

На правах рукописи



Ло Ван Хао

**СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ИНЕРЦИАЛЬНОГО МОДУЛЯ С ФУНКЦИЯМИ ГИРОСКОПА
И АКСЕЛЕРОМЕТРА**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Нестеренко Тамара Георгиевна,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Якубов Владимир Петрович

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры радиофизики.

Лысенко Игорь Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Таганрог, главный научный сотрудник дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта

Защита диссертации состоится 02 марта 2021 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.31 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



П.Ф. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Микроэлектромеханическая система (МЭМС) представляет собой чип, в котором одновременно находится движущаяся 3D микромеханическая структура и микроэлектронная система, отвечающая за обработку сигналов механической системы. Изготовление МЭМС осуществляется с использованием оборудования и технологий, применяемых в микроэлектронике.

В настоящее время наиболее востребованными МЭМС являются инерциальные датчики (гироскопы и акселерометры). Они применяются для решения многих сложных задач ориентации, навигации, управления и мониторинга в разнообразных областях, таких как автомобильная промышленность, потребительская электроника, медицина, робототехника, беспилотные летательные аппараты, мониторинг технических объектов и сейсмологической обстановки. Благодаря комбинации акселерометров и гироскопов появляется возможность отследить и зафиксировать движение в трехмерном пространстве.

Распространение МЭМС гироскопов и акселерометров обусловлено рядом ключевых достоинств, таких как малые габариты, низкое энергопотребление, малое время готовности, низкая стоимость.

Наиболее сложными МЭМС датчиками являются гироскопы, которые представляют собой вибрационные системы. Для выполнения своего назначения – измерение угловой скорости движения объектов, в гироскопе необходимо возбудить гармонические первичные колебания инерционного тела на его резонансной частоте. При вращении объекта появляется сила Кориолиса, вызывающая вторичные колебания инерционного тела относительно ортогональной оси, амплитуда которых пропорциональна действующей скорости. Из-за особенностей применяемой технологии изготовления МЭМС гироскопов датчики, измеряющие амплитуды вторичных и первичных колебаний, а также привод, возбуждающий первичные колебания, являются емкостными, которые содержат подвижные и неподвижные электроды.

Чувствительность МЭМС гироскопа зависит от соотношения частот его первичных и вторичных колебаний, которая может быть увеличена за счёт эффекта резонанса. Изменение соотношения между частотами приводит к снижению чувствительности и даже неработоспособности гироскопа. Задача системы возбуждения заключается в возбуждении первичных колебаний и стабилизации их параметров в условиях наличия возмущающих факторов, основными из которых является температура окружающей среды и паразитные связи.

Таким образом, разработка системы возбуждения и управления первичными и вторичными колебаниями гироскопа при наличии негативных воздействий является актуальной задачей.

В данной работе исследуется способ улучшения характеристик МЭМС инерциальных датчиков путем создания электронной схемы, которая одновременно выполняет следующие задачи: преобразование измеренной величины в электрический сигнал, управление первичными колебаниями гироскопа; управ-

ление вторичными колебаниями гироскопа; формирование выходного сигнала гироскопа и акселерометра.

Кроме того, в одной МЭМС конструкции за счёт применения соответствующих алгоритмов обработки сигналов реализованы режимы гироскопа и акселерометра, что соответствует мировой тенденции создавать инерциальные модули, объединяющие несколько датчиков.

Целью диссертационной работы является разработка системы возбуждения первичных колебаний и системы обработки измерительной информации микроэлектромеханического инерциального модуля компенсационного типа, реализующего функции гироскопа и акселерометра, устойчивого к температурным воздействиям.

Для достижения данной цели в работе должны быть решены следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор существующих конструкций МЭМС гироскопов и акселерометров с электронными схемами, на основании которых разработать и создать электронную систему, обеспечивающую созданному микроэлектромеханическому инерциальному модулю (МИМ) работу в компенсационном режиме.

2. Анализ воздействий внешних факторов, влияющих на динамические характеристики чувствительного элемента инерционного модуля, что позволит разработать способы устранения этих негативных влияний.

3. Разработка способа преобразования механических перемещений подвижных структур чувствительного элемента МИМ в электрические сигналы.

4. Разработка алгоритмов системы управления первичными и вторичными колебаниями чувствительного элемента МИМ для компенсационного преобразования угловых скоростей и поступательных ускорений в электрические сигналы.

5. Исследование влияния температуры на динамические характеристики микроэлектромеханического чувствительного элемента инерционного модуля.

6. Экспериментальные исследования работоспособности схемотехнических решений и достижимости технических характеристик МИМ.

Методы исследования. Цель и поставленные задачи достигаются методами теоретического и экспериментального исследований. Экспериментальные исследования проведены в два этапа. Первым этапом является исследование динамики чувствительного элемента МИМ методами моделирования математических моделей на персональном компьютере. На втором этапе проведены лабораторные испытания экспериментальных образцов в вакуумной термокамере.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложены математические модели электродных структур для построения приводных и сенсорных электродных структур, позволяющие реализовать линейную систему возбуждения первичными колебаниями и повысить емкостную чувствительность микроэлектромеханического инерциального модуля.

2. Предложено устройство резонансного возбуждения и управления первичными колебаниями инерциального модуля на основе фазовой автоподстройки частоты и автоматической регулировки усиления, позволяющее устранить паразитные эффекты и стабилизировать скорость первичных колебаний чувствительного элемента микроэлектромеханического инерциального модуля.

3. Разработан и экспериментально исследован метод управления микроэлектромеханическим инерциальным модулем путем компенсации вторичных колебаний замкнутой системой управления с обратной связью, обеспечивающей высокую устойчивость к воздействиям температуры.

Практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в учреждениях и организациях, занимающихся научными исследованиями и разработкой микроэлектромеханических инерциальных датчиков. Разработанная последовательность расчета параметров электронных схем системы управления может быть использована как универсальная методика для построения электронных блоков управления МИМ. Полученные результаты могут служить методической базой для создания серийных малогабаритных инерциальных датчиков.

Внедрение результатов работы. Полученные результаты диссертации использованы в ходе выполнения проектов:

- Грант ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России", контракт № 14.575.21.0068 "Разработка методов проектирования многокомпонентных интегрированных микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям", 2014-2016 гг.

- Грант ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России", контракт № 14.578.21.0232 "Интеллектуальный инерциальный модуль на основе микроэлектромеханических датчиков с функциями гироскопа, акселерометра и магнитометра для систем ориентации и навигации транспортных средств с автоматизированным управлением", 2017-2020 гг.

Результаты работы используются: в ООО «Машиностроительное предприятие «Ильма» при реализации проекта по созданию системы навигации горнопроходческого комбайна для обработки выходных сигналов с гироскопов и акселерометров; в учебном процессе в отделение Электронной инженерии Томского политехнического университета.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели приводных и сенсорных электродных структур позволяют реализовать линейную систему возбуждения первичных колебаний и повысить емкостную чувствительность микроэлектромеханического инерциального модуля.

2. Система возбуждения и управления первичными колебаниями инерциального модуля позволяет стабилизировать скорость первичных колебаний с погрешностью 1,3 % в диапазоне температур от минус 20 °С до 80 °С.

3. Система управления вторичными колебаниями инерциального модуля за счет компенсационного преобразования позволяет снизить нелинейность функции преобразования во всем диапазоне измерений до 0,4 % в режиме гироскопа, до 0,47 % в режиме акселерометра, достичь полосы пропускания свыше 20 Гц в режиме гироскопа и свыше 50 Гц в режиме акселерометра, устранить зависимость масштабного коэффициента от добротности и собственной частоты.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных и отечественных научно-технических конференциях, выставках:

- XI Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», НГТУ, г. Новосибирск, Россия, 04 - 08 декабря 2017 года;
- XII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», НГТУ, г. Новосибирск, Россия, 03 - 07 декабря 2018 года;
- VI Международный молодежный форум «Инженерия для освоения космоса», ТПУ, г. Томск, Россия, 26–28 апреля 2018 года;
- Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции», ТГУ, Томск, Россия, 21-23 ноября 2018 года.
- XIII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», НГТУ, г. Новосибирск, Россия, 02 - 06 декабря 2019 года;
- 4 International Conference on Mechatronics and Electrical Systems (ICMES 2019), г. Прага, Республика Чехия, 2019 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ в том числе: 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 1 патент на изобретение; 4 публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science; 4 тезиса в материалах научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка используемой литературы из 107 наименований и трех приложений. Основное содержание диссертации изложено на 169 странице и включает 112 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, научная и техническая новизна, кратко излагаются содержание работы и основные защищаемые положения. Также приведены: обоснование выбора объекта исследования, общая характеристика полученных результатов и сведения о публикациях по теме диссертации.

В первой главе дано общее введение в МЭМС инерциальные датчики, такие как, МЭМС гироскопы и акселерометры. Принцип работы МЭМС акселерометра основан на слежении за перемещениями инерционной массы, установ-

ленной на упругом подвесе, как схематически показано на рисунке 1, а. При наличии поступательного ускорения инерционная масса перемещается относительно неподвижной подложки по направлению оси чувствительности, в результате чего будет обнаружено изменение емкости между подвижным электродом, связанным с инерционной массой, и неподвижным электродом.

Принцип работы МЭМС вибрационного гироскопа основан на эффекте Кориолиса. Его инерционная масса поддерживается двумя пружинами над подложкой. Гармоническая электростатическая сила возбуждает первичные колебания инерционной массы. При наличии переносной угловой скорости Ω_z вокруг оси Z под действием силы Кориолиса, вызванной комбинацией первичных колебаний и угловой скорости, инерционная масса совершает вторичные колебания вдоль направления оси чувствительности X (рисунок 1, б).

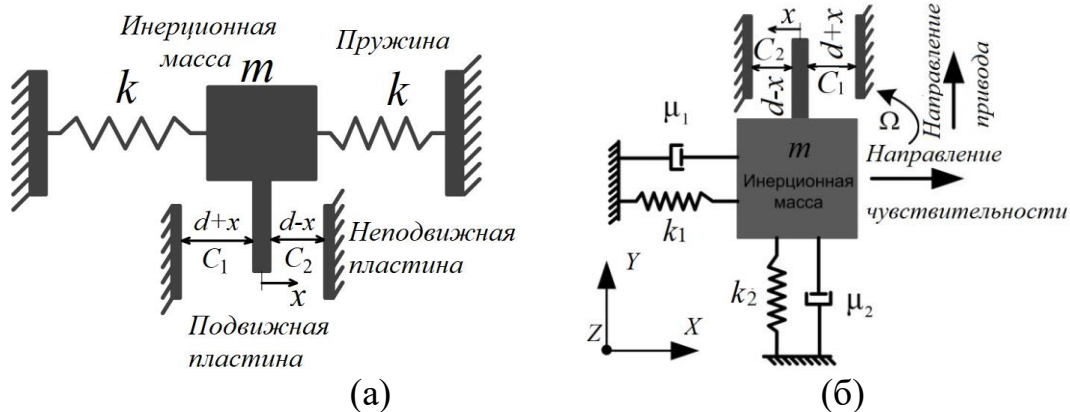


Рисунок 1 – Принцип действия МЭМС акселерометра (а) и гироскопа (б)

Рассматривается основной принцип действия емкостных преобразователей, используемых для преобразования физических перемещений в электрические сигналы. Изложено общее описание известных методов измерения малых емкостей: метод амперметра-вольтметра, резонансный метод, метод емкостного делителя, мостовой метод и метод проходного конденсатора.

Проведенный в данной главе анализ существующих методов и алгоритмов возбуждения и обработки измерительной информации МЭМС инерциальных датчиков показал, что МЭМС гироскопы с прямым преобразованием имеют простые алгоритмы управления. Их электроника состоит из системы возбуждения первичных колебаний, электронного интерфейса, блока демодуляции и блока фильтрации. Однако они чувствительны к изменению внешних факторов, таких как температура и вибрация.

Для реализации инерциального модуля компенсационного типа необходима система управления вторичными колебаниями с обратной связью. Обратная связь контура позволяет отслеживать и компенсировать перемещение инерционной массы по направлению чувствительности. При этом диапазон измерения увеличивается, масштабный коэффициент стабилизирован и погрешность уменьшается.

Вторая глава посвящена описанию исследуемой конструкции МИМ с функциями гироскопа и акселерометра. Разработаны математические модели

электродных структур и проведен анализ электродных структур для эффективного построения приводных и сенсорных электродных структур.

Принцип электростатического усилия для линейного возбуждения колебаний и эффективный метод преобразования малых физических перемещений в электрические сигналы подробно рассматриваются. Предложена обобщенная функциональная схема системы возбуждения и обработки измерительной информации для построения МИМ компенсационного типа. Инерциальный модуль представляет собой совокупность микромеханического чувствительного элемента (ЧЭ), преобразователей перемещений (ПП) и системы управления (СУ) (рисунок 2).

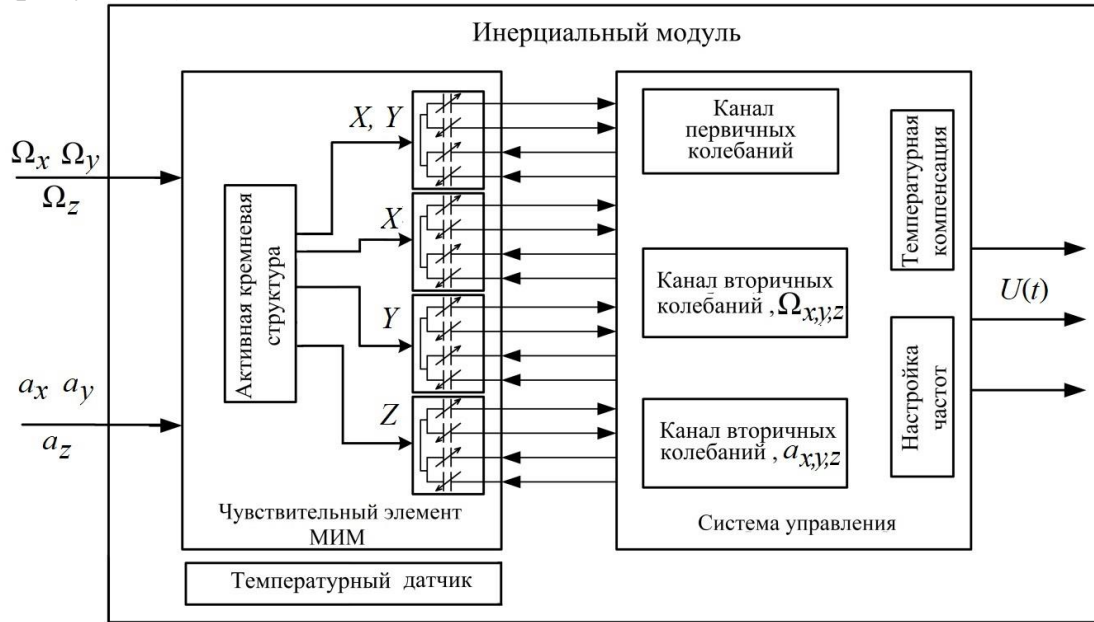


Рисунок 2 – Структурная схема МИМ

ЧЭ преобразует измеряемые угловые скорости $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ и поступательные ускорения a_x, a_y, a_z в линейные перемещения x, y, z инерционной массы.

Затем преобразователи перемещений преобразуют перемещения инерционной массы в электрические сигналы. Система управления обрабатывает электрические сигналы с выходов преобразователей и создает управляющий сигнал, используемый для компенсации колебаний инерциальной массы. Система управления также выдаёт сигналы, пропорциональные проекциям абсолютных угловых скоростей и поступательных ускорений на оси чувствительности.

В состав чувствительного элемента МИМ входят два одинаковых двухкомпонентных ЧЭ, повернутые относительно друг друга на 90° (XZ-модуль и YZ-модуль), как показано на рисунке 3. XZ-модуль измеряет угловые скорости, Ω_x, Ω_z и поступательные ускорения a_z, a_x ; YZ-модуль измеряет угловые скорости, Ω_y, Ω_z и поступательные ускорения, a_z, a_y .

В конструкции каждого двухкомпонентного чувствительного элемента используются четыре пары электродных сенсорных структур с общим электродом для обнаружения информативных перемещений и четыре пары корректирующих структур для компенсации этих перемещений.

Схема перемещений инерционных масс XZ -модуля приведена на рисунке 4.

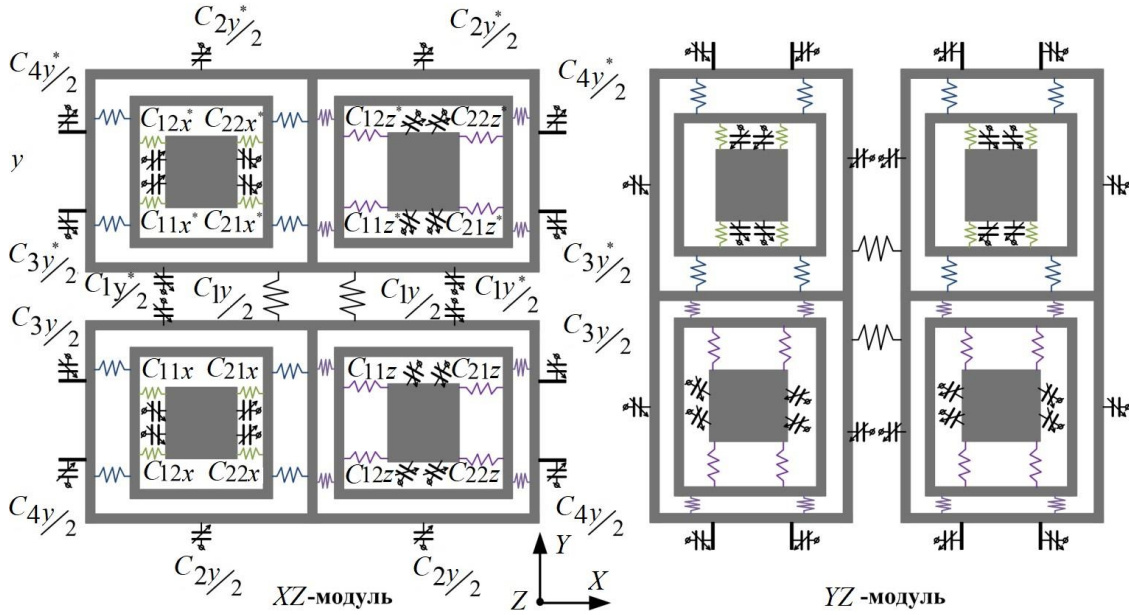


Рисунок 3 – Эквивалентная схема ЧЭ МИМ с электродными структурами

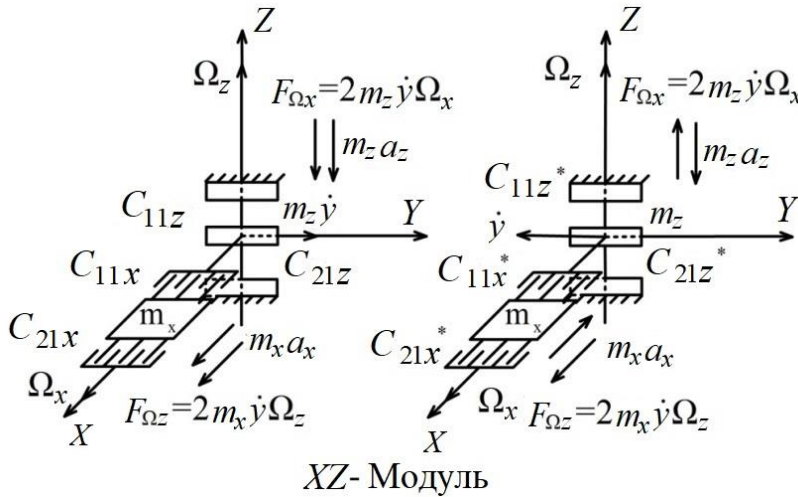


Рисунок 4 – Схема перемещений инерционных масс XZ -модуля

При наличии угловой скорости вокруг оси Z и поступательного ускорения вдоль оси X емкости конденсаторов C_{11x} , C_{12x} , C_{11x}^* и C_{21x}^* в XZ -модуле изменяются следующим образом:

$$C_{11x} = C_{01} - \Delta C_{\Omega_z} - \Delta C_{ax}; \quad C_{21x} = C_{01} + \Delta C_{\Omega_z} + \Delta C_{ax}. \quad (1)$$

$$C_{11x}^* = C_{01} + \Delta C_{\Omega_z} - \Delta C_{ax}; \quad C_{21x}^* = C_{01} - \Delta C_{\Omega_z} + \Delta C_{ax}. \quad (2)$$

При наличии поступательного ускорения вдоль оси Z и угловой скорости вокруг оси X изменяются емкости конденсаторов C_{11z} , C_{21z} , C_{11z}^* и C_{21z}^* :

$$C_{11z} = C_{02} - \Delta C_{\Omega_x} - \Delta C_{az}; \quad C_{21z} = C_{02} + \Delta C_{\Omega_x} + \Delta C_{az}. \quad (3)$$

$$C_{11z}^* = C_{02} + \Delta C_{\Omega_x} - \Delta C_{az}; \quad C_{21z}^* = C_{02} - \Delta C_{\Omega_x} + \Delta C_{az}, \quad (4)$$

где C_{01} и C_{02} – начальные значения емкостей конденсаторов; ΔC_{Ω_x} и ΔC_{Ω_z} – изменения емкостей конденсаторов, обусловленные переносными угловыми скоростями; ΔC_{ax} и ΔC_{az} – изменения емкостей конденсаторов, обусловленные поступательными ускорениями.

Выражение (5) определяет алгоритм вычисления угловых скоростей и линейных ускорений инерциальным модулем.

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{\Omega x} & \Delta C_{ax} \\ \Delta C_{\Omega z} & \Delta C_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(C_{21z}^* - C_{11z}^*) - (C_{21z} - C_{11z})}{4} & \frac{(C_{21x}^* - C_{11x}^*) + (C_{21x} - C_{11x})}{4} \\ \frac{(C_{21x}^* - C_{11x}^*) - (C_{21x} - C_{11x})}{4} & \frac{(C_{21z}^* - C_{11z}^*) + (C_{21z} - C_{11z})}{4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Электродные структуры в МИМ являются основным связующим звеном между механическими и электрическими частями. Электродные структуры можно разделить на два типа: с изменением зазора между электродами (рисунк 5, а) и с изменением площади перекрытия электродов (рисунки 5, б и в).

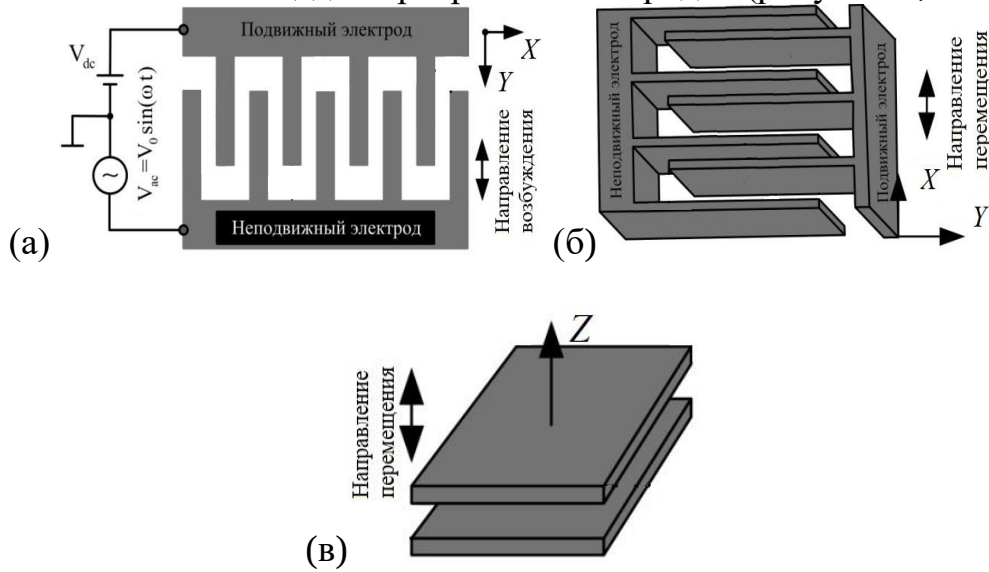


Рисунок 5 – (а) Модель привода; (б) Модель сенсорных структур по оси X; (в) Модель сенсорных структур по оси Z

Они могут быть применены для выполнения различных задач, таких как датчики перемещений (сенсорные структуры), вибропривод (приводные структуры) и корректирующие структуры.

Для возбуждения первичных колебаний используется система с частотным и амплитудным контурами (рисунок 6). В частотном контуре находятся блоки фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), детектора нуля (ДН), формирователя синусоидального сигнала (ФС). Его роль заключается в отслеживании резонанса канала первичных колебаний и создании гармонического возбуждающего сигнала. Амплитудный контур выполняет задачу управления и стабилизации первичных колебаний с требуемой амплитудой. Структура амплитудного контура очень важна с точки зрения стабильности системы, в которой пропорционально-интегральный контроллер (ПИ1) имеет решающее значение для регулирования амплитуды первичных колебаний. Первичные колебания инерционных масс преобразуются в электрический сигнал с помощью преобразователя емкости в напряжение (ПЕН), постоянная составляющая которого подавляется фильтром верхних частот (ФВЧ1). Информация об амплитуде первичных коле-

баний детектирована синхронным детектором и фильтром нижних частот (ФНЧ1).

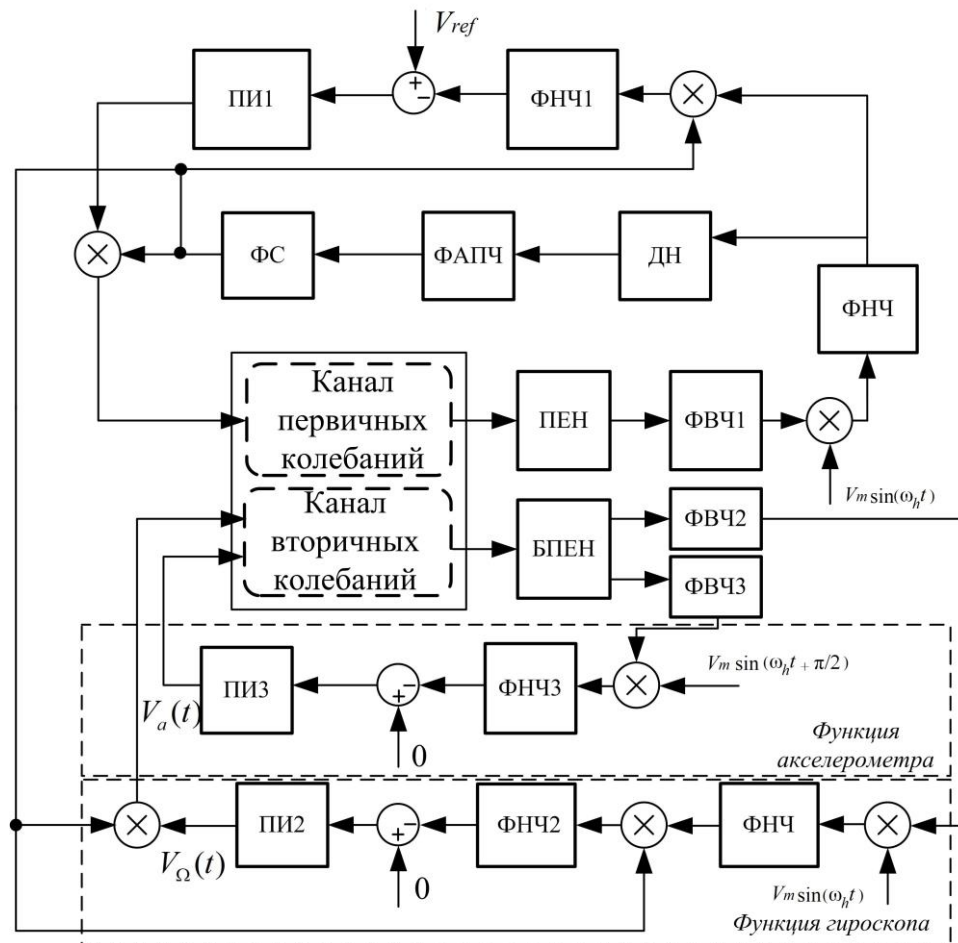


Рисунок 6– Структурная схема системы управления МИМ

В канале вторичных колебаний для получения выходной информации МИМ в режиме гироскопа и акселерометра применяется метод, при котором используется дополнительный высокочастотный сигнал $V(t) = V_m \sin(\omega_h t)$. В каждом измерительном канале после блока преобразователя емкости в напряжение (БПЕН) установлены фильтры верхних частот (ФВЧ2 и ФВЧ3) для устранения постоянной составляющей в измерительном сигнале, которая возникает вследствие неодинаковости начальных значений емкостей.

После ФВЧ2 в каналах измерения угловых скоростей последовательно включены два синхронных детектора. Первые синхронные детекторы выделяют сигнал на частоте высокочастотного сигнала $V_m \sin(\omega_h t)$. Вторые синхронные детекторы в каналах измерения угловой скорости детектируют сигнал на частоте возбуждения первичных колебаний. После синхронного детектирования измерительная информация фильтруется фильтрами нижних частот (ФНЧ и ФНЧ2). В результате после фильтрации выделяются постоянные составляющие в измерительных сигналах, которые пропорциональны угловой скорости. Перемещения инерционных масс из-за наличия угловых скоростей компенсированы подачей обратных сигналов от пропорционально-интегральных контроллеров (ПИ2 и ПИ3) на корректирующие электроды. После ФВЧ3 синхронный детек-

тор выделяет сигнал на частоте сигнала $V_m \sin(\omega_{ht})$. После синхронного детектирования измерительная информация фильтруется фильтрами нижних частот (ФНЧЗ), в результате чего выделяются постоянные составляющие в измерительных сигналах, которые пропорциональны ускорению. Пропорционально-интегральные контроллеры (ПИЗ) также используются для создания обратной связи, компенсирующей перемещения инерционных масс под действием ускорений.

В третьей главе проведено исследование динамических характеристик чувствительного элемента инерциального модуля под воздействием температуры. Под воздействием температуры окружающей среды собственные частоты первичных и вторичных колебаний изменяются. При этом согласование собственных частот каналов первичных и вторичных колебаний нарушается, что приводит к уменьшению амплитуд колебаний инерционных масс, в результате этого изменяются механические масштабные коэффициенты чувствительного элемента МИМ.

Проведены температурные тестирования исследуемого образца чувствительного элемента МИМ в термокамере. Для этого ЧЭ МИМ был упакован в металлическом корпусе с вакуумом под давлением 10^{-2} Па (рисунок 7).

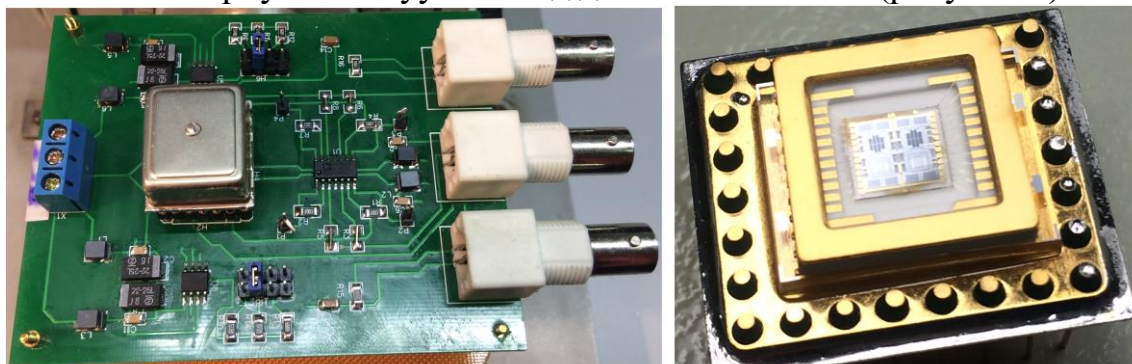


Рисунок 7 – Чувствительный элемент МИМ в корпусе

Температура повышается от минус 20 °С до 80 °С с интервалом 10 °С. Каждый уровень температуры поддерживается постоянным в течение 10 мин. Результаты испытаний представлены на рисунке 8.

В испытаниях было обнаружено, что собственная частота первичных колебаний увеличивается от 12,54 кГц до 12,7 кГц при увеличении температуры от минус 20 °С до 80 °С. Средний температурный коэффициент изменения собственной частоты составляет 1,61 Гц/°С. Видно, что собственная частота вторичных колебаний выше собственной частоты первичных колебаний. Частотное рассогласование принимает величину $\Delta f = 25$ Гц при температуре минус 20 °С. При увеличении температуры рассогласование частот уменьшается. Средний температурный коэффициент изменения собственной частоты вторичных колебаний равен 1,31 Гц/°С.

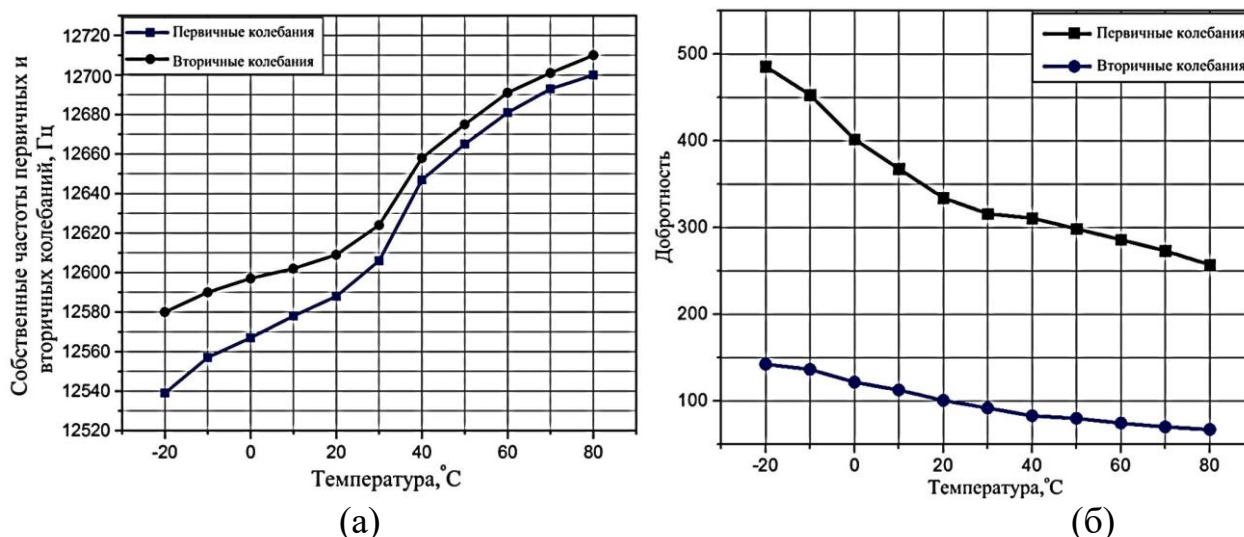


Рисунок 8 – Зависимость собственных частот (а) и добротности (б) от температуры

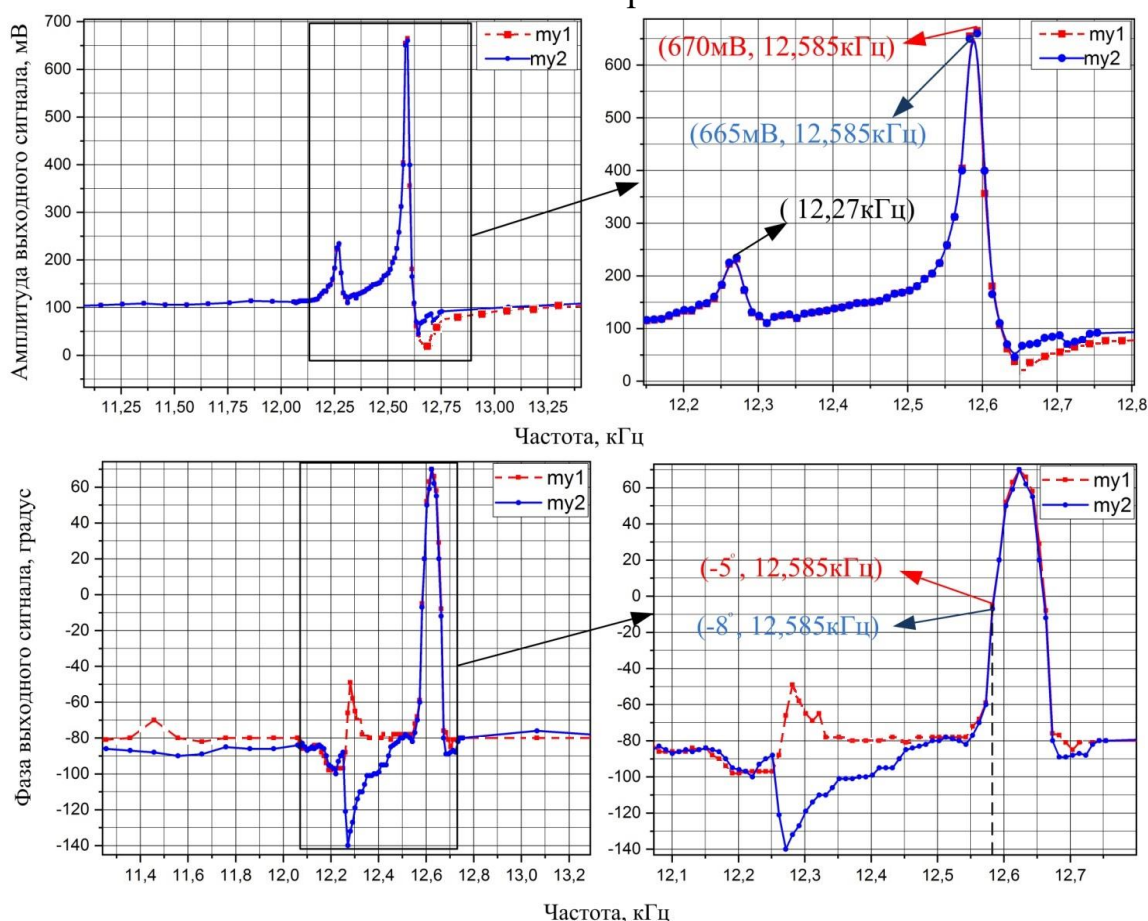
Экспериментально исследовано влияние температуры на давление и демпфирование воздуха внутри корпуса МИМ. Результаты исследования показали, что добротности двух каналов МИМ являются невысокими (при 20 °C для канала первичных колебаний добротность равна 331, для канала вторичных колебаний по оси X добротность составляет 100). С ростом температуры от минус 20 °C до 80 °C добротности в двух каналах снижаются на 52,81 %. При недостаточно низких давлениях добротности обычно начинают сходить к низкому значению, которое будет вызывать быстрое рассеивание энергии движения инерционных масс. В результате этого резонансные амплитуды первичных и вторичных колебаний уменьшаются. Чтобы минимизировать влияние колебаний температуры, желательно корпусировать ЧЭ МИМ в условии глубокого вакуума внутри корпуса.

Таким образом, изменение температуры оказывает значительное влияние на динамические характеристики ЧЭ. Рост окружающей температуры приводит к увеличению собственных частот первичных и вторичных колебаний, нарушается соотношение между этими частотами, увеличивается демпфирование колебаний ЧЭ и, как следствие, уменьшаются амплитуды первичных и вторичных колебаний. Поэтому использование обычных способов для возбуждения первичных колебаний с разомкнутым контуром и прямого преобразования для получения информации об ускорении и угловой скорости является неэффективным.

Четвёртая глава посвящена разработке и экспериментальным исследованиям системы возбуждения первичных колебаний, которая позволяет устранить влияние температуры и автоматически регулировать параметры первичных колебаний.

Представлены частотные характеристики канала первичных колебаний изготовленного образца ЧЭ МИМ (рисунок 9). Экспериментальные частотные характеристики показали, что существуют две резонансные частоты, расположенные близко друг к другу (12,27 кГц и 12,58 кГц). Это объясняется тем, что в

канале первичных колебаний две инерционные массы возбуждаются антифазными колебаниями на частоте около 12,5 кГц, но асимметрия в конструкции из-за технологических несовершенств в процессе производства вызывает движение инерционных масс с меньшей амплитудой на частоте 12,27 кГц. Эти колебания называются синфазными. Наличие паразитного сигнала обнаружено по отличию максимальных амплитуд выходных колебательных сигналов двух инерционных масс на 0,75 %. При резонансе наблюдается фазовое согласование между возбуждающим и выходным колебательными сигналами, которое можно использовать в качестве отметки слежения резонанса.



где m_{y1} и m_{y2} — являются обозначениями двух инерционных масс.

Рисунок 9 – Частотные характеристики канала первичных колебаний

Представлен метод снижения паразитного эффекта, который позволяет детектировать слабый сигнал с использованием дополнительного высокочастотного сигнала $V(t) = V_m \sin(\omega_{ht})$ в схемах ПЕН (рисунок 10). Данный метод является наиболее оптимальным с точки зрения повышения чувствительности ПЕН при выделении слабых информационных сигналов за счет того, что выходной отклик преобразования выделяется с помощью синхронного детектора.

Поскольку сила Кориолиса пропорциональна скорости первичных колебаний, то фактически управляемым параметром системы возбуждения первичных колебаний должна быть скорость первичных колебаний. Скорость первичных

колебаний пропорциональна электрическому току выходного сигнала, поэтому ПЕН построен на основе преобразования тока в напряжение.

$$V_{\text{ПЕН}}(t) = \frac{R_{\text{ос}} R_2}{R_1} (2I_y(t) + I_{C_p}(t)). \quad (6)$$

где C_p – паразитная емкость, I_y – ток, сгенерированный первичными колебаниями.

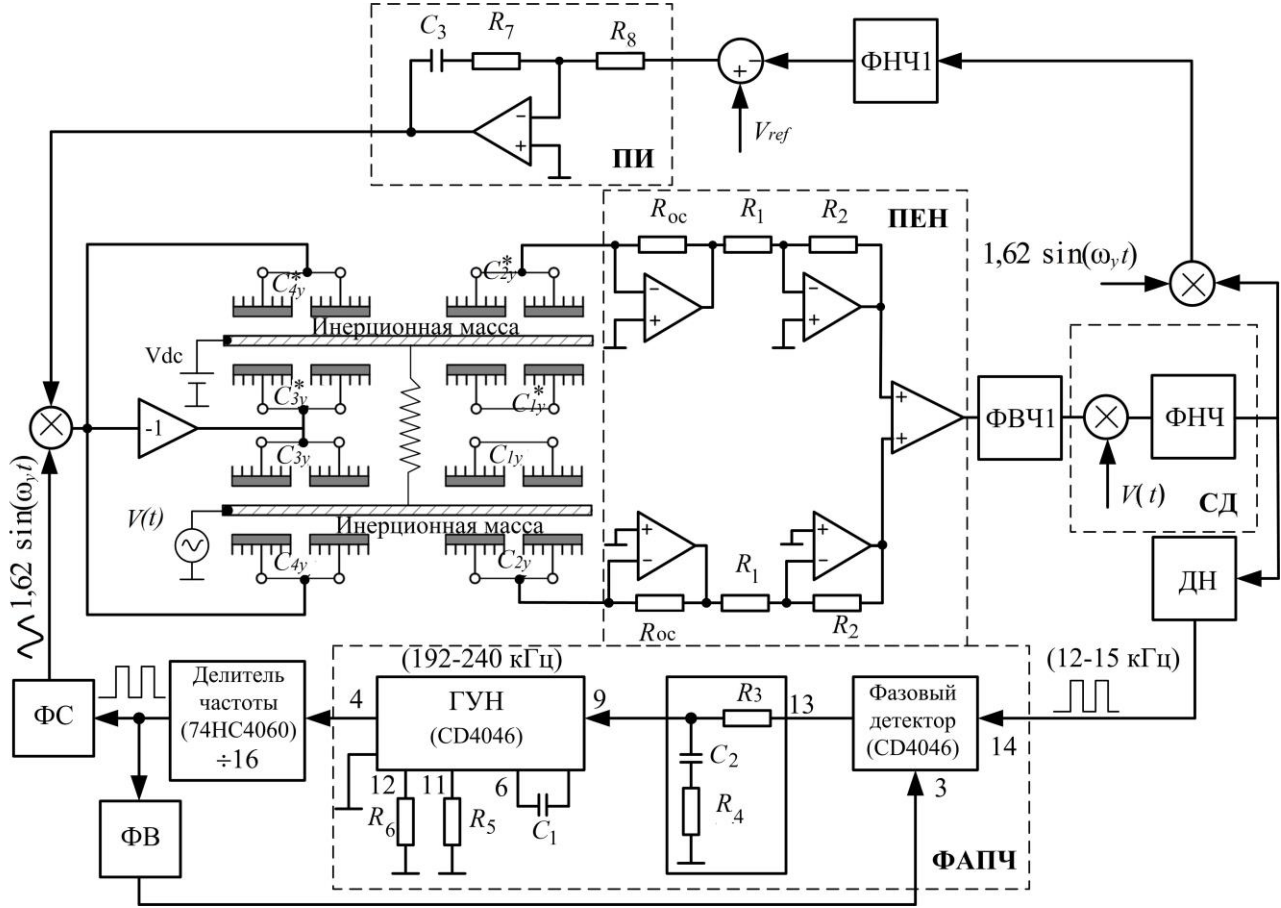


Рисунок 10 – Схема возбуждения первичных колебаний

Электрический ток, сгенерированный первичными колебаниями, определяется как:

$$I_y(t) = \omega_h \cos(\omega_h t) (a_2 + b_2 y_1) + (V_m \sin(\omega_h t) + V_{dc}) b_2 \dot{y}_1. \quad (7)$$

Общий паразитный ток, проходящий через паразитные ёмкости, имеет вид:

$$I_{C_p}(t) = \frac{d(V_{ac} C_p)}{dt} = 1,62 \omega_y \cos(\omega_y t) C_p + 1,62 \sin(\omega_y t) \frac{d(C_p)}{dt}. \quad (8)$$

Напряжение после первого синхронного детектора (СД) будет определяться как:

$$V_{\text{СД1}}(t) = V_{\text{ПЕН}} V_m \sin(\omega_h t) F(t) = -V_m^2 \frac{R_{\text{ос}} R_2}{R_1} b_2 \omega_y y_m \sin(\omega_y t + \varphi_1). \quad (9)$$

Напряжение после второго СД имеет вид:

$$V_{CD2}(t) = 1,62V_{ПЕН} \sin(\omega_y t) F_1(t) = -1,62V_m^2 \frac{R_{oc} R_2}{2R_1} b_2 \omega_y y_m \cos(\varphi_1), \quad (10)$$

где $F(t)$ и $F_1(t)$ – передаточные функции фильтров низких частот ФНЧ и ФНЧ1; φ_1 – сдвиг фазы выходного сигнала после ФНЧ.

С помощью ПИ контроллера напряжение после второго СД поддерживается постоянным на опорном уровне. Это означает, что скорость первичных колебаний стабилизирована.

На основе предложенного метода с целью возбуждения первичных колебаний на своей собственной частоте, используется ФАПЧ (рисунок 10). Поскольку, собственная частота первичных колебаний приближается к величине 12,5 кГц, то в схеме ФАПЧ выбран диапазон частоты отслеживания от 12 кГц до 15 кГц. Определено, что при резонансе фазовая ошибка выходного сигнала после первого СД относительно возбуждающего сигнала равна $\varphi_1 = 10^\circ$. Поэтому для устранения фазовой ошибки при резонансе применяется фазовращатель (ФВ).

На рисунке 11, а представлен процесс запуска и отслеживания резонанса канала первичных колебаний с использованием системы ФАПЧ при приложении напряжения V_{dc} , равного 30 В. Первичные колебания имеют гармонический вид и возбуждаются на резонансной частоте 12,585 кГц. Амплитуда скорости первичных колебаний непрерывно стабилизирована на заданном значении (1,25 В), время установления составляет 260 мс.

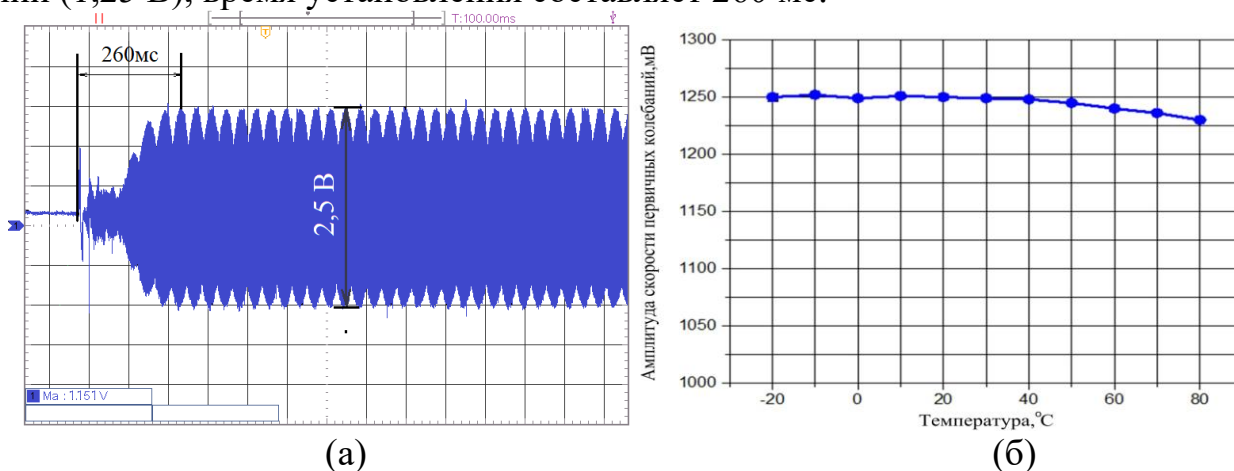


Рисунок 11– Амплитуда скорости первичных колебаний

На рисунке 11, б представлены результаты тестирования системы управления первичных колебаний в термокамере. Результаты испытаний показывают, что при изменении температуры в диапазоне от минус 20 °С до 80 °С скорость первичных колебаний стабилизирована. Малое отклонение возникает, начиная с температуры 50 °С. Максимальное отклонение от установленного уровня (1,25 В) составляет 1,30 %.

В пятой главе предложена структура системы обработки измерительной информации для получения МИМ компенсационного типа. Проведено моделирование и экспериментальные исследования работы МИМ в режимах акселерометра и гироскопа (рисунок 12).

Система обработки измерительной информации работает следующим образом: информация о скорости и ускорении выделяется с помощью синхронных детекторов при использовании дополнительных высокочастотных сигналов, затем полученные сигналы отправляются в обратную связь для создания замкнутого контура с целью создания электрического демпфирования для компенсации движения инерционных масс. Электрическое демпфирование регулируется величиной управляющего сигнала, генерируемого ПИ-контроллерами (ПИ2 и ПИ3). Управляющий сигнал через обратную связь подаётся на электроды корректирующей структуры для создания электростатических сил, уравнивающих силы Кориолиса и инерции, чтобы стабилизировать инерционные массы в установленном положении.

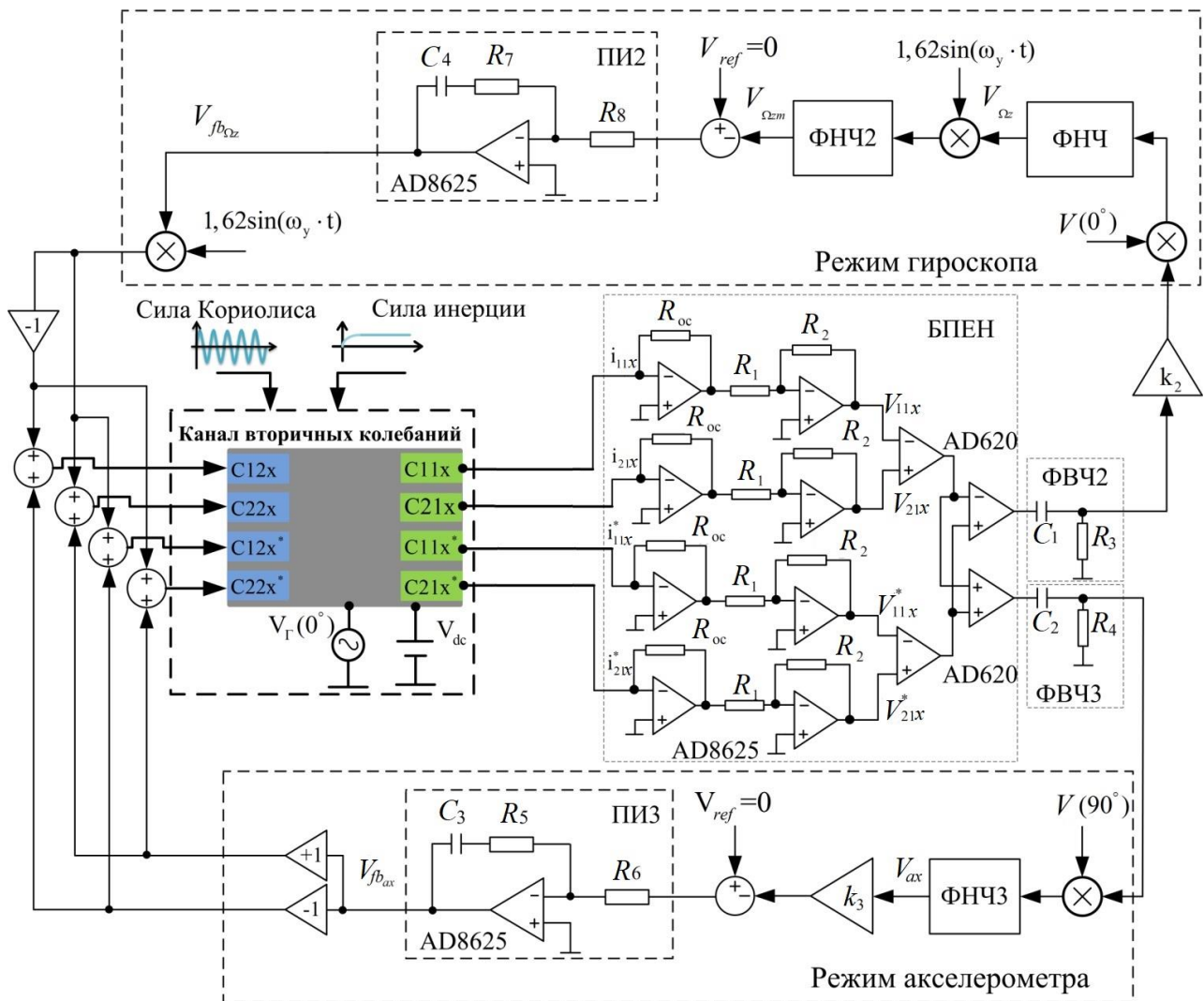


Рисунок 12– Схема обработки измерительной информации

Проведены экспериментальные исследования на основе МИМ с разработанной полной электронной системой: системой возбуждения первичных колебаний и системой обработки измерительной информации. Для оценки характеристик МИМ проведены испытания с тремя изготовленными образцами ЧЭ. Достигнутые характеристики МИМ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики инерциального модуля

Характеристики	Единица	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Режим акселерометра				
Масштабный коэффициент	мВ/г	152,3	148,5	151,7
Смещение нуля	mg	24,95	10,1	18,06
Порог чувствительность	г	меньше 0,1	меньше 0,1	меньше 0,1
Полоса пропускания	Гц	больше 50	больше 50	больше 50
Нелинейность	%	0,61	0,82	0,47
Дрейф скорости	mg/√ Гц	0,088	0,0755	0,0962
Нестабильность смещения нуля	mg	$2,035 \times 10^{-2}$	$2,254 \times 10^{-2}$	$1,961 \times 10^{-2}$
Дрейф ускорения	mg/√ Гц	$1,828 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,546 \times 10^{-3}$
Спектральная плотность мощности	mg/√ Гц	0,0854	0,074	0,099
Режим гироскопа				
Масштабный коэффициент	мВ/градус/ с	8,0	8,0	8,1
Смещение нуля	град/с	48	60	66
Порог чувствительность	град/с	±0,8	±0,8	±0,8
Полоса пропускания	Гц	больше 20	больше 20	больше 20
Нелинейность	%	0,4	0,82	2,7
Дрейф угла	град/√ Гц	$3,35 \times 10^{-3}$	$2,88 \times 10^{-3}$	$3,56 \times 10^{-3}$
Нестабильность смещения нуля	град/с	$5,269 \times 10^{-4}$	$4,37 \times 10^{-4}$	$5,49 \times 10^{-4}$
Дрейф угловой скорости	град/с/√ Гц	$4,982 \times 10^{-5}$	$5,33 \times 10^{-5}$	$3,546 \times 10^{-5}$
Спектральная плотность мощности	град/с/√ Гц	$3,35 \times 10^{-3}$	$2,875 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$
<i>Примечание:</i> г – ускорение свободного падения в г. Томске равное 9,816 м/с ²				

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели приводных и сенсорных электродных структур, позволяющих реализовать линейную систему возбуждения первичных колебаний и повысить емкостную чувствительность микроэлектромеханического инерциального модуля.

2. Построены частотные характеристики канала первичных колебаний чувствительного элемента инерциального модуля.

3. Разработана система управления первичными колебаниями, основанная на результатах аналитического анализа, моделирования и экспериментальных исследований образцов, которая позволяет стабилизировать скорость первичных колебаний с погрешностью не более 1,3 % в температурном диапазоне от минус 20 °С до 80 °С.

4. Разработана система управления вторичными колебаниями, способная управлять положением инерционных масс МИМ для получения компенсационного преобразования, улучшающего характеристики МИМ: повышение линейности, увеличение полосы пропускания, устранение зависимости масштабного коэффициента от добротности и собственной частоты.

5. Созданы экспериментальные образцы МИМ компенсационного типа с диапазоном измерения ±400 градус/с, нестабильностью смещения нуля менее 22,54 мкг в режиме акселерометра и $5,49 \times 10^{-4}$ градус/с в режиме гироскопа, и нелинейностью 0,47 % во всем диапазоне измерений в режиме акселерометра,

0,4 % в режиме гироскопа. Определены пути дальнейшего улучшения характеристик МИМ.

6. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР, финансируемых в рамках ФЦП.

7. Результаты работы используются: в ООО «Машиностроительное предприятие «Ильма» при реализации проекта по созданию системы навигации горнопроходческого комбайна для обработки выходных сигналов с гироскопов и акселерометров; в учебном процессе в отделение Электронной инженерии Томского политехнического университета.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Ло В.Х. Анализ эффекта паразитной емкости в режиме движения микроэлектромеханического гироскопа/ Ло В.Х., Нестеренко Т.Г.// Известия Южного федерального университета. Технические науки: Электроника и нанотехнологии. – 2018. – Т. 196, № 2. – С. 54-67.

2. Ло В.Х. Система резонансной настройки режима функционирования вибрационного многокомпонентного МЭМС-гироскопа/ Ло В.Х., Нестеренко Т.Г. // Известия Южного федерального университета. Технические науки: Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 267–278.

3. Ло В.Х. Анализ влияния температуры на частотные характеристики кремниевого микромеханического гироскопа/ Нестеренко Т.Г., Баранов П.Ф., Коледа А.Н., Ло В.Х., // Известия Южного федерального университета. Технические науки: Электроника и нанотехнологии. – 2019. – № 6. – С. 100-112.

Патент на изобретение

4. Патент 2686441 РФ МПК 01С 19/56. Микромеханический гироскоп / Нестеренко Т.Г., Баранов П.Ф., Ло В.Х., Буй Д.Б.; заявл. 25.10.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 12.-11 с.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных WoS и Scopus

5. Lo V.H. A novel system of primary oscillations for micromechanical gyroscope / P. Baranov, T. Nesterenko, Bui D.B., Lo V.H // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 841. – Article 012004.

6. Lo V.H. MEMS Instrument Accuracy in Automated Vehicle Control / Lo V.H, A. Koleda, E. Barbin, T. Nesterenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol 1118. – P.4.

7. Lo V.H. Amplitude control system of drive-mode oscillations of MEMS gyroscopes/ T.G. Nesterenko, E.S. Barbin, P.F. Baranov, Lo V.H // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019 – Vol. 516, № 1.– P.6.

8. Lo V.H. Personal navigation system based on MEMS gyroscope/ Lo V.H, T.G. Nesterenko // MATEC Web of Conferences.– 2017– Vol 102, №01020. – P.4.

Публикации в других изданиях

9. Lo V.H. Small scale personal navigation system based on micromechanical gyroscopes / Lo V.H, T.G. Nesterenko, P.F. Baranov, E.V. Zorina // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON. –2017. –Р.4.

10. Ло В.Х., Управление первичными колебаниями многокомпонентного МЭМС гироскопа / Ло В.Х. // Сборник научных трудов XI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – 2017. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, – Часть 10. – С. 117–121.

11. Ло В.Х., Многокомпонентный микроэлектромеханический гироскоп с антифазным возбуждением режима движения / Ло В.Х. // Сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – 2018. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, Часть 6. – С. 47–51.

12. Ло В.Х., Микроэлектромеханический гироскоп компенсационного типа / Ло В.Х., Т.Г. Нестеренко // Сборник научных трудов XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». – 2019. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, Часть 6. – С. 96–100.