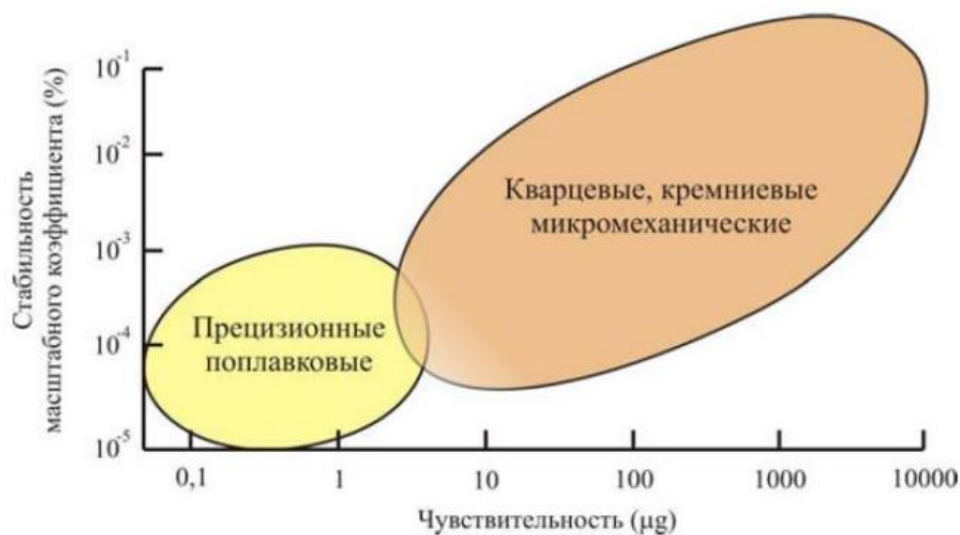


Рисунок 11 – Области распределения характеристик, определяющих класс точности акселерометров различного типа

3. Выбор датчиков, сравнение достоинств и недостатков основных типов навигационных датчиков.

Как сказано выше, для работы данной системы позиционирования пространственного положения человека на основе МЭМС датчиков необходимо использовать три гироскопа и один акселерометр. Также необходимо использовать микроконтроллер для программирования и датчик для осуществления передачи сигнала на компьютер. Для уменьшения габаритов системы удобнее всего использовать гироскоп и акселерометр на одном кристалле.

Гироскоп L3G4200D является трехосевым датчиком угловых перемещений с низким энергопотреблением, обладающим также чрезвычайной стабильностью нулевого уровня и высокой точностью показаний, которая сохраняется при изменениях температуры и длительной работе датчика. В микросхему, кроме чувствительного элемента, встроен интерфейс I2C/SPI, через который можно передать во внешний мир скорость изменения угла по трем осям (этот интерфейс используется для подключения к внешнему микроконтроллеру). Чувствительный элемент датчика изготовлен с использованием специальной микромеханической обработки, разработанной STMicroelectronics, чтобы выполнить инерционные сенсоры и актуаторы на кремниевых пластинах. Внешний цифровой интерфейс реализован по CMOS-технологии, позволяющей создать высокоинтегрированный дизайн, наилучшим образом подстроенный под характеристики чувствительного элемента датчика. L3G4200D имеет полные шкалы $\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ dps, и может измерять скорость изменения угла в выбранной пользователем полосе частот. L3G4200D выпускается в пластмассовом корпусе land grid array (LGA) и может работать в диапазоне температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$.

Характеристики гироскопа:

- три выбираемые полные шкалы (250/500/2000 dps);
- цифровые выходные интерфейсы I2C и SPI;

- 16-битные выходные данные;
- встроенный сенсор температуры, с которого можно считать 8-битные данные;
- два дополнительных выходных сигнала (прерывание и готовность данных);
- встроенные фильтры ФНЧ и ФВЧ, полосу пропускания которых можно выбрать;
- чрезвычайно высокая стабильность показаний по температуре и времени;
- широкий диапазон питающих напряжений 2.4V..3.6V;
- входы и выходы (IO), совместимые с низковольтной логикой (1.8V);
- встроенные режимы отключения (power-down) и сна (sleep);
- встроенный FIFO;
- высокая устойчивость к ударам и вибрациям;
- расширенный рабочий температурный диапазон (-40°C .. +85°C);
- миниатюрный пластмассовый корпус LGA-16 (4x4x1.1 mm).

LPR550AL Dual-Axis 1270 - двухосевой гироскоп собран на базе MEMS гироскопов компании ST и измеряет угловые перемещения вокруг осей X и Y или X и Z. Два отдельных аналоговых выхода по напряжению для каждой оси предоставляют два диапазона. Плата имеет стабилизатор 3.3 В, что обеспечивает легкую интеграцию с 5 В частью, двухступенчатый НЧ фильтр для снижения шума и имеет меньшие размеры, чем аналогичные продукты других производителей.

Характеристики гироскопа:

- оси XY;
- два аналоговых выхода для каждой из осей;
- встроенный 3,3В регулятор напряжения для подключения к 5 В шинам;
- диапазон измерения ± 500 °/с и ± 2000 °/с;

- габариты 12x25 мм;
- напряжение питания от 2.7В до 3.6В;
- диапазон измерений $\pm 500 \text{ гр/с}$ для режима с усилением сигнала 4х и $\pm 2000 \text{ гр/с}$ для режима без усиления;
- чувствительность $2 \text{ мВ/}^\circ\text{/с}$;
- полоса пропускания 140Hz;
- ток потребления 6.8 mA.

Микросхема MPU6050 содержит как акселерометр, так и гироскоп, а помимо этого еще и температурный сенсор. MPU6050 является главным элементом модуля GY-531. Помимо этой микросхемы на плате модуля расположена необходимая обвязка MPU6050, в том числе подтягивающие резисторы интерфейса I²C, а также стабилизатор напряжения на 3,3 вольта с малым падением напряжения (при питании уже в 3,3 вольта на выходе стабилизатора будет 3 ровно вольта) с фильтрующими конденсаторами. Ну и бонусом на плате распаян SMD светодиод с ограничивающим резистором как индикатор питающего напряжения. Размер платы модуля GY-521 10 x 20 мм.

Характеристики MPU6050:

- напряжения питания 2,375 - 3,46 вольт;
- потребляемый ток до 4 mA;
- интерфейс передачи данных - I²C;
- максимальная скорость I²C - 400 кГц;
- вход для других датчиков I²C;
- внутренний генератор на 8 МГц (вне модуля возможность подключить внешний кварцевый резонатор на 32,768 кГц или 19,2 МГц);
- трехосевой MEMS гироскоп с 16 битным АЦП;
- трехосевой MEMS акселерометр с 16 битным АЦП;
- Digital Motion Processor (DMP);
- slave I²C для подключения к микроконтроллеру;
- master I²C для подключения к микросхеме дополнительного датчика;

- регистры данных датчиков;
- встроенный FIFO;
- прерывания;
- температурный сенсор;
- самопроверка гироскопа и акселерометра;
- регистр идентификации устройства.

Для выбора датчиков подключаем их к микросхеме и программируем.

Программирование осуществляется для калибровки в программе Arduino.

После программирования оставляем гироскоп неподвижным и смотрим результаты по графикам.

Программа в Arduino для калибровки гироскопов:

```

/const int Gx=0;
const int Gy=0;
float val1, val2; float valoff1=0,valoff2=0;
unsigned long timer = 0, dt;
int LABEL=1, i;
float gyroHighGyX=0,gyroLowGyX=1000;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,val1, val2,dt");
  calibration();
  Serial.println(valoff1);
  delay(1000);
}
void loop(){
  timer = millis();
  val1=analogRead(Gy);
  val1=(val1-valoff1)*2000/1024;
  /* if (val1 > (gyroHighGyX) || val1 < (gyroLowGyX) ){
    val1=(val1-valoff1)*2000/1024;}
  else {
    val1=0;}*/

  //val2=(analogRead(Gy)-valoff2)*2500/1024;
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(val1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(val2);
  Serial.print(",");
  Serial.println(dt);

```

```

dt=millis()-timer;

}
void calibration(){
  for(i=0;i<1000;i++){

    valoff1+=analogRead(Gy);

    if(valoff1 > gyroHighGyX){
      gyroHighGyX = valoff1;
    }
    else if(valoff1 < gyroLowGyX){
      gyroLowGyX = valoff1;
    }

  }
  valoff1=valoff1/1000;
}

```

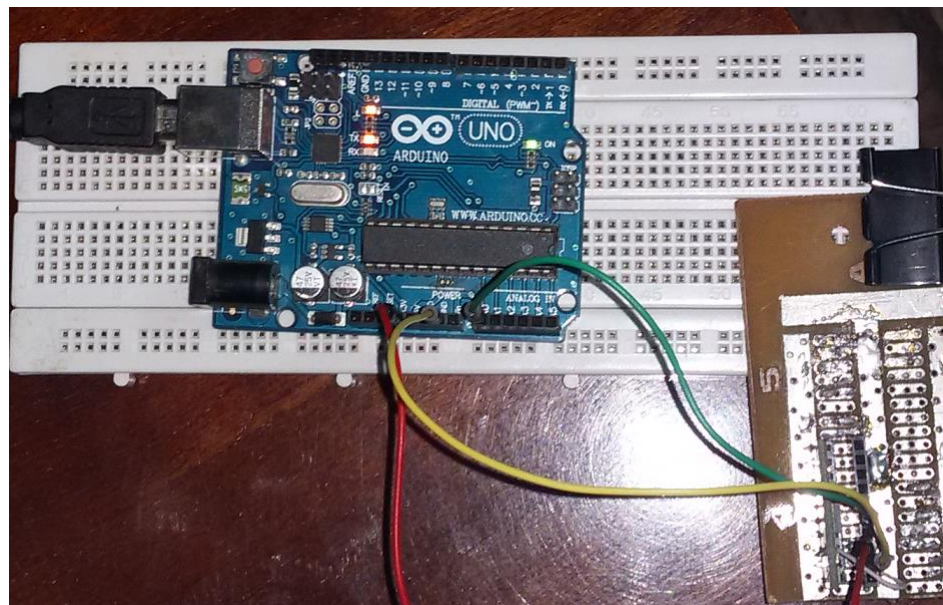


Рисунок 12 - Калибровка **LPR550AL** гироскопа

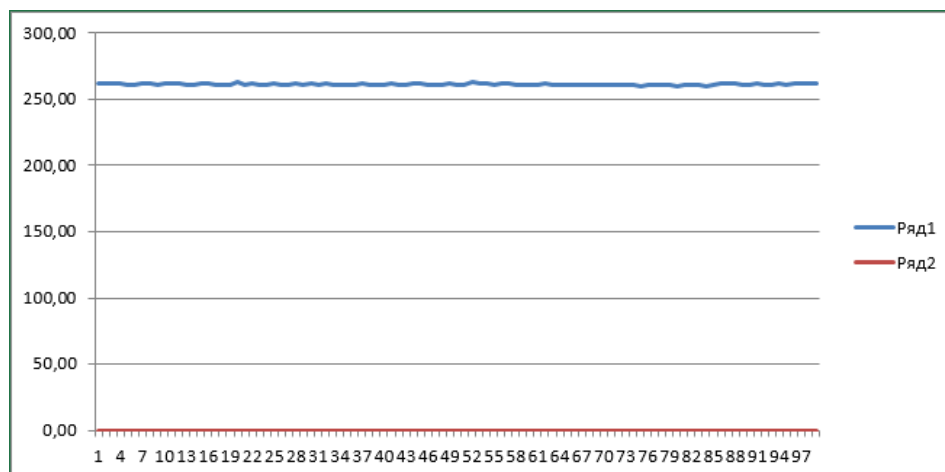


Рисунок 13 – Результаты калибровки **LPR550AL** гироскопа

Ряд 1- без калибровки

Ряд 2- после калибровки

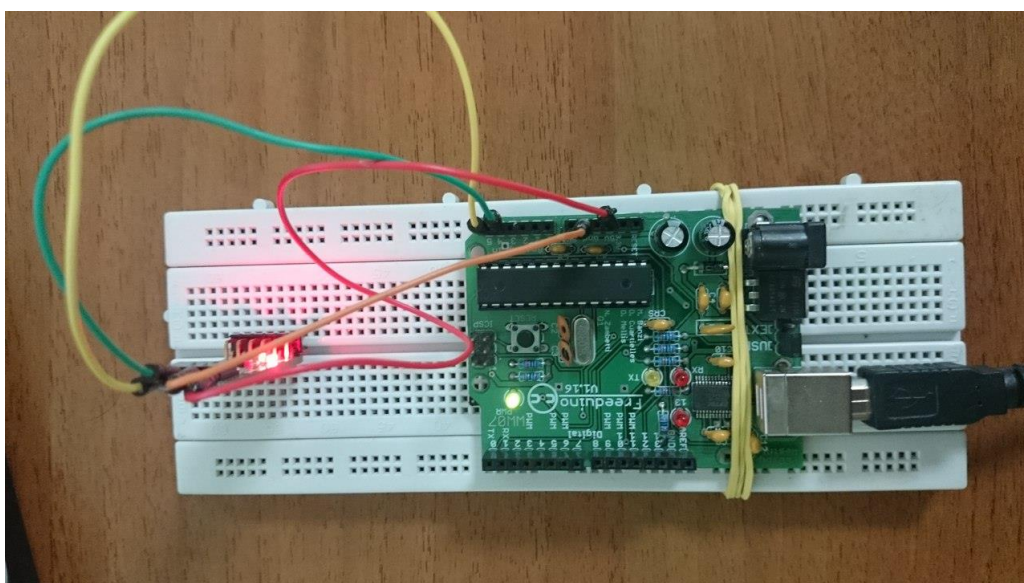


Рисунок 14 – калибровка **L3G4200D** гироскопа

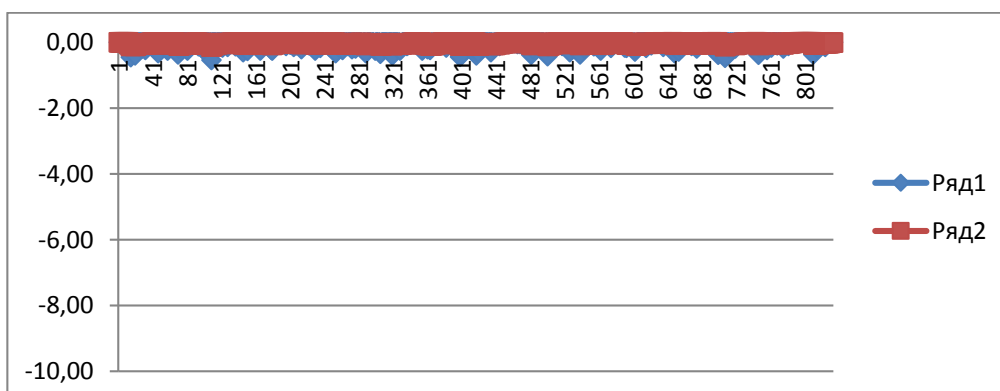


Рисунок 15 –Результаты калибровки **L3G4200D** гироскопа

Ряд 1- без калибровки

Ряд 2- после калибровки

По результатам калибровки по графикам видно, что у LPR550AL гироскопа показания ровно лежат вблизи нулевого значения. Нам необходимо использовать 2 гироскопа для закрепления их на ногах, для этого выбираем LPR550AL гироскопы. Для пояса нужен гироскоп и акселерометр на одной микросхеме, для этого выбираем микросхему MPU6050.

Для программирования будем использовать микроконтроллер Arduino Nano, потому что он имеет наименьшие размеры. Платформа Nano, построенная на микроконтроллере ATmega328 (Arduino Nano 3.0) или ATmega168 (Arduino Nano 2.x), имеет небольшие размеры и может использоваться в лабораторных работах. Она имеет схожую с Arduino Duemilanove функциональность, однако отличается сборкой. Отличие заключается в отсутствии силового разъема постоянного тока и работе через кабель Mini-B USB. Nano разработана и продается компанией Gravitech.

Характеристики микроконтроллера:

Микроконтроллер	Atmel ATmega168 или ATmega328
Рабочее напряжение	5 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	8
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Флеш-память	16 Кб (ATmega168) или 32 Кб (ATmega328) при этом 2 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	1 Кб (ATmega168) или 2 Кб (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) или 1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц
Размеры	1.85 см x 4.2 см

Arduino Nano может получать питание через подключение Mini-B USB, или от нерегулируемого 6-20 В (вывод 30), или регулируемого 5 В (вывод 27), внешнего источника питания. Автоматически выбирается источник с самым высоким напряжением. Микросхема FTDI FT232RL получает питание, только если сама платформа запитана от USB. Таким

образом при работе от внешнего источника (не USB), будет отсутствовать напряжение 3.3 В, генерируемое микросхемой FTDI, при этом светодиоды RX и TX мигают только при наличии сигнала высокого уровня на выводах 0 и 1.

Микроконтроллер ATmega168 имеет 16 кБ флеш-памяти для хранения кода программы, а микроконтроллер ATmega328, в свою очередь, имеет 32 кБ (в обоих случаях 2 кБ используется для хранения загрузчика). ATmega168 имеет 1 кБ ОЗУ и 512 байт EEPROM, а ATmega328 – 2 кБ ОЗУ и 1 Кб EEPROM.

Для передачи сигнала с МЭМС датчиков и передачи сигнала на компьютер нужно использовать передатчик и приемник информации, для данной системы выбираем модуль RF 433 МГц. Комплект состоит из двух модулей: радиопередатчика и приемника, настроенных на частоту 433,92 МГц. Он предназначен для создания простого радиоканала трансляции данных, где происходит передача команд без обратной связи. Контроль выполнения команды дистанционного управления с помощью комплекта приемник + передатчик 433MHz производится оператором.

Модуль передатчика содержит резонатор на поверхностных акустических волнах. Металлический корпус резонатора выполнен в виде большой таблетки. Для передачи используется амплитудная модуляция. Когда на управляющем входе уровень лог. 1 передатчик 433 МГц работает и передает в эфир сигнал несущей частоты, а когда лог. 0 выключается.

Технические характеристики передатчика:

- Рабочее напряжение: от 3 В до 12 В. Чем больше напряжение, тем больше мощность передатчика.
- Рабочая сила тока: максимально 40 мА, минимально 9 мА.
- Режим резонанса: (SAW).
- Режим модуляции: ASK.
- Рабочий частотный диапазон: 315 МГц или 433 МГц.
- Мощность: 25 мВ (315 МГц при 12 В).

- Погрешность частот: +150 кГц (макс.).
- Скорость: не больше 10 Кб/с.

Этот модуль обеспечивает передачу данных на расстояние до 90 метров на открытом пространстве.

Технические характеристики приемника:

- Рабочее напряжение: 5 В +0.5 В- постоянный ток.
- Рабочая сила тока: <5.5 мА.
- Метод приема данных: OOK/ASK.
- Рабочие частоты: 315 МГц - 433.92 МГц.
- Пропускная способность: 2 МГц.
- Чувствительность: более 100 дБм (50 Ом).
- Скорость приемника: <9.6 Кб/сек (при 315 МГц и -95 дБм).

Дополнительно будем использовать антенну для улучшения качества сигнала.

4. Анализ погрешностей системы персональной навигации

Погрешностями системы персональной навигации являются погрешности ее датчиков, поэтому для корректной работы их необходимо исключить.

4.1 Стабильные погрешности

Смещение нуля

Смещение нуля инерциальных датчиков является основной причиной, вызывающей погрешность БИНС. Предполагаем, что в показаниях гироскопа и акселерометра присутствует слагаемое, обусловленное смещением нулевого сигнала датчика, оно будет вносить погрешность в определении ориентации и навигации:

$$\Delta V = \int_0^t (a + b_a) \cdot dt - \int_0^t a \cdot dt = b_a \cdot t ; \quad \Delta x = \int_0^t \Delta V \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot b_a \cdot t^2 \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = \int_0^t (\omega + b_\omega) \cdot dt - \int_0^t \omega \cdot dt = b_\omega \cdot t \quad (3)$$

Где b_a , b_ω – смещение нуля акселерометра и гироскопа по каждой оси; t – время интегрирования; ΔV – погрешность линейной скорости; $\Delta \varphi$, Δx - ошибка в определении углового и линейного движений человека.

Масштабный коэффициент

Ошибка, вызванная масштабным коэффициентом в определении ориентации и навигации будет иметь такой же характер, как и ошибка, вызванная смещением нуля.

$$\Delta V = \int_0^t (a + S_a \cdot a) \cdot dt - \int_0^t a \cdot dt = S_a \cdot a \cdot t ; \quad \Delta x = \int_0^t \Delta V \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot S_a \cdot a \cdot t^2 \quad (4)$$

$$\Delta \varphi = \int_0^t (\omega + S_\omega \cdot \omega) \cdot dt - \int_0^t \omega \cdot dt = S_\omega \cdot \omega \cdot t \quad (5)$$

Неортогональность осей

При изготовлении инерциальных датчиков производитель не может обеспечить совпадение осей чувствительных элементов с корпусом. Из-за этого у датчиков будет неточность установки или неортогональность осей. При постоянной воздействующей величине, например, ускорение свободного падения или скорость вращения Земли, ошибки, вызванные неточностями установки, будут иметь характер постоянного смещения. В другой ситуации неортогональность осей возникает при неточности совмещения связанной системы координат и локальной системы координат. В данном случае на чувствительные оси датчиков так же будут действовать дополнительные величины (проекции векторов g и скорости вращения Земли), при этом они так же могут быть рассмотрены в качестве постоянных составляющих смещения нуля.

4.2 Нестабильная погрешность

Шум квантования

Шум квантования возникает в результате дискретизации аналогового сигнала. Частота дискретизации любого АЦП и быстродействие датчика являются конечными, поэтому при измерении и преобразовании аналогового сигнала в дискретный присутствует отличие.

Угловая спектральная плотность мощности процесса квантования записывается в виде:

$$S_{\theta}(f) = T_z \cdot Q_z^2 \cdot \left(\frac{\sin^2(\pi \cdot f \cdot T_z)}{(\pi \cdot f \cdot T_z)^2} \right) \approx T_z \cdot Q_z^2 \quad f < \frac{1}{2 \cdot T_z}, \quad (6)$$

Где Q_z – квантовый шумовой коэффициент;

T_z – интервал выборки.

Теоретический предел для коэффициента Q_z равен значению $\frac{S}{\sqrt{12}}$, где S – масштабный коэффициент гироскопа. Скоростная спектральная плотность мощности связана с угловой СПМ:

$$S_{\Omega}(2\pi f) = (2\pi f)^2 \cdot S_{\omega}(2\pi f)$$

$$S_{\Omega}(f) = \frac{Q_z^2}{T_z} \cdot \sin^2(\pi \cdot f \cdot T_z) \approx (2\pi f)^2 \cdot T_z \cdot Q_z^2, \text{ для } f < \frac{1}{2 \cdot T_z} \quad (7)$$

Белый шум

Случайное блуждание угла является основной шумовой компонентой в выходных данных МЭМС-датчиков. Случайное блуждание угла представляет собой компоненту аддитивного белого шума, проявляющуюся в отклонении значений от ожидаемых случайным образом. Оно оказывает влияние на результат интегрирования углового или ускоренного сигналов от гироскопа и акселерометра. Если датчик находится в статическом состоянии, ожидается, что результат интегрирования будет равен нулю, но под воздействием белого шума показание после интегрирования выходного сигнала датчика колеблется случайным образом. При этом с ростом времени среднее отклонение увеличивается. Примером случайного блуждания является дрейф угла датчиков угловых скоростей, размерность которого измеряется в $\%/\sqrt{\text{ч}}$. Уровень дрейфа в выходном сигнале характеризует качество датчика. С ростом показателя дрейфа, увеличивается погрешность в определении значения углов и линейных скоростей.

Спектральная плотность мощности белого шума является постоянной:

$$S_{\Omega}(f) = Q^2 \quad (8)$$

Нестабильность смещения нуля

Точность гироскопа и акселерометра обычно определяется важнейшим параметром - стабильностью смещения. Стабильность смещения представляет собой точность выходных характеристик датчиков при

отсутствии вращения и поступательного движения в течение всего времени работы. Стабильность смещения идеальных инерциальных датчиков должна быть постоянной, но в реальных условиях достижение такой точности невозможно. Во-первых, при изготовлении уже имеется погрешность изготовления. Во-вторых, в режиме работы на датчик влияют внешние факторы (температурные колебания, вибрации, линейные ускорения и др.). Измеренным смещением во время работы инерциальных датчиков с течением времени из-за действия 1/f-шумов называется нестабильность смещения нуля.

Спектральная плотность мощности шума:

$$S(\omega) = \begin{cases} \frac{B^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{f} (\omega < \omega_0) \\ 0 (\omega > \omega_0) \end{cases} \quad (9)$$

где B — коэффициент стабильности нуля, ω_0 — частота среза.

Спектральная плотность мощности нестабильности смещения нуля обратно пропорциональна частоте $1/f$ (розовый шум). Это показывает, что на низких частотах нестабильность смещения нуля оказывает значительное влияние. С увеличением частоты её влияние перекрывается.

Случайное блуждание угловой скорости/ускорения

Это случайный шум, который не имеет ясное происхождение с очень большим временем корреляции. Такой шум реально возникает в процессе измерения физических величин датчиком на больших промежутках времени, таких как ускорение, угловая скорость. Для оценки этого шума необходимо использовать методы аппроксимации и снять с датчиков значительное количество данных. Но при этом на долгих промежутках времени на датчик влияет внешнее условие среды и шум может теряться из-за нестабильности среды.

Спектральная плотность мощности случайного блуждания угловой скорости или ускорения имеет вид:

$$S_{\Omega}(f) = \left(\frac{K}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{f^2} \quad (10)$$

Где K – коэффициент данного стохастического процесса

Линейное изменение угловой скорости/ ускорения

Данный вид погрешности не является случайным и носит систематический характер. При значительных промежутках времени измерения угловой скорости или ускорения наблюдается детерминированное отклонение показаний датчика. Отклонение может быть представлено в виде линейного закона:

$$\Omega = R \cdot t$$

Погрешность обладает спектральной плотностью мощности в виде:

$$S_{\Omega}(f) = \frac{R^2}{(2\pi f)^3}, \quad (11)$$

где R – коэффициент процесса.

Синусоидальный шум

Синусоидальный шум – это шум, порождаемый вибрациями в компонентах датчика. Принцип работы основных МЭМС датчиков основан на вибрации или вращении компонентов устройства, особенно гироскопов, которые получают данные на основе измерения кориолисовой силы. Этим обусловлено зашумление выходного сигнала датчика псевдодетерминированной синусоидальной компонентой, непосредственно связанной с резонансной частотой его компонентов.

Шум, имеющий экспоненциальную корреляционную функцию с конечным интервалом корреляции T_c и амплитудой q_c , имеет СПМ:

$$S_{\Omega}(f) = \frac{(q_c \cdot T_c)^2}{1 + (2\pi \cdot f \cdot T_c)^2} \quad (12)$$

10. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

10.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

10.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной работе исследуются МЭМС датчики позиционирования пространственного положения человека, построенные на основе микроэлектромеханических гироскопов и акселерометра. МЭМС датчики используются для определения параметры ориентации и навигации объекта в пространстве. Для выполнения анализа потребителей микроэлектромеханической системы был рассмотрен целевой рынок и проведено их сегментирование.

Сегментировать рынок услуг по разработке МЭМС можно по следующим критериям: месторасположение, конкурентоспособность (таблица 10.1).

Таблица 10.1 Карта сегментирования рынка услуг по разработке МЭМС

Месторасположение	Конкурентоспособность	
	точность	стоимость
	Крупные (производство, предприятия)	A, D
	Средние (магазин, университет)	A,D
	Мелкие (жители)	C

A. Компания «Геокосмос» ; B. Компания "РосЛаб";
C. ЗАО «КБ НАВИС» ; D. ООО "Глобал НТВ";

В приведенной карте сегментирования показано, что компания "РосЛаб" занимает сегмент рынка, привлекательный для предприятия в будущем.

10.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Таблица 10.2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок) (МЭМС 500; GL-SVG-03/1; GL-SVG-02/1).

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _Б	Б _{G1}	Б _{G2}	Б _Б	Б _{G1}	Б _{G2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Надежность	0,18	5	5	4	0,9	0,9	0,72
4. Простота эксплуатации	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
5. Качество интеллектуального интерфейса	0,09	5	4	3	0,45	0,36	0,27
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	4	4	5	0,28	0,28	0,35
3. Цена	0,07	4	4	4	0,28	0,28	0,28
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,15	5	5	5	0,7	0,7	0,7
5. Послепродажное обслуживание	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
6. Финансирование научной разработки	0,03	5	5	4	0,15	0,15	0,12
7. Срок выхода на рынок	0,02	5	4	4	0,1	0,08	0,08
8. Наличие сертификации разработки	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
Итого	1	60	53	48	4,65	4,21	3,75

10.1.3 FAST-анализ

Выбор объекта FAST-анализа

В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа выступает инерциальный измерительный модуль.

Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом

Главная функция МЭМС датчиков системы позиционирования пространственного положения человека инерциального измерительного модуля состоит в определении параметров ориентации и навигации объекта в пространстве. В инерциальном измерительном модуле находятся акселерометр, три гироскопа и модуль радиопередачи. Акселерометр позволяет определить ускорение объекта, а гироскоп угловую скорость. Сигнал от акселерометра, гироскопов передается к модулю приема с помощью модуля радиопередачи.

Для облегчения процесса выделения и классификации функций инерциального измерительного модуля построена таблица 10.3.

Таблица 10.3 - Функции инерциального измерительного модуля БИНС

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Акселерометр	1	Измерение ускорения	X		
Гироскоп	3	Измерение угловой скорости	X		
Модуль радиопередачи	1	Передача данных, беспроводная связь		X	
Плата с микроконтроллером	1	Обработка данных		X	
Корпус	3	Соединение			X

Определение значимости выполняемых функций объектом (табл. 10.4).

Таблица 10.4 - Матрица смежности функции

	Акселерометр	Гироскоп	Модуль радиопередачи	Плата с микроконтроллером	Корпус
Акселерометр	=	=	>	>	>
Гироскоп	=	=	>	>	>
Модуль радиопередачи	<	<	=	<	>
Плата с микроконтроллером	<	<	>	=	>
Корпус	<	<	<	<	=

Таблица 10.5 - Преобразование матрицы смежности в матрицу количественных соотношений функций

	Акселерометр	Гироскоп	Модуль радиопередачи	Плата с микроконтроллером	Корпус	Итого
Акселерометр	1	1	1.5	1.5	1.5	6.5
Гироскоп	1	1	1.5	1.5	1.5	6.5
Модуль радиопередачи	0.5	0.5	1	0.5	1.5	4
Плата с микроконтроллером	0.5	0.5	1.5	1	1.5	5
Корпус	0.5	0.5	0.5	0.5	1	3
Σ						25

Для акселерометра относительная значимость равна $6.5/25 = 0,26$; для гироскопа – $6.5/25 = 0,26$; для модуля радиопередачи – $0,16$; для платы с микроконтроллером – $0,2$ и для корпуса – $0,12$.

Анализ стоимости функций, выполняемых объектом

Таблица 10.6 - Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование детали (узла, процесса)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоемкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Акселерометр	1	Измерение ускорения	-	1	200	-	200
Гироскоп	3	Измерение угловой скорости	-	1	250	-	250
Модуль радиопередачи	1	Передача данных, беспроводная связь	-	4	350	-	350

и							
Плата с микроконтроллером	1	Обработка данных	-	2	300	-	300
Корпус	3	Соединение		7	100	400	500

Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ



Рисунок 10.1 - Функционально-стоимостная диаграмма

Оптимизация функций, выполняемых объектом

При рассматривании продукции различных компаний конструкция МЭМС была оптимально выбрана с целью исследования микроэлектромеханических акселерометра и гироскопов. В результате FAST-анализа видно, что можно уменьшить затрат разработки и повышение качество МЭМС путем улучшения конструкции и уменьшения трудоемкости модуля радиопередачи, также платы с микроконтроллером и корпуса.

10.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 10.7 - Оценка готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	3	4
2	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	2
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления	3	2

	на рынок		
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	5
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	5
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	3
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	5	5
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	1
12	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	41	42

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации находится в диапазоне от 20 до 44 - перспективность средняя. Для улучшения оценки готовности научного проекта к коммерциализации необходимо выбрать лучшие пути продвижения научной разработки на рынок и улучшить его качество работы.

10.2 Инициация проекта

10.2.1 Цели и результат проекта

В таблице 10.8 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 10.8 - Цели и результат проекта

Цели проекта	Исследование и разработка МЭМС
Ожидаемые результаты проекта	Разработанная МЭМС на основе датчиков
Критерии приемки результата проекта	
Требования к результату проекта	Гироскоп с диапазоном измерения до 250 град/с
	Акселерометр с диапазоном измерения $\pm 2g$
	Дистанция передачи до 100 метров
	Погрешность не выше 5%

10.2.2 Организационная структура проекта

Таблица 10.9 - Организационная структура

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Нестеренко Т.Г., к.т.н, доцент кафедрой ТПС	руководитель магистерской диссертации	отвечает за реализацию проекта	240
2	Ефремова М.В., магистр кафедры ТПС	исполнитель проекта	выполняет проект	960

10.3 Планирование управления научно-техническим проектом

10.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта МЭМС.



Рисунок 10.2 - Иерархическая структура работ по проекту

10.3.2 Контрольные события проекта

Таблица 10.11 - Контрольные события проекта

Название работы	Исполнители		Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
Составление и утверждение технического задания	Руководите	-	0	8	0	2
Подбор и изучение материалов по теме		Студент	0	8	0	20
Выбор направления исследований	Руководите	Студент	8	8	1	1
Календарное планирование работ по теме	Руководите	Студент	8	8	4	4
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководите	Студент	8	8	1	19
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Руководите	Студент	8	8	1	10
Расчет принципиальной схемы устройства	Руководите	Студент	8	8	1	18
Выбор и расчет конструкции	Руководите	Студент	8	8	1	10
Оценка технологии конструкции и эффективности производства	Руководите	Студент	8	8	4	4
Технологическая операционная карта	Руководите	Студент	8	8	1	24

10.3.3 План проекта

На основе табл. 10.11 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе табл. 10.12 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 10.12 - Календарный план-график проведения работы

Вид работ	Исполнитель	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
			январь		февраль			март			апрель			май		
			10	20	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	
Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2														
Подбор и изучение материалов по теме	Студент	20														
Выбор направления исследований	Руководитель Студент	1														
Календарное планирование работ по теме	Руководитель Студент	4														
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель Студент	1/19														
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Руководитель Студент	1/10														
Расчет принципиальной схемы устройства	Руководитель Студент	1/18														
Выбор и расчет конструкции	Руководитель Студент	1/10														
Оценка технологии и эффективности производства	Руководитель Студент	4														
Технологическая операционная карта	Руководитель Студент	1/24														



- Руководитель



- Студент

10.3.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Таблица 10.13 - Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед.,руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
Акселерометр	шт	1	200	200
Гироскоп	шт	3	250	250
Модуль радиопередачи	шт	1	350	350
Плата с микроконтроллером	шт	1	300	300
Корпус	шт	1	500	500
Всего за материалы				1600
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				48
Итого				1648

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной

научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Таблица 10.14 - Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер	1	40000	40000
2	Тестер	1	1000	1000
3	Клеевой пистолет	1	200	200
4	паяльник	1	500	500
Всего за специальное оборудование				40170
Монтажу в размере 15% от его цены				6025.5
Итого:				46195.5

Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих, непосредственно участвующих в выполнении работ данной работы. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (10.1)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (10.2)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 8);

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (10.3)$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (10.4)$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $З_{\text{тс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20% от $З_{\text{тс}}$);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 10.15 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	27	27
Потери рабочего времени		
- отпуск	24	48
- невыходы по болезни	0	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	263	239

Таблица 10.16 - Заработная плата

Исполнители	Разряд	k_T	$Z_{тс},$ руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	$Z_m,$ руб.	$Z_{дн},$ руб.	$T_p,$ раб. дн.	$Z_{осн},$ руб.
Руководитель			23264.86	0.3	0.3	1.3	48390.91	2060,75	16	32972
Студент			6342.03			1.3	8244.639	239.94	108	25902.72
Итого $Z_{осн}$										58874.72

10.3.5 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы можно рассчитать по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (10.5)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Таблица 10.17 - Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Исп.
Основная зарплата	58874.72
Дополнительная зарплата	8831.208
Итого по статье $C_{зп}$	67705.92

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$\begin{aligned}
 C_{внеб} &= k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \\
 &= 0.271 \cdot (67705.92) = 18348.306
 \end{aligned}$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Расчет затрат на научные и производственные командировки

В процессе изготовления установки не необходимо командировки, поэтому затрат на научные и производственные командировки равен нулю.

Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

В нашем проекте не больше другие участвуют, поэтому контрагентные расходы не посчитать.

Накладные расходы

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

$$З_{\text{накл}} = (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (10.6)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 80-100%.

$$З_{\text{накл}} = (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \cdot k_{\text{нр}} = 0.8 \cdot (67705.92) = 54164.74$$

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в табл.18.

Таблица 10.18 - Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	1648
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	46195.5
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	58874.72
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	8831.208
5. Отчисления во внебюджетные фонды	18348.306
6. Затраты на научные и производственные командировки	0
7. Контрагентские расходы	0
8. Накладные расходы	54164.74

10.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

В работе задача выполняется по заданному требованию и не был рассмотрен другой вариант разработки объекта исследования, поэтому нельзя сравнивать и сделать вывод о эффективности варианта решения с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Для ознакомления с методом определения ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования были проведены расчеты всех коэффициентов разработки.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (10.7)$$

где: $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{54164.74}{54164.74} = 1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{\text{pi}} = \sum a_i \cdot b_i \quad (10.8)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 10.21).

Таблица 10.21 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5
3. Помехоустойчивость	0,15	5
4. Энергосбережение	0,15	4
5. Надежность	0,25	5
6. Материалоемкость	0,05	4
ИТОГО	1	4,8

$$I_{p-ucn1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,05 = 4,8;$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{ucni.}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{I_{\text{р-исп1}}}{I_{\text{финр}}} = \frac{4.8}{1} = 4.8$$

Список публикаций

1. IV Всероссийский молодежный Форум с международным участием «Инженерия для основания космоса» 12-14 апреля 2016 года, г. Томск, на тему «Application of MEMS Technology in Space».