

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

*На правах рукописи*



**Коробков Кирилл Андреевич**

**Разработка и исследование микро-опто-электромеханического  
адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе  
методов двухканальной обработки сигналов**

**Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Бусурин Владимир Игоревич

**МОСКВА – 2021**

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ.....	12
1.1 Основные проблемы области микроэлектромеханических преобразователей .....	12
1.2 Структура преобразователя ускорения и типы чувствительного элемента . .....	15
1.3 Методы считывания микроперемещений чувствительного элемента .....	18
1.4 Постановка частных задач исследования .....	24
1.5 Выводы по первой главе .....	25
2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ С ДВУХКАНАЛЬНЫМ АДАПТИРУЕМЫМ ОПТИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ .....	26
2.1 Разработка структурной и функциональной схем преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем ..	26
2.2 Разработка математической модели чувствительного элемента с малыми перемещениями .....	28
2.2.1 Статическая математическая модель чувствительного элемента.....	28
2.2.2 Динамическая математическая модель чувствительного элемента ..	30
2.3 Разработка математических моделей оптических узлов считывания .....	31
2.3.1 Математическая модель интерферометрического узла считывания .	31
2.3.2 Математическая модель узла считывания на оптическом туннельном эффекте.....	34
2.4 Разработка математической модели преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем.....	37
2.5 Разработка алгоритма работы преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем.....	39

2.6	Моделирование алгоритма работы преобразователя линейного ускорения с адаптируемым оптическим модулем.....	41
2.7	Выводы по второй главе.....	44
3	РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ.....	46
3.1	Разработка оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью .....	46
3.1.1	Структурная схема оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью .....	46
3.1.2	Функциональная схема оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью...	49
3.1.3	Математическая модель модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования... ..	50
3.1.4	Математическая модель преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью.....	54
3.1.5	Алгоритмы функционирования и калибровки компенсационного преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.....	59
3.2	Разработка оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью .....	62
3.2.1	Структурная схема и общий вид оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью ...	62
3.2.2	Математическая модель преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью .....	67
3.2.3	Исследование устойчивости преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью .....	73
3.2.4	Исследование электростатического демпфирования колебаний балочного чувствительного элемента компенсационного преобразователя линейного ускорения .....	79

3.3	Разработка микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами «грубо-точной» стабилизации чувствительного элемента .....	84
3.4	Выводы по третьей главе .....	88
4	АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЭМ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ.....	90
4.1	Анализ влияния параметров узлов на характеристики МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.....	90
4.1.1	Влияние конструктивных параметров ЧЭ на характеристики преобразователя линейного ускорения.....	90
4.1.2	Влияние конструктивных параметров ОТЭ-модулятора на характеристики преобразователя линейного ускорения.....	94
4.1.3	Влияние газового демпфирования на характеристики преобразователя линейного ускорения .....	97
4.1.4	Влияние коэффициента обратной связи на характеристики компенсационного преобразователя линейного ускорения .....	98
4.2	Анализ влияния внешних дестабилизирующих факторов на погрешности преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.....	100
4.2.1	Влияние температуры на погрешность преобразователя линейного ускорения .....	100
4.2.2	Влияние поперечного ускорения на погрешность преобразователя линейного ускорения .....	101
4.3	Минимально детектируемое линейное ускорение и динамический диапазон МОЭМ-преобразователя.....	102
4.4	Разработка алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения.....	105
4.4.1	Структурная схема преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов.....	105
4.4.2	Математическая модель двухканального интерференционного узла считывания информации.....	110

4.4.3	Алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения.....	113
4.5	Экспериментальное исследование параметров узлов преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием .....	116
4.6	Разработка методики проектирования МОЭМ-преобразователя линейного ускорения .....	121
4.6.1	Алгоритм выбора структуры и параметров МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием .....	121
4.6.2	Разработка программы синтеза оптического преобразователя линейного ускорения .....	123
4.7	Выводы по четвёртой главе .....	128
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	130
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	132
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
	ПРИЛОЖЕНИЕ .....	147
	Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ГОСНИИП»	
	Приложение Б. Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе	
	Приложение В. Уведомление о приеме и регистрации заявки на изобретение	
	Приложение Г. Математические модели в среде графического программирования	
	Приложение Д. Алгебраические преобразования и упрощения	
	Приложение Е. Дополнительный анализ деформаций чувствительного элемента при различных его топологиях	
	Приложение Ж. Текст программы синтеза оптического преобразователя линейного ускорения	

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Прецизионное измерение ускорения востребовано во многих прикладных задачах управления подвижными объектами, например, при построении навигационных систем, для повышения точности систем контроля положения манипуляторов и т.д. Большой вклад в его развитие внесен российскими и зарубежными учеными, такими как В.М. Ачильдиев, В.Д. Вавилов, Д.М. Калихман, Э.Г. Косцов, А.П. Мезенцев, В.Е. Мельников, В.Я. Распопов, С.П. Тимошенко, Р.Г. Джексон, М.С. Расрас, Э. Удд, Дж. Фрайден и др. Использование оптических методов считывания информации о микроперемещениях чувствительного элемента, индуцированных ускорением, в микроэлектромеханических системах (МЭМС) по сравнению с емкостным способом позволяет: избежать электростатических силовых воздействий на чувствительный элемент при считывании; снизить чувствительность преобразователя к внешним электромагнитным шумам; исключить электрический пробой между подвижными частями. Применение оптических средств позволяет также сократить диапазон механических перемещений чувствительного элемента и уменьшить чувствительность к поперечным ускорениям. При построении высокочувствительных оптических узлов считывания, которые могут быть реализованы на основе использования оптического туннельного эффекта и интерферометрических методов, предъявляются требования к отсутствию механического контакта между подвижными элементами модулятора, что может быть обеспечено средствами компенсационных обратных связей. Оптический модулятор в микро-опто-электромеханических (МОЭМ) преобразователях ускорения воспринимает изгибы чувствительного элемента и измеряет его перемещения порядка единиц-десятков микрометров. При компенсации влияния различных внешних факторов погрешность оптических способов детектирования может не превышать десятков нанометров, обеспечивая высокую чувствительность к ускорению. Поэтому разработка и исследование МОЭМ адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов прецизионного

оптического считывания, способного обеспечить измерение малых линейных ускорений, является актуальной задачей.

**Целью исследования** является повышение чувствительности и помехозащищенности микроэлектромеханического преобразователя линейного ускорения путём применения прецизионных оптических средств считывания субмикрометровых перемещений чувствительного элемента и методов двухканальной обработки сигналов.

**Объектом исследования** являются структурные схемы и математические модели преобразователей линейного ускорения с адаптируемым оптическим модулем и комбинированной обратной связью, выполненных на основе высокочувствительных оптических средств считывания микроперемещений чувствительного элемента.

**Предметом исследования** является улучшение характеристик преобразователей линейного ускорения путём разработки новых структур, реализующих оптическое считывание, алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла, позволяющего анализировать дробную часть полосы интерференционной картины, и методики проектирования, автоматизирующей определение структуры и расчет основных параметров.

**Методы исследования.** При исследовании микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения применялись методы геометрической и волновой оптики, теории упругости и механики деформируемого твёрдого тела, теории автоматического управления, математического и полунатурного моделирования.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

– разработан микро-опто-электромеханический адаптируемый преобразователь линейного ускорения, в котором использование двухканального оптического съема информации на основе оптического туннелирования и интерферометра обеспечило повышение точности, уменьшение влияния поперечных ускорений и исключение дополнительных силовых воздействий при считывании сигналов об индуцированном перемещении;

- разработанные новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения отличаются использованием совместной обработки сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования, что обеспечивает уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения;
- разработанная математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, учитывающая динамические свойства чувствительного элемента и расположение узлов комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связи, отличается использованием модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, что позволяет повысить точность расчета характеристик;
- предложенный алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения отличается определением дробной части полосы интерференционной картины, что позволяет увеличить чувствительность к микроперемещениям чувствительного элемента.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

- структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующие совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования, обеспечивающие уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения;
- математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненная модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, позволяющая повысить точность расчета характеристик;



- алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины, позволяющий увеличить чувствительность к индуцированным ускорением субмикрометровым перемещениям;
- методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям.

**Практическая значимость результатов исследования:**

- использование разработанной математической модели компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненной модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, позволяет выполнять анализ влияния конструктивных параметров на характеристики и повысить точность их расчета;
- проведенное экспериментальное исследование канала считывания на эффекте оптического туннелирования и макета оптического преобразователя ускорения подтверждает возможность использования прецизионных оптических средств для детектирования микроперемещений чувствительного элемента и измерения линейного ускорения;
- разработанная методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения обеспечивает автоматизированный выбор структуры и расчёт параметров конструкции нового преобразователя, что позволяет ускорить процесс разработки.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается обоснованностью допущений и преобразований при разработке математических моделей микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов,

экспериментальными исследованиями и соответствием полученных результатов известным.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы внедрены в АО «ГосНИИП» (см. Приложение А) и используются в учебном процессе МАИ (см. Приложение Б).

**Апробация работы.** Основные научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на: XXVII, XXVIII, XXIX, XXX Международных научно-технических конференциях «Современные технологии в задачах управления, автоматки и обработки информации» (2018, 2019, 2020, 2021; Алушта); 17-ой, 19-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (2018, 2020; Москва, МАИ); VIII, IX, X Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (2019, 2020, 2021; Москва, НИЯУ МИФИ); 26-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2019» (2019; Зеленоград, МИЭТ); XLVI, XLVII Международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения – 2020», «Гагаринские чтения – 2021» (2020, 2021; Москва, МАИ); XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (2020; Санкт-Петербург).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 работ [1 – 20], из них 3 – статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [1 – 3], 1 – статья в ведущем научном журнале, входящем в международные реферативные базы данных [4]. Получено решение о выдаче патента РФ на изобретение: Бусурин В.И., Коробков К.А., Кошеварова Н.А., Штек С.Г., Жеглов М.А. Микро-опто-электромеханический компенсационный преобразователь линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента. Заявка на изобретение №2021112754 от 30 апреля 2021 г (см. Приложение В). Решение о выдаче патента от 08 октября 2021 г.

**Личный вклад автора** в работы, написанные в соавторстве, заключается в разработке новых структурных и функциональных схем микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения [1; 8; 15], математической модели компенсационного преобразователя с модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования [2; 3; 5 – 7; 9; 11; 13; 18; 20], алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла [4; 10; 14; 16; 19], методики проектирования преобразователя линейного ускорения [17], получении результатов исследований, составляющих научную новизну работы и выносимых на защиту.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и семи приложений. Общий объём диссертации составляет 186 страниц, из них 146 – основная часть, 40 – приложение. Работа содержит 74 рисунка и 1 таблицу. Список использованных источников включает 102 наименования.

# 1 ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

## 1.1 Основные проблемы области микроэлектромеханических преобразователей

Прецизионные малогабаритные преобразователи ускорений являются неотъемлемой частью решения многих прикладных задач: в сфере построения навигационных систем; для стабилизации элементов конструкции твердотельных волновых гироскопов (ТВГ); для повышения точности систем позиционирования рабочего органа манипуляторов и т.д.

Развитие МЭМС-технологий является перспективным направлением, позволяющим улучшать характеристики измерительных преобразователей [21–29]. Исследования и разработки в данном направлении весьма актуальны [30]. Интерес представляет создание технологичных, дешёвых и миниатюрных преобразователей [31–33]. Рассматриваются различные спектры практических применений микромеханических преобразователей, пути и перспективы дальнейшего развития, включая переход в нанометровый диапазон с созданием элементов нанoeлектроники [30; 33–38]. На базе измерителей различного принципа действия выполняется построение распределенных резервированных бесплатформенных инерциальных навигационных систем [39]. МЭМС-преобразователи ускорения способны измерять сверхвысокие значения (более 100g) [40]. Следует отметить, что задача сохранения и повышения точностных характеристик является наиболее важной [41], что может достигаться средствами оптического считывания. Несмотря на то, что емкостные преобразователи имеют ряд преимуществ [33] и в настоящее время предлагаются новые математические модели емкостного микромеханического акселерометра [42], одним из направлений развития сенсорных систем и инерциальных МЭМС является использование оптических элементов [43–45]. Отмечается перспективность использования технологий волоконной оптики в оптических датчиках [46]. Представлена возможность построения микрооптоэлектромеханического преобразователя на основе оптического туннельного эффекта [47; 48].

Спектр причин, вызывающих появление погрешностей в результатах измерений преобразователя, довольно широк [49]. Оказывают влияние параметры окружающей среды, например температура [50–52]. Для уменьшения влияния технологических погрешностей НИИПМ и НПК «Вектор» исследуются способы обеспечения точности изготовления микромеханических чувствительных элементов [34]. Исследуются особенности применения сквозного реактивного ионного травления кварцевых мембран для маятниковых узлов Q-flex акселерометров [53]. Инерционные свойства подвижной части преобразователя могут вызывать динамические погрешности [42]. В оптических схемах немалое внимание уделяется фотоприёмникам, технологические ограничения и параметры которых могут существенно влиять на выходные характеристики преобразователя ускорения [54]. Важным фактором, влияющим на преобразователь, являются вибрации, исследования которых показали, что они могут изменять емкость считывающего узла за счёт деформаций ЧЭ [55]. Для борьбы со случайной вибрацией можно использовать методику оптимизации параметров преобразователя [56]. Другим подходом является введение электромагнитных или электростатических обратных связей, которые позволят обеспечить устойчивость маятникового преобразователя линейных ускорений к вибрациям [57]. Компенсационные схемы для преобразователей ускорения начинают использоваться всё чаще: ОАО РПКБ проводит работы в области создания кремниевых компенсационных акселерометров и мультисенсорных датчиков [58]; подлежат исследованию процессы в компенсационном акселерометре, формируются рекомендации по выбору параметров [59] и т.д. На вибрационные погрешности преобразователя ускорения оказывает влияние и сжимаемость газа [60], что говорит о необходимости исследования газового демпфирования чувствительного элемента.

Предлагаются различные алгоритмические и конструкционные способы улучшения характеристик преобразователя. Улучшения характеристик добиваются путём обработки данных, полученных с преобразователя, для которой может использоваться, например, интегродифференцирующий фильтр второго порядка,

что позволяет корректировать динамические свойства микромеханического акселерометра [61]. Также разработана конструкция сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности [62]. Анализируются различные принципы построения чувствительных элементов инерциальных датчиков, представляются особенности конструкции и исследуются характеристики [63], предлагаются способы расчета параметров микромеханических акселерометров [64].

Стоит отметить, что результаты большого количества исследований, например, конструкции туннельного акселерометра или деформаций ЧЭ под действием вибраций, подтверждаются моделированием в различных системах инженерных расчётов [31; 55; 65].

В настоящее время рассматриваются возможности комплексирования [66; 67] преобразователей различных величин в одном устройстве, например, микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр, который выполнен в виде маятника с емкостным датчиком угла и электростатическим датчиком момента [68]. Также при ударных нагрузках на твердотельный волновой гироскоп, его чувствительный элемент может испытывать механические напряжения и изгибные деформации [69–72]. Эти явления могут служить источниками первичной информации, которая позволит измерить ускорения тела гироскопа [73]. Однако без дополнительных алгоритмов обработки они являются источником помех, которые приводят к неточностям в работе прибора [74; 75] и даже к разрушению его компонентов. Вид деформаций оси резонатора ТВГ представлен на иллюстрации (Рисунок 1).

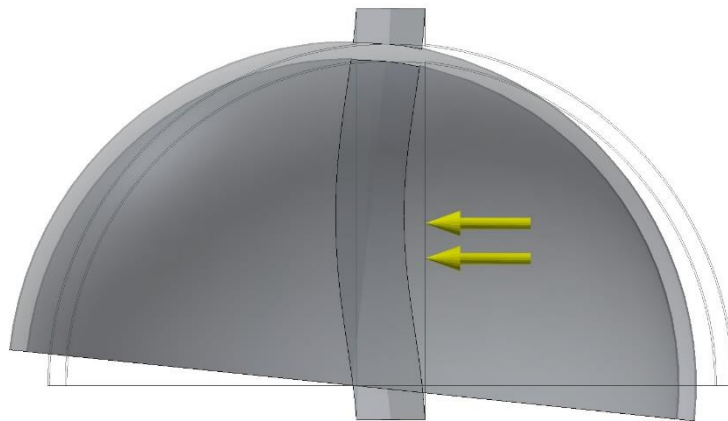


Рисунок 1 – Изгиб оси и смещение полусферического ЧЭ ТВГ

Эти деформации можно уменьшить при помощи введения дополнительных элементов, таких как: датчики микроперемещений оси, электронный блок формирования компенсационных воздействий и электроды стабилизации положения. Комплексование позволяет расширить функциональность и выполнять взаимную коррекцию преобразователей. Также позволяет добиться улучшения характеристик ТВГ использование оптических узлов считывания [76].

Следующим этапом развития первичных измерительных преобразователей может являться их интеллектуализация, например, средствами использования нейронных сетей, способных выполнять прогнозирование [77].

## **1.2 Структура преобразователя ускорения и типы чувствительного элемента**

Преобразователи ускорения могут быть реализованы на основе использования различных принципов построения: прямого или компенсационного измерений [78; 79]. При использовании принципа прямого измерения информация о перемещениях или деформациях ЧЭ непосредственно передаётся последующему узлу, и погрешности цепи измерений сохраняются в выходном сигнале преобразователя. В компенсационном преобразователе присутствует контур отрицательной обратной связи, силовые элементы которого выполняют формирование сил, уменьшающих или полностью исключаящих влияние инерционных явлений, действующих на ЧЭ. Точностные характеристики измерительной цепи компенсационного преобразователя в основном определяются параметрами контура обратной связи. Выбор принципа на этапе конструирования интегрального акселерометра позволяет измерительному устройству удовлетворять требованиям, предъявляемым в техническом задании.

Представлена структура преобразователя линейного ускорения, выполненного по принципу прямого преобразования (Рисунок 2), в которую входят: ЧЭ, элементы считывания информации о микроперемещениях и блок обработки.

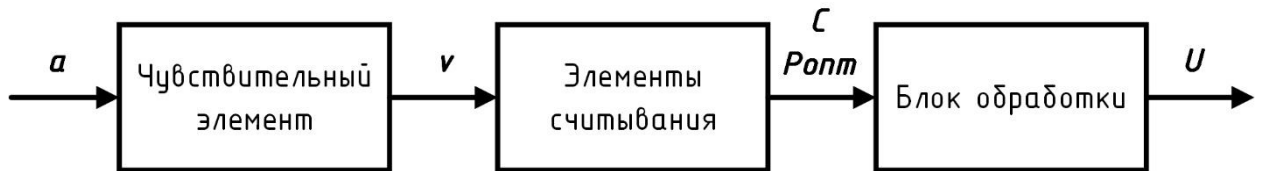


Рисунок 2 – Структура акселерометра прямого преобразования

Модуляция сигнала об ускорении ( $a$ ) обеспечивается субмикрометровыми изгибными деформациями или смещениями ( $v$ ) ЧЭ. Под действием инерции ЧЭ отклоняется в сторону, противоположенную направлению вектора ускорения. Элементы считывания, например, емкостные или оптические, детектируют смещения ЧЭ, модулируя значение электрической ёмкости ( $C$ ) или оптической мощности ( $P_{\text{опт}}$ ) соответственно. Информация от элементов считывания передаётся на блок обработки, формирующий выходное напряжение ( $U$ ), функционально связанное с ускорением ( $a$ ).

Чувствительным элементом (ЧЭ) в преобразователе ускорения является в основном инерционная масса, закреплённая на корпусе при помощи изгибающихся плоских пружинных элементов или торсионов [80; 81]. Микромеханический чувствительный элемент осуществляет преобразование распределённой силы в перемещения или деформации упругих элементов [82; 83]. Детектируя микроперемещения ЧЭ, вызванные измеряемым ускорением, можно определить его значение. Чувствительные элементы преобразователей ускорения делятся по типу на осевые и маятниковые (или балочные). Тип ЧЭ определяется по характеру перемещения подвижных узлов: при использовании осевого типа предполагаются прямолинейные смещения ЧЭ, при использовании маятникового – угловые (или изгибные деформации). В акселерометрии широкое распространение получило практическое использование маятникового несимметричного ЧЭ, схема которого легла в основу первого отечественного интегрального прибора. Основным направлением совершенствования данной конструкции является решение задачи компенсации влияния термических явлений.



Представлены внешние виды и деформации некоторых вариантов исполнения ЧЭ осевого и маятникового типов преобразователей ускорения (Рисунок 3).

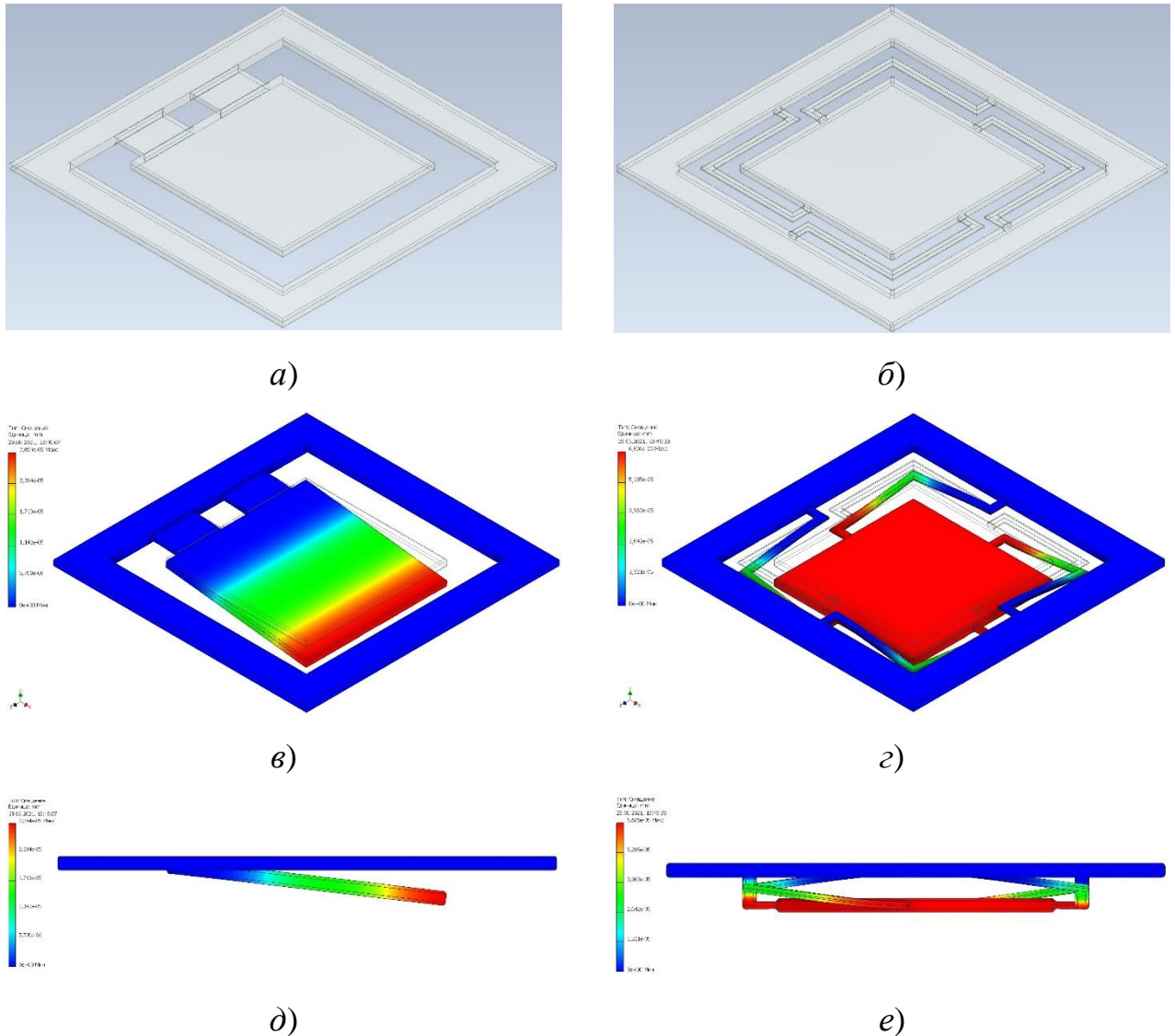


Рисунок 3 – Внешние виды и деформации ЧЭ преобразователей ускорения:  
 а) внешний вид ЧЭ маятникового типа; б) внешний вид ЧЭ осевого типа;  
 в) деформации ЧЭ маятникового типа (изометрическая проекция); г) деформации ЧЭ осевого типа (изометрическая проекция); д) деформации ЧЭ маятникового типа (вид сбоку); е) деформации ЧЭ осевого типа (вид сбоку)

При выбранных топологиях максимальные перемещения ЧЭ осевого типа (Рисунок 3-е) больше, чем перемещения свободной стороны ЧЭ маятникового типа (Рисунок 3-д), но с технологической точки зрения изготовление ЧЭ осевого типа с инерционной массой на торсионах может представлять большие сложности.

Схему конструкции акселерометра прямых измерений с маятниковым ЧЭ описывает иллюстрация (Рисунок 4).

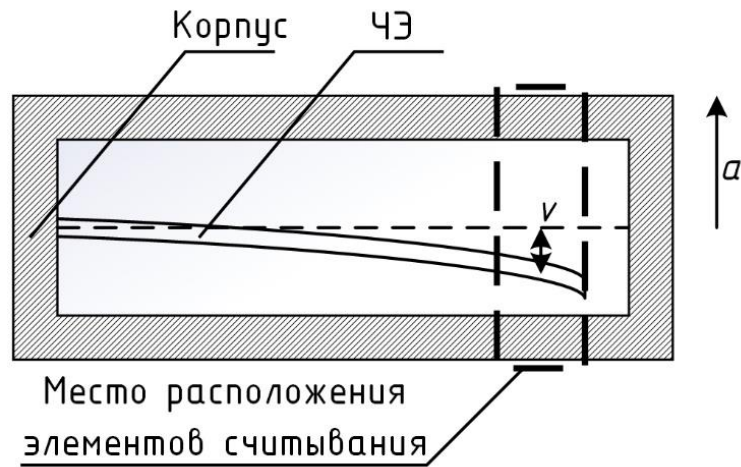


Рисунок 4 – Схема конструкции акселерометра прямых измерений с маятниковым ЧЭ

Данная схема (Рисунок 4) включает ЧЭ, места, предназначенные для монтажа элементов считывания перемещений ЧЭ, и корпус изделия.

### 1.3 Методы считывания микроперемещений чувствительного элемента

Можно предложить следующую классификацию основных методов считывания информации о микроперемещениях ЧЭ (Рисунок 5).

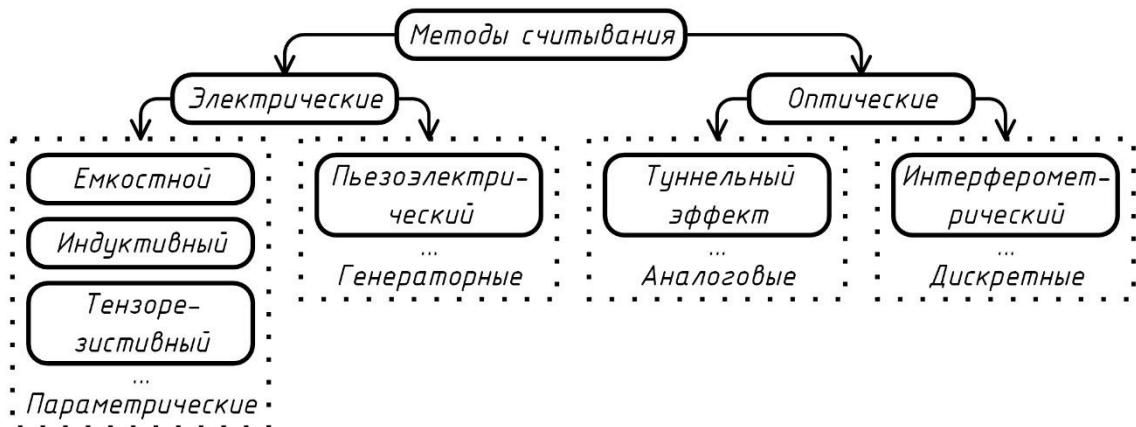


Рисунок 5 – Классификация основных методов считывания микроперемещений

Методы считывания в целом делятся на электрические и оптические. Для электрических методов предложено разделение по способу получения выходного сигнала на параметрические и генераторные. К параметрическим относятся емкостной, индуктивный, тензорезистивный методы и т.д., а к генераторным

можно отнести, например, пьезоэлектрический. Оптические методы предложено разделить по характеру выходного сигнала на аналоговые, к которым отнесён оптический туннельный эффект, и дискретные – интерферометрический метод.

Наибольший интерес представляют емкостной и оптические методы считывания информации о микроперемещениях ЧЭ [84; 85]. Емкостной тип наиболее распространён, что обусловлено простотой его реализации. Оптические средства детектирования положения ЧЭ являются перспективными, к их преимуществам по сравнению с емкостными относятся: отсутствие возможности электрического пробоя между элементами преобразователя; низкая чувствительность к электромагнитным внешним шумам; отсутствие электростатических силовых воздействий на ЧЭ при считывании [84; 85].

Элементы емкостного считывания представляют собой пары обкладок конденсатора, закрепленные на ЧЭ и корпусе. Изменение зазора или площади перекрытия между обкладками приводит к изменению электрической ёмкости, что влечёт за собой изменение реактивного сопротивления в измерительной цепи.

Емкостное считывание может быть описано при помощи модели конденсатора переменной ёмкости. Для детектирования изменений ёмкости конденсатор требуется поместить в измерительную схему, например, интегрирующую *RC*-цепочку. Передаточная функция данной схемы соответствует апериодическому звену первого порядка:

$$W(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s},$$

где  $\tau$  – постоянная времени, определяемая значениями активного сопротивления и измеряемой ёмкости. Параметром, несущим полезную информацию об измерениях зазора, является амплитуда напряжения на конденсаторе.

Простейшие *RC*-цепочки для данных целей применяют редко по причине, например, ослабления выходного сигнала. На практике чаще применяется интегратор на основе операционного усилителя (ОУ), у которого конденсатор включен в цепь отрицательной обратной связи. Схеме на ОУ соответствует передаточная функция интегрирующего звена:

$$W(s) = -\frac{1}{\tau \cdot s}.$$

Значение амплитуды выходного сигнала может быть получено, например, при помощи фильтров или различных цифровых алгоритмов построения огибающей [71; 72].

К оптическим средствам детектирования микроперемещений относятся, например, интерферометр Фабри-Перо (ИФП) [86; 87] и датчики, основанные на оптическом туннельном эффекте (ОТЭ) [88; 89]. При помощи интерферометрического метода измеряются перемещения порядка единиц-десятков микрометров, а погрешность прямых измерений таким способом без усложнения оптической схемы не превышает половины длины волны источника излучения. Датчик на основе ОТЭ позволяет измерять субмикронные перемещения в диапазоне порядка длины волны излучения с малой погрешностью, около единиц-десятков нанометров.

При построении оптических систем считывания предъявляются требования к отсутствию механического контакта между подвижными элементами, что может быть обеспечено средствами электромагнитной или электростатической обратной связи, которые возвращают ЧЭ к положению покоя и дополнительно демпфируют его колебания.

ОТЭ-датчик представляет собой оптический модулятор «среда – воздушный зазор – среда», который образуют призма полного внутреннего отражения (ПВО), закреплённая на корпусе, и ЧЭ (Рисунок 6). Туннелирование оптической мощности происходит через зазор между призмой и ЧЭ, размер которого сопоставим с длиной волны источника излучения (ИИ). В одну катетную грань призмы вводится коллимированное инфракрасное излучение ( $P_{0\text{ОТЭ}}$ ) таким образом, чтобы угол падения на границу сред модулятора (гипотенузную грань) был близок к критическому, но удовлетворял условиям полного внутреннего отражения. За счёт изменения субмикрометрового зазора ( $d_{\text{ОТЭ}}$ ), вызванного ускорением, происходит модуляция выходной оптической мощности ( $P_{\text{ОТЭ}}$ ).

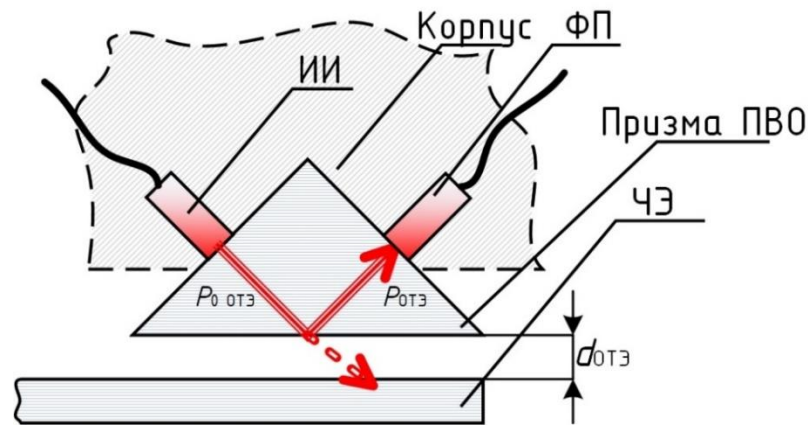


Рисунок 6 – Схема конструкции оптического модулятора ОТЭ-датчика

Оптическая мощность попадает на фотоприёмник (ФП) и преобразуется им в фототок. Далее преобразователь «ток-напряжение» формирует выходной аналоговый сигнал.

В волоконно-оптическом ИФП интерференция происходит на частично отражающем скеле волокна, расположенном на корпусе, и внешнем отражателе, закреплённом на ЧЭ (Рисунок 7).

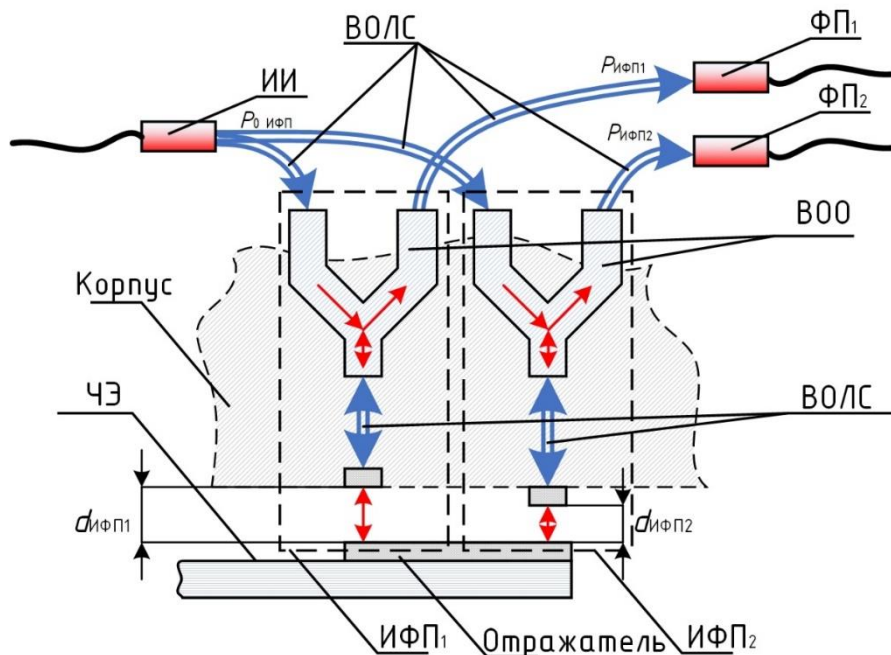


Рисунок 7 – Схема конструкции оптического модулятора, состоящего из двух ИФП

Излучение от ИИ вводится в волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) (или волоконный световод) и через волоконно-оптический ответвитель (ВОО) передаётся к торцу волокна, расположенному вблизи края корпуса. При этом часть

излучения отражается от торца волоконного световода, а другая его часть высвечивается в воздух, отражается от зеркальной поверхности (отражателя) и возвращается обратно в волоконный световод. Луч, отраженный от торца волоконного световода, интерферирует с лучом, отраженным от зеркальной поверхности, и ФП регистрирует мощность излучения, изменяющуюся периодически в зависимости от расстояния ( $d_{\text{ИФП1,2}}$ ) между торцом световода и зеркалом. Т.е. изменение положения ЧЭ приводит к изменению зазора в резонаторе ИФП<sub>1,2</sub> ( $d_{\text{ИФП1,2}}$ ), что модулирует входную оптическую мощность ( $P_{0\text{ИФП}}$ ), формируя значение выходной мощности ( $P_{\text{ИФП1,2}}$ ). В двухканальном ИФП (Рисунок 7) периоды интерференционных картин ( $P_{\text{ИФП1}}$ ) и ( $P_{\text{ИФП2}}$ ) смещены на  $\pi/2$ . Это можно реализовать, например, сместив торцы оптических волокон друг относительно друга на  $\lambda/8$ , где  $\lambda$  – длина волны ИИ.

Далее выполняется преобразование «ток-напряжение», и выходные напряжения с двух каналов интерферометра обрабатываются счётчиком, осуществляющим подсчёт целого числа полос и формирующим цифровой сигнал, пропорциональный перемещениям ЧЭ.

По результатам сравнения емкостного и оптических методов считывания микроперемещений составлена таблица, отражающая основные преимущества и недостатки каждого из них (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты сравнения емкостного и оптических методов считывания

Метод считывания	Емкостной	Туннельный эффект	Интерферометрический
Преимущества	Простота реализации	Малое минимально детектируемое перемещение	Высокая чувствительность
Недостатки	Силовые воздействия при считывании Возможность электрического пробоя Чувствительность к электромагнитным помехам	Работа в малом диапазоне перемещений Возможность механического контакта	Дискретный характер функции преобразования

Приведены графики функций преобразования оптических датчиков, представляющих собой зависимости отражательной способности  $R$  от микроперемещений  $d$  (Рисунок 8): черная линия соответствует ИФП; красная – ОТЭ-датчику.

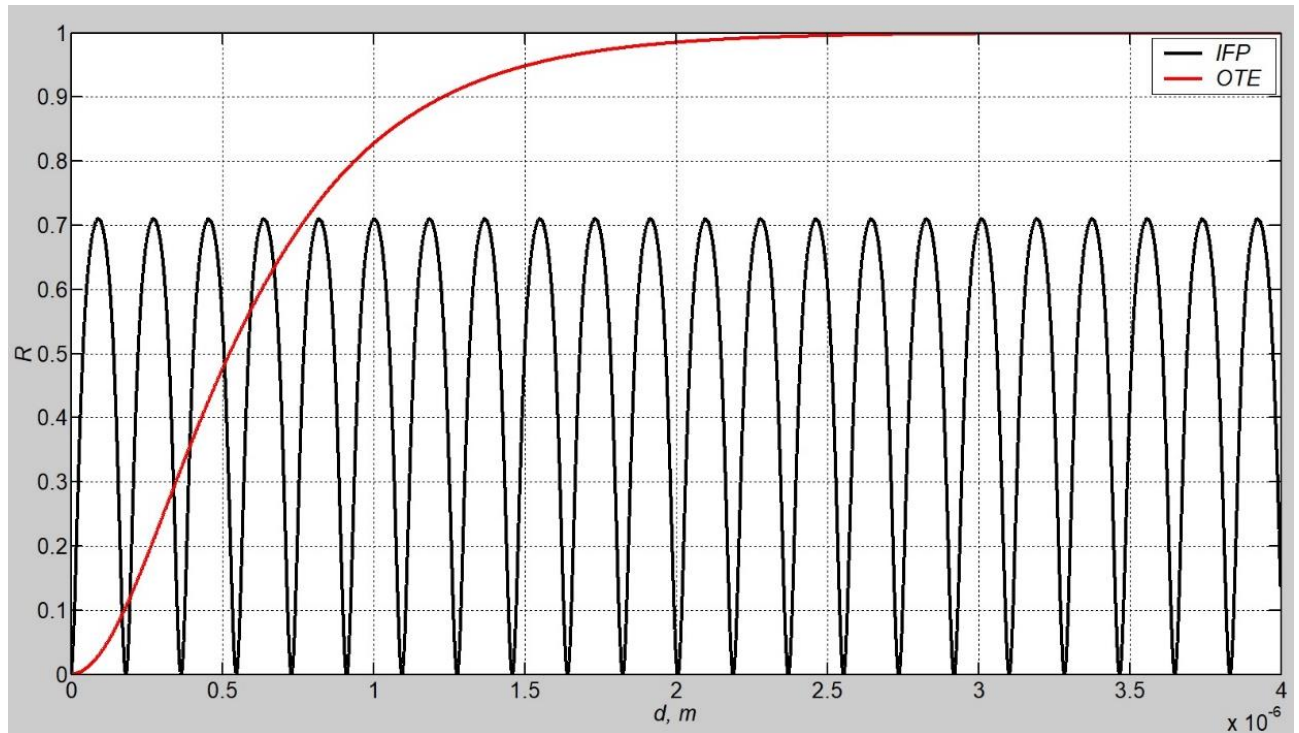


Рисунок 8 – Графики функций преобразования оптических датчиков микроперемещений: черная линия – ИФП; красная – ОТЭ-датчик

Выходная функция преобразования выполненного на ИФП акселерометра, являющаяся результатом подсчёта количества максимумов на интерференционной картине, будет иметь ступенчатый вид, обусловленный дискретностью способа обработки сигналов. Функция преобразования акселерометра, построенного на основе ОТЭ-датчика, будет являться непрерывной, но обладать нелинейностью.

Для повышения точностных характеристик ИФП можно использовать двухканальный интерферометрический считывающий узел. График функции преобразования двухканального ИФП представлен на иллюстрации (Рисунок 9).

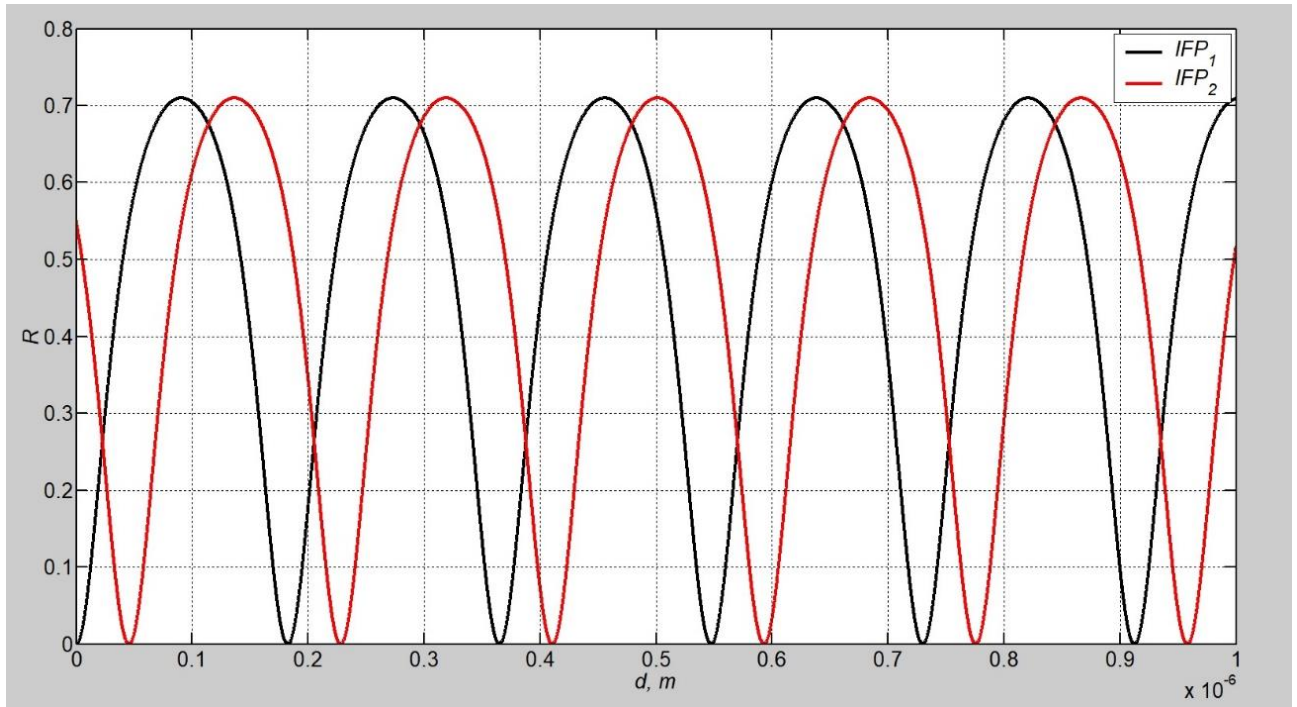


Рисунок 9 – График функции преобразования двухканального ИФП: черная линия соответствует первому каналу; красная – второму

Видно, что сигналы с первого (черная линия) и второго (красная линия) каналов находятся в квадратуре. Двухканальный ИФП позволяет реализовать более сложные алгоритмы обработки.

#### 1.4 Постановка частных задач исследования

Для достижения поставленной цели диссертационной работы предполагается решение следующих частных задач исследования:

- 1) разработка преобразователя ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, включающая получение его структурных и функциональных схем, математических моделей и алгоритма, проведение численного эксперимента и исследование характеристик;
- 2) разработка компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием;
- 3) исследование влияния конструктивных параметров ОТЭ-модулятора, газового демпфирования и параметров обратной связи;
- 4) исследование влияния внешних дестабилизирующих факторов на погрешности преобразователя;



- 5) разработка преобразователя ускорения с прецизионным интерферометрическим считыванием;
- 6) проведение полунатурных исследований преобразователя линейного ускорения;
- 7) разработка методики проектирования и программы синтеза МОЭМ-преобразователя линейного ускорения.

### **1.5 Выводы по первой главе**

Даны общие сведения о МЭМС и показана перспективность развития направления, связанного с исследованием миниатюрных преобразователей линейных ускорений и угловых скоростей.

Выполнен аналитический обзор основных методов считывания микроперемещений ЧЭ, по результатам которого оценены положительные и отрицательные аспекты их использования, а также показана эффективность высокочувствительных оптоэлектронных систем, подтверждающая актуальность диссертационной работы. Рассмотрены используемые виды конструкций преобразователей линейных ускорений и их ЧЭ, а также средства повышения точностных характеристик. Предлагаемое совмещение МЭМС-преобразователей ускорения и оптических средств считывания, таких как модули на ОТЭ или интерферометры, позволит: повысить чувствительность к субмикрометровым перемещениям ЧЭ, избавиться от силовых воздействий на него со стороны элементов считывания, повысить устойчивость к электромагнитным шумам.

Выполнена постановка частных задач, которые подлежат решению в ходе разработки и исследования МОЭМ адаптируемого преобразователя линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов.

## 2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ С ДВУХКАНАЛЬНЫМ АДАПТИРУЕМЫМ ОПТИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ

### 2.1 Разработка структурной и функциональной схем преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем

Предложен МОЭМ адаптируемый преобразователь линейного ускорения, использующий совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования, что обеспечивает уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения. Разработана структурная схема преобразователя с двухканальным адаптируемым оптическим модулем (Рисунок 10), позволяющая реализовать метод «грубо-точного» считывания.

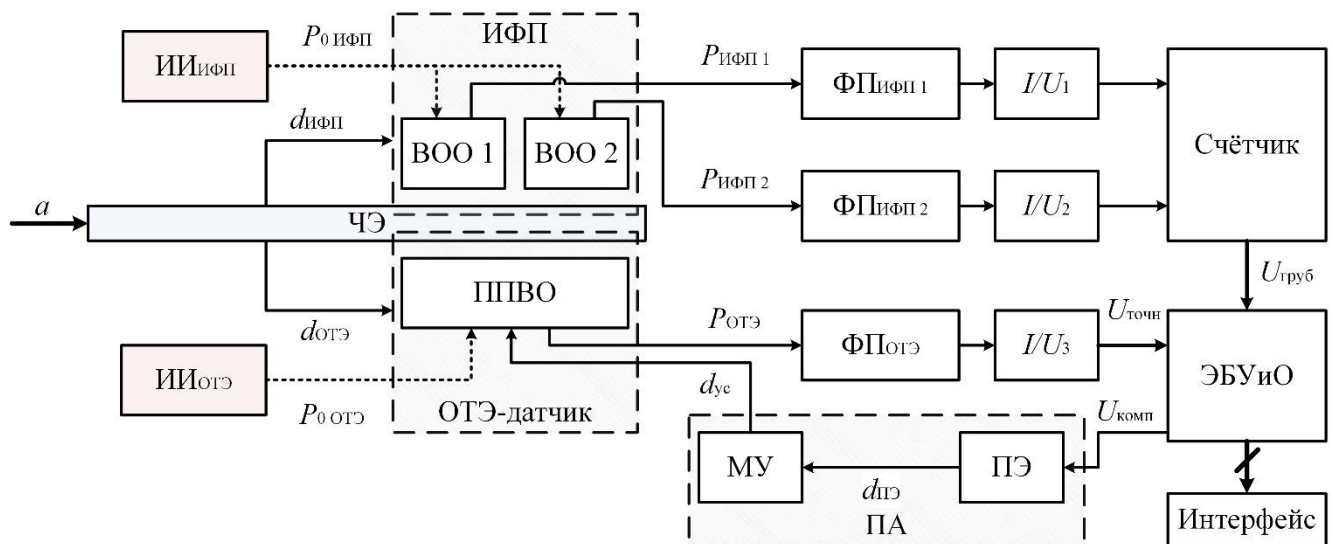


Рисунок 10 – Структурная схема преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем

Модуляция сигнала об ускорениях обеспечивается субмикрометровыми изгибными деформациями ЧЭ, в качестве которого используется кварцевая плоскопараллельная пластина с жёсткой заделкой. Детектирование перемещений ЧЭ осуществляется средствами комбинированного использования двух оптических информационных каналов, расположенных с двух сторон от ЧЭ на равном расстоянии от заделки.

Разработана функциональная схема преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем (Рисунок 11), включающая в

себя: ЧЭ, ИФП, ОТЭ-датчик, источники излучения интерферометра (ИИ<sub>ИФП</sub>) и ОТЭ-датчика (ИИ<sub>ОТЭ</sub>), фотоприёмники двухканального интерферометра (ФП<sub>ИФП1</sub>, ФП<sub>ИФП2</sub>) и ОТЭ-датчика (ФП<sub>ОТЭ</sub>), преобразователи «ток-напряжение» ( $I/U_1$ ,  $I/U_2$ ,  $I/U_3$ ), счётчик, электронный блок управления и обработки (ЭБУиО), пьезоактюатор (ПА) и интерфейс.

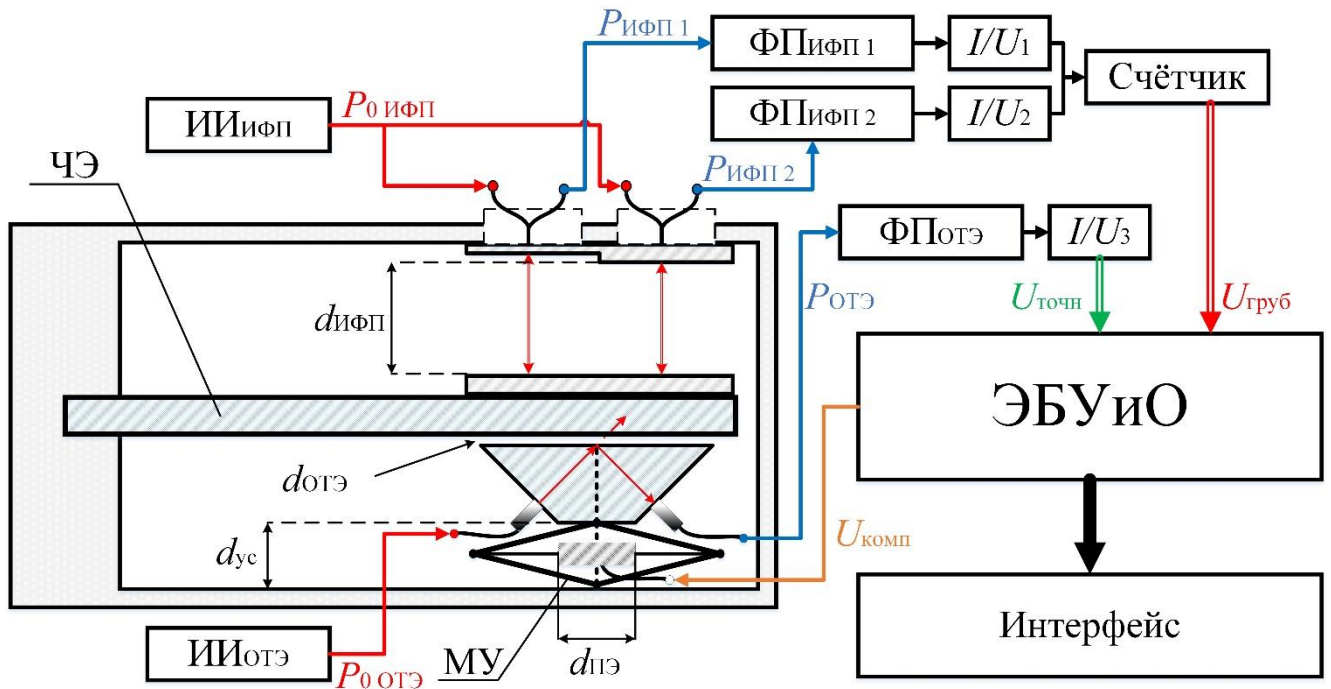


Рисунок 11 – Функциональная схема преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем

Под действием инерции ЧЭ отклоняется в сторону, противоположенную направлению вектора ускорения. Изменение положения ЧЭ приводит к изменению зазора в резонаторе ИФП ( $d_{\text{ИФП}}$ ), что модулирует входную оптическую мощность ( $P_{0\text{ИФП}}$ ), формируя значения выходных мощностей  $P_{\text{ИФП1}}$  и  $P_{\text{ИФП2}}$ , периоды интерференционных картин которых смещены на  $\pi/2$ . Фотоприёмники и преобразователи «ток-напряжение» осуществляют первичную подготовку сигнала к обработке, выполняя преобразование выходных мощностей в фототоки, а затем – в напряжения.

Выходные напряжения двух каналов интерферометра обрабатываются счётчиком, осуществляющим подсчёт целого числа полос и формирующим цифровой  $n$ -разрядный сигнал, пропорциональный перемещениям ЧЭ. Разрядность

$n$  может варьироваться в зависимости от значения требуемой точности и параметров ОТЭ-датчика. Выходные данные счётчика образуют «грубую» составляющую измерений, которая поступает на ЭБУиО. ЭБУиО на основании значения «грубой» составляющей формирует сигналы управления для ПА, адаптирующего положение ОТЭ-датчика. ПА, в который входят пьезоэлемент (ПЭ) и механический умножитель (МУ) перемещений, позиционирует ОТЭ-датчик на расстоянии, обеспечивающем его эффективную работу. Адаптация положения выполняется за счёт изменения размеров ПЭ ( $d_{\text{ПЭ}}$ ) и МУ ( $d_{\text{УС}}$ ).

ОТЭ-датчик представляет собой оптический модулятор «среда – воздушный зазор – среда», который образуют призма полного внутреннего отражения и ЧЭ. Туннелирование оптической мощности происходит через зазор между призмой и ЧЭ, размер которого сопоставим с длиной волны источника излучения. В одну грань призмы вводится коллимированное инфракрасное излучение ( $P_{0\text{ ОТЭ}}$ ) таким образом, чтобы угол падения на границу сред модулятора был близок к критическому, но удовлетворял условиям полного внутреннего отражения. За счёт изменения субмикрометрового зазора ( $d_{\text{ОТЭ}}$ ), вызванного ускорением, происходит модуляция выходной оптической мощности  $P_{\text{ОТЭ}}$ , детектируемой фотоприёмником, которая преобразуется в фототок, а затем – в аналоговое напряжение, подаваемое на ЭБУиО. Совокупность ИФП, ОТЭ-датчика и ПА образует адаптируемый оптический модуль, позволяющий использовать метод «грубо-точного» считывания микроперемещений.

В ЭБУиО происходит уточнение результатов измерений «точной» составляющей, полученной с ОТЭ-датчика. Уточнённые результаты измерений передаются на однонаправленный интерфейс.

## **2.2 Разработка математической модели чувствительного элемента с малыми перемещениями**

### **2.2.1 Статическая математическая модель чувствительного элемента**

Измеряемое ускорение  $a$  действует на ЧЭ и индуцирует распределённую силу  $q_{SE}$ , которую можно описать следующим уравнением [91]:

$$q_{SE} = \frac{m}{L} \cdot a = \frac{\rho \cdot V}{L} \cdot a, \quad (1)$$

где  $m$  – масса ЧЭ,  $L$  – длина ЧЭ,  $\rho$  – плотность материала ЧЭ,  $V$  – объём ЧЭ.

С точки зрения сопротивления материалов, исследуемая конструкция ЧЭ является консольной балкой с жёсткой заделкой в точке  $A$  (Рисунок 12).

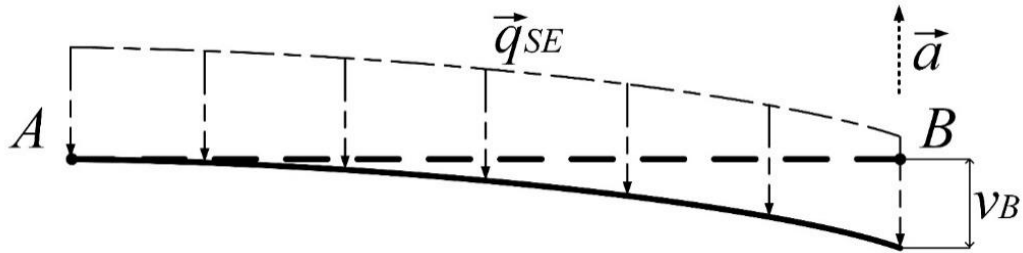


Рисунок 12 – Изгиб средней линии балочного ЧЭ под действием измеряемого ускорения

Для неё, исходя из условий равновесия, можно составить следующую систему, описывающую изгибный момент  $M$  и поперечную силу  $Q$ :

$$\begin{cases} Q(z) = R_A - q_{SE} \cdot z; \\ M(z) = -M_A + R_A \cdot z - \frac{q_{SE} \cdot z^2}{2}; \end{cases}$$

где  $R_A$  – сила реакции опоры в точке заделки,  $M_A$  – момент в заделке,  $z$  – координата точки на средней линии недеформированного ЧЭ, соответствующая расстоянию от заделки.

Сила реакции опоры должна уравновешивать все силы, приложенные к балке, включая распределённые, и значения  $R_A$  и  $M_A$  примут вид:

$$R_A = q_{SE} \cdot L; \quad M_A = \frac{q_{SE} \cdot L^2}{2}.$$

Получим зависимость, описывающую изгибный момент  $M$  через распределённую силу  $q_{SE}$ :

$$M(z) = -\frac{q_{SE} \cdot L^2}{2} + q_{SE} \cdot L \cdot z - \frac{q_{SE} \cdot z^2}{2}.$$

Уравнение перемещений  $\nu$  свободного края балки (точки  $B$ ), направленных вдоль оси чувствительности преобразователя, описывается формулой:

$$v''(z) = \frac{M(z)}{E \cdot J_{SE}},$$

где  $E$  – модуль Юнга материала ЧЭ,  $J_{SE} = \frac{b \cdot h^3}{12}$  – момент инерции для ЧЭ с прямоугольным сечением,  $b, h$  – ширина и толщина ЧЭ соответственно.

Дважды проинтегрируем зависимость, описывающую изгибный момент  $M$ , подставленную в уравнение перемещений балки  $v$ , вынеся за интеграл  $E$  и  $J_{SE}$ :

$$v(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \iint M(z) dz dz;$$

$$v(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -\frac{q_{SE} \cdot L^2}{4} \cdot z^2 + \frac{q_{SE} \cdot L}{6} \cdot z^3 - \frac{q_{SE}}{24} \cdot z^4 + C_1 \cdot z + C_2 \right).$$

Начальные условия таковы, что константы интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  равны нулю. При этом зависимость перемещения свободного края ЧЭ  $v_B$  от  $q_{SE}$  примет вид:

$$v_B = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -\frac{1}{8} \cdot q_{SE} \cdot L^4 \right). \quad (2)$$

Данное уравнение справедливо определяет перемещения при статических значениях ускорения или после завершения всех переходных процессов. Разработана статическая модель ЧЭ в среде графического программирования (см. Приложение Г).

### 2.2.2 Динамическая математическая модель чувствительного элемента

Для более точного отражения динамики ЧЭ требуется составить дифференциальное уравнение (ДУ), учитывающее его инерционность и колебательность [92]:

$$m \cdot \ddot{v}_B + K_D \cdot \dot{v}_B + G_{FSE} \cdot v_B = m \cdot a;$$

где  $m$  – масса ЧЭ,  $K_D = \frac{2 \cdot \mu_{ADV} \cdot L^3 \cdot b^3}{d_{body}^3 \cdot (L^2 + b^2)}$  – коэффициент демпфирования,

$\mu_{ADV}$  – коэффициент динамической вязкости среды в зазоре между ЧЭ и корпусом,

$d_{body}$  – значение этого зазора;  $G_{FSE} = \frac{8 \cdot E \cdot J_{SE}}{L^3}$ , – коэффициент жесткости ЧЭ, определяемый по значению коэффициента в уравнении перемещения свободного края ЧЭ.

По ДУ составлена передаточная функция ЧЭ:

$$W_{FSE}(s) = \frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}}.$$

## 2.3 Разработка математических моделей оптических узлов считывания

### 2.3.1 Математическая модель интерферометрического узла считывания

С учётом формулы Эйри [93] математическая модель ИФП преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем, представляющая собой зависимость пропускания интерферометра  $T_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)])$  или отражательной способности  $R_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)])$  от линейного ускорения  $a$ , может быть записана в виде:

$$T_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)]) = \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot R_{mir}}{(1 - R_{mir})^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta[d_{IFP}(a)]}{2}\right)},$$

или

$$R_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)]) = 1 - T_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)]) = 1 - \frac{1}{1 + \frac{4 \cdot R_{mir}}{(1 - R_{mir})^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta[d_{IFP}(a)]}{2}\right)};$$

$$R_{IFP}(\delta[d_{IFP}(a)]) = \frac{1}{1 + \frac{(1 - R_{mir})^2}{4 \cdot R_{mir} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta[d_{IFP}(a)]}{2}\right)}}, \quad (3)$$

где  $\delta[d_{IFP}(a)] = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_{IFP}(a)}{\lambda_{IFP}}$  – фазовый набег,  $R_{mir}$  – отражательная способность

зеркал,  $d_{IFP}(a) = d_{IFP0} + v_B(a)$  – зазор между зеркалами интерферометра (база интерферометра), являющийся расстоянием до ЧЭ,  $d_{IFP0}$  – начальный зазор ИФП,

$\nu(a)$  – перемещения ЧЭ, вызванные ускорением,  $a$  – измеряемое ускорение,  $\lambda_{IFP}$  – длина волны излучения в среде между зеркалами.

Для разработанной схемы выходная оптическая мощность интерферометра  $P_{IFP}$  описывается зависимостью:

$$P_{IFP} = P_{0IFP} \cdot k_{los} \cdot R_{IFP} \left( \delta \left[ d_{IFP} (a) \right] \right), \quad (4)$$

где  $P_{0IFP}$  – оптическая мощность, поступающая на вход ИФП;  $k_{los}$  – коэффициент суммарных потерь.

Оптическая мощность  $P_{IFP}$ , падающая на фотодиод, индуцирует протекание фототока  $I_{PhD}$ , определяемого по соотношению:

$$I_{PhD} = S_{PhD} \cdot P_{IFP} + I_d, \quad (5)$$

где  $S_{PhD}$  – токовая чувствительность фотодиода,  $I_d$  – темновой ток.

Преобразователь «ток-напряжение» представляет собой трансимпедансный усилитель и реализует следующую функцию преобразования:

$$U_0 = -R_{FB} \cdot I_{PhD}, \quad (6)$$

где  $I_{PhD}$  – ток через фотодиод,  $R_{FB}$  – сопротивление ОС,  $U_0$  – выходное напряжение.

Напряжение  $U_0$  может быть подано на вход дифференциального усилителя, который увеличит амплитуду сигнала и компенсирует влияние темнового тока.

Получение информации о зазоре между зеркалами ИФП осуществляется путём подсчёта пиков (целого числа полос) на интерференционной картине. Для обеспечения реверсивной характеристики использовано два ИФП (периоды их интерференционных картин находятся в квадратуре).

Напряжения  $U_{IFP1}$  и  $U_{IFP2}$ , полученные после преобразования (из фототоков), требуется обработать при помощи схемы (Рисунок 13).



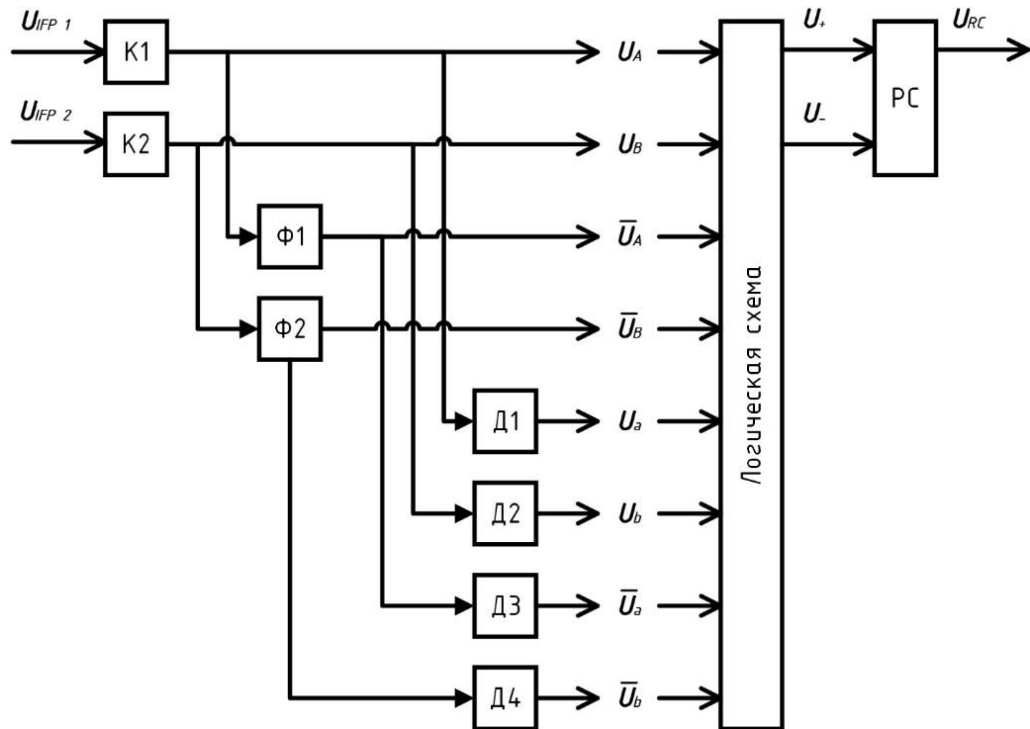


Рисунок 13 – Структура схемы обработки сигналов с интерферометров

Сигналы  $U_{IFP1}$  и  $U_{IFP2}$  проходят через компараторы (K1, K2), напряжение срабатывания которых  $U_{cp}$  выбрано таким образом, чтобы выходные однополярные периодические сигналы прямоугольной формы  $U_A$  и  $U_B$  соответственно имели коэффициент заполнения 0,5. Полученные цифровые сигналы  $U_A$  и  $U_B$  проходят через формирователи (Φ1, Φ2), которые инвертируют их значения (логическое «НЕ»), и выходными сигналами которых являются  $\bar{U}_A$  и  $\bar{U}_B$  соответственно. Четыре полученных одноразрядных цифровых сигнала  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $\bar{U}_A$  и  $\bar{U}_B$ , три из которых смещены относительно каждого предыдущего по фазе на  $\pi/2$ , поступают на дифференцирующие цепочки (Д1, Д2, Д3, Д4), которые формируют импульсные напряжения  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $\bar{U}_a$  и  $\bar{U}_b$  соответственно. Сигналы ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$ ,  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $\bar{U}_a$  и  $\bar{U}_b$ ) подаются на логическую схему, формирующую на выходе  $U_+$  и  $U_-$ . Логическая схема реализует следующие функции:

$$U_+ = U_a \bar{U}_B + U_b U_A + \bar{U}_a U_B + \bar{U}_b \bar{U}_A; \quad U_- = U_a U_B + U_b \bar{U}_A + \bar{U}_a \bar{U}_B + \bar{U}_b U_A.$$

$U_+$  и  $U_-$  требуется подать на соответствующие входы реверсивного счётчика (РС). Если  $U_+$  принимает значение логической единицы, то количество отсчётов инкрементируется, если значение логической единицы принимает  $U_-$  – декрементируется. Итоговое количество отсчётов ( $U_{RC}$ ) пропорционально измеряемым перемещениям. Разработана модель ИФП в среде графического программирования (см. Приложение Г).

### 2.3.2 Математическая модель узла считывания на оптическом туннельном эффекте

При реализации оптического туннелирования в преобразователе ускорения использованы три среды: среда, в которую вводится излучение (призма ПВО), с показателем преломления (ПП)  $n_1$ ; среда, через которую будет происходить туннелирование (зазор), с ПП  $n_2$ ; среда, в которую излучение будет переходить (ЧЭ), с ПП  $n_1$ . В общем виде зависимость отражательной способности  $R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)])$  от величины зазора  $d_{OTE}$ , изменяющегося под действием линейного ускорения  $a$ , может быть записана как [93]:

$$R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)]) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\perp} - \varphi_{23\perp})}{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\perp} + \varphi_{23\perp})} + \frac{1}{2} \cdot \frac{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\parallel} - \varphi_{23\parallel})}{e^{2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2 \cdot b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(\varphi_{12\parallel} + \varphi_{23\parallel})}; \quad (7)$$

$$b[d_{OTE}(a)] = -\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_{OTE}(a) \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2}; \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения в вакууме,  $d_{OTE} = d_{OTE0} - v_B(a)$  – величина зазора,  $d_{OTE0}$  – начальный зазор ОТЭ-модулятора,  $\theta$  – угол падения коллимированного оптического излучения на границу сред,  $n_1$  – ПП первой и третьей сред (призмы ПВО и ЧЭ),  $n_2$  – ПП второй среды (зазора),  $\varphi_{12\perp}$ ,  $\varphi_{23\perp}$ ,  $\varphi_{12\parallel}$ ,  $\varphi_{23\parallel}$  – фазы волны при

отражении от границ сред (индексы  $\parallel$  и  $\perp$  указывают на параллельную и перпендикулярную поляризации соответственно).

Выполним замены:

$$\varphi_{12\perp} = \varphi_{TM} ; \varphi_{23\perp} = \varphi_{TM} + 180^\circ ; \varphi_{12\parallel} = \varphi_{TE} ; \varphi_{23\parallel} = \varphi_{TE} + 180^\circ ,$$

где  $\varphi_{TM}$  – фаза при поперечной магнитной поляризации,  $\varphi_{TE}$  – фаза при поперечной электрической поляризации.

Уравнение (7) примет вид:

$$R_{OTE} \left( b \left[ d_{OTE} (a) \right] \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + e^{-2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + 2 \cdot \cos \left( \varphi_{TM} - \varphi_{TM} + 180^\circ \right)}{e^{2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + e^{-2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + 2 \cdot \cos \left( \varphi_{TM} + \varphi_{TM} + 180^\circ \right)} \right) + \\ + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + e^{-2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + 2 \cdot \cos \left( \varphi_{TE} - \varphi_{TE} + 180^\circ \right)}{e^{2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + e^{-2 \cdot b \left[ d_{OTE} (a) \right]} + 2 \cdot \cos \left( \varphi_{TE} + \varphi_{TE} + 180^\circ \right)} \right) .$$

После алгебраических преобразований (см. Приложение Д) получим:

$$R_{OTE} \left( b \left[ d_{OTE} (a) \right] \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sin^2 \left( \varphi_{TE} \right)}{\left( \frac{e^{b \left[ d_{OTE} (a) \right]} - e^{-b \left[ d_{OTE} (a) \right]}}{2} \right)^2}} + \\ + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sin^2 \left( \varphi_{TM} \right)}{\left( \frac{e^{b \left[ d_{OTE} (a) \right]} - e^{-b \left[ d_{OTE} (a) \right]}}{2} \right)^2}} , \quad (9)$$

или

$$R_{OTE} \left( b \left[ d_{OTE} (a) \right] \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{\sin^2 \left( \varphi_{TE} \right)}{sh^2 \left( b \left[ d_{OTE} (a) \right] \right)}} + \frac{1}{1 + \frac{\sin^2 \left( \varphi_{TM} \right)}{sh^2 \left( b \left[ d_{OTE} (a) \right] \right)}} \right) ,$$

где

$$\varphi_{TE} = \arctg \left( \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2}}{n_2^2 \cdot \cos^2(\theta) - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot (n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2)} \right); \quad (10)$$

$$\varphi_{TM} = \arctg \left( \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2}}{n_1^2 \cdot \cos^2(\theta) - n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) + n_2^2} \right). \quad (11)$$

Если первая и третья среды выполнены из одного и того же материала ( $n_1=n_3=n$ ), а вторая среда представляет собой воздушный зазор ( $n_2=1$ ), то для структуры «среда – воздушный зазор – среда» значения  $b[d_{OTE}(a)]$ ,  $\varphi_{TE}$  и  $\varphi_{TM}$  могут быть записаны в виде:

$$b[d_{OTE}(a)] = -\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot d_{OTE}(a) \cdot \sqrt{n^2 \cdot \sin^2(\theta) - 1}; \quad (12)$$

$$\varphi_{TE} = \arctg \left( \frac{2 \cdot n \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{n^2 \cdot \sin^2(\theta) - 1}}{\cos^2(\theta) - n^2 \cdot (n^2 \cdot \sin^2(\theta) - 1)} \right); \quad (13)$$

$$\varphi_{TM} = \arctg \left( \frac{2 \cdot n \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{n^2 \cdot \sin^2(\theta) - 1}}{n^2 \cdot \cos^2(\theta) - n^2 \cdot \sin^2(\theta) + 1} \right), \quad (14)$$

где  $n$  – показатель преломления первой и третьей сред.

Зависимость мощности выходного оптического излучения  $P_{OTE}$  от отражательной способности  $R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)])$  может быть представлена следующим образом:

$$P_{OTE} = P_{0OTE} \cdot k_{los} \cdot R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)]). \quad (15)$$

Преобразование оптической мощности  $P_{OTE}$  в напряжение ( $U_{OTE}$ ) выполняется аналогично ИФП. Разработана модель ОТЭ-датчика в среде графического программирования (см. Приложение Г).

## 2.4 Разработка математической модели преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем

Математическая модель преобразователя ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем включает в себя математические описания следующих функциональных элементов: ЧЭ; ИФП; ОТЭ-датчика перемещений; ПА.

Прямые измерения перемещений  $v$  дают возможность косвенно определить интересующее значение ускорения  $a$ . Детектирование перемещений осуществляется оптическими средствами.

Для «грубых» измерений полного диапазона (единицы микрометров) использован интерферометр, зависимость пропускания которого от фазового набега между зеркалами описывается формулой Эйри, для «точных» измерений субмикрометровых деформаций с меньшей погрешностью (десятки нанометров) использован ОТЭ-датчик.

Математическая модель ЭБУиО может быть описана следующей системой уравнений (16):

$$\begin{cases} U_c = U_{RC} \cdot K_{IFP} \cdot K_{FB}; \\ U_{out} = (U_{RC} \cdot K_{IFP} + (U_{OTE} + K_{OTEsh}) \cdot K_{OTE}) \cdot K_{out}; \end{cases} \quad (16)$$

где  $U_c$  – напряжение, подаваемое на ПА,  $U_{RC}$  – напряжение, полученное с реверсивного счётчика,  $K_{IFP}$  – коэффициент усиления значения с реверсивного счётчика,  $K_{FB}$  – коэффициент усиления обратной связи,  $U_{out}$  – выходное напряжение преобразователя,  $U_{OTE}$  – напряжение, полученное с узла считывания на ОТЭ,  $K_{OTEsh}$  – коэффициент смещения напряжения с узла считывания на ОТЭ,  $K_{OTE}$  – коэффициент усиления напряжения с узла считывания на ОТЭ,  $K_{out}$  – коэффициент усиления выходного напряжения.

ПА, регулирующий зазор между ЧЭ и ОТЭ-датчиком, представляет собой совокупность ПЭ и МУ перемещений. Зависимость между зарядом  $q_c$  на плоском конденсаторе и напряжением  $U_c$  на его обкладках описывается соотношением:

$$q_c = U_c \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_c}{d_c},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $S_c$  – площадь обкладок,  $d_c$  – расстояние между обкладками.

Продольный пьезоэффект, вызванный силой  $F_p$  описывается формулой:

$$q_c = d_{11} \cdot F_p,$$

где  $d_{11}$  – пьезоэлектрический модуль ПЭ.

Из закона Гука [91] следует, что:

$$F_p = \Delta l \cdot \frac{E_p \cdot S_p}{L_p},$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение (сжатие) ПЭ,  $E_p$  – модуль Юнга,  $S_p$  – площадь поперечного сечения,  $L_p$  – длина. Следовательно, т.к.  $S_p = S_c$  и  $L_p = d_c$ , уравнение обратного пьезоэффекта примет вид:

$$\Delta l = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d_{11} \cdot E_p} \cdot U_c. \quad (17)$$

МУ перемещений может быть выполнен в виде ромба, в большей диагонали  $d_2$  которого установлен ПЭ, а выходные перемещения снимаются с его меньшей диагонали  $d_1$ . В этом случае, функция преобразования множителя может быть описана формулой:

$$d_1 = \sqrt{4 \cdot r^2 - d_2^2}, \quad (18)$$

где  $r$  – длина стороны ромба.

Если пренебречь нелинейностями, то МУ может быть описан пропорциональным звеном с коэффициентом усиления  $K_{Amp}$ .

Таким образом, математическая модель преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем описывается совокупностью уравнений (1) – (4), (9), (12) – (18), в которой: уравнения (1), (2) связывают измеряемое ускорение  $a$  и микроперемещения ЧЭ  $v_B$ ; уравнения (3), (4) преобразуют перемещения ЧЭ, являющиеся расстоянием между зеркалами интерферометра  $d_{IFP}$ , в выходную оптическую мощность интерферометра  $P_{IFP}$ ; уравнения (9), (12) – (15)

соотносят расстояние между ОТЭ-датчиком и ЧЭ  $d_{OTE}$  с мощностью выходного оптического излучения  $P_{OTE}$ ; система уравнений (16) определяет зависимости напряжения, подаваемого на ПА  $U_c$ , и выходного напряжения преобразователя  $U_{out}$  от напряжений, полученных с узлов считывания  $U_{RC}$  и  $U_{OTE}$ ; уравнения (17), (18) отражают зависимость между значением адаптирующего напряжения  $U_c$  и смещением ОТЭ-датчика.

## 2.5 Разработка алгоритма работы преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем

Предложен алгоритм функционирования преобразователя ускорения (Рисунок 14) с методом «грубо-точного» считывания.

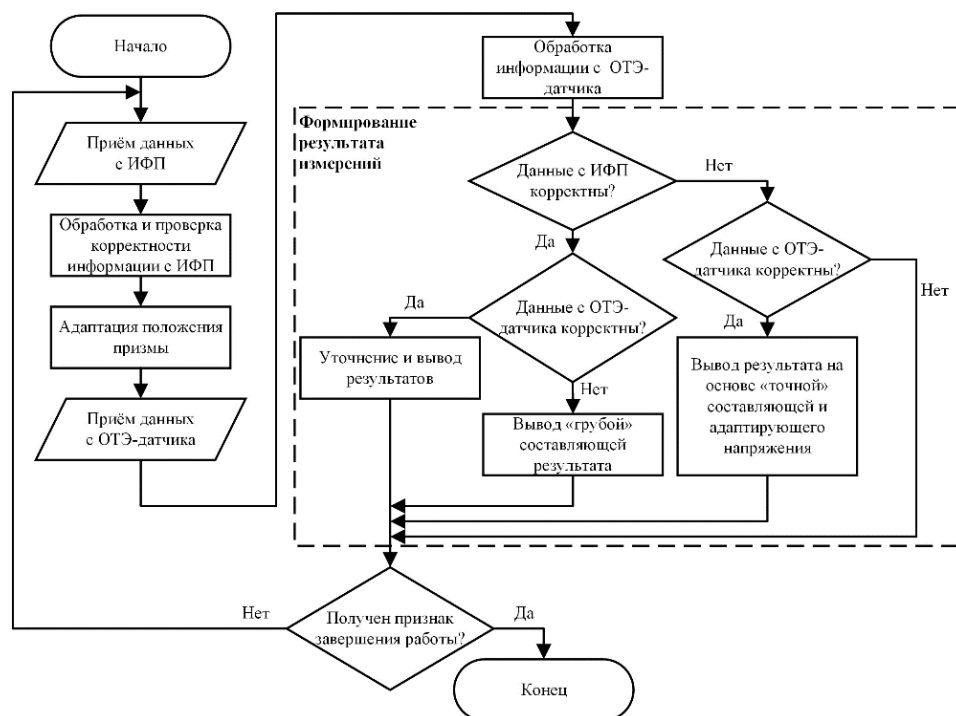


Рисунок 14 – Алгоритм функционирования преобразователя ускорения с методом «грубо-точного» считывания

На первом шаге работы алгоритма происходит приём данных от двухканального ИФП. Далее результаты измерений обрабатываются: происходит первичное преобразование сигнала, подсчёт целого числа полос на интерференционной картине и определение расстояния между зеркалами резонатора ( $d_{ИФП}$ ).

Информация о расстоянии проходит проверку на корректность, например, не вышли ли результаты измерений за пределы максимально допустимых значений. Затем происходит адаптация положения ОТЭ-датчика, подразумевающая его приближение или отдаление относительно ЧЭ. Изменение положения призмы по одной координате обеспечивается путём подачи на ПА адаптирующего напряжения, изменяющего размеры ПЭ ( $d_{ПЭ}$ ) и МУ ( $d_{УС}$ ).

При корректной работе системы «грубая» информация о положении ЧЭ появляется на основе результатов измерений ИФП, однако, даже если ИФП выйдет из строя, работоспособность преобразователя сохранится. В этом случае адаптация будет происходить на основе данных о текущем значении положения ОТЭ-датчика, которому соответствует совокупность значений адаптирующего напряжения на ПА и «точной» составляющей измерений с самого ОТЭ-датчика. Система останется следящей, но будет не просто уточнять «грубые» измерения ИФП «точными» измерениями ОТЭ-датчика, а поддерживать между ОТЭ-датчиком и ЧЭ постоянный зазор и вводить компенсационную корректировку. После адаптации происходит приём данных с ОТЭ-датчика, которые обрабатываются, в случае необходимости, линеаризуются и также проверяются на корректность.

Следующим этапом является формирование результатов измерений: в штатном режиме функционирования результаты формируются путём суммирования измерений ИФП и ОТЭ-датчика. В случае, если результаты измерений ОТЭ-датчика некорректны, выходное значение будет содержать только значение «грубой» составляющей, полученной от ИФП. Если некорректны результаты измерений ИФП, то итоговый результат будет сформирован на основе значения адаптирующего напряжения, из которого по функции преобразования ПА можно судить о значении его увеличения и, соответственно, о положении призмы, и результатов измерений ОТЭ-датчика.

На последнем этапе проверяется наличие одного из признаков завершения работы алгоритма, к которым можно отнести отключение питания или многократное получение некорректных результатов от ИФП и ОТЭ-датчика.



## 2.6 Моделирование алгоритма работы преобразователя линейного ускорения с адаптируемым оптическим модулем

Для проведения исследования работы преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем и метода «грубо-точного» считывания, на основе функциональной схемы, алгоритма и математического описания, разработана модель преобразователя в среде графического программирования (Рисунок 15).

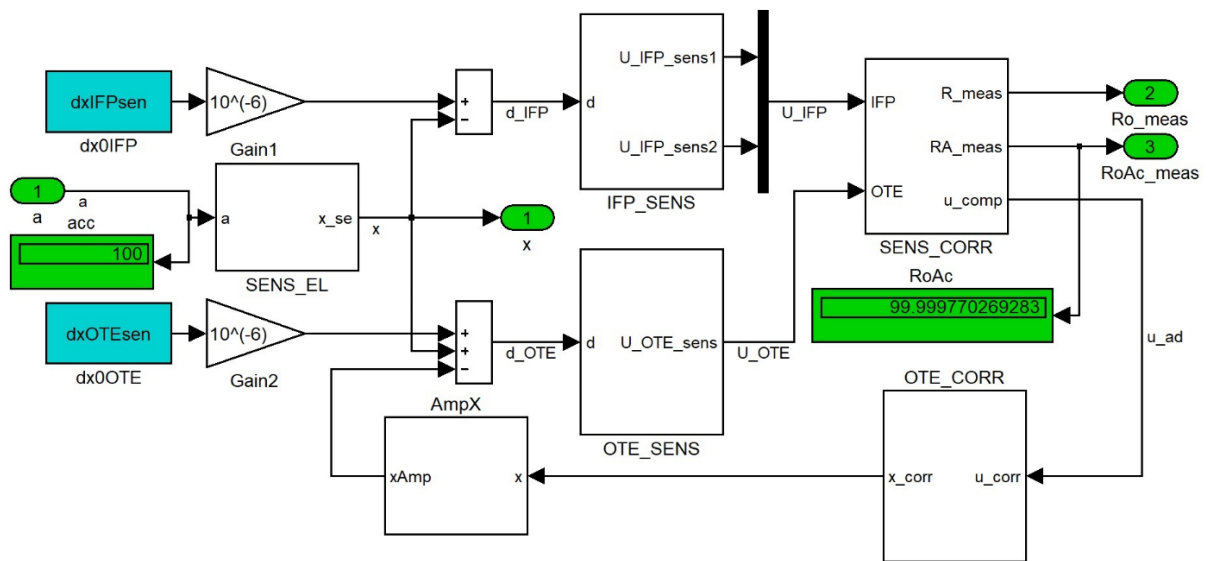


Рисунок 15 – Модель преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем в среде графического программирования

Модель микро-опто-электромеханического преобразователя линейных ускорений включает следующие блоки: «*SENS\_EL*» – ЧЭ; «*IFP\_SENS*» – ИФП; «*OTE\_SENS*» – ОТЭ-датчик; «*SENS\_CORR*» – счётчик и ЭБУиО; «*OTE\_CORR*» – пьезоэлемент; «*AmpX*» – механический множитель перемещений. Блоки с константными значениями «*dx0IFP*» и «*dx0OTE*» соответствуют начальным зазорам в резонаторе ИФП и оптическом модуляторе ОТЭ-датчика.

Измеряемое ускорение  $a$ , поступающее на вход « $a$ » системы, действует на ЧЭ и приводит к его микродеформациям  $x$ , которые изменяют зазоры в резонаторе  $d_{IFP}$  и оптическом модуляторе  $d_{OTE}$ . Значение зазора детектируется ИФП и преобразуется в интерференционные сигналы, а затем – в двухканальное напряжение  $U_{IFP}$  блоком «*IFP\_SENS*», которое поступает на счётчик в блоке «*SENS\_CORR*». Счётчик накапливает целое число интерференционных полос и

передаёт это значение в ЭБУиО, который также расположен в блоке «SENS\_CORR», преобразует эти показания в значение перемещения ЧЭ и на его основе формирует адаптирующее напряжение  $u_{ad}$  на выходе « $u_{comp}$ » и «грубую» составляющую результата измерений на выходе « $R_{meas}$ ». Адаптирующее напряжение  $u_{ad}$  подаётся в обратную связь на пьезоэлемент, деформации которого поступают на МУ, а затем – адаптируют положение ОТЭ-датчика, изменяя  $d_{OTE}$ . Зазор  $d_{OTE}$  измеряется методом оптического туннелирования, и напряжение  $U_{OTE}$  с выхода блока « $OTE\_SENS$ » поступает в «SENS\_CORR» на ЭБУиО, где происходит расчёт «точной» составляющей и формирование выходного уточнённого значения на выходе « $RA_{meas}$ », зависящего от воздействующего линейного ускорения.

Проведено исследование изменения средней линии ЧЭ (Рисунок 16) при значениях входного ускорения  $a_1 = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $a_2 = 25 \text{ м/с}^2$ ,  $a_3 = 50 \text{ м/с}^2$ ,  $a_4 = 75 \text{ м/с}^2$  и  $a_5 = 100 \text{ м/с}^2$ .

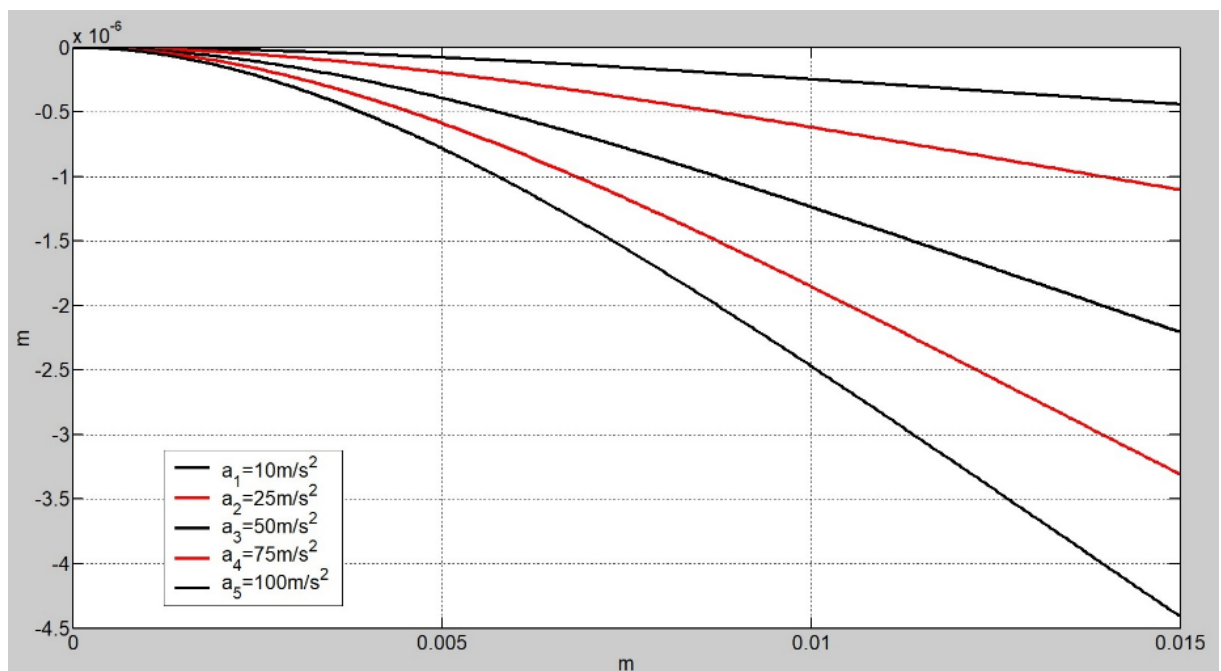


Рисунок 16 – Изменение средней линии ЧЭ при различных значениях входного ускорения  $a$

Показано, что микроперемещения свободного края ЧЭ, т.е. той области, в которой происходит считывание информации, составляют  $x_1 = 0,4 \text{ мкм}$ ,  $x_2 = 1,1 \text{ мкм}$ ,  $x_3 = 2,2 \text{ мкм}$ ,  $x_4 = 3,3 \text{ мкм}$ ,  $x_5 = 4,4 \text{ мкм}$  соответственно, линейно

зависят от ускорения  $a$  и могут быть детектированы интерферометрическим методом. Перед значениями перемещений не стоит знак «минус», но подразумевается, что в системе отсчёта, связанной с осью чувствительности преобразователя ускорения, направления вектора ускорения и перемещения противоположны.

Построены временные диаграммы МОЭМ-преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем (Рисунок 17): с нуля до 4 секунд измеряемое ускорение  $a$  (чёрная пунктирная линия «*real*») линейно изменяется от 0 до 100 м/с<sup>2</sup>.

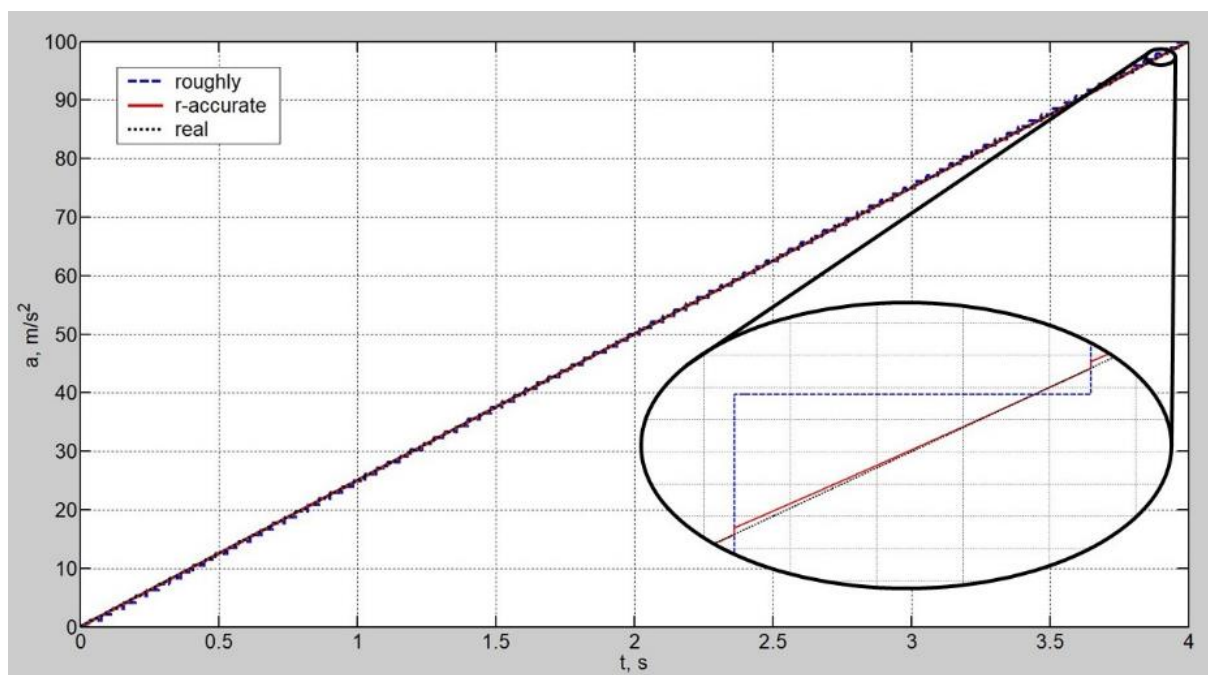


Рисунок 17 – Временные диаграммы МОЭМ-преобразователя ускорения

Являющиеся эквивалентом ускорения результаты измерений «грубо-точным» методом представлены красной непрерывной линией «*r-accurate*», а их «грубая» составляющая, изменяющаяся ступенчато, – синей штриховой «*roughly*». Построены временные диаграммы изменения модуля ошибок измерений (Рисунок 18): чёрная пунктирная линия «*roughly*» – погрешность измерений при наличии только «грубой» составляющей; синяя штриховая ( $r\text{-accurate} + pa$ ) – погрешность при использовании «грубо-точного» метода и с учётом нелинейности функции преобразования МУ; красная непрерывная (*r-accurate*) – погрешность при использовании «грубо-точного» метода без учёта нелинейности умножителя.

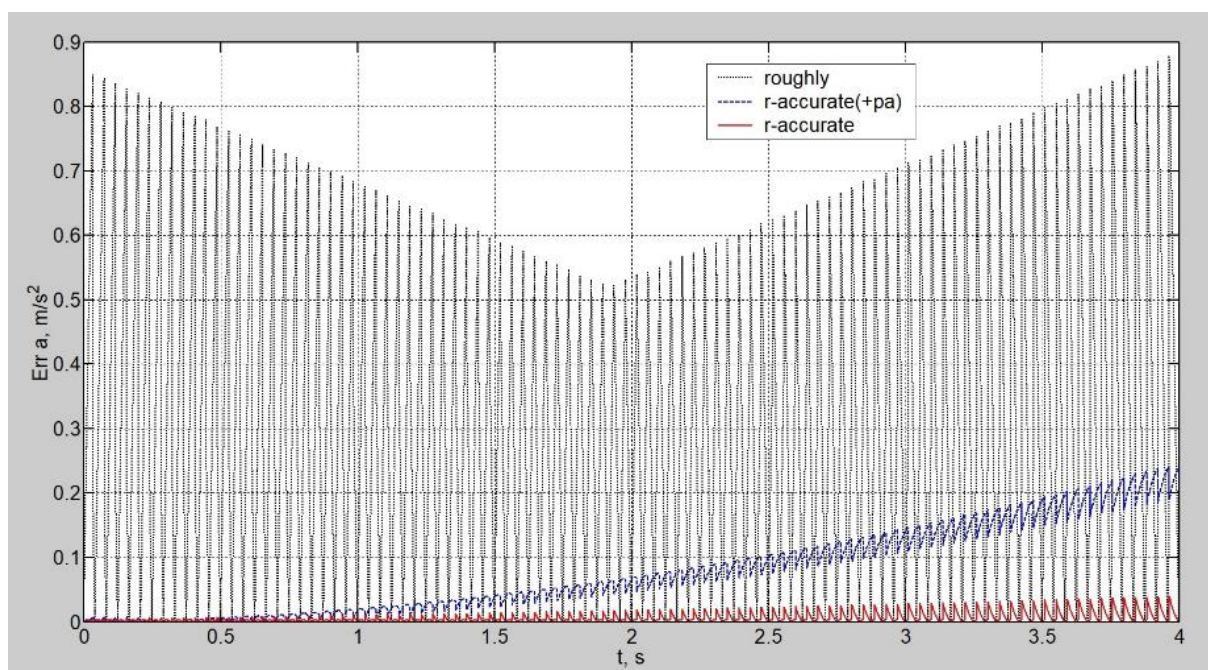


Рисунок 18 – Временные диаграммы изменения модуля ошибок измерений

В выбранном диапазоне измерений погрешность преобразования составляет десятые доли  $\text{м/с}^2$  для линейного ускорения при учёте нелинейности умножителя и сотые доли  $\text{м/с}^2$  – без учёта, что не превышает 0,25% и 0,05% соответственно. Например, при подаче на вход ускорения  $a = 100 \text{ м/с}^2$ , производящего перемещение  $x = 4,4 \text{ мкм}$ , результат измерений без учёта нелинейности умножителя составляет  $a_{RoAc} = 99,99 \text{ м/с}^2$ .

## 2.7 Выводы по второй главе

Предложен метод «грубо-точного» считывания для микроэлектромеханического преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем. Разработаны структурная и функциональная схемы микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем. Предложен адаптируемый модуль «грубо-точного» считывания микроперемещений, индуцированных ускорением.

Разработана математическая модель преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, включающая: статическую и динамическую модели чувствительного элемента с малыми перемещениями;

модель интерферометрического узла считывания; модель узла считывания на оптическом туннельном эффекте. Разработан алгоритм функционирования преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, позволяющий наиболее эффективно использовать совокупность двух разнотипных оптических преобразователей перемещения. На основе анализа оптических сигналов происходит проверка и уточнение результатов измерения ускорения.

Предложенный метод считывания совместно с алгоритмом обработки позволяет увеличить точность результатов измерений ускорения без изменения диапазона, а также обеспечить работоспособность преобразователя в случае частичного выхода из строя оптического модуля. Моделирование характеристик преобразователя показало эффективность использования данного метода.

### **3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ**

Использование оптических средств считывания информации о положении чувствительного элемента (ЧЭ) в микроэлектромеханических системах (МЭМС) по сравнению с емкостными позволяет: избежать электростатических силовых воздействий на ЧЭ при считывании; снизить чувствительность преобразователя к внешним электромагнитным шумам; исключить электрический пробой между подвижными частями. Результатом совместного использования оптических средств и компенсационного типа преобразователя является снижение величины микроперемещений ЧЭ, что влечёт за собой уменьшение чувствительности к поперечным ускорениям. При построении оптических систем считывания, которые могут быть реализованы на основе использования оптического туннельного эффекта (ОТЭ) или интерферометрических методов, предъявляются требования к отсутствию механического контакта между подвижными элементами модулятора, что может быть обеспечено средствами электромагнитной (ЭМ) или электростатической (ЭС) обратной связи (ОС), которая возвращает ЧЭ к положению покоя и дополнительно демпфирует его колебания. Предложен компенсационный МОЭМ-преобразователь линейного ускорения с комбинированной ЭМ и ЭС ОС, позволяющей стабилизировать положение ЧЭ и демпфировать колебания вблизи свободного края.

#### **3.1 Разработка оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью**

##### **3.1.1 Структурная схема оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью**

Компенсационный преобразователь ускорений на основе оптического туннелирования включает: ЧЭ, блок формирования излучения (БФИ), два оптических модулятора (ОТЭ-мод 1,2), блок приёма и первичной обработки сигнала (БПиПОС), электронный блок обработки (ЭБО), компенсационный блок

(КБ) и интерфейс. На иллюстрации (Рисунок 19) приведена структурная схема преобразователя ускорения с контуром стабилизации положения ЧЭ.

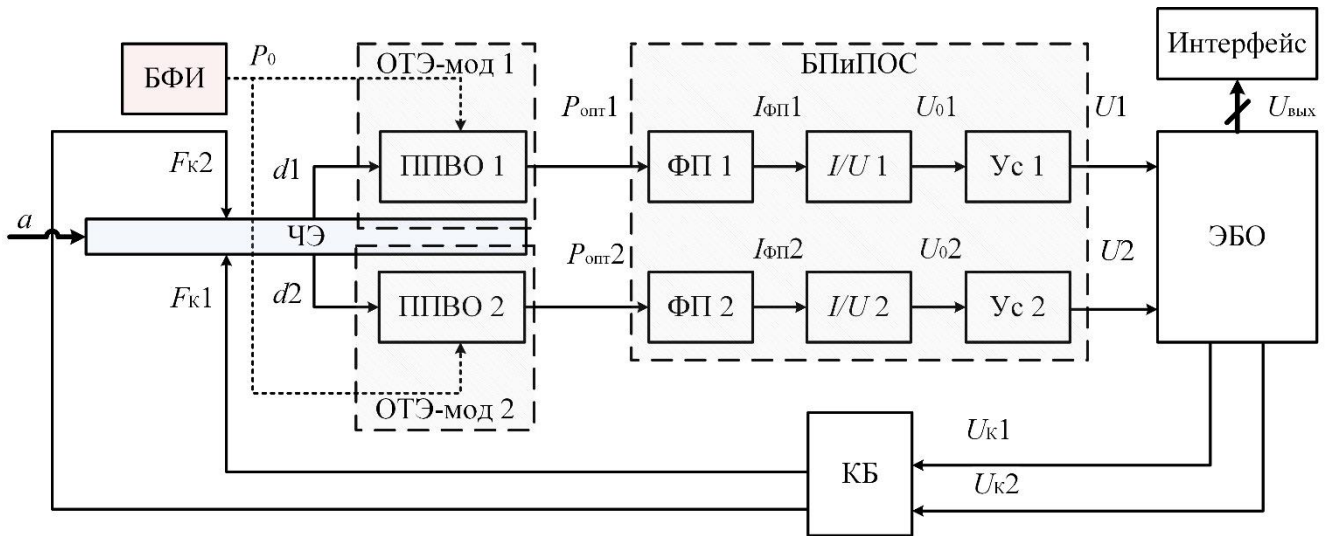


Рисунок 19 – Структурная схема преобразователя ускорения с контуром стабилизации положения ЧЭ

В состав БФИ входят: источник оптического излучения, волоконно-оптические ответвитель и световоды, и линза, коллимирующая излучение и обеспечивающая его ввод в призму полного внутреннего отражения (ППВО 1,2). Излучение ( $P_0$ ) вводится в одну из меньших граней прямоугольной призмы и падает на большую – под углом, близким к критическому, но удовлетворяющим условию полного внутреннего отражения.

Оптические модуляторы образованы ЧЭ и ППВО 1,2. ЧЭ балочного типа представляет собой кварцевую плоскопараллельную пластину, жёстко закреплённую одним концом в корпусе. ЧЭ воспринимает внешние ускорения и преобразует их в субмикронные перемещения за счёт сил инерции.

Компенсационный преобразователь ускорений построен по дифференциальной схеме, содержащей два идентичных канала оптического съёма информации о перемещениях чувствительного элемента. Перемещения детектируются оптическими средствами БПиПОС, в который входят два информационных канала, каждый из которых состоит из фотоприёмника (ФП 1,2), преобразователя «ток-напряжение» ( $I/U$  1,2) и усилителя ( $Ус$  1,2). В каждом канале излучение от источника поступает на оптический модулятор структуры

«ППВО – воздух – ЧЭ», изменяющий пропускательную способность. В начальном положении ЧЭ расположен на равном удалении от обеих призм. При воздействии измеряемого линейного ускорения  $a$  происходит изгиб балки, что изменяет рабочие зазоры  $d_{1,2}$  между ЧЭ и призмами. За счёт оптического туннелирования изменяются отражательные ( $R$ ) и пропускательные ( $T$ ) способности структур, что приводит к модуляции выходных оптических мощностей  $P_{\text{опт}1,2}$  в двух каналах. Выходные оптические мощности модуляторов преобразуются фотоприёмниками в фототоки ( $I_{\text{фп}1,2}$ ), которые поступают на преобразователи «ток-напряжение», а затем – усиливаются. На выходе усилителей формируются напряжения, поступающие в электронный блок обработки.

ЭБО предназначен для формирования функции преобразования оптического датчика и передачи информации на интерфейс и компенсационный блок. Разность напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , полученных с усилителей, преобразуется в выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , подаваемое на интерфейс. Также в ЭБО может входить селективная схема, которая обеспечивает формирование напряжений ( $U_{к1,2}$ ), пропорциональных микроперемещениям, для КБ.

КБ обратной связи состоит из элементов, создающих силовые воздействия на ЧЭ, например, электродов. Электроды, расположенные на ЧЭ и корпусе, обеспечивают возникновение компенсационных сил  $F_{к1,2}$  электростатического типа. Электростатические силы обеспечивают стабилизацию положения чувствительного элемента за счёт создания компенсирующего прогиба. К параметрам элементов емкостной стабилизации положения ЧЭ относятся длина и ширина электродов, а также начальный зазор между парными электродами.

Однонаправленный интерфейс предназначен для передачи значений измеренных устройством ускорений внешней системе.

Структурная схема с контуром стабилизации положения ЧЭ обеспечивает уменьшение рабочего диапазона его перемещений и позволяет расширить динамический диапазон преобразователя.



### 3.1.2 Функциональная схема оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью

Разработана функциональная схема компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 20), включающая: два ОТЭ-модулятора (ОТЭ-мод 1, ОТЭ-мод 2), образованных ЧЭ и призмами полного внутреннего отражения (ПВО); два источника оптического излучения (ИИ 1, ИИ 2); два фотоприёмника (ФП 1, ФП 2); два преобразователя «ток-напряжение» ( $I/U$  1,  $I/U$  2); два усилителя ( $Ус$  1,  $Ус$  2); электронный блок обработки (ЭБО); два элемента стабилизации, например, электромагнита, состоящих из катушки, сердечника и якоря; интерфейс.

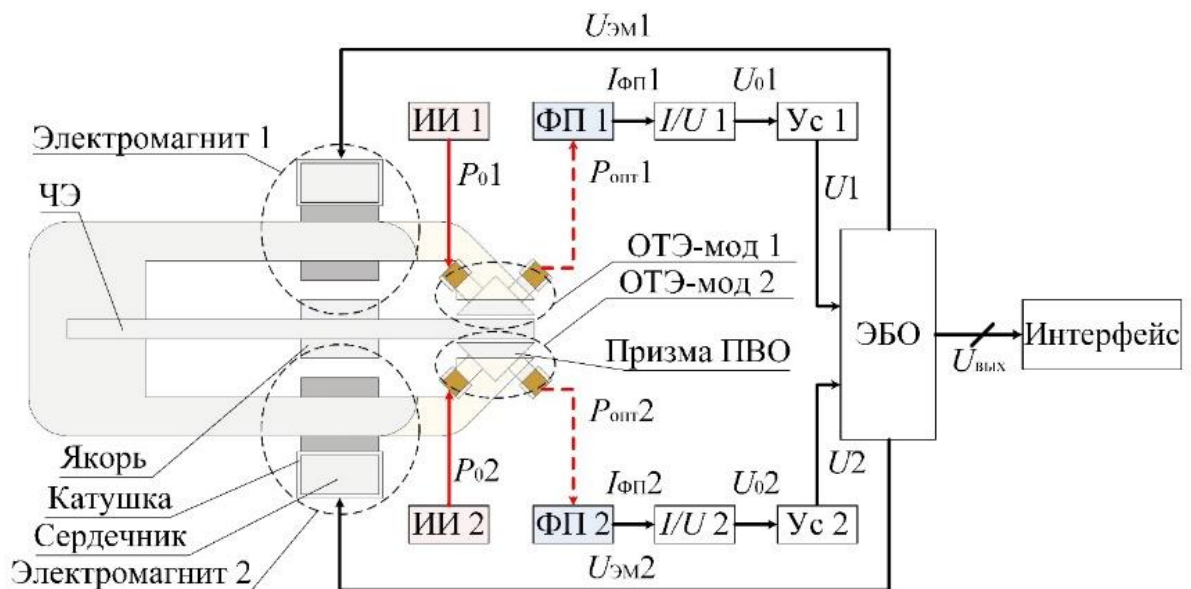


Рисунок 20 – Функциональная схема компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием

Балочный ЧЭ, в качестве которого используется кварцевая плоскопараллельная пластина, жёстко крепится в корпусе одной стороной. Измеряемое ускорение индуцирует инерционные силы, изгибающие ЧЭ. Перемещения свободного края балочного ЧЭ составляют десятые доли микрометра, что позволяет эффективно измерить их средствами ОТЭ-модулятора «среда – зазор – среда», образованного ЧЭ и прямоугольной призмой ПВО. Оптическая мощность ( $P_0$ ) от источника излучения (ИИ) поступает на ОТЭ-модулятор: в одну катетную грань призмы ПВО вводится коллимированный

луч, угол падения которого на границу сред близок к критическому, но не превышает его. Через гипотенузную грань призмы оптическая мощность туннелирует в ЧЭ. Значение оптической мощности ( $P_{\text{опт}}$ ) отражённого луча детектируется фотоприёмником (ФП) на второй катетной грани призмы. Фототок ( $I_{\text{ФП}}$ ) преобразуется в аналоговое напряжение ( $U_0$ ), усиливается ( $U$ ) и поступает на ЭБО. Использовано дифференциальное включение двух ОТЭ-модуляторов: призмы ПВО расположены с двух сторон от ЧЭ на равном расстоянии от заделки вблизи его свободного края.

ЭБО обрабатывает результаты измерений ОТЭ-модуляторов, линеаризует зависимость компенсационной силы ( $F_{\text{ЭМ}}$ ) от напряжения ОС, формирует сигналы управления ( $U_{\text{ЭМ}}$ ) для контуров ОС с учетом закона управления, передаёт информацию о результатах измерений на однонаправленный интерфейс. Напряжение стабилизации одновременно подаётся только на один электромагнит (верхний или нижний) в зависимости от требуемого направления стабилизирующей силы. Катушки с сердечником монтируются в корпус и, притягивая якорь, установленный на ЧЭ, формируют стабилизирующую силу, приложенную к его середине. ЭМ сила между сердечником и подвижным магнитопроводом ( $F_{\text{ЭМ}}$ ), являющимся якорем в магнитной цепи, позиционирует ЧЭ: демпфирует колебания и смещает его к положению покоя, компенсируя изгибные деформации, вызванные измеряемым линейным ускорением, и поддерживает зазоры ОТЭ-модуляторов в их рабочем диапазоне.

### **3.1.3 Математическая модель модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования**

Для уменьшения влияния погрешностей, вызванных нелинейностью функции преобразования узлов считывания, выполненного на основе ОТЭ-датчика, предложено использовать модуль линеаризации, входящий в состав ЭБО. Математическая модель модуля линеаризации является функциональной зависимостью зазора  $d_{\text{ОТЕ}}$  от отражательной способности  $R_{\text{ОТЕ}}$ , которая обратна по

отношению к исходной функции преобразования ОТЭ-датчика. Преобразуем уравнение (9), полученное ранее, к виду:

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{K_{\varphi TE}}{\left(\frac{e^{K_b \cdot d_{OTE}} - e^{-K_b \cdot d_{OTE}}}{2}\right)^2}} + \frac{1}{1 + \frac{K_{\varphi TM}}{\left(\frac{e^{K_b \cdot d_{OTE}} - e^{-K_b \cdot d_{OTE}}}{2}\right)^2}} \right),$$

где

$$K_{\varphi TE} = \sin^2 \left( \arctg \left( \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2}}{n_2^2 \cdot \cos^2(\theta) - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot (n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2)} \right) \right);$$

$$K_{\varphi TM} = \sin^2 \left( \arctg \left( \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2}}{n_1^2 \cdot \cos^2(\theta) - n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) + n_2^2} \right) \right);$$

$$K_b = -\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 \cdot \sin^2(\theta) - n_2^2}.$$

Выполнив замену  $R_{IF} = \left(\frac{e^{K_b \cdot d_{OTE}} - e^{-K_b \cdot d_{OTE}}}{2}\right)^2$ , получим уравнение:

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{K_{\varphi TE}}{R_{IF}}} + \frac{1}{1 + \frac{K_{\varphi TM}}{R_{IF}}} \right).$$

Решим уравнение относительно  $R_{IF}$  и упростим его (см. Приложение Д). В качестве решения выбрано:

$$R_{IF} = -\frac{(2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\phi TE} + K_{\phi TM})}{4 \cdot (R_{OTE} - 1)} - \frac{\sqrt{\left( (2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\phi TE} + K_{\phi TM}) \right)^2 - 16 \cdot R_{OTE} \cdot (R_{OTE} - 1) \cdot K_{\phi TE} \cdot K_{\phi TM}}}{4 \cdot (R_{OTE} - 1)}. \quad (19)$$

Далее, приравняем  $\frac{e^{K_b \cdot d_{OTE}} - e^{-K_b \cdot d_{OTE}}}{2} = d_{OTEIF}$  и выразим  $d_{OTE}$

(см. Приложение Д):

$$d_{OTE} = \frac{\ln\left(d_{OTEIF} + \sqrt{d_{OTEIF}^2 + 1}\right)}{K_b}.$$

После выполнения подстановки  $d_{OTEIF} = \sqrt{R_{IF}}$  и взятия абсолютной величины (т.к. зазор не может принимать отрицательные значения) получим выражение, соответствующее обратной функции:

$$d_{OTE} = \frac{\ln\left(\left(\sqrt{R_{IF}}\right) + \sqrt{\left(\sqrt{R_{IF}}\right)^2 + 1}\right)}{K_b};$$

$$d_{OTE} = \frac{\ln\left(\sqrt{R_{IF}} + \sqrt{R_{IF} + 1}\right)}{K_b}. \quad (20)$$

Полученные выражения (19) и (20) являются математическим описанием модуля линейризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования.

На основе разработанной математической модели выполнено исследование модуля линейризации функции преобразования узлов считывания (Рисунок 21) в среде графического программирования (см. Приложение Г).

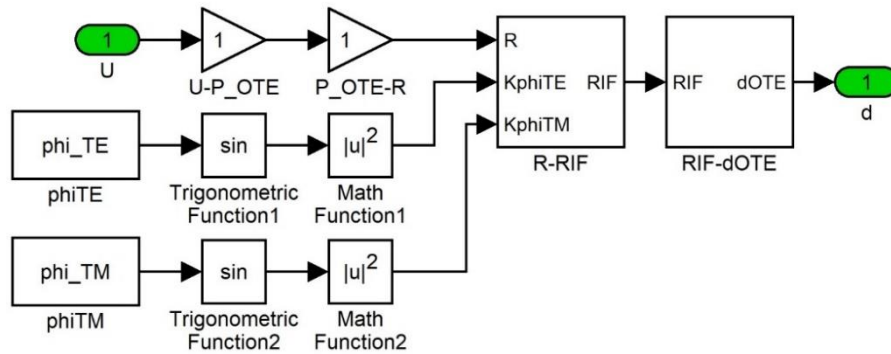


Рисунок 21 – Модель модуля линейризации в среде графического программирования

Построен график функции преобразования (т.е. зависимости зазора  $d$  от отражательной способности  $R$ , находящейся в диапазоне от нуля до единицы) модуля линейризации (Рисунок 22).

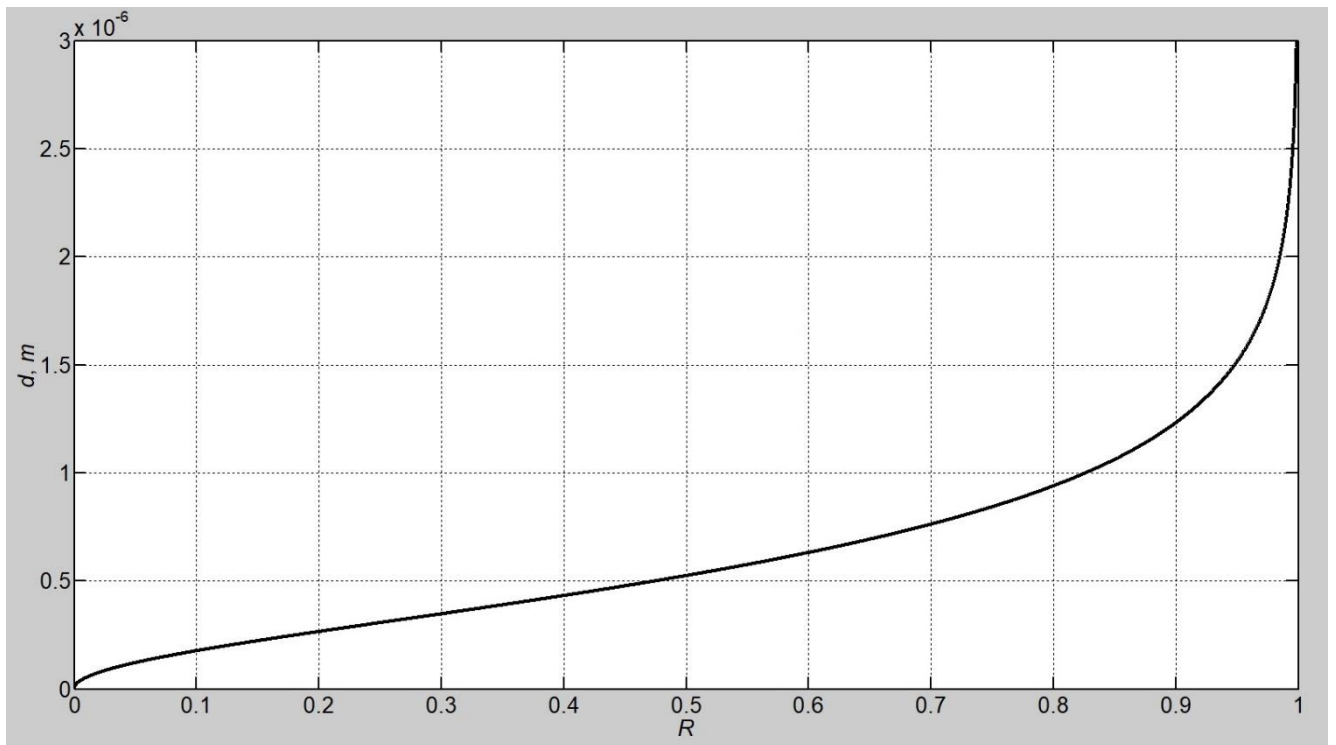


Рисунок 22 – График функции преобразования модуля линейризации

График (Рисунок 22) соответствует обратному графику функции преобразования ОТЭ-модулятора.

Представлен график зависимости значения на выходе модуля линейризации  $d_o$  от входных микроперемещений  $d$  (Рисунок 23).

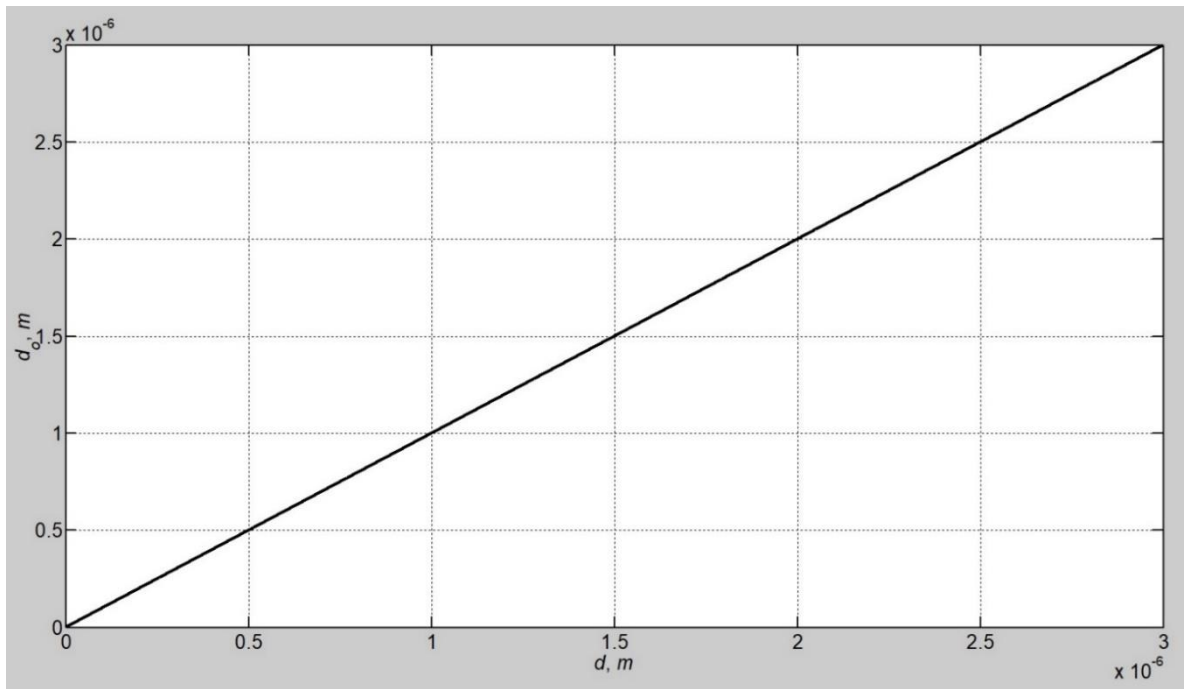


Рисунок 23 – График зависимости значения на выходе модуля линейризации от входных микроперемещений

При использовании модуля линейризации выходная функция (Рисунок 23) имеет линейный характер, а значение нелинейности находится на уровне погрешности вычислений среды моделирования. Для работы модуля в составе системы с ограниченными вычислительными ресурсами или для увеличения быстродействия данная модель может быть аппроксимирована. Реализован модуль линейризации может быть как в виде программы для микроконтроллера, так и на основе аппаратных средств.

### 3.1.4 Математическая модель преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью

Математическая модель компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием описывается совокупностью моделей ЧЭ, оптического модулятора, фотоприёмника, преобразователя «ток-напряжение», усилителя и электромагнита ОС. Представлен изгиб средней линии балочного ЧЭ под действием измеряемого ускорения и компенсационной силы (Рисунок 24).

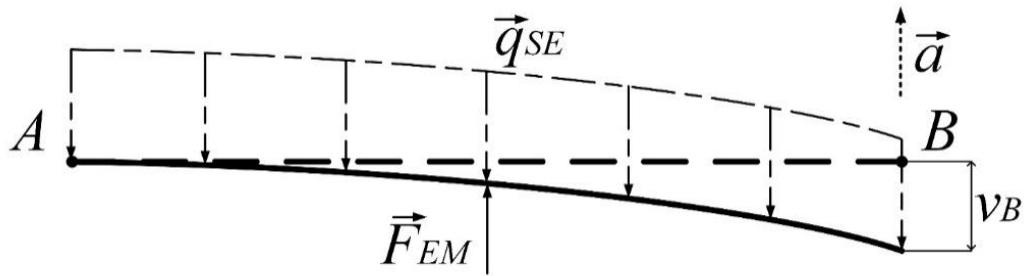


Рисунок 24 – Изгиб средней линии балочного ЧЭ под действием измеряемого ускорения и компенсационной силы

Вдоль основной оси чувствительности преобразователя на ЧЭ – консольную балку с жёсткой заделкой в точке  $A$  – действуют распределённая сила  $q_{SE}$ , индуцированная измеряемым ускорением  $a$ , и сосредоточенная сила  $F_{EM}$ , приложенная к середине ЧЭ, которая стабилизирует его положение. Оптические модуляторы, осуществляющие съём информации о микроперемещениях ЧЭ, расположены около свободного края (точки  $B$ ). При статических значениях силы и ускорения или по завершению переходного процесса уравнение перемещения  $v_B$  свободного края ЧЭ имеет вид [91]:

$$v_B = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -\frac{5 \cdot L^3}{48} \cdot F_{EM} - \frac{L^4}{8} \cdot q_{SE} \right), \quad (21)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала ЧЭ,  $J_{SE} = \frac{b \cdot h^3}{12}$  – момент инерции для ЧЭ с прямоугольным сечением [91];  $L$ ,  $b$ ,  $h$  – длина, ширина и толщина ЧЭ соответственно;  $q_{SE} = \frac{m \cdot a}{L}$ ,  $m$  – масса ЧЭ.

Динамика ЧЭ может быть описана передаточной функцией, составленной из системы дифференциальных уравнений, учитывающей инерционность и колебательность ЧЭ, и связывающей перемещение с ускорением и стабилизирующей ЭМ силой [92]:

$$W_{SE}(s) = -\frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}} + \frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}}, \quad (22)$$

где  $K_D = \frac{2 \cdot \mu_{ADV} \cdot L^3 \cdot b^3}{d_{body}^3 \cdot (L^2 + b^2)}$  – коэффициент демпфирования [92],  $\mu_{ADV}$  – коэффициент

динамической вязкости среды в зазоре между ЧЭ и корпусом,  $d_{body}$  – значение этого

зазора;  $G_{FSE} = \frac{8 \cdot E \cdot J_{SE}}{L^3}$ ,  $G_{FEM} = \frac{48 \cdot E \cdot J_{SE}}{5 \cdot L^3}$  – коэффициенты жесткости ЧЭ при

действии сил, соответствующих индексам, определяемые по значениям коэффициентов перед слагаемыми в уравнении (21) перемещения свободного края ЧЭ.

Оптический модулятор обеспечивает измерение субмикрометровых перемещений ЧЭ  $v_B$ , которые возникают при его деформации, например, ОТЭ-модулятор, в котором оптическое излучение, вводимое в призму ПВО, туннелирует через воздушный зазор в ЧЭ.

Оптическая мощность  $P_{OTE}$ , падающая на фотодиод, индуцирует протекание фототока  $I_{PhD}$ , который, проходя через трансимпедансный усилитель, преобразуется в напряжение  $U_0$ .

Напряжение  $U_0$  поступает на вход дифференциального усилителя, который осуществляет первичную обработку – увеличивает амплитуду сигнала и компенсирует влияние темнового тока – по следующему соотношению:

$$U_{EPU} = -U_0 \cdot K_G - U_{BN} \cdot K_{BN} + U_{BP} \cdot (K_{BP} \cdot (1 + K_G + K_{BN})), \quad (23)$$

где  $U_{EPU}$  – выходное напряжение усилителя, подаваемое на ЭБО,  $K_G$  – коэффициент усиления входного напряжения ( $U_0$ ),  $U_{BN}$ ,  $K_{BN}$  – напряжение смещения в отрицательную сторону и его коэффициент усиления соответственно,  $U_{BP}$ ,  $K_{BP}$  – напряжение смещения в положительную сторону и его коэффициент усиления соответственно.

ЭБО формирует напряжение  $U_{EM}$ , подаваемое на один из электромагнитов ОС для стабилизации ЧЭ. Силу тяги каждого из электромагнитов  $F_{EM}$  можно определить по формуле Максвелла [94; 95]:

$$F_{EM} = \frac{\Phi_{core}^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot 2 \cdot S_{core}},$$



где  $\Phi_{core} = \frac{\mathcal{F}}{R_M}$  – магнитный поток в сердечнике (по закону Гопкинсона),

$\mu_0$  – магнитная постоянная,  $S_{core}$  – площадь поперечного сечения сердечника;

$\mathcal{F} = n_{turn} \cdot I$  – магнитодвижущая сила,  $R_M$  – полное магнитное сопротивление цепи;

$n_{turn}$  – число витков в катушке,  $I$  – сила тока, проходящего через катушку.

Следовательно, магнитный поток  $\Phi_{core}$  и сила тяги электромагнита  $F_{EM}$  равны соответственно:

$$\Phi_{core} = \frac{n_{turn} \cdot I}{R_M}; \quad F_{EM} = \frac{n_{turn}^2 \cdot I^2}{4 \cdot \mu_0 \cdot S_{core} \cdot R_M^2}.$$

Полное магнитное сопротивление цепи  $R_M$  складывается из магнитного сопротивления сердечника  $R_{MC}$ , магнитного сопротивления двух зазоров  $R_{MG}$  и магнитного сопротивления якоря  $R_{MA}$ :

$$R_M = R_{MC} + 2 \cdot R_{MG} + R_{MA},$$

где  $R_{MG} = \frac{d_{EM}}{\mu_{air} \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}$  – магнитное сопротивление воздушного зазора;

$d_{EM}$  – расстояние между сердечником и якорем,  $\mu_{air}$  – относительная магнитная проницаемость воздуха.

Т.к. магнитные сопротивления сердечника и якоря малы по сравнению с магнитным сопротивлением воздушных зазоров, а относительная магнитная проницаемость воздуха равна единице ( $\mu_{air} = 1$ ), то магнитное сопротивление цепи  $R_M$  и сила тяги электромагнита  $F_{EM}$  примут вид:

$$R_M = \frac{2 \cdot d_{EM}}{\mu_{air} \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}; \quad F_{EM} = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2} \cdot I^2. \quad (24)$$

По второму закону Кирхгофа напряжение, приложенное к катушке электромагнита  $U_{EM}$ , соответствует [94; 95]:

$$U_{EM} = R_{coil} \cdot I + L_{coil} \cdot \frac{dI}{dt} = R_{coil} \cdot I + L_{coil} \cdot \dot{I},$$

где  $R_{coil}$  – активное сопротивление катушки,  $L_{coil} = \frac{\Psi}{I}$  – индуктивность катушки;  
 $\Psi = n_{turn} \cdot \Phi$  – потокосцепление;  $\Phi = B \cdot S_{core}$  – магнитный поток в катушке,  
 $S_{core}$  – площадь поперечного сечения катушки (сердечника);  $B = \mu_a \cdot H$  – магнитная  
индукция;  $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_{core}$  – абсолютная магнитная проницаемость среды  
(сердечника),  $\mu_{core}$  – относительная магнитная проницаемость сердечника;  
 $H = \frac{I \cdot n_{turn}}{l_{coil}}$  – напряженность магнитного поля внутри катушки,  $l_{coil}$  – длина  
катушки.

Если пренебречь активным сопротивлением катушки, то её ПФ  $W_L$  можно  
представить интегрирующим звеном:

$$W_L(s) = \frac{1}{L_{coil} \cdot s}, \quad (25)$$

где индуктивность катушки  $L_{coil} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{core} \cdot S_{core} \cdot n_{turn}^2}{l_{coil}}$ .

Уравнения (5) – (8), (10) – (11), (15), (22) – (25) описывают  
компенсационный преобразователь ускорения с оптическим считыванием:  
уравнение (22) определяет связь измеряемого ускорения  $a$  и стабилизирующей ЭМ  
силы  $F_{EM}$  с микроперемещениями свободного края ЧЭ  $v_B$ ; уравнения  
(7) – (8), (10) – (11), (15) сопоставляют перемещения ЧЭ  $v_B$  с зазором в  
ОТЭ-модуляторе  $d_{OTE}$  и мощностью выходного оптического излучения  $P_{OTE}$ ;  
преобразования «оптическая мощность  $P_{OTE}$  – фототок  $I_{phD}$  – предварительное  
напряжение  $U_0$  – обработанное напряжение  $U_{EPU}$ », последнее из которых подаётся  
на ЭБО, описываются уравнениями (5), (6), (23) соответственно; уравнения  
(24), (25) отражают зависимость между выходным стабилизирующим  
напряжением ЭБО  $U_{EM}$  с ЭМ силой  $F_{EM}$ .

### 3.1.5 Алгоритмы функционирования и калибровки компенсационного преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием

Предложен алгоритм функционирования компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 25).

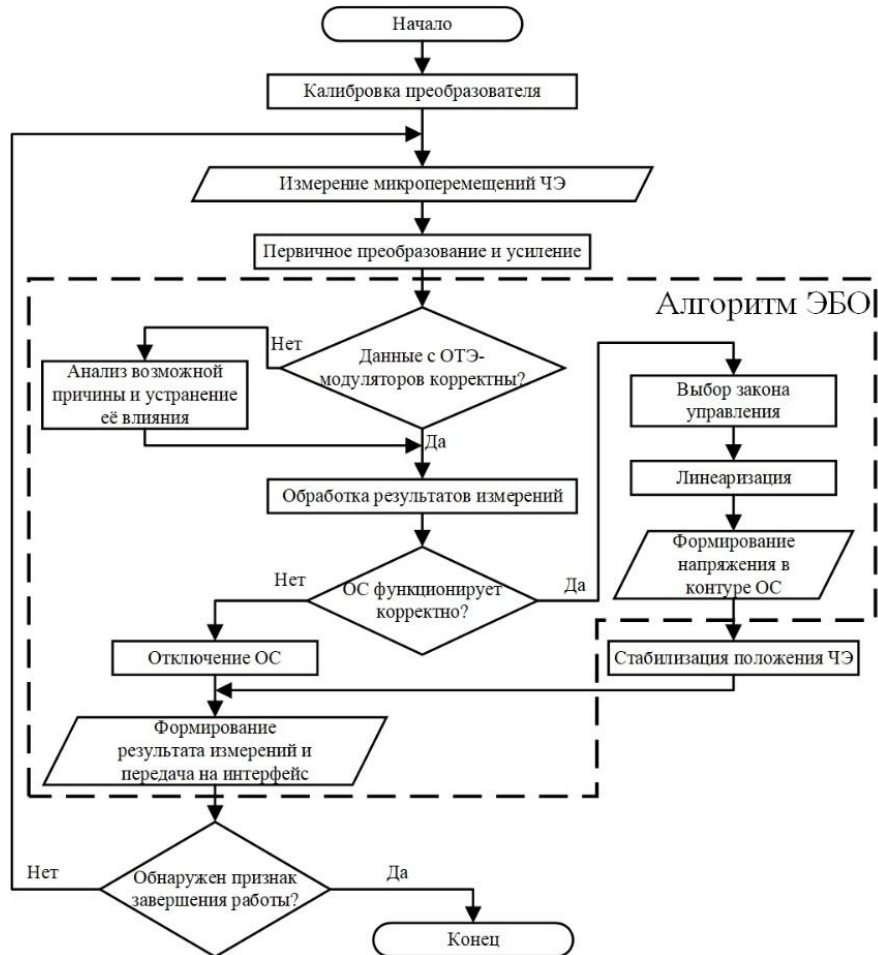


Рисунок 25 – Алгоритм функционирования компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием

На первом этапе работы выполняется калибровка преобразователя, которая заключается в проверке ОТЭ-модуляторов и электромагнитов ОС, после чего на электромагниты подаются тестовые сигналы. По анализу поведения ЧЭ выполняется корректировка коэффициентов в законах управления, участвующих также в формировании результатов измерений, позволяющая минимизировать влияние технологических погрешностей на характеристики преобразователя. Затем ОТЭ-модуляторы выполняют измерение микроперемещений ЧЭ. Сигнал с ОТЭ-модуляторов проходит первичное преобразование, усиливается и поступает на ЭБО, который выполняет проверку результатов измерений на корректность.

Если проверка не пройдена, то выполняется анализ причины возникновения некорректности по её виду, например, результаты измерений ОТЭ-модуляторов противоречат друг другу или находятся за пределами диапазона возможных значений, на основе которого происходит выбор метода устранения: от отключения одного из ОТЭ-модуляторов до перезапуска системы.

Результаты измерений обрабатываются, происходит диагностика элементов ОС и анализ динамики результатов измерений. Использование контура ЭМ стабилизации положения ЧЭ позволяет сделать систему более устойчивой к ударным нагрузкам и колебательным входным ускорениям с большой амплитудой. По результатам диагностики ОС принимается решение о её отключении, если она вышла из строя, и смене режима функционирования преобразователя. Система перестаёт быть следящей, но сохраняет свою работоспособность. По динамике результатов измерений с применением предиктивного анализа выполняется выбор закона управления (пропорциональный, интегральный, дифференциальный или их сочетание), например, корректируется значение интегральной составляющей при возрастании частоты измеряемого ускорения. Последующая математическая обработка, выполняемая в ЭБО, линеаризует зависимость силы, стабилизирующей положение ЧЭ, от напряжения, подаваемого на электромагнит ОС. Затем сигнал управления поступает на соответствующий электромагнит ОС, который выполняет стабилизацию положения ЧЭ.

На следующем этапе выполняется формирование результата измерения ускорения на основе данных, полученных с ОТЭ-модуляторов, значений стабилизирующих напряжений и законов управления. При отключении ОС результат формируется на основе только измерений ОТЭ-модуляторов. На последнем шаге проверяется наличие одного из условий, инициирующих завершение работы алгоритма, к которым можно отнести отключение питания, многократное получение некорректных результатов от ОТЭ-модуляторов или невозможность функционирования без ОС, если она отключена.

Предложен алгоритм калибровки компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 26), использование которого

позволит уменьшить влияние технологических погрешностей узлов на выходные характеристики преобразователя (см. 4.1 Анализ влияния параметров узлов на характеристики МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием, стр. 90).

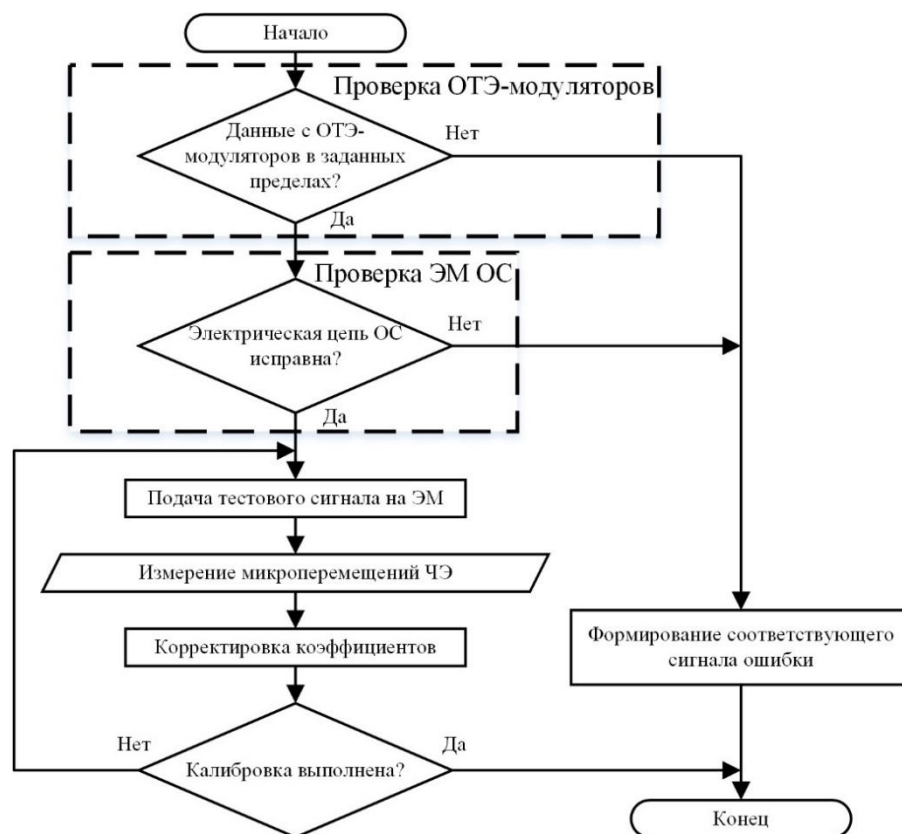


Рисунок 26 – Алгоритм калибровки компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием

На первом этапе проверяется поступление сигналов от ОТЭ-модуляторов на фотоприёмники и нахождение их значений в допустимом диапазоне. Далее выполняется проверка исправности электрической цепи обратной связи на основе значения активного сопротивления обмоток электромагнитов, что позволяет судить об их целостности и отсутствии короткого замыкания между витками.

После данных проверок на электромагниты поступает набор различных тестовых сигналов и анализируется характер перемещений ЧЭ под действием электромагнитных сил. Например, выполняется формирование последовательности прямоугольных импульсов разной длительности и детектирование значения амплитуды перемещений ЧЭ. Средствами электромагнитных сил может выполняться кратковременная «раскачка» ЧЭ в

различных диапазонах для проверки его частоты резонанса. По времени завершения собственных колебаний ЧЭ можно оценить декремент затухания. Анализ полученных результатов позволит скорректировать коэффициенты в законах управления.

На последнем шаге проверяется наличие признака завершения калибровки, например, использование всего набора тестовых сигналов и отсутствие необходимости в их повторной подаче, после чего алгоритм завершает свою работу.

### 3.2 Разработка оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью

#### 3.2.1 Структурная схема и общий вид оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью

Разработана структурная схема компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 27), позволяющая реализовать метод комбинированной стабилизации ЧЭ при помощи ЭС и ЭМ ОС.

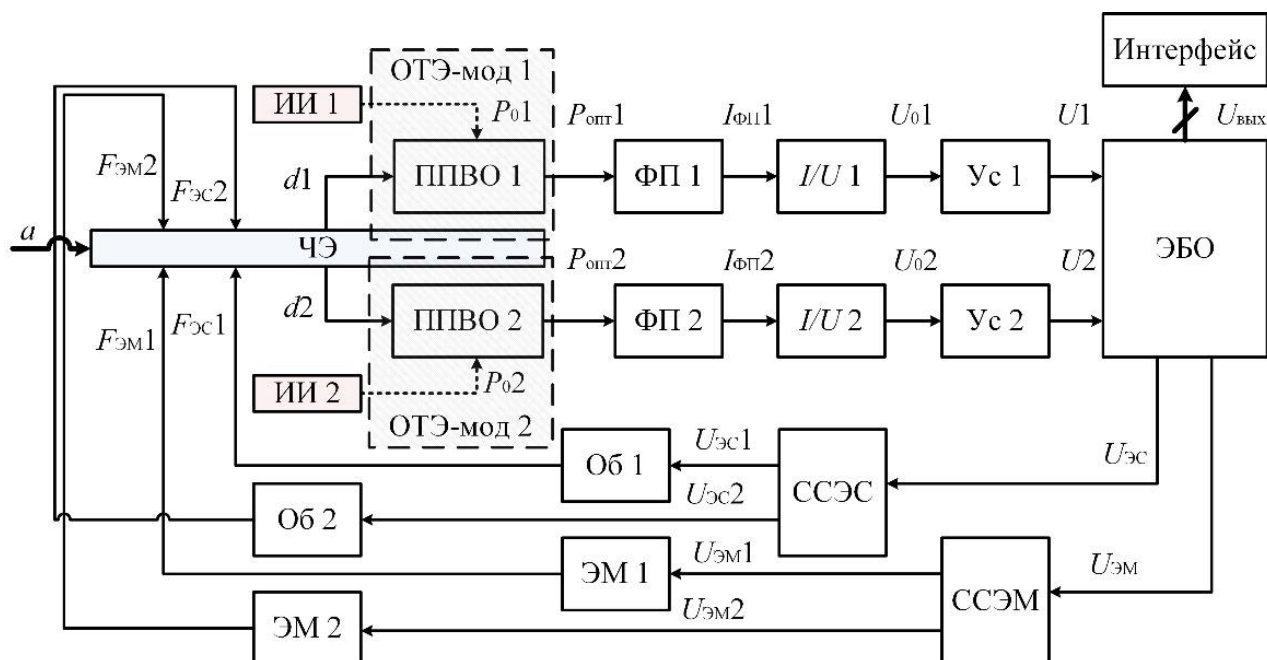


Рисунок 27 – Структурная схема компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием

Структурная схема компенсационного преобразователя ускорения включает в себя: два ОТЭ-модулятора (ОТЭ-мод 1, ОТЭ-мод 2), образованных ЧЭ и призмами полного внутреннего отражения (ПВО) (ППВО 1, ППВО 2); два источника оптического излучения (ИИ) (ИИ 1, ИИ 2); два фотоприёмника (ФП 1, ФП 2); два преобразователя «ток-напряжение» ( $I/U$  1,  $I/U$  2); два усилителя ( $Ус$  1,  $Ус$  2); электронный блок обработки (ЭБО); схемы селекции для ЭС (ССЭС) и ЭМ (ССЭМ) обратных связей; обкладки (Об 1, Об 2) и два электромагнита (ЭМ 1, ЭМ 2).

ЧЭ и прямоугольная призма ПВО, через катетную грань которой вводится коллимированное инфракрасное излучение от ИИ, образуют ОТЭ-модулятор «среда – воздушный зазор – среда». Угол падения излучения на границу сред оптического модулятора близок к критическому, но удовлетворяет условиям ПВО. ЧЭ, в качестве которого используется кварцевая плоскопараллельная пластина, закреплённая с одной стороны, изгибается в направлении, противоположенном измеряемому ускорению  $a$ . Деформации ЧЭ приводят к перемещению его свободного края и изменениям между ним и призмами зазоров ( $d_1$ ,  $d_2$ ), соизмеримых с длиной волны ИИ, через которые происходит туннелирование оптической мощности.

Изменения субмикрометровых зазоров модулируют значения выходных оптических мощностей ( $P_{\text{опт}1}$ ,  $P_{\text{опт}2}$ ), детектируемых ФП1 и ФП2, преобразующими оптические мощности в фототоки ( $I_{\text{ФП}1}$ ,  $I_{\text{ФП}2}$ ).  $I/U$  1 и  $I/U$  2 преобразуют фототоки в аналоговые напряжения ( $U_01$ ,  $U_02$ ), усиливаемые и подаваемые на ЭБО.

ЭБО обрабатывает результаты измерений и формирует сигналы управления для ЭМ ( $U_{\text{ЭМ}}$ ) и ЭС ( $U_{\text{ЭС}}$ ) контуров обратной связи, стабилизирующих положение ЧЭ. Сигналы управления поступают на ССЭС и ССЭМ, линеаризующие характеристики, связывающие значения стабилизирующих напряжений и сил, и подающие напряжения на требуемые пары электродов ( $U_{\text{ЭС}1}$ ,  $U_{\text{ЭС}2}$ ) ЭС и электромагнит ( $U_{\text{ЭМ}1}$ ,  $U_{\text{ЭМ}2}$ ) ЭМ стабилизаций. ЭС силы между обкладками ( $F_{\text{ЭС}1}$ ,  $F_{\text{ЭС}2}$ ) и ЭМ сила между сердечником и подвижным магнитопроводом ( $F_{\text{ЭМ}1}$ ,  $F_{\text{ЭМ}2}$ ), являющимся якорем в магнитной цепи, демпфируют колебания и смещают ЧЭ к

положению покоя соответственно. ЭБО формирует выходное значение на основе измерений ОТЭ-модуляторов и стабилизирующих напряжений ОС, а затем передаёт его на однонаправленный интерфейс.

Компенсационный преобразователь ускорения с оптическим считыванием содержит: ОТЭ-модуляторы, включающие ЧЭ и призмы ПВО; электромагниты, состоящие из катушки, сердечника и якоря; обкладки (Рисунок 28).

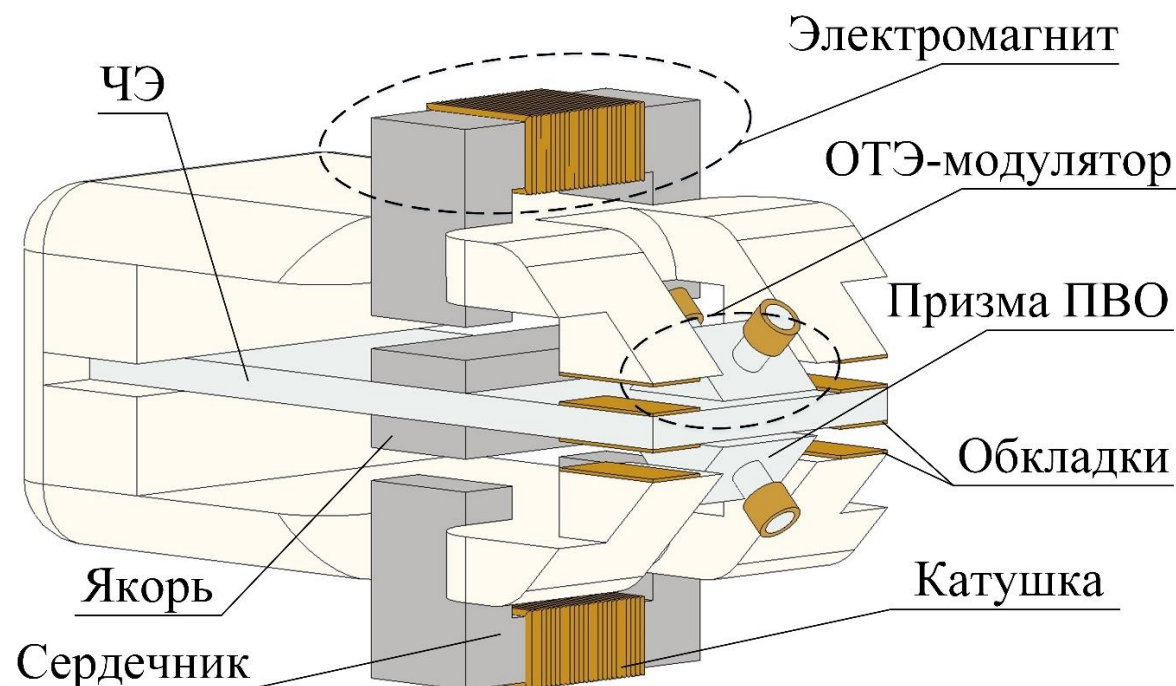


Рисунок 28 – Компенсационный преобразователь ускорения с оптическим считыванием

ЧЭ жёстко крепится в корпусе одной стороной. Призмы расположены с двух сторон от ЧЭ на равном расстоянии от заделки вблизи его свободного края. Четыре пары обкладок ЭС стабилизации расположены рядом с призмами и обеспечивают приложение силы к свободному краю ЧЭ. Катушки с сердечником ЭМ стабилизации монтируются в корпус и, притягивая якорь, установленный на ЧЭ, формируют стабилизирующую силу, приложенную к его середине. Напряжение стабилизации одновременно подаётся только на две пары обкладок (верхние или нижние) и на один электромагнит, в зависимости от требуемых направлений стабилизирующих сил.



Предложен алгоритм функционирования компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и методом комбинированной стабилизации ЧЭ (Рисунок 29).

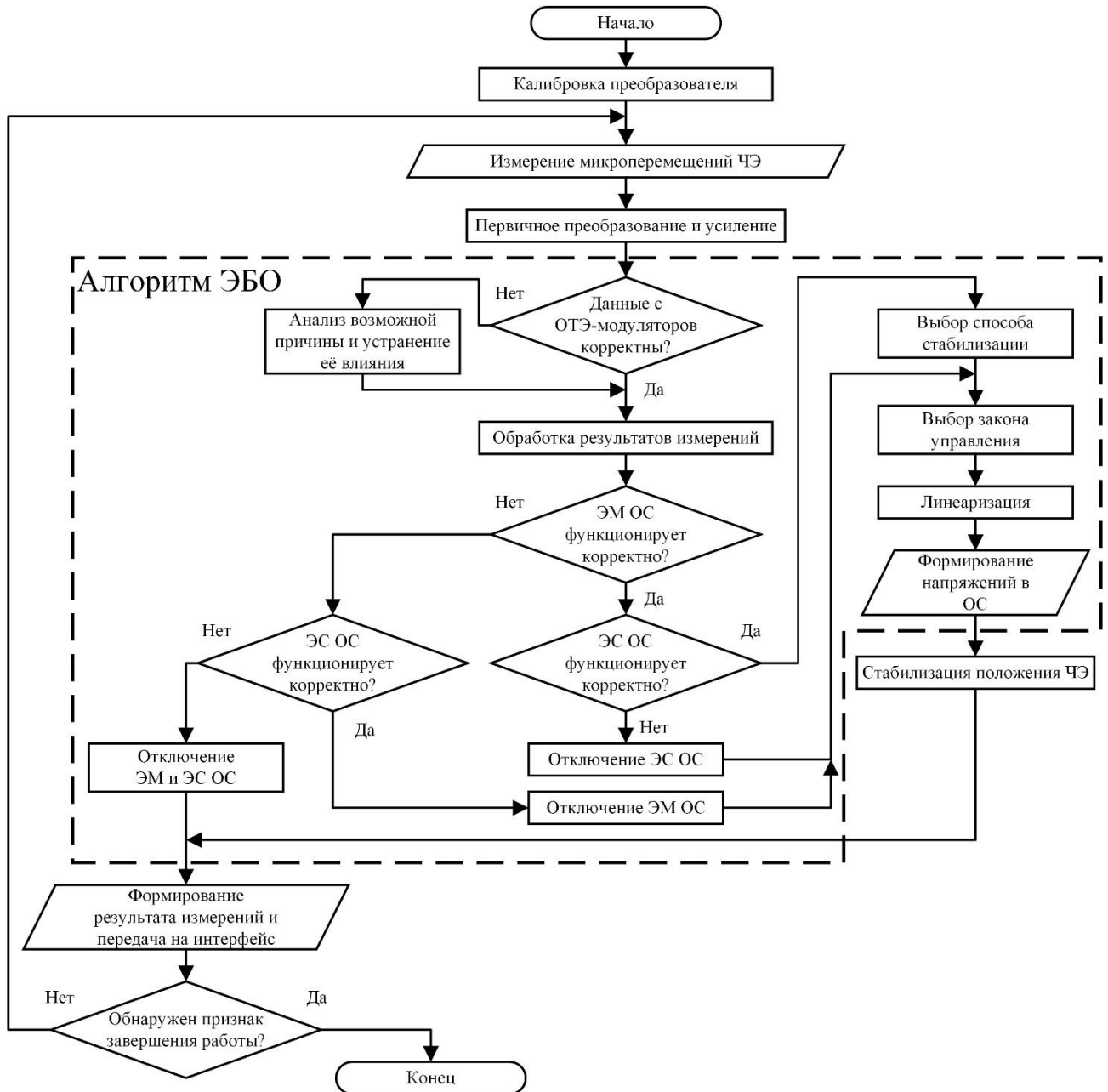


Рисунок 29 – Алгоритм функционирования компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и методом комбинированной стабилизации ЧЭ

На первом этапе работы алгоритма выполняется калибровка преобразователя и происходит приём данных от ОТЭ-модуляторов. Далее происходит первичное преобразование сигнала, определение значений зазоров ( $d_1$ ,  $d_2$ ) и значения ускорения ( $a$ ). Информация о результатах измерений проходит проверку на

корректность: находятся ли они в пределах допустимых значений или не противоречат ли друг другу данные с двух ОТЭ-модуляторов.

Затем происходит диагностика элементов ОС и анализ динамики результатов измерений. Совместное использование ЭМ и ЭС контуров позволяет выполнить резервирование ОС и сделать систему гибкой к видам входных воздействий: высокочастотным колебаниям, ударным нагрузкам, ускорениям с большой амплитудой. Происходит выбор режима стабилизации ЧЭ: способа стабилизации (ЭМ, ЭС или комбинированный) и закона управления (пропорциональный, интегральный, дифференциальный или их сочетание). Например, при корректной работе системы с малой частотой измеряемых ускорений ЭМ ОС ( $F_{ЭМ1}$ ,  $F_{ЭМ2}$ ) возвращает ЧЭ к положению покоя, а ЭС ( $F_{ЭС1}$ ,  $F_{ЭС2}$ ) – демпфирует его колебания. Если возрастёт частота измеряемого ускорения, то корректируется значение интегральной составляющей в законе управления контура ЭМ ОС. Если одна из ОС выйдет из строя, работоспособность преобразователя сохранится и выполнится выбор закона управления, минимизирующего ухудшения характеристик преобразователя.

Следующим этапом является формирование результатов измерений. При отсутствии ОС для получения результатов достаточно измерений ОТЭ-модуляторов. Т.к. использован метод комбинированной стабилизации ЧЭ, и ОС корректируют его положение, система становится следящей, и результаты измерений уточняются на основе значений стабилизирующих напряжений и законов управления.

Последним этапом работы алгоритма является проверка наличия одного из признаков завершения работы, например, отключение питания или многократное получение некорректных результатов от ОТЭ-модуляторов.

### 3.2.2 Математическая модель преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью

Математическая модель оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью является совокупностью моделей ЧЭ, ОТЭ-модулятора, обкладок ЭС ОС и электромагнита ЭМ ОС.

ЧЭ выполнен в виде консольной балки с жёсткой заделкой. Измеряемое ускорение  $a$  действует на ЧЭ и индуцирует распределённую силу  $q_{SE}$ . На ЧЭ действуют и две сосредоточенные силы, стабилизирующие его положение: ЭС  $F_{ES}$  и ЭМ  $F_{EM}$ , приложенные к краю и середине ЧЭ соответственно. Представлен изгиб средней линии балочного ЧЭ под действием измеряемого ускорения и компенсационных сил (Рисунок 30).

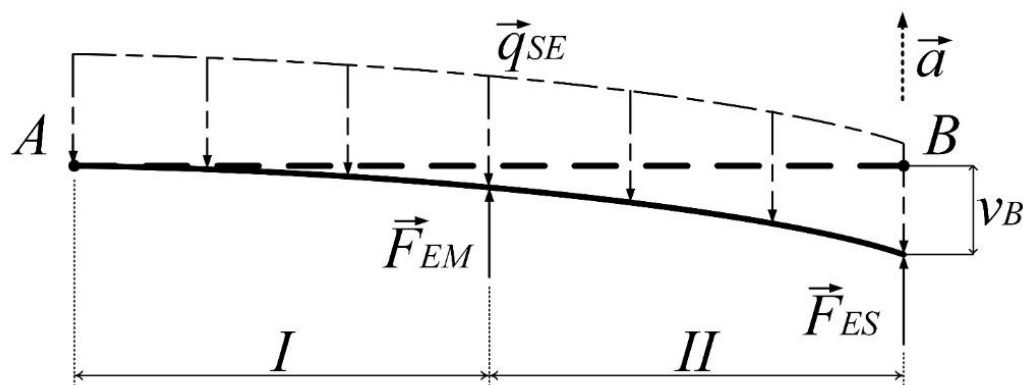


Рисунок 30 – Изгиб средней линии балочного ЧЭ под действием измеряемого ускорения и компенсационных сил

Сумма проекций на основную ось чувствительности всех сил, приложенных к ЧЭ, и сумма моментов этих сил относительно заделки (точки А) должны равняться нулю [91]:

$$\sum F^{sen} = R_A - F_{EM} - F_{ES} - q_{SE} \cdot L = 0;$$

$$\sum M^A = -M_A - F_{EM} \cdot \frac{L}{2} - F_{ES} \cdot L - q_{SE} \cdot \frac{L^2}{2} = 0.$$

При этом значения силы реакции опоры в точке заделки  $R_A$  и момента в заделке  $M_A$  примут вид:

$$R_A = F_{EM} + F_{ES} + q_{SE} \cdot L; \quad M_A = -F_{EM} \cdot \frac{L}{2} - F_{ES} \cdot L - q_{SE} \cdot \frac{L^2}{2},$$

где  $L$  – длина ЧЭ.

Поперечная сила и изгибающий момент описываются различными системами уравнений для двух половин ЧЭ, расположенных ближе к заделке ( $I$ ) и дальше от неё ( $II$ ) соответственно. Система из поперечной силы  $Q_I$  и изгибающего момента  $M_I$  для первого участка:

$$\begin{cases} Q_I(z) = R_A - q_{SE} \cdot z; \\ M_I(z) = M_A + R_A \cdot z - q_{SE} \cdot \frac{z^2}{2}; \end{cases}$$

система из поперечной силы  $Q_{II}$  и изгибающего момента  $M_{II}$  для второго участка, представляющего больший интерес, т.к. ОТЭ-модуляторы расположены около свободного края ЧЭ (точки  $B$ ):

$$\begin{cases} Q_{II}(z) = R_A - q_{SE} \cdot z - F_{EM}; \\ M_{II}(z) = M_A + R_A \cdot z - q_{SE} \cdot \frac{z^2}{2} - F_{EM} \left( z - \frac{L}{2} \right), \end{cases}$$

где  $z$  – координата точки на средней линии недеформированного ЧЭ, соответствующая расстоянию от заделки ( $z=0$  в т.  $A$ ,  $z=L$  в т.  $B$ ).

Перемещения  $v_{I,II}(z)$  каждой точки ЧЭ вдоль оси чувствительности определены уравнением, в котором индексы ( $I$ ) и ( $II$ ) соответствуют первому и второму участкам [91]:

$$v_{I,II}(z) = \iint \frac{M_{I,II}(z)}{E \cdot J_{SE}} dz dz = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \iint M_{I,II}(z) dz dz,$$

где  $E$  – модуль Юнга материала ЧЭ,  $J_{SE}$  – момент инерции сечения ЧЭ, которые можно вынести из подынтегрального выражения.

Дважды проинтегрируем уравнение момента  $M_I$ :

$$\begin{aligned} \int M_I(z) dz &= M_A \cdot z + \frac{1}{2} \cdot R_A \cdot z^2 - \frac{1}{6} \cdot q_{SE} \cdot z^3 + C_1; \\ \int \left( \int M_I(z) dz \right) dz &= \frac{1}{2} \cdot M_A \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot R_A \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 + C_1 \cdot z + C_2. \end{aligned}$$

Дважды проинтегрируем уравнение момента  $M_{II}$ :

$$\int M_{II}(z)dz = M_A \cdot z + \frac{1}{2} \cdot R_A \cdot z^2 - \frac{1}{6} \cdot q_{SE} \cdot z^3 - \frac{1}{2} \cdot F_{EM} \cdot \left(z - \frac{L}{2}\right)^2 + C_3;$$

$$\int \left( \int M_{II}(z)dz \right) dz = \frac{1}{2} \cdot M_A \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot R_A \cdot z^3 -$$

$$-\frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 - \frac{1}{6} \cdot F_{EM} \cdot \left(z - \frac{L}{2}\right)^3 + C_3 \cdot z + C_4.$$

Т.к. прогиб и поворот в заделке отсутствуют, постоянные интегрирования равны нулю, т.е. начальные параметры таковы, что:  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = 0$ ,  $C_3 = 0$ ,  $C_4 = 0$ . После алгебраических преобразований (см. Приложение Д) получим уравнение перемещения  $v_I(z)$  половины ЧЭ, находящейся ближе к заделке, выполнив подстановку и упростив выражение:

$$v_I(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L}{4} \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot z^3 \right) + F_{EM} \cdot \left( -\frac{L}{2} \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot z^3 \right) \right) +$$

$$+ \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^2}{4} \cdot z^2 + \frac{L}{6} \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot z^4 \right) \right).$$

Получим уравнение перемещения  $v_{II}(z)$  крайней половины ЧЭ, выполнив подстановку и упростив выражение (см. Приложение Д):

$$v_{II}(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L}{4} \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot z^3 - \frac{1}{6} \cdot \left( z - \frac{L}{2} \right)^3 \right) \right) +$$

$$+ \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{ES} \cdot \left( -\frac{L}{2} \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot z^3 \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^2}{4} \cdot z^2 + \frac{L}{6} \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot z^4 \right) \right).$$

Определим уравнение перемещений точки с координатой  $(L/2)$ , находящейся посередине ЧЭ (см. Приложение Д):

$$v_{II}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -\frac{L^3}{24} F_{EM} - \frac{5 \cdot L^3}{48} \cdot F_{ES} - \frac{17 \cdot L^4}{384} \cdot q_{SE} \right).$$

Определим уравнение перемещений точки  $v_B$  с координатой  $(L)$ , соответствующей свободному краю ЧЭ (см. Приложение Д):

$$v_B = v_{II}(L) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -\frac{5 \cdot L^3}{48} \cdot F_{EM} - \frac{L^3}{3} \cdot F_{ES} - \frac{L^4}{8} \cdot q_{SE} \right),$$

где  $q_{SE} = \frac{F_{SE}}{L}$ ,  $F_{SE}$  – сосредоточенная сила, вызванная ускорением;  $J_{SE} = \frac{b \cdot h^3}{12}$  – для

ЧЭ с прямоугольным сечением [91],  $b, h$  – ширина и толщина ЧЭ соответственно.

Перемещения свободного края ЧЭ  $v_B$  при статических значениях сил и ускорения или после завершения всех переходных процессов могут быть описаны уравнением:

$$v_B = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -\frac{L^4}{8} \cdot q_{SE} + \frac{5 \cdot L^3}{48} \cdot F_{EM} + \frac{L^3}{3} \cdot F_{ES} \right).$$

Для более точного отражения динамики ЧЭ требуется составить систему дифференциальных уравнений (ДУ), учитывающую его инерционность и колебательность [92]:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{v}_B + K_D \cdot \dot{v}_B + G_{FSE} \cdot v_B = m \cdot a; \\ m \cdot \ddot{v}_B + K_D \cdot \dot{v}_B + G_{FEM} \cdot v_B = F_{EM}; \\ m \cdot \ddot{v}_B + K_D \cdot \dot{v}_B + G_{FES} \cdot v_B = F_{ES}; \end{cases}$$

где  $m$  – масса ЧЭ,  $K_D = \frac{2 \cdot \mu_{ADV} \cdot L^3 \cdot b^3}{d_{body}^3 \cdot (L^2 + b^2)}$  – коэффициент демпфирования [92],

$\mu_{ADV}$  – коэффициент динамической вязкости среды в зазоре между ЧЭ и корпусом,

$d_{body}$  – значение этого зазора;  $G_{FSE} = \frac{8 \cdot E \cdot J_{SE}}{L^3}$ ,  $G_{FEM} = \frac{48 \cdot E \cdot J_{SE}}{5 \cdot L^3}$ ,

$G_{FES} = \frac{3 \cdot E \cdot J_{SE}}{L^3}$  – коэффициенты жесткости ЧЭ при действии сил,

соответствующих индексам, определяемые по значениям коэффициентов перед слагаемыми в уравнении перемещения свободного края ЧЭ.

По системе ДУ составлены передаточные функции (ПФ), связывающие перемещение с ускорением  $W_{FSE}$ , электромагнитной  $W_{FEM}$  и электростатической силами  $W_{FES}$ , а также ПФ ЧЭ  $W_{SE}$  в целом:

$$W_{FSE}(s) = \frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}}; \quad (26)$$

$$W_{FEM}(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}}; \quad (27)$$

$$W_{FES}(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}}; \quad (28)$$

$$W_{SE}(s) = -W_{FSE}(s) + W_{FEM}(s) + W_{FES}(s). \quad (29)$$

Косвенно определить значение ускорения  $a$  можно по прямым измерениям перемещений  $v_B$ . Детектирование деформаций, соизмеримых с длиной волны излучения, осуществляется посредством ОТЭ-модулятора.

Для ЭС стабилизации ЧЭ преобразователя ускорения, демпфирующей колебания, используются обкладки, сила взаимодействия между которыми определяется через силу Лоренца [94; 95] как:

$$F_{ES} = Q_{pl} \cdot E_{pl},$$

где  $Q_{pl} = C_{el} \cdot U_{ES}$  – величина электрического заряда каждой из обкладок;

$E_{pl} = \frac{U_{ES}}{2 \cdot d_{ES}}$  – напряжённость электрического поля каждой обкладки;

$C_{el} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pl}}{d_{ES}}$  – электрическая ёмкость;  $U_{ES}$  – напряжение между обкладками;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $S_{pl}$  – площадь поверхности каждой из обкладок,  $d_{ES}$  – расстояние между обкладками.

Выражение, определяющее значение электростатической силы, примет вид:

$$F_{ES} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pl}}{2 \cdot d_{ES}^2} \cdot U_{ES}^2. \quad (30)$$

Для ЭМ стабилизации ЧЭ, минимизирующей его перемещения, использованы электромагниты. Если пренебречь активным сопротивлением катушки и применить нулевые начальные условия, то по второму закону Кирхгофа [94; 95] ток  $I$  на ней определяется по уравнению:

$$I = \frac{1}{L_{coil}} \int_0^t U_{EM} dt, \quad (31)$$

где  $L_{coil} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{core} \cdot S_{core} \cdot n_{turn}^2}{l_{coil}}$  – индуктивность катушки;  $\mu_{core}$  – относительная магнитная проницаемость сердечника,  $S_{core}$  – площадь поперечного сечения сердечника,  $l_{coil}$  – длина катушки.

Передаточная функция катушки  $W_L$  описывается интегрирующим звеном:

$$W_L(s) = \frac{1}{L_{coil} \cdot s}.$$

С учётом формулы Максвелла [94; 95] силу тяги  $F_{EM}$  электромагнита цепи ОС преобразователя ускорения с оптическим считыванием определим как:

$$F_{EM} = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2} \cdot I^2, \quad (32)$$

где  $n_{turn}$  – число витков в катушке,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $S_{core}$  – площадь поперечного сечения сердечника,  $d_{EM}$  – расстояние между сердечником и якорем,  $I$  – сила тока, проходящего через катушку.

Таким образом, математическая модель компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и методом комбинированной стабилизации ЧЭ описывается совокупностью уравнений (9), (12) – (15), (26) – (32), в которой: уравнения (26) – (29) связывают измеряемое ускорение, ЭМ и ЭС стабилизирующие силы с микроперемещениями ЧЭ; уравнения (9), (12) – (15) преобразуют расстояние между ЧЭ и призмой ОТЭ-модулятора в мощность выходного оптического излучения; уравнения (30) – (32) отражают зависимость между выходными стабилизирующими напряжениями ЭБО с ЭМ и ЭС силами, действующими на ЧЭ.



### 3.2.3 Исследование устойчивости преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью

При помощи разработанной математической модели получена ПФ компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью. Составлена структурная схема преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью с обозначениями передаточных функций динамических звеньев (Рисунок 31).

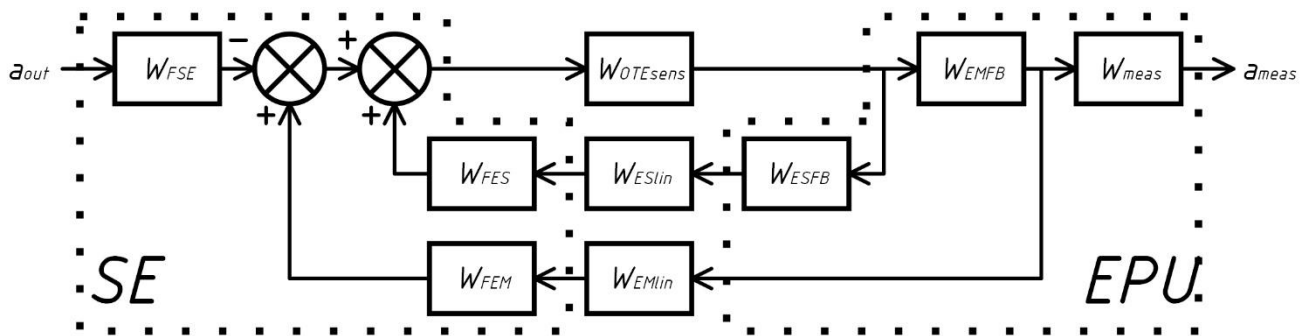


Рисунок 31 – Структурная схема преобразователя с двухконтурной обратной связью с обозначениями передаточных функций динамических звеньев

Передаточные функции, описывающие ЧЭ (*SE*), т.е.  $W_{FSE}$ ,  $W_{FEM}$  и  $W_{FES}$ , представлены на формулах (26) – (28) соответственно. ПФ датчика микроперемещений на ОТЭ  $W_{OTEsens}$  после линеаризации его характеристики имеет следующий вид:

$$W_{OTEsens}(s) = K_{OTE} \cdot K_{ampOTE}, \quad (33)$$

где  $K_{OTE}$  – передаточный коэффициент линейной модели модулятора на ОТЭ,  $K_{ampOTE}$  – коэффициент усиления схемы обработки.

ЭБО (*EPU*) включает следующие передаточные функции:

$$W_{EMFB}(s) = K_{EMFB}; \quad W_{meas}(s) = K_{meas} \cdot \frac{1}{s};$$

$$W_{ESFB}(s) = K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2}, \quad (34)$$

где  $K_{EMFB}$  – коэффициент при пропорциональной составляющей в законе управления контура ЭМ ОС,  $K_{meas}$  – коэффициент усиления выходного значения,  $K_{ESFB1}$  – коэффициент при дифференциальной составляющей в законе управления

контура ЭС ОС,  $K_{ESFB2}$  – коэффициент при пропорциональной составляющей в законе управления контура ЭС ОС.

Т.к. ЭБО линеаризует характеристики контуров ОС, то из формулы (30) видно, что ПФ контура электростатической стабилизации  $W_{ESlin}$  может быть описана отношением:

$$W_{ESlin}(s) = K_{ESlin} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pl}}{2 \cdot d_{ES}^2}, \quad (35)$$

где  $K_{ESlin}$  – передаточный коэффициент контура ЭС ОС.

Аналогично получен передаточный коэффициент контура ЭМ ОС  $K_{EMlin}$ :

$$K_{EMlin} = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2}.$$

Получена ПФ контура электромагнитной стабилизации  $W_{EMlin}$ :

$$W_{EMlin}(s) = K_{EMlin} \cdot W_L(s) = K_{EMlin} \cdot \frac{1}{L_{coil} \cdot s} = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2} \cdot \frac{1}{L_{coil} \cdot s}, \quad (36)$$

или  $W_{EMlin}(s) = \frac{l_{coil}}{16 \cdot d_{EM}^2 \cdot \mu_{core} \cdot s}$ , после преобразований (см. Приложение Д).

Выполнив преобразования (см. Приложение Д) получим ПФ в следующем виде:

$$W_{AT} = \frac{W_{FSE} \cdot (-W_{OTEsens}) \cdot W_{EMFB} \cdot W_{meas}}{1 + (-W_{OTEsens}) \cdot (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB})}. \quad (37)$$

После выполнения подстановок (26) – (28) и (33) – (36) в (37) получим:

$$W_{AT} = \frac{m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas}}{(m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}} + \frac{K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB}}{L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM})} \cdot s}. \quad (38)$$

Знак минус перед коэффициентом  $K_{ampOTE}$  указывает на то, что само значение этого коэффициента является отрицательным. После упрощения (см. Приложение Д) ПФ преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью примет вид:

$$W_{AT}(s) = \frac{W_{ATnum}(s)}{W_{ATden}(s)}, \quad (39)$$

где

$$W_{ATnum}(s) = \left( m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right); \quad (40)$$

$$W_{ATden}(s) = \left( \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot s \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right) + \left( \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot s \right) \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot \left( K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2} \right) \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right) + \left( \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot s \right) \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right). \quad (41)$$

ПФ преобразователя линейного ускорения может быть записана и в следующем виде (после выделения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя):

$$W_{AT}(s) = \frac{b_{n0} \cdot s^5 + b_{n1} \cdot s^4 + b_{n2} \cdot s^3 + b_{n3} \cdot s^2 + b_{n4} \cdot s}{a_{d0} \cdot s^8 + a_{d1} \cdot s^7 + a_{d2} \cdot s^6 + a_{d3} \cdot s^5 + a_{d4} \cdot s^4 + a_{d5} \cdot s^3 + a_{d6} \cdot s^2 + a_{d7} \cdot s} \quad (42)$$

где коэффициенты определяются выражениями:

$$b_{n0} = m^3 \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \cdot L_{coil};$$

$$b_{n1} = 2 \cdot m^2 \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \cdot L_{coil} \cdot K_D;$$

$$b_{n2} = m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \cdot L_{coil} \cdot \left( m \cdot G_{FES} + m \cdot G_{FEM} + K_D^2 \right);$$

$$b_{n3} = m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \cdot L_{coil} \cdot K_D \cdot \left( G_{FEM} + G_{FES} \right);$$

$$b_{n4} = m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \cdot L_{coil} \cdot G_{FES} \cdot G_{FEM};$$

$$a_{d0} = m^3 \cdot L_{coil};$$

$$a_{d1} = L_{coil} \cdot m^2 \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot K_{ESFB1} + 3 \cdot K_D \right);$$

$$a_{d2} = L_{coil} \cdot m \cdot \left( 3 \cdot K_D^2 + m \cdot (G_{FES} + G_{FEM} + G_{FSE}) \right) + \\ + L_{coil} \cdot m \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot (m \cdot K_{ESFB2} + 2 \cdot K_{ESFB1} \cdot K_D) \right);$$

$$a_{d3} = 2 \cdot L_{coil} \cdot G_{FES} \cdot m \cdot K_D + L_{coil} \cdot \left( 2 \cdot m \cdot K_D \cdot (G_{FEM} + G_{FSE}) + K_D^3 \right) + \\ + K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot m \cdot \left( K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \cdot m + 2 \cdot K_{ESlin} \cdot L_{coil} \cdot K_{ESFB2} \cdot K_D \right) + \\ + K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot L_{coil} \cdot K_{ESFB1} \cdot \left( m \cdot (G_{FEM} + G_{FSE}) + K_D^2 \right);$$

$$a_{d4} = 2 \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \cdot m \cdot K_D + K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot L_{coil} \cdot \\ \cdot \left( (G_{FSE} + G_{FEM}) \cdot (K_D \cdot K_{ESFB1} + m \cdot K_{ESFB2}) + K_D^2 \cdot K_{ESFB2} \right) + \\ + L_{coil} \cdot \left( K_D^2 \cdot (G_{FSE} + G_{FES} + G_{FEM}) + m \cdot (G_{FSE} \cdot G_{FES} + G_{FSE} \cdot G_{FEM} + G_{FES} \cdot G_{FEM}) \right);$$

$$a_{d5} = L_{coil} \cdot K_D \cdot \left( G_{FSE} \cdot G_{FES} + G_{FSE} \cdot G_{FEM} + G_{FES} \cdot G_{FEM} \right) + \\ + K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \cdot \left( m \cdot (G_{FES} + G_{FSE}) + K_D^2 \right) + \\ + K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot L_{coil} \cdot \left( K_{ESFB1} \cdot G_{FSE} \cdot G_{FEM} + K_{ESFB2} \cdot K_D \cdot (G_{FSE} + G_{FEM}) \right);$$

$$a_{d6} = L_{coil} \cdot G_{FSE} \cdot G_{FES} \cdot G_{FEM} + K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot \\ \cdot \left( K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \cdot K_D \cdot (G_{FES} + G_{FSE}) + K_{ESlin} \cdot L_{coil} \cdot G_{FSE} \cdot K_{ESFB2} \cdot G_{FEM} \right);$$

$$a_{d7} = K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \cdot G_{FSE} \cdot G_{FES} \cdot$$

По ПФ (39)–(41) и структурной схеме (Рисунок 31) преобразователя разработана модель в среде графического программирования (см. Приложение Г). Построены графики реакции преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью (Рисунок 32) на входное воздействие в виде: а) функции Хевисайда (переходная функция); б) дельта-функции Дирака (весовая функция).

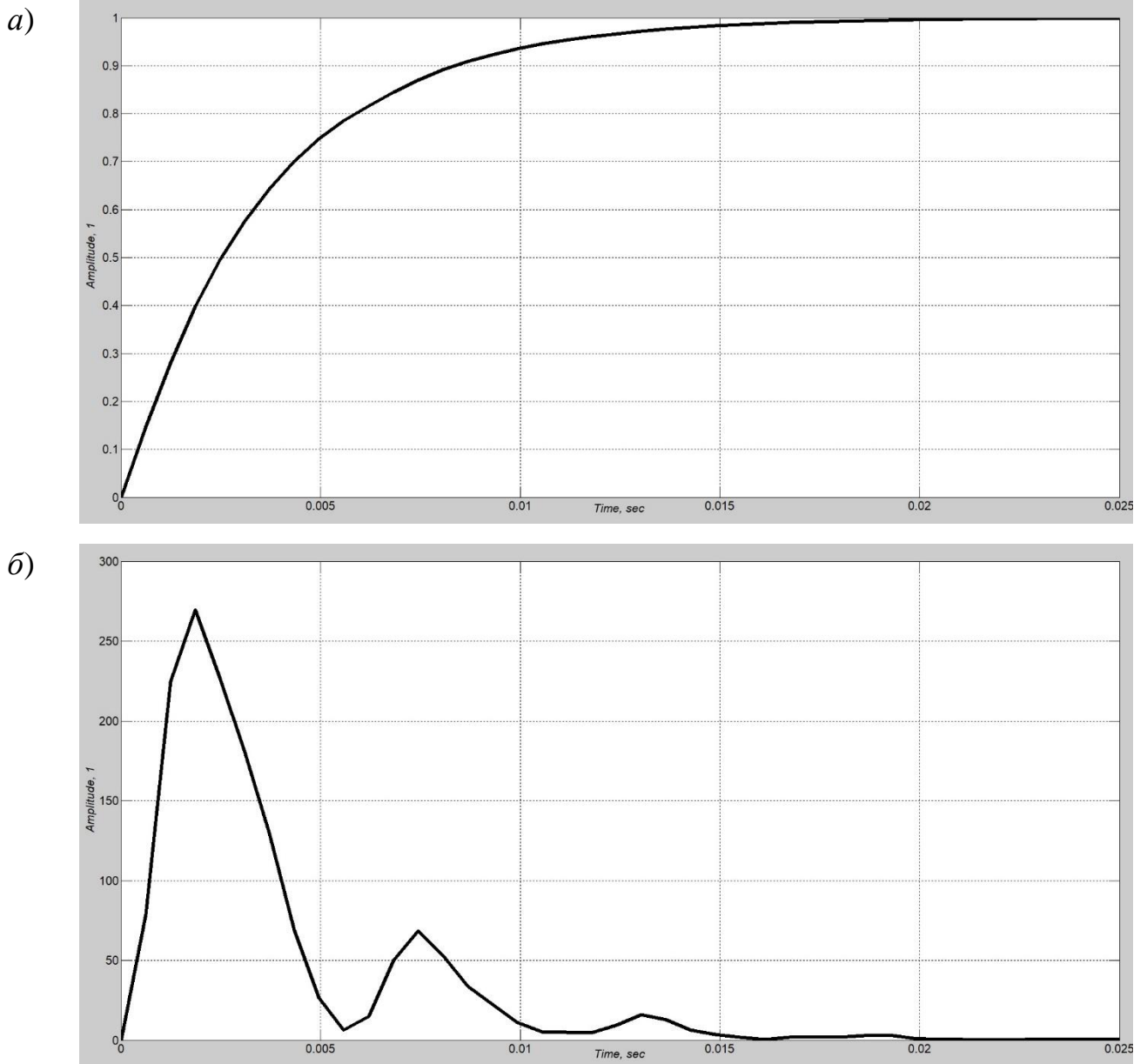


Рисунок 32 – Графики реакции преобразователя ускорения: *a)* переходная функция; *б)* весовая функция

Получены и отложены на комплексной плоскости нули (○) и полюсы (×) ПФ (42) преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью (Рисунок 33).



$$W_x = -W_{FSE} \cdot \frac{1}{1 - (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB}) \cdot W_{OTEsens}},$$

или:

$$W_x(s) = - \frac{\frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}}}{1 + (-K_{OTE} \cdot K_{ampOTE}) \cdot \left( \frac{K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}} + \frac{K_{EMlin} \cdot K_{EMFB}}{L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s} \right)}, \quad (43)$$

после выполнения подстановок.

Видно, что ПФ  $W_x(s)$  (43) отличается от ПФ  $W_{AT}(s)$  (38) отсутствием нескольких коэффициентов ( $K_{OTE}$ ,  $(-K_{ampOTE})$ ,  $K_{EMFB}$ ,  $K_{meas}$ ) и интегратора в прямой цепи, а характеристическое уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} W_{xden}(s) = & L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}) \cdot \\ & \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s + L_{coil} \cdot (-K_{OTE}) \cdot K_{ampOTE} \cdot K_{ESlin} \cdot \\ & \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2}) \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot \\ & \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s + (-K_{OTE}) \cdot K_{ampOTE} \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \cdot \\ & \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}). \end{aligned} \quad (44)$$

На основе ПФ для перемещений ЧЭ по измеряемому ускорению сделан вывод об устойчивости положения ЧЭ, т.к. в характеристическом многочлене (44) отсутствует сомножитель, добавляющий полюс в начале координат.

### 3.2.4 Исследование электростатического демпфирования колебаний балочного чувствительного элемента компенсационного преобразователя линейного ускорения

Исследование работы и характеристик компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и методом комбинированной стабилизации ЧЭ выполнено в среде графического программирования на основе анализа разработанной математической модели (Рисунок 35).

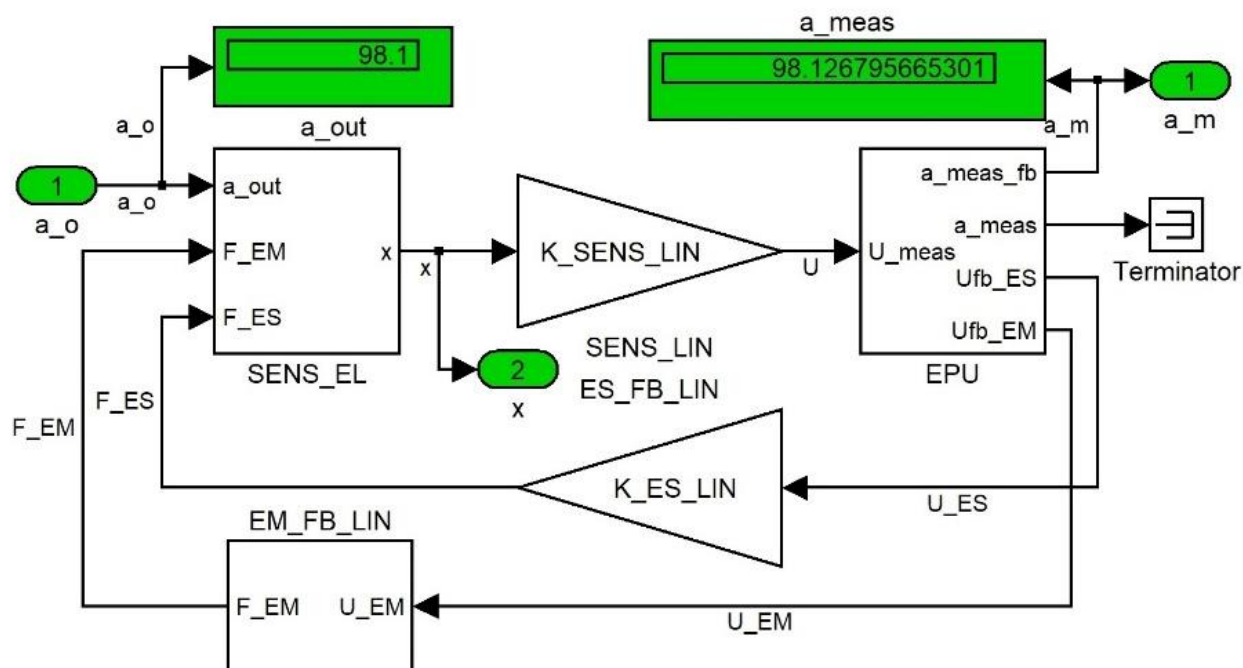


Рисунок 35 – Модель компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием в среде графического программирования

Модель микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений включает следующие блоки: «*SENS\_EL*» – ЧЭ; «*SENS\_LIN*» – линейная модель двух ОТЭ-модуляторов, фотоприёмников, преобразователей «ток-напряжение», усилителей; «*EPU*» – ЭБО; «*ES\_FB\_LIN*» – линейная модель ССЭС и обкладок ЭС стабилизации; «*EM\_FB\_LIN*» – линейная модель ССЭМ и электромагнитов ЭМ стабилизации.

Измеряемое внешнее ускорение  $a$ , поступающее на вход « $a_o$ » системы, действует на ЧЭ (блок «*SENS\_EL*», вход « $a_{out}$ ») и приводит к его микродеформациям  $x$ . В блоке «*SENS\_LIN*» изменения зазоров в ОТЭ-модуляторах преобразуются в двухканальное напряжение  $U$ , которое поступает на вход « $U_{meas}$ » блока «*EPU*». Погрешность ОТЭ-модулятора, после линеаризации его характеристик, в диапазоне перемещений от минус 0,3 мкм до 0,3 мкм не превышает 2%. «*EPU*» формирует стабилизирующие напряжения  $U_{ES}$  и  $U_{EM}$  на выходах « $U_{fb\_ES}$ » и « $U_{fb\_EM}$ » соответственно и, при отсутствии ОС, значение измеренного ускорения  $a_m$  на выходе « $a_{meas}$ ». Модель ССЭС и обкладок ЭС стабилизации описывается пропорциональным звеном «*ES\_FB\_LIN*», а модель ССЭМ и электромагнитов ЭМ стабилизации – последовательным включением



пропорционального и интегрирующего звеньев «EM\_FB\_LIN». Моделирование показало, что погрешность нелинейности блоков «ES\_FB\_LIN» и «EM\_FB\_LIN» находится на уровне точности вычислений программной среды. Стабилизирующие силы  $F_{ES}$  и  $F_{EM}$ , сформированные по пропорционально-дифференциальному и интегральному законам управления соответственно, воздействуют на ЧЭ (блок «SENS\_EL», входы «F\_ES» и «F\_EM» соответственно). При наличии ОС, значение измеренного ускорения  $a_m$  формируется блоком «EPU» на выходе «a\_meas\_fb».

Выполнено исследование характеристик компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и методом комбинированной стабилизации ЧЭ. Статическая ошибка преобразователя в выбранном диапазоне измерений составляет сотые доли  $\text{м/с}^2$ , что не превышает 0,05%. Например, при подаче на вход ускорения  $a_{out} = 98,1 \text{ м/с}^2$  результат измерений составляет  $a_{meas} = 98,13 \text{ м/с}^2$ .

Проведено исследование реакции модели компенсационного преобразователя ускорения на ступенчатое (Рисунок 36) и гармоническое (Рисунок 37) воздействия. Значение амплитуды входного измеряемого ускорения  $a_{max} = 98,1 \text{ м/с}^2 \approx 10g$ , а частота гармонического воздействия  $\omega = 100 \text{ Гц}$ .

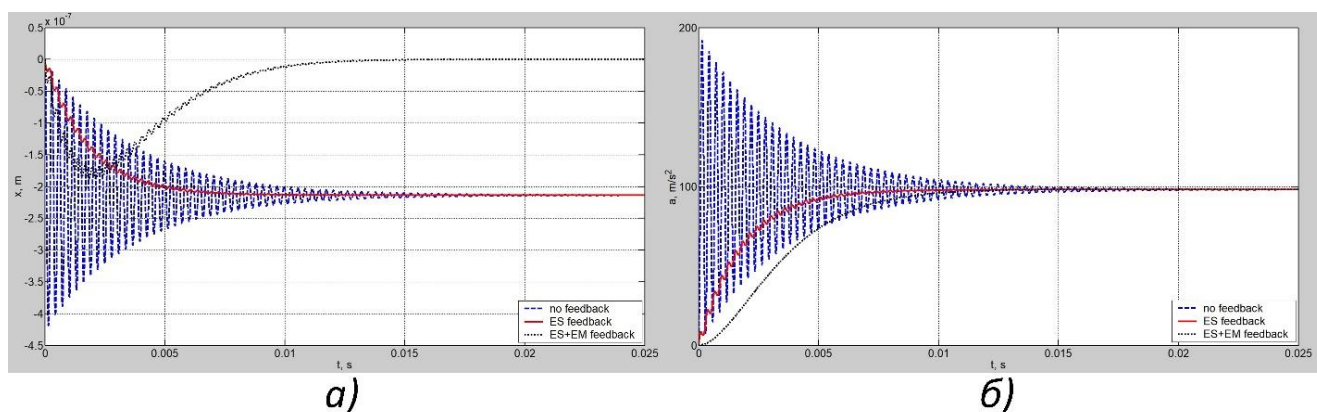


Рисунок 36 – Реакция модели компенсационного преобразователя ускорения на ступенчатое воздействие: а) координата перемещения свободного края ЧЭ; б) значение измеренного ускорения

Результаты измерений, эквивалентные ускорению, без использования стабилизации ЧЭ представлены синей штриховой линией «no feedback», с использованием только ЭС стабилизации и дифференциального закона управления – красной непрерывной «ES feedback», а с использованием метода

комбинированной стабилизации, т.е. совместным использованием ЭС и ЭМ стабилизаций, и пропорционально-интегрально-дифференциального закона управления – чёрной пунктирной «ES+EM feedback».

Показано, что диапазоны микроперемещений свободного края ЧЭ, т.е. той области, в которой происходит считывание информации, (Рисунок 36-а) составляют  $\pm 0,42$  мкм,  $\pm 0,22$  мкм и  $\pm 0,19$  мкм, в случаях отсутствия стабилизации, при наличии только ЭС стабилизации и при совместном использовании ЭС и ЭМ стабилизаций соответственно. При совместном использовании ЭС и ЭМ стабилизаций ЧЭ стремится вернуться к своему исходному положению. Использование метода комбинированной стабилизации делает преобразователь более устойчивым к ударным нагрузкам и позволяет расширить диапазон амплитуды измеряемых ускорений. Система в рассмотренных случаях остаётся устойчивой, а переходные процессы – сходящимися. Результаты измерений (Рисунок 36-б) стремятся к реальному измеряемому значению. Система без стабилизации ЧЭ обладает большими перерегулированием (около 95%) и колебательностью. Введение только ЭС стабилизации позволяет почти в 2 раза увеличить диапазон значений измеряемых ускорений и быстрее демпфировать колебательность, а совместно с ЭМ – исключить её. Законы регулирования таковы, что перерегулирование, при наличии ОС, мало. Также сокращается время переходного процесса.

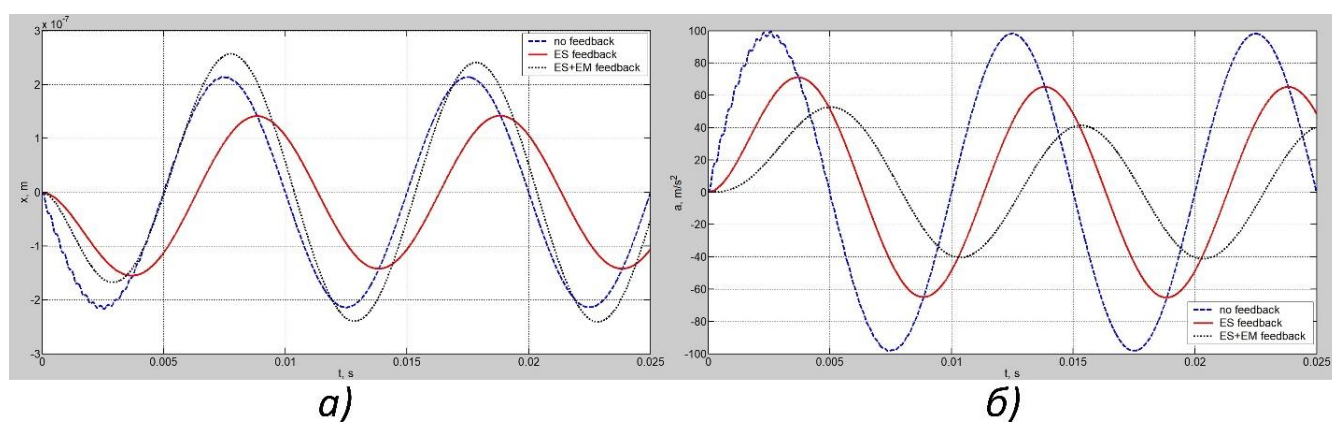


Рисунок 37 – Реакция модели компенсационного преобразователя ускорения на гармоническое воздействие: а) координата перемещения свободного края ЧЭ; б) значение измеренного ускорения

Исследование временных диаграмм реакции преобразователя на гармоническое воздействие показало, что использование метода комбинированной стабилизации ЧЭ и закона управления, обеспечивающего малые перерегулирование и колебательность, при измерении ускорений с большой частотой, неблагоприятно сказывается на перемещениях ЧЭ (Рисунок 37-а), амплитуда которых возрастает, увеличивает запаздывание результатов измерений и уменьшает амплитуду выходного сигнала. Например, при частоте измеряемого ускорения  $\omega = 100$  Гц, амплитуда выходного сигнала снижается на 35% и 60%, при наличии только ЭС стабилизации и при совместном использовании ЭС и ЭМ стабилизаций соответственно, а при отсутствии стабилизаций - снижение амплитуды отсутствует (Рисунок 37-б).

Проведено исследование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) компенсационного преобразователя ускорения (Рисунок 38) без ОС (синяя штриховая линия «no feedback») и с совместным использованием ЭС и ЭМ ОС (чёрная пунктирная линия «with feedback»).

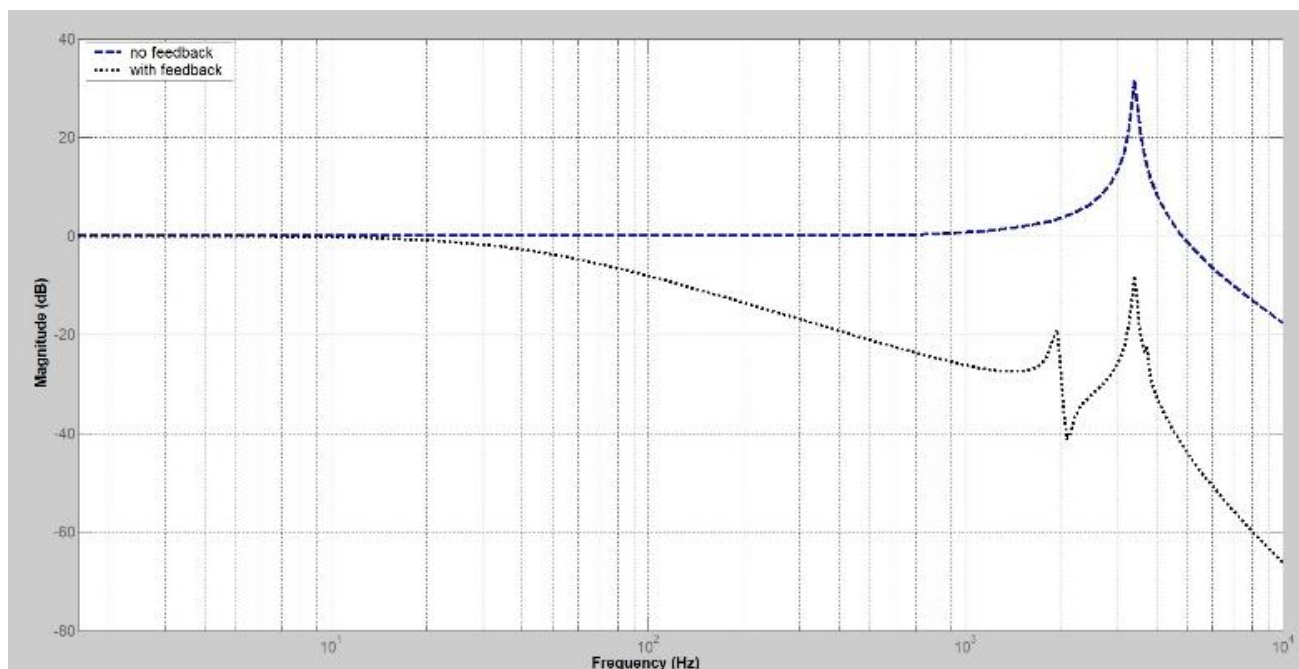


Рисунок 38 – АЧХ модели компенсационного преобразователя ускорения

Показано, что частоты среза по уровню минус 3 дБ составляют, при наличии ЭС и ЭМ ОС и использовании закона управления, обеспечивающего малые перерегулирование и колебательность, – десятки Гц ( $\omega_{ср\text{wfb}} \approx 43$  Гц), а при

отсутствии ОС – тысячи Гц ( $\omega_{српfb} \approx 5,3$  кГц), что подтверждает необходимость использования многорежимного управления: при больших частотах измеряемых ускорений целесообразны корректировка коэффициентов регуляторов ЭС и ЭМ ОС. Например, частоту среза можно увеличить до уровня 100 Гц, увеличив колебательность и допустив перерегулирование в 8,5%.

### **3.3 Разработка микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами «грубо-точной» стабилизации чувствительного элемента**

Рассмотрен волоконно-оптический преобразователь линейного ускорения на основе оптического туннельного эффекта [96], предложенный Бусуриным В.И., Жегловым М.А., Казарьяном А.В. и Коробковым В.В. Данный преобразователь состоит из основного канала приемо-передачи оптического излучения, включающего волоконно-оптический ответвитель, связанный световодами с источником и приемником оптического излучения, соединенного электрически с блоком обработки информации и оптически, через световод, с чувствительным элементом, включающим в себя устройство ориентации оптического излучения. К недостаткам данного волоконно-оптического преобразователя можно отнести риск возникновения механического контакта между оптическими деталями.

Предложен микро-опто-электромеханический компенсационный преобразователь линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента (см. Приложение В). Разработана структурная схема МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента (Рисунок 39).

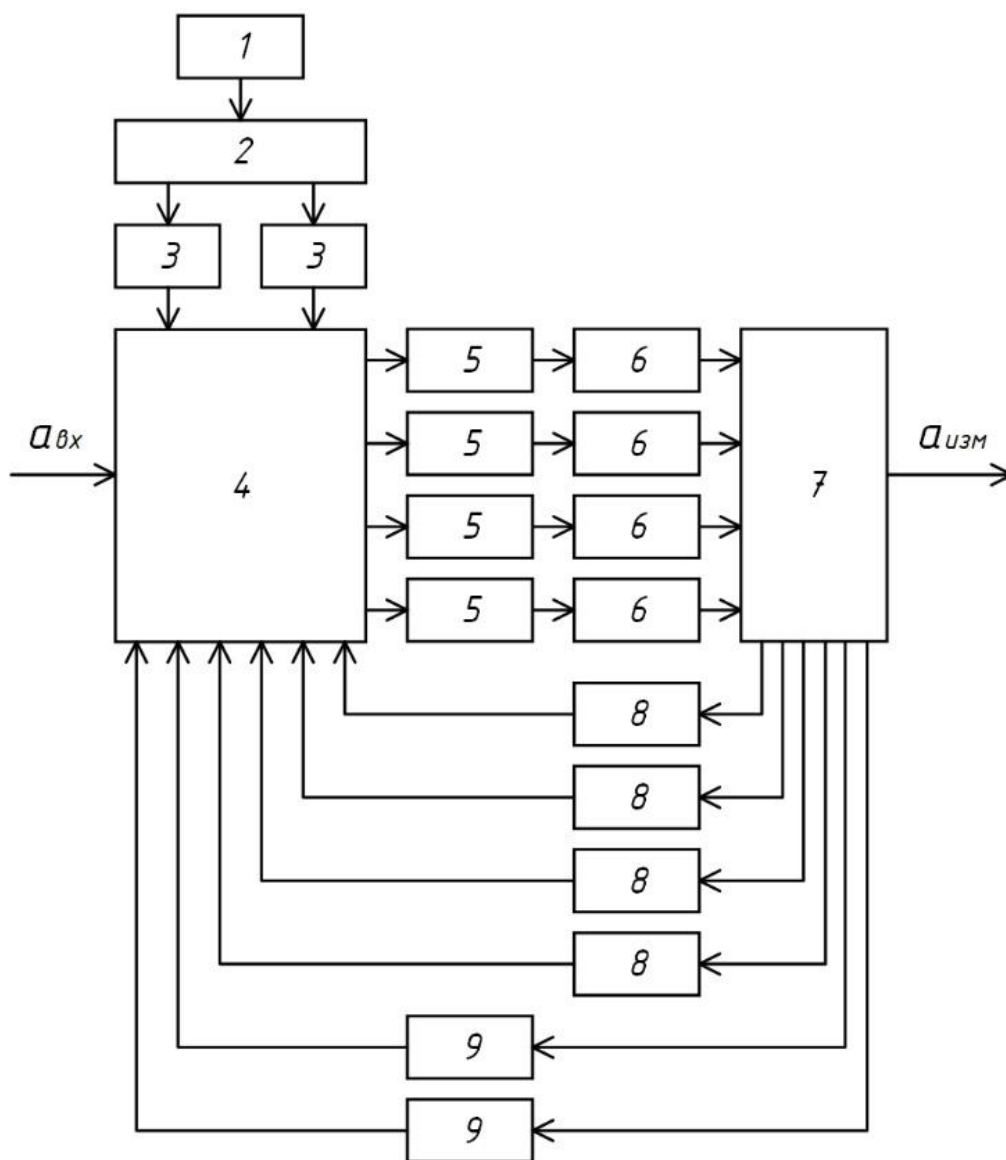


Рисунок 39 – Структурная схема МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента

Предложенный МОЭМ компенсационный преобразователь линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента включает: источник оптического излучения (эл. 1); волоконно-оптический ответвитель (эл. 2), разделяющий оптическую мощность источника; два световода (эл. 3), подводящих излучение к четырёхканальному оптическому модулятору (эл. 4), воспринимающему входное ускорение  $a_{вх}$ ; четыре фотоприёмника (эл. 5), детектирующих изменение оптической мощности в модуляторе; четыре преобразователя ток-напряжение (эл. 6); блок обработки и коррекции (эл. 7), формирующий значение измеренного ускорения  $a_{изм}$  и передающий сигналы

коррекции на четыре пары обкладок (эл. 8) контура точной стабилизации и два электромагнита (эл. 9) контура грубой стабилизации.

Разработан общий вид четырёхканального оптического модулятора со смежными элементами МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента и представлен при помощи схемы конструкции (Рисунок 40).

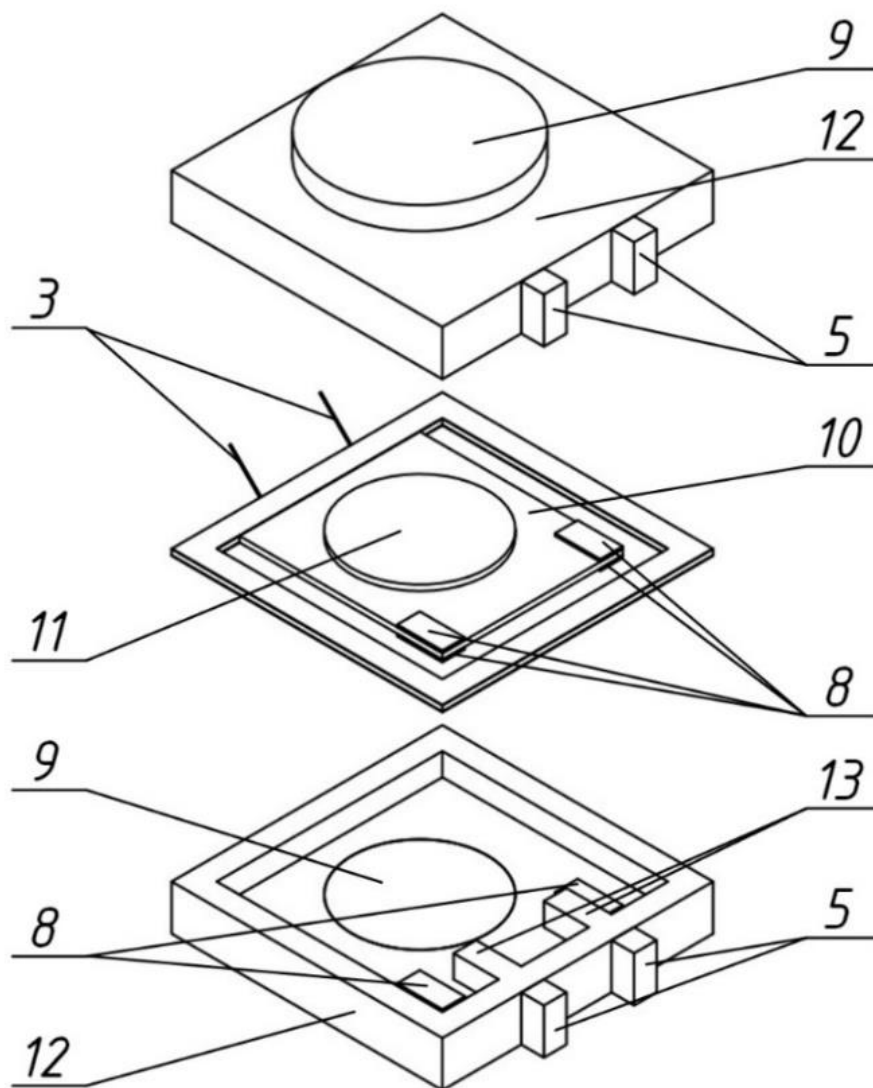


Рисунок 40 – Схема конструкции четырёхканального оптического модулятора со смежными элементами МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента

Четырёхканальный оптический модулятор (эл. 4) состоит из: чувствительного элемента (эл. 10), модулирующего оптическую мощность за счёт субмикрометровых изгибных деформаций, представляющего собой

плоскопараллельную пластину, например кварцевую, консольно закреплённую между двумя половинами корпуса, в торцевую часть которой через световоды (эл. 3) заведено коллимированное инфракрасное излучение под углом близким к критическому, но не превышающим его; двух магнитопроводов (эл. 11), являющихся якорями в цепях электромагнитов; двух половин корпуса МОЭМ-преобразователя линейных ускорений (эл. 12), на которых предусмотрены четыре элемента приёма оптического излучения (эл. 13), представляющих собой прямоугольные призмы.

Представлен продольный разрез (Рисунок 41) четырёхканального оптического модулятора со смежными элементами МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента.

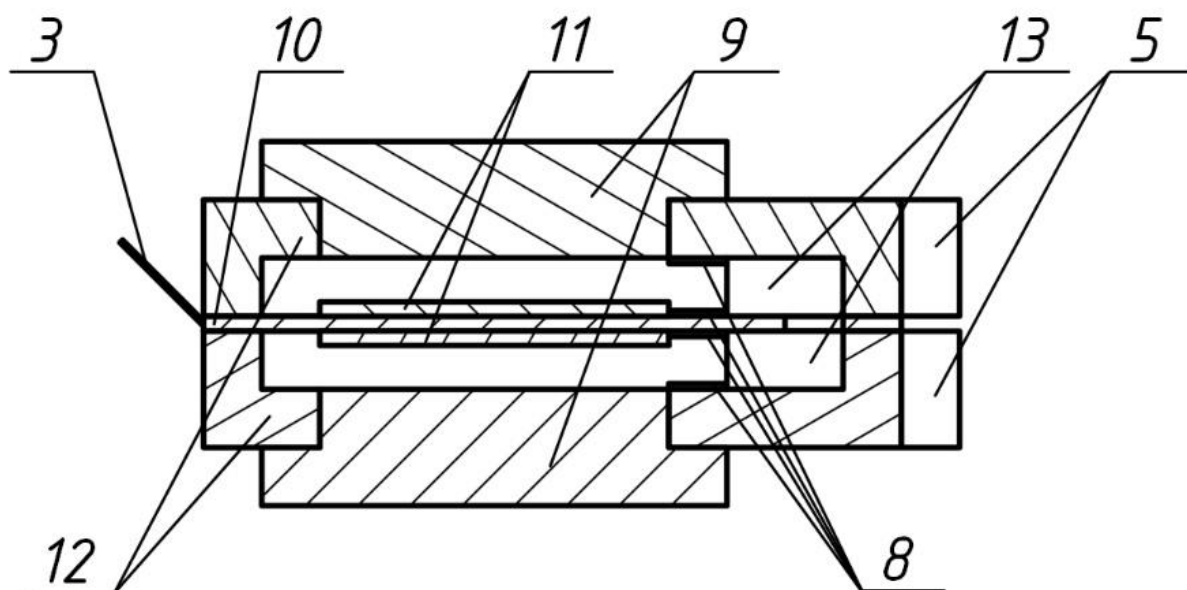


Рисунок 41 – Продольный разрез четырёхканального оптического модулятора со смежными элементами МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента

Элементы приёма оптического излучения (эл. 13) находятся на корпусе МОЭМ-преобразователя на микрометровом расстоянии попарно сверху и снизу от ЧЭ, расположенного между ними, и на равном удалении от места крепления ЧЭ к корпусу МОЭМ-преобразователя. Наличие у МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений элементов приёма оптического излучения

(эл. 13) сверху и снизу от ЧЭ позволяет реализовать дифференциальный способ считывания информации об изгибе ЧЭ относительно продольной оси, а элементов приёма слева и справа – детектировать перекося или скручивание ЧЭ вдоль его продольной оси. ЧЭ (эл. 10) воспринимает входное линейное ускорение и модулирует оптический сигнал за счёт изменения расстояния между собой и элементами приёма оптического излучения (эл. 13). Информация о перемещениях ЧЭ преобразуется в напряжение и поступает на блок обработки и коррекции (эл. 7).

Контур точной стабилизации представляет собой электростатическую обратную связь, состоящую из четырёх пар обкладок (эл. 8), расположенных на углах свободного края ЧЭ, и выравнивает его поверхность, уменьшая деформацию кручения от побочных угловых ускорений. Обкладки представляют собой пластины, выполненные из токопроводящего материала.

Контур грубой стабилизации, которым является электромагнитная обратная связь, состоящая из двух электромагнитов, воздействующих на магнитопроводы, закреплённые на середине ЧЭ, обеспечивает компенсацию изгибных деформаций, вызванных измеряемым линейным ускорением.

Предложенный МОЭМ компенсационный преобразователь линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента позволяет: расширить диапазон измерений, снизить чувствительность к поперечным линейным ускорениям, снизить чувствительность к побочным угловым ускорениям, снизить риск механического контакта между деталями оптического преобразователя за счёт совместного использования элементов электромагнитной обратной связи, обеспечивающей грубое позиционирование ЧЭ, компенсируя изгибные деформации, вызванные измеряемым линейным ускорением, и элементов электростатической обратной связи, выравнивающих поверхность ЧЭ, уменьшая деформацию кручения.

### **3.4 Выводы по третьей главе**

Разработаны структурная и функциональная схемы оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с одноконтурной



обратной связью. Разработана математическая модель преобразователя линейного ускорения с одноконтурной обратной связью, включающая модуль линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования. Предложены алгоритмы функционирования и калибровки компенсационного преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.

Предложен метод комбинированной стабилизации ЧЭ для МОЭМ-преобразователя ускорения компенсационного типа, в котором совместно используются элементы ЭМ ОС, возвращающие ЧЭ к положению покоя, и элементы ЭС ОС, демпфирующие его колебания. ЭМ и ЭС силы выполняют позиционирование ЧЭ, компенсируя изгибные деформации, вызванные измеряемым линейным ускорением, и поддерживают зазоры ОТЭ-модуляторов в их рабочем диапазоне.

Разработана структурная схема и предложен общий вид оптического компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью. Разработана математическая модель компенсационного преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью, получена ПФ, проверена устойчивость, исследовано электростатическое демпфирование колебаний балочного чувствительного элемента.

Использование метода комбинированной стабилизации ЧЭ позволяет: обеспечить работу преобразователя при различных видах входных ускорений, расширить диапазон измеряемых ускорений без ухудшения точностных показателей и исключить механический контакт между элементами преобразователя.

Разработана структурная схема МОЭМ компенсационного преобразователя линейных ускорений, включающего четырёхканальный оптический модулятор, с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента. Предлагаемый преобразователь позволяет также снизить чувствительность к побочным угловым ускорениям, уменьшая деформацию кручения ЧЭ.

## 4 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ И МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЭМ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ

### 4.1 Анализ влияния параметров узлов на характеристики МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием

#### 4.1.1 Влияние конструктивных параметров ЧЭ на характеристики преобразователя линейного ускорения

Функция преобразования датчика ускорения на основе оптического считывания представляет собой зависимость выходного напряжения от ускорения  $a$ , которое определяет прогиб ЧЭ. При воздействии ускорений балка начинает деформироваться относительно основной оси чувствительности. Балочный вид чувствительного элемента предназначен для формирования деформации под действием ускорения, перпендикулярного плоскости пластины.

Под воздействием ускорения  $a$  балка отклоняется от исходного положения. Отклонение конца балки при воздействии ускорения  $a$  определяют как:

$$v(a) = (m \cdot a \cdot L^3) / (8 \cdot E \cdot J),$$

где  $v$  – перемещение вдоль вертикальной оси;  $a$  – измеряемое ускорение;  $m$  – масса балочного чувствительного элемента;  $L$  – длина балочного ЧЭ;  $E$  – модуль упругости;  $J$  – момент инерции сечения.

Момент инерции сечения  $J$  рассчитывают по формуле:

$$J = (b \cdot h^3) / 12,$$

где  $b, h$  – соответственно ширина и толщина балочного ЧЭ.

Масса  $m$  ЧЭ и его объём  $V$  равны соответственно:

$$m = \rho \cdot V ; \quad V = L \cdot b \cdot h ,$$

где  $\rho$  – плотность материала ЧЭ;  $V$  – объём ЧЭ.

Выполним подстановку:

$$v(a) = \frac{(\rho \cdot (L \cdot b \cdot h)) \cdot a \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot \left( \frac{b \cdot h^3}{12} \right)} .$$

Упростим выражение:

$$v(a) = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho \cdot L^4}{E \cdot h^2} \cdot a.$$

Проведён анализ влияния параметров узлов на характеристики МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием. Толщина  $h$  влияет на чувствительность преобразователя, изменяя диапазон деформаций ЧЭ. Представлена зависимость перемещения свободного края ЧЭ, выполненного из кварца, от вертикального ускорения при разных размерах балочного ЧЭ (Рисунок 42).

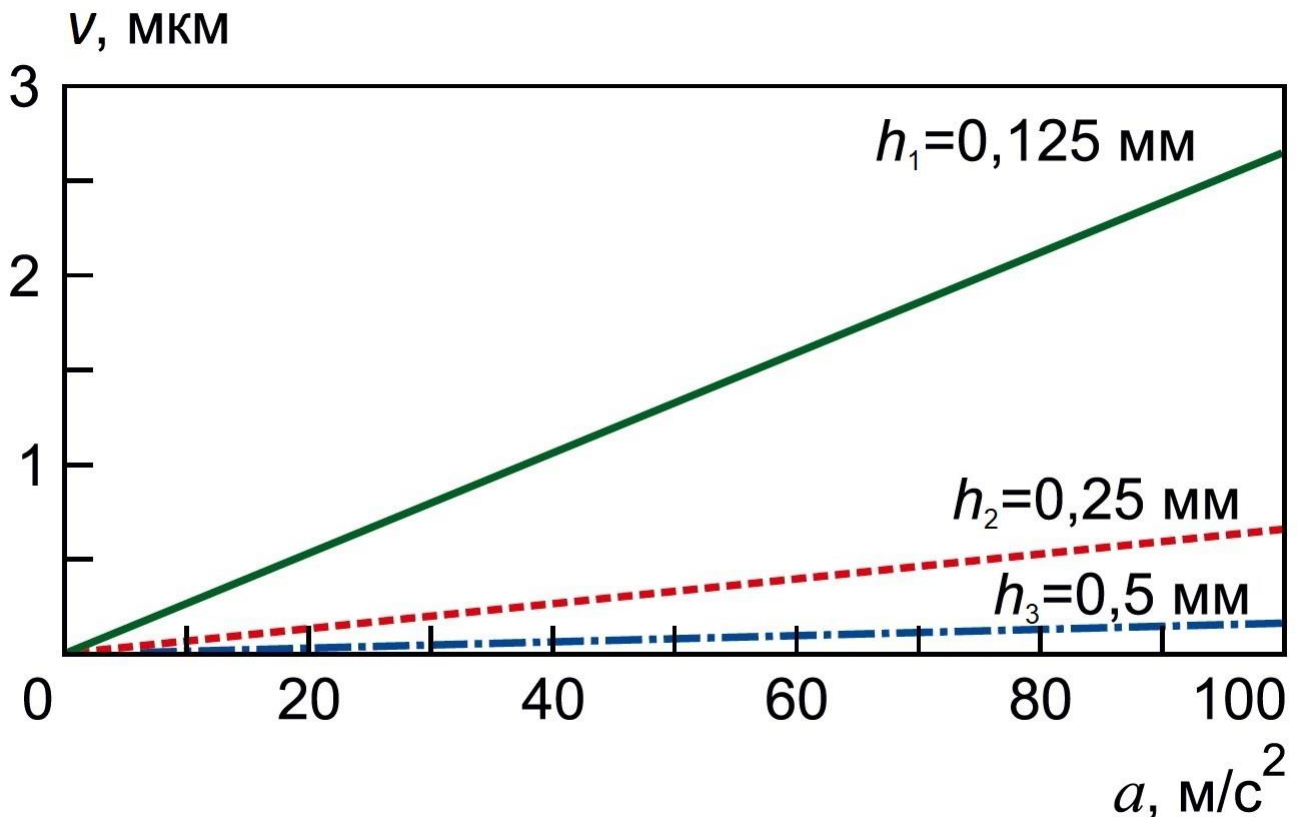


Рисунок 42 – Зависимость перемещения  $v$  свободного края ЧЭ от действия вертикального ускорения  $a$  ( $L=10$  мм);  $h$  – толщина ЧЭ

Перемещение крайней точки ЧЭ связано гиперболической зависимостью с толщиной  $h$ . При ускорении  $a=100$   $\text{м/с}^2$  и толщинах  $h_1=0,125$  мм,  $h_2=0,25$  мм,  $h_3=0,5$  мм перемещения составляют соответственно  $v_1=2,7$  мкм,  $v_2=0,7$  мкм,  $v_3=0,2$  мкм.

Для корректировки параметров чувствительности преобразователя могут изменяться такие параметры ЧЭ, как его топология или профиль. С точки зрения

удобства изготовления и монтажа наиболее приоритетной является прямоугольная или квадратная структуры. В системе трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования проведено исследование максимального перемещения свободного края ЧЭ при изменении его топологии и профиля. Исследование выполнено для ЧЭ длиной  $L=10$  мм, шириной  $b=10$  мм и толщиной  $h=0,5$  мм при действии измеряемого ускорения  $a=10g$ . Представлены перемещения ЧЭ без изменения его топологии и профиля (Рисунок 43).

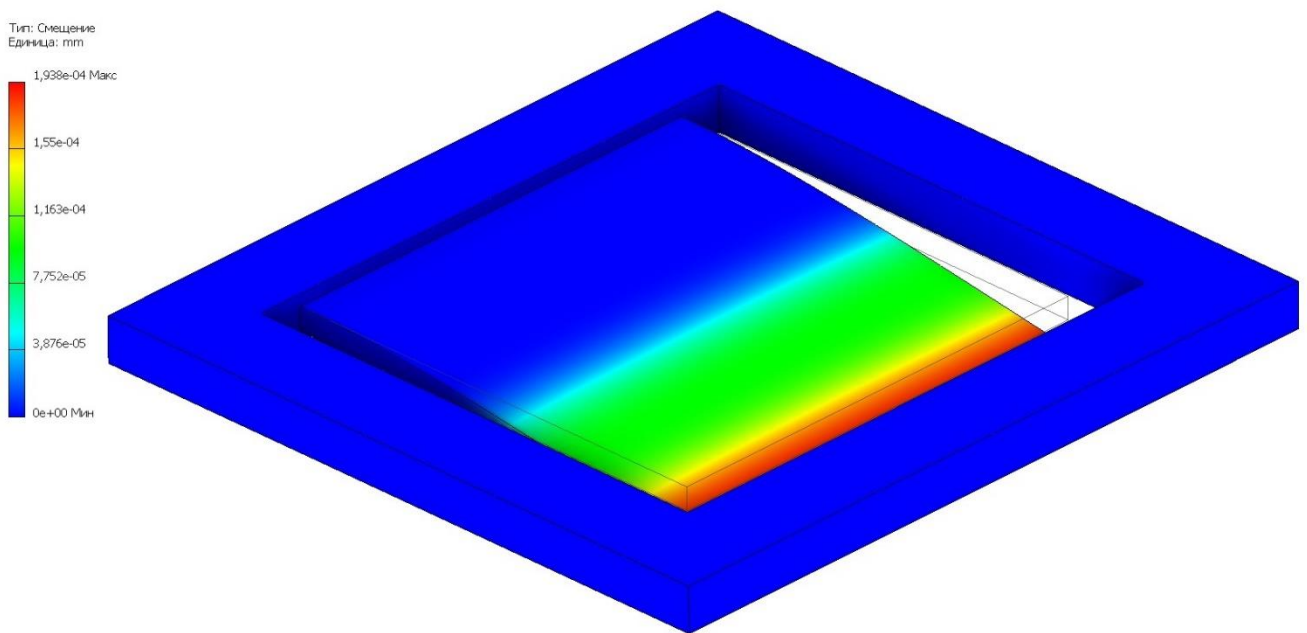


Рисунок 43 – Деформация ЧЭ без изменения его топологии и профиля

Для исследования влияния топологии на ЧЭ добавлены отверстия вблизи места заделки. Представлены перемещения ЧЭ при изменении его топологии (Рисунок 44): *a*) дополнительные отверстия общей длиной 25% от ширины ЧЭ (два отверстия длиной 1,25 мм, шириной 1 мм); *б*) дополнительные отверстия общей длиной 50% от ширины ЧЭ (два отверстия длиной 2,5 мм, шириной 1 мм).

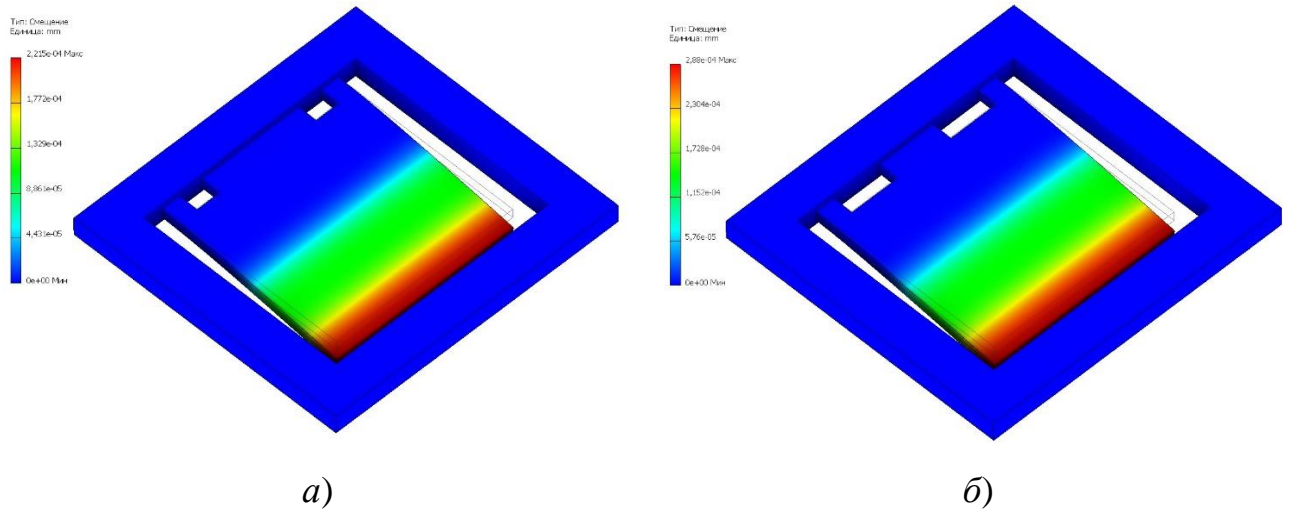


Рисунок 44 – Деформация ЧЭ при изменении его топологии: *а)* дополнительные отверстия общей длиной 25% от ширины ЧЭ; *б)* дополнительные отверстия общей длиной 50% от ширины ЧЭ

Для исследования влияния профиля на ЧЭ добавлены утонения вблизи места заделки. Представлены перемещения ЧЭ при изменении его профиля (Рисунок 45): *а)* утонение ЧЭ вблизи заделки на 25% от начальной толщины (две канавки глубиной 0,625 мм, шириной 1 мм); *б)* утонение ЧЭ вблизи заделки на 50% от начальной толщины (две канавки глубиной 1,25 мм, шириной 1 мм).

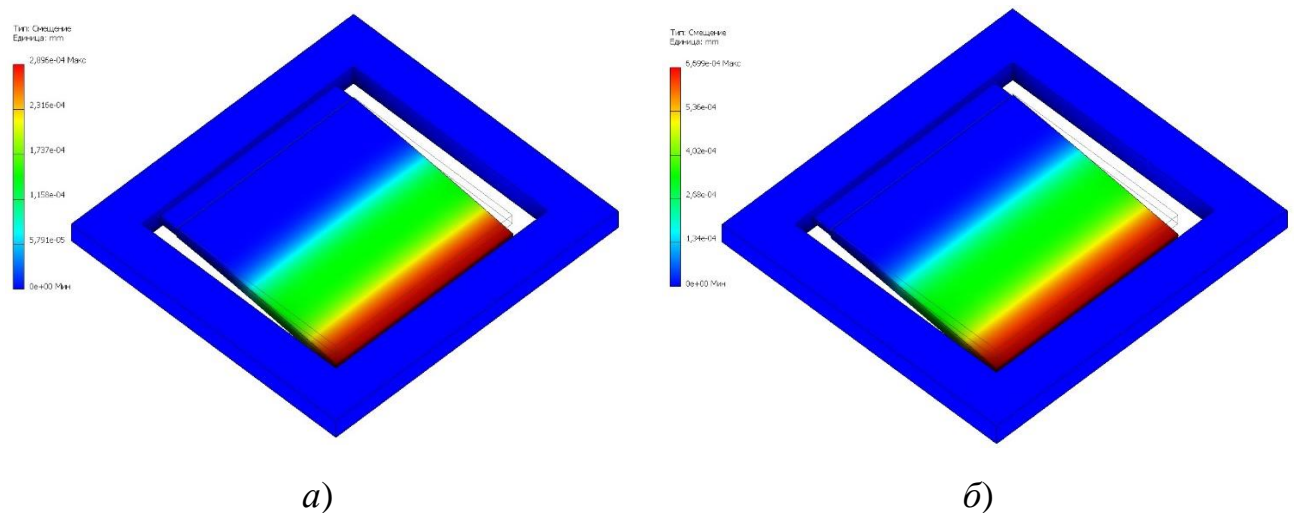


Рисунок 45 – Деформация ЧЭ при изменении его профиля: *а)* утонение ЧЭ вблизи заделки на 25% от начальной толщины; *б)* утонение ЧЭ вблизи заделки на 50% от начальной толщины

Исследования показали, что добавление перфорационных отверстий на ЧЭ общей длиной 25% от его ширины увеличивает перемещения его свободного края с 0,19 мкм до 0,22 мкм (на 16%), а отверстий общей длиной 50% от ширины ЧЭ – до

0,29 мкм (на 53%). Локальное уменьшение толщины ЧЭ на 25% от исходной увеличивает перемещения его свободного края с 0,19 мкм до 0,29 мкм (на 53%), а на 50% – до 0,67 мкм (на 253%). Дополнительный анализ деформаций чувствительного элемента при различных его топологиях представлен в Приложении Е.

#### 4.1.2 Влияние конструктивных параметров ОТЭ-модулятора на характеристики преобразователя линейного ускорения

Проведено исследование зависимости отражательной способности  $R$  от величины субмикрометрового зазора  $d$  между ЧЭ и призмой ОТЭ-модулятора. Формула, описывающая ОТЭ, показывает, что  $R$  зависит также от длины волны источника излучения  $\lambda$ , угла падения излучения на границу сред  $\theta$  и показателей преломления этих сред  $n_1, n_2$ . Величина чувствительности ОТЭ-модулятора  $S_R$  получена путём дифференцирования зависимости  $R(d)$  по зазору  $d$ . Погрешности, возникающие в значениях параметров компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием, могут оказывать влияние на его статические и динамические характеристики.

Проведено исследование зависимости отражательной способности и чувствительности от величины зазора между призмой ОТЭ-модулятора и ЧЭ при варьировании: угла падения излучения  $\theta$  (Рисунок 46) и длины электромагнитной волны источника  $\lambda$  (Рисунок 47).

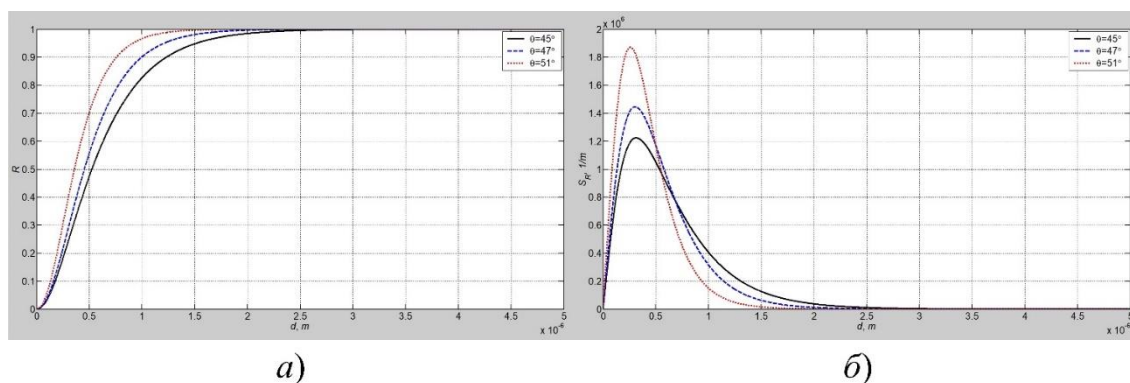


Рисунок 46 – Семейства характеристик ОТЭ-модулятора при варьировании угла падения излучения: а) зависимость отражательной способности от зазора; б) зависимость чувствительности от зазора

Представлены семейства характеристик ОТЭ-модулятора при варьировании угла падения излучения (Рисунок 46):  $\theta=45^\circ$  (непрерывная линия);  $\theta=47^\circ$  (штриховая линия);  $\theta=51^\circ$  (пунктирная линия).

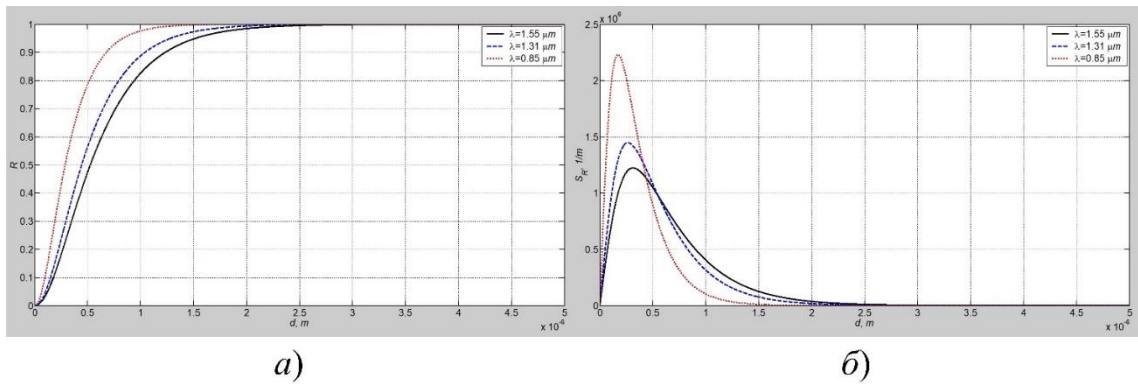


Рисунок 47 – Семейства характеристик ОТЭ-модулятора при варьировании длины электромагнитной волны источника: а) зависимость отражательной способности от зазора; б) зависимость чувствительности от зазора

Представлены семейства характеристик ОТЭ-модулятора при варьировании длины электромагнитной волны источника (Рисунок 47):  $\lambda=1,55$  мкм (непрерывная линия);  $\lambda=1,31$  мкм (штриховая линия);  $\lambda=0,85$  мкм (пунктирная линия).

Исследование показало, что значение максимальной чувствительности возрастает с увеличением угла падения, однако сама чувствительность быстрее снижается при отклонениях зазора между призмой и ЧЭ от значения, соответствующего максимальной чувствительности. Значение максимальной чувствительности увеличивается с уменьшением длины волны, но сама чувствительность быстрее снижается при отклонениях зазора между призмой и ЧЭ от значения, соответствующего максимальной чувствительности. Значение отражательной способности возрастает с уменьшением длины волны и увеличением зазора между призмой и ЧЭ.

Исследования зависимостей отражательной способности и чувствительности от величины зазора между призмой и ЧЭ при варьировании длины электромагнитной волны  $\lambda$  и угла падения к призме  $\theta$  показали, что при увеличении  $\theta$  или уменьшении  $\lambda$ : уменьшается диапазон допустимого участка работы, но возрастает максимальное значение чувствительности; происходит смещение пика чувствительности в сторону меньших перемещений.

Построены зависимости отражательной способности и чувствительности ОТЭ-модулятора от микроперемещений при варьировании показателей преломления сред  $n_1$  и  $n_2$  (Рисунок 48).

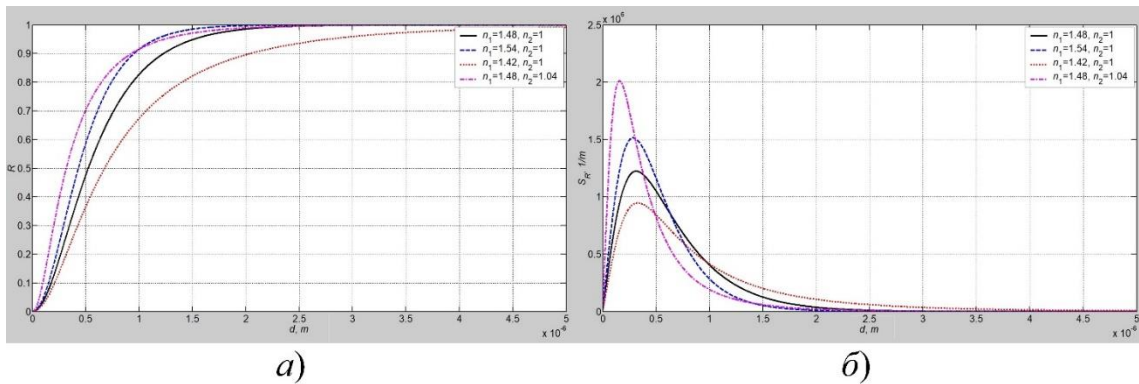


Рисунок 48 – Семейства характеристик ОТЭ-модулятора при варьировании показателей преломления сред: *a)* зависимость отражательной способности от зазора; *б)* зависимость чувствительности от зазора

Начальные значения  $n_1=1,48$  и  $n_2=1$  отклоняются на величину порядка 4%, т.е. моделирование (Рисунок 48) выполнено при использовании четырёх пар значений  $n_1$  и  $n_2$ :  $n_1=1,48$ ,  $n_2=1$  (непрерывная линия);  $n_1=1,54$ ,  $n_2=1$  (штриховая линия);  $n_1=1,42$ ,  $n_2=1$  (пунктирная линия);  $n_1=1,48$ ,  $n_2=1,04$  (штрихпунктирная линия). При уменьшении  $n_1$  и увеличении  $n_2$  уменьшается диапазон допустимого участка работы, но возрастает максимальное значение чувствительности. Также, при увеличении  $n_2$ , происходит смещение пика чувствительности в сторону меньших перемещений.

Для перехода к динамической модели компенсационного преобразователя ускорения модель ОТЭ-модуляторов была линеаризована. Построена зависимость погрешности нелинейности  $\Delta$  от значения координаты свободного края ЧЭ  $x$  (Рисунок 49).



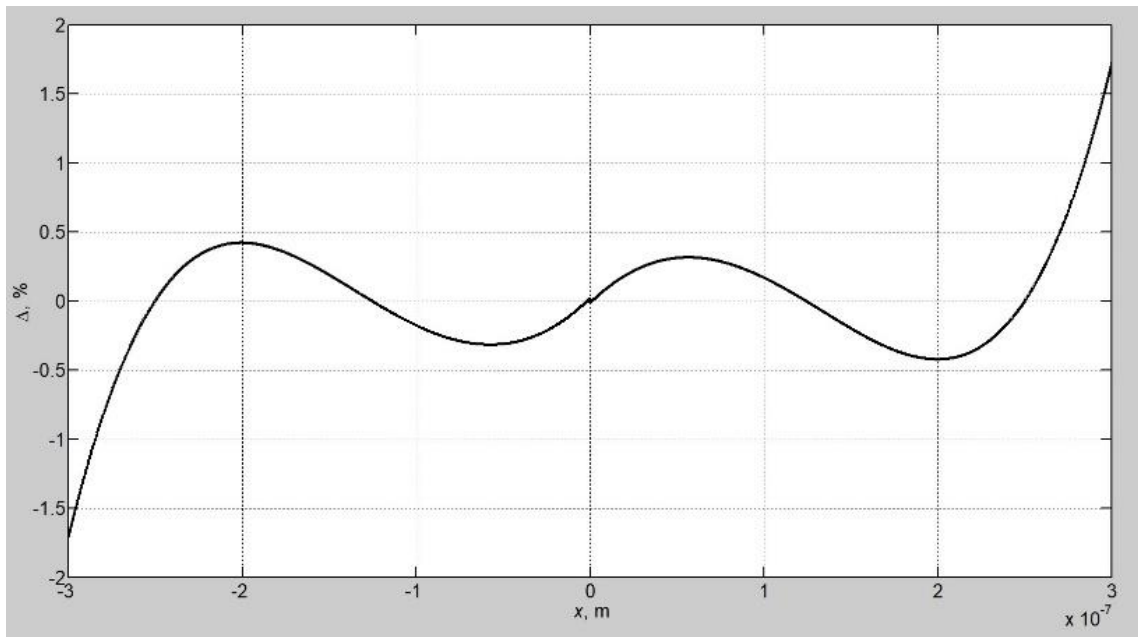


Рисунок 49 – Зависимость погрешности нелинейности от значения координаты свободного края ЧЭ

При перемещениях свободного края ЧЭ в диапазоне от минус 0,3 мкм до 0,3 мкм, погрешность нелинейности не превышает 2%.

#### 4.1.3 Влияние газового демпфирования на характеристики преобразователя линейного ускорения

Проведены исследования влияния газового демпфирования на характер переходного процесса разомкнутой системы (Рисунок 50) при входном измеряемом ускорении  $a = 98,1 \text{ м/с}^2 \approx 10g$ .

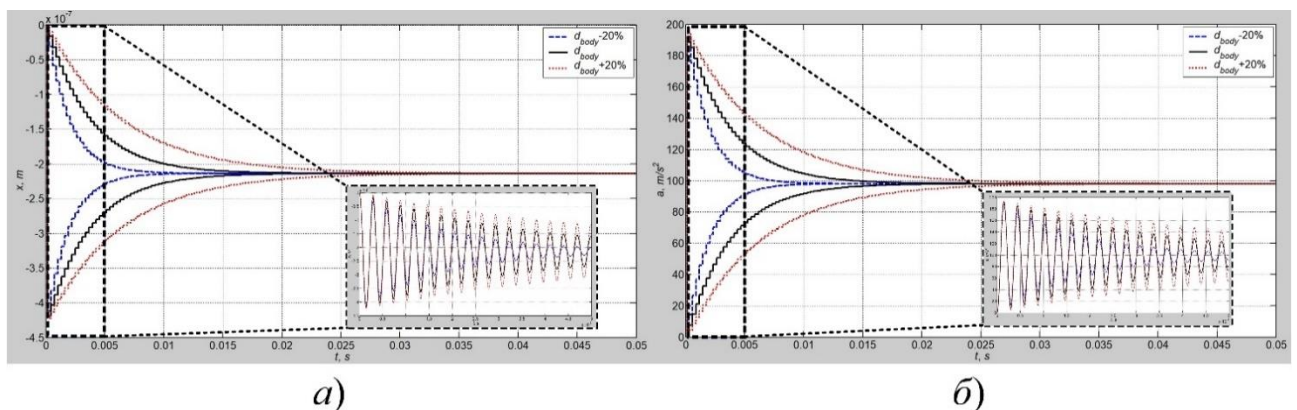


Рисунок 50 – Переходный процесс разомкнутой системы при изменении зазора между ЧЭ и корпусом: а) координата перемещения свободного края ЧЭ; б) значение измеренного ускорения

Результаты моделирования переходного процесса при изменении зазора между ЧЭ и корпусом  $d_{body}$  (Рисунок 50) справедливы для случая детектирования перемещений интерферометрическими средствами или при допущении, что пятно оптического туннелирования мало по отношению к общей площади ЧЭ. Переходные процессы (Рисунок 50), являющиеся затухающими колебаниями, в интервале времени 0–0,05 с представлены огибающими с дополнительной выноской увеличенного временного интервала 0–0,005 с. Зазор между ЧЭ и корпусом  $d_{body}$  влияет на коэффициент газового демпфирования, что приводит к изменению декремента затухания и времени переходного процесса. При уменьшении зазора на 20% по сравнению с его начальным значением время переходного процесса уменьшается в 2 раза (с 0,01 с до 0,005 с), а при увеличении – возрастает в 1,7 (до 0,017 с).

#### 4.1.4 Влияние коэффициента обратной связи на характеристики компенсационного преобразователя линейного ускорения

Для анализа погрешностей компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием и исследования его динамических характеристик в среде графического программирования разработана математическая модель (Рисунок 51).

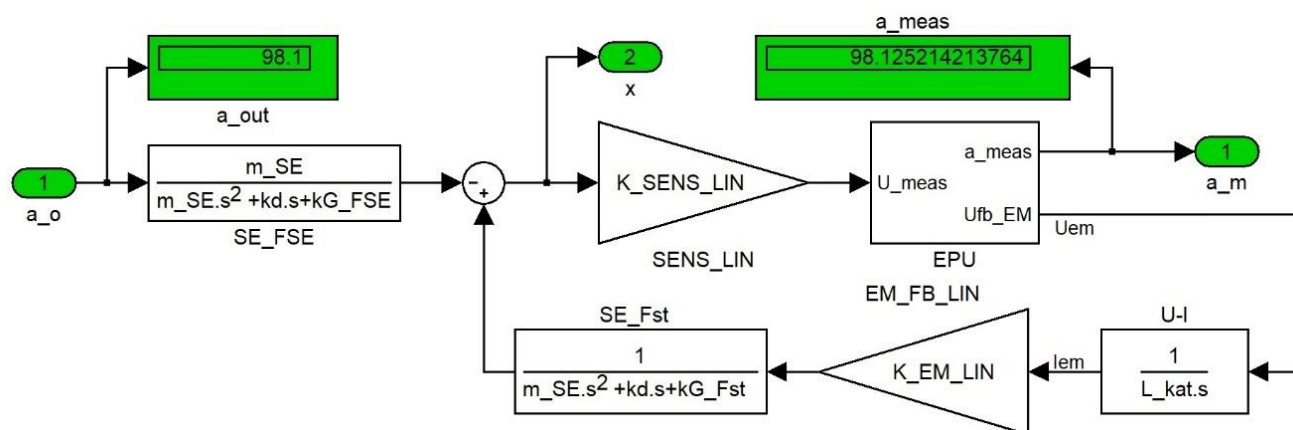


Рисунок 51 – Модель компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием в среде графического программирования

Модель микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений включает следующие блоки:

«*SE\_FSE*» – передаточная функция ЧЭ, описывающая зависимость координаты свободного края ( $x$ ) от измеряемого ускорения ( $a_o$ ); «*SENS\_LIN*» – линейная модель оптических модуляторов, фотоприёмников, преобразователей «ток-напряжение», усилителей; «*EPU*» – ЭБО; «*U-I*» – передаточная функция, связывающая напряжение на катушке ( $U_{em}$ ) с током в ней ( $I_{em}$ ); «*EM\_FB\_LIN*» – линейная модель электромагнитов; «*SE\_Fst*» – передаточная функция ЧЭ, описывающая зависимость координаты перемещения свободного края ( $x$ ) от значения стабилизирующей силы ( $Fst$ ). Предложенная модель предусматривает выбор типа оптического модулятора путём настройки значения блока «*SENS\_LIN*».

На динамические характеристики преобразователя влияют такие параметры, как, например, толщина ЧЭ, которая изменяет значение перерегулирования и величину перемещения свободного края в установившемся режиме, с которой связана гиперболической зависимостью [91].

Проведены исследования влияния значения коэффициента ОС  $K_{FB}$ , настраиваемого в блоке «*EPU*», на характер переходного процесса замкнутой системы (Рисунок 52) при входном измеряемом ускорении  $a = 98,1 \text{ м/с}^2 \approx 10g$ .

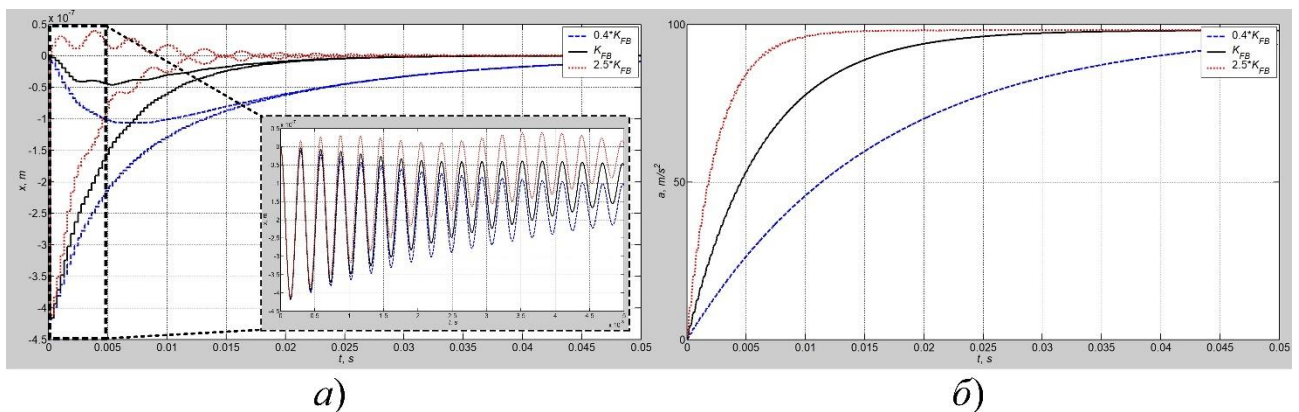


Рисунок 52 – Переходный процесс замкнутой системы при изменении значения коэффициента ОС: *а)* координата перемещения свободного края ЧЭ; *б)* значение измеренного ускорения

Переходный процесс (Рисунок 52–*а*), являющийся затухающими колебаниями, в интервале времени 0–0,05 с представлен огибающими с дополнительной выноской увеличенного временного интервала 0–0,005 с.

Увеличение коэффициента ОС пропорционально ускоряет переходные процессы, например, при увеличении  $K_{FB}$  в 2,5 раз время уменьшается с 0,018 с до 0,007 с, а при уменьшении в 2,5 раз – возрастает до 0,045 с, однако увеличение значения  $K_{FB}$  увеличивает колебательность: на графике « $2.5 * K_{FB}$ » (Рисунок 52–а, пунктирная линия) переходного процесса координаты свободного края ЧЭ видно усиление влияния дополнительной гармонической составляющей.

Одним из источников погрешности является изменение температуры. Изготовление всего ЧЭ из одного термостабильного материала, например плавленого кварца, а также измерение температуры и соответствующая коррекция результатов измерений обеспечивает меньшую зависимость показаний от температуры.

## **4.2 Анализ влияния внешних дестабилизирующих факторов на погрешности преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием**

### **4.2.1 Влияние температуры на погрешность преобразователя линейного ускорения**

Изменение температуры и поперечное ускорение, перпендикулярное к измеряемому, являются одними из основных внешних источников возникновения погрешностей. Температура влияет на изменение модуля упругости кварца  $E(T)$ , что вносит ошибку в значение выходного напряжения преобразователя ускорения.

Представлена зависимость температурной погрешности от ускорения (Рисунок 53) при изменении температуры в диапазоне от минус 40 °С до плюс 80 °С (при  $T = 20$  °С модуль упругости материала ЧЭ  $E_0 = 1,87 \cdot 10^{11}$  Па).

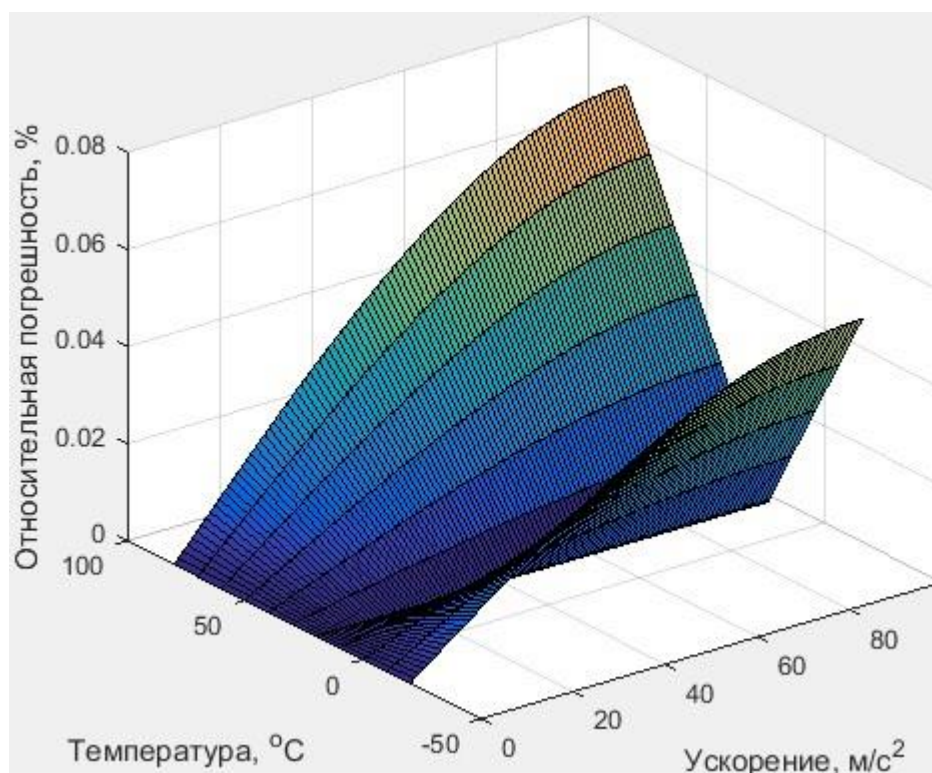


Рисунок 53 – Зависимость температурной погрешности от ускорения и температуры

Максимальное значение температурной погрешности составляет  $\delta_{max} \approx 0,07\%$  и достигается при  $a = 10g$ ,  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За счет малого температурного коэффициента модуля упругости кварцевого ЧЭ и использования дифференциальной схемы преобразователя с двумя каналами оптического считывания температура мало влияет на характеристики преобразователя ускорения.

#### 4.2.2 Влияние поперечного ускорения на погрешность преобразователя линейного ускорения

Для оценки влияния поперечного ускорения на характеристики преобразователя необходимо определить силы, действующие на ЧЭ, и величину отклонения ЧЭ за счет этих сил. Силу, обусловленную поперечным ускорением, можно разделить на нормальную составляющую, направленную вдоль оси  $OY$ , и тангенциальную – вдоль оси  $OX$ . Тангенциальная составляющая не действует вдоль оси чувствительности и не оказывает влияния на результаты измерений. Нормальная составляющая пропорциональна синусу угла наклона ЧЭ под действием измеряемого ускорения.

Получена зависимость погрешности поперечного ускорения от двух перпендикулярных ускорений (Рисунок 54) в диапазоне  $a_x = [0...10g]$  и  $a_y = [0...10g]$ .

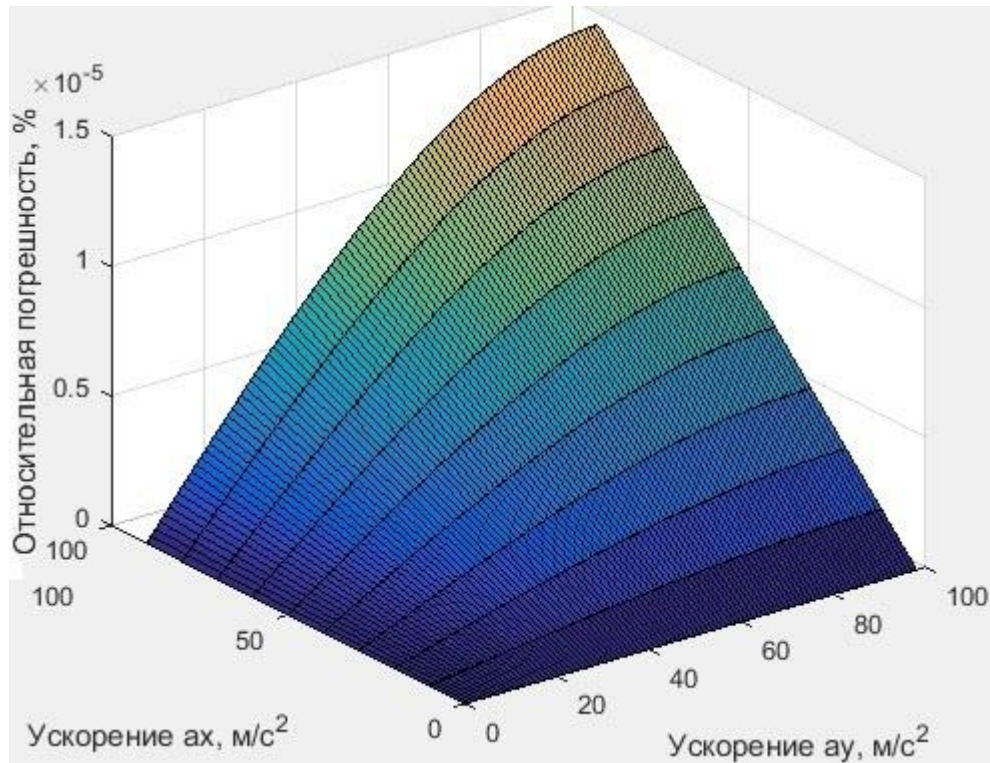


Рисунок 54 – Зависимость погрешности поперечного ускорения от двух перпендикулярных ускорений

В предлагаемой схеме преобразователя ускорения на основе оптического туннелирования рабочие перемещения ЧЭ составляют сотни нанометров. В связи с такими малыми рабочими перемещениями, которые индуцируются измеряемым линейным ускорением по оси  $OY$ , поперечная чувствительность является незначительной. Значение погрешности при измеряемом и поперечном ускорениях  $10g$  составляет около  $0,009\%$ .

#### 4.3 Минимально детектируемое линейное ускорение и динамический диапазон МОЭМ-преобразователя

Уровень минимального детектируемого линейного ускорения может быть определён как значение, которое будет распознано на уровне шумов. Шумами являются неустранимые возмущения, отличные от полезного сигнала. Наличие шумовых явлений электрического или оптического характера обусловлено

ограничение чувствительности преобразователя. В оптических системах, в частности МОЭМ-преобразователе линейного ускорения, наибольшее влияние оказывают шумовые явления фотоприёмника. В фотоприёмнике выделяют такие шумы, как: дробовой шум, обусловленный дискретной природой электронов; тепловой шум, возникающий из-за отклонений сопротивления приёмника; шумы темнового тока, характер которого также случаен. Дробовой шум может быть описан следующей формулой:

$$I_{ShotN}^2 = 2 \cdot e_0 \cdot I_{PhMean} \cdot \Delta f,$$

где  $e_0$  – заряд электрона,  $I_{PhMean}$  – среднее значение фототока,  $\Delta f$  – ширина частотной полосы фотоприёмника.

Среднее значение фототока  $I_{PhMean}$  может быть оценено по уравнению:

$$I_{PhMean} = \frac{S_{PhD} \cdot P_0 \cdot k_{los} + I_{Dark}}{2},$$

где  $S_{PhD}$  – токовая чувствительность фотодиода,  $P_0$  – оптическая мощность источника излучения,  $k_{los}$  – коэффициент суммарных потерь,  $I_{Dark}$  – темновой ток.

Тепловой ток может быть определён из соотношения:

$$I_{ThermalN}^2 = \frac{4 \cdot k_B \cdot T \cdot \Delta f}{R_{Load}},$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $R_{Load}$  – активное сопротивление нагрузки фотоприёмника.

Значение шумовой составляющей темнового тока может быть определено следующим образом:

$$I_{DarkN}^2 = 2 \cdot e_0 \cdot I_{Dark} \cdot \Delta f.$$

Полный шумовой ток фотоприёмника может быть найден из формулы:

$$I_N^2 = I_{ShotN}^2 + I_{ThermalN}^2 + I_{DarkN}^2,$$

которая после выполнения подстановок примет вид:

$$I_N = \sqrt{e_0 \cdot \Delta f \cdot (S_{PhD} \cdot P_0 \cdot k_{los} + I_{Dark}) + \frac{4 \cdot k_B \cdot T \cdot \Delta f}{R_{Load}} + 2 \cdot e_0 \cdot I_{Dark} \cdot \Delta f};$$

или, если выполнить упрощения:

$$I_N = \sqrt{\left( e_0 \cdot (S_{PhD} \cdot P_0 \cdot k_{los} + 3 \cdot I_{Dark}) + \frac{4 \cdot k_B \cdot T}{R_{Load}} \right) \cdot \Delta f}.$$

При следующих значениях параметров: ширина частотной полосы фотоприёмника  $\Delta f=10$  МГц, токовая чувствительность фотодиода  $S_{PhD}=0,3$  А/Вт, оптическая мощность источника излучения  $P_0=1$  мВт, коэффициент суммарных потерь  $k_{los}=0,95$ , темновой ток  $I_{Dark}=10$  нА, температура  $T=297$  К, сопротивление нагрузки  $R_{Load}=20$  кОм; полный шумовой ток равен  $I_N=21,55$  нА, т.е. его значение одного порядка со значением темнового тока. При таком значении шумового тока выходное значение преобразователя  $a_N=0,03$  м/с<sup>2</sup>. Значение минимального ускорения  $a_{min}$ , различимого на уровне шумов, выбрано из соотношения:

$$a_{min} = 2 \cdot a_N;$$

и составляет  $a_{min}=0,06$  м/с<sup>2</sup>.

Динамический диапазон, представляющий собой допустимый диапазон изменения входного воздействия, МОЭМ-преобразователя линейного ускорения может быть определён из отношения максимально допустимого и минимально детектируемого ускорений:

$$D_{sens} = 20 \cdot \lg \left| \frac{a_{max}}{a_{min}} \right|,$$

где  $a_{max}$  – максимально допустимое измеряемое ускорение,  $a_{min}$  – минимально детектируемое ускорение.

При значениях параметров, описанных ранее, и максимальном значении измеряемого ускорения  $a_{max}=100$  м/с<sup>2</sup> динамический диапазон составляет  $D_{sens}=64,4$  дБ. Следует отметить, что при значении ширины полосы  $\Delta f=10$  кГц минимально детектируемое ускорение составит  $a_{min}=0,002$  м/с<sup>2</sup>, а динамический диапазон увеличится до  $D_{sens}=94,4$  дБ.



#### **4.4 Разработка алгоритма повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения**

На основе анализа целого числа полос интерференционной картины с помощью интерферометра измеряют микроперемещения ЧЭ, возникающие под действием ускорения. При этом абсолютная погрешность измерения не превышает значение длины волны источника излучения.

Динамические смещения с высокой чувствительностью и погрешностью порядка 5 нм можно определить с помощью дополнительных средств, например с использованием оптоэлектронного метода регистрации сигнала лазерного интерферометра в совокупности с алгоритмом обработки [97]. Обработка предлагаемым грубо-точным методом позволяет уменьшить погрешность измерений МЭМС-преобразователя ускорений с оптическим узлом считывания на основе интерферометра Фабри-Перо. При таком подходе не только подсчитывается целое число полос интерференционной картины, представляющих собой грубое значение измерений, но и анализируется дробная часть полосы, в ходе чего формируется точная составляющая измерений (так называемая добавка). При этом анализ дробной части полосы выполняется исходя из результатов измерения оптической мощности одного из каналов регистрации в пределах выделенных интервалов.

МОЭМ-преобразователь линейного ускорения с алгоритмом повышения точности интерферометрического считывающего узла может быть использован для измерения высокочастотных виброускорений.

##### **4.4.1 Структурная схема преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов**

В качестве ЧЭ в оптических преобразователях ускорения обычно используется инерционная эталонная масса в виде твёрдого тела, которая крепится к основанию или базе гибкими элементами, например, пружинами или торсионами. Одним из инженерных решений является ЧЭ в виде квадратной плоскопараллельной пластины, подвешенной на двух G-образных пружинах,

которые закреплены на серединах её противоположенных краёв и лежат в плоскости ЧЭ. Интерферометрическим методом детектируются перемещения, нормальные к плоскости пластины [98]. Перемещения пластины могут происходить и вдоль её плоскости. В этом случае пластина крепится за углы четырьмя взаимно параллельными плоскими пружинами, которые позволяют ей двигаться только вдоль одной оси. Схема конструкции с продольным перемещением пластины (ЧЭ) представлена на рисунке (Рисунок 55).

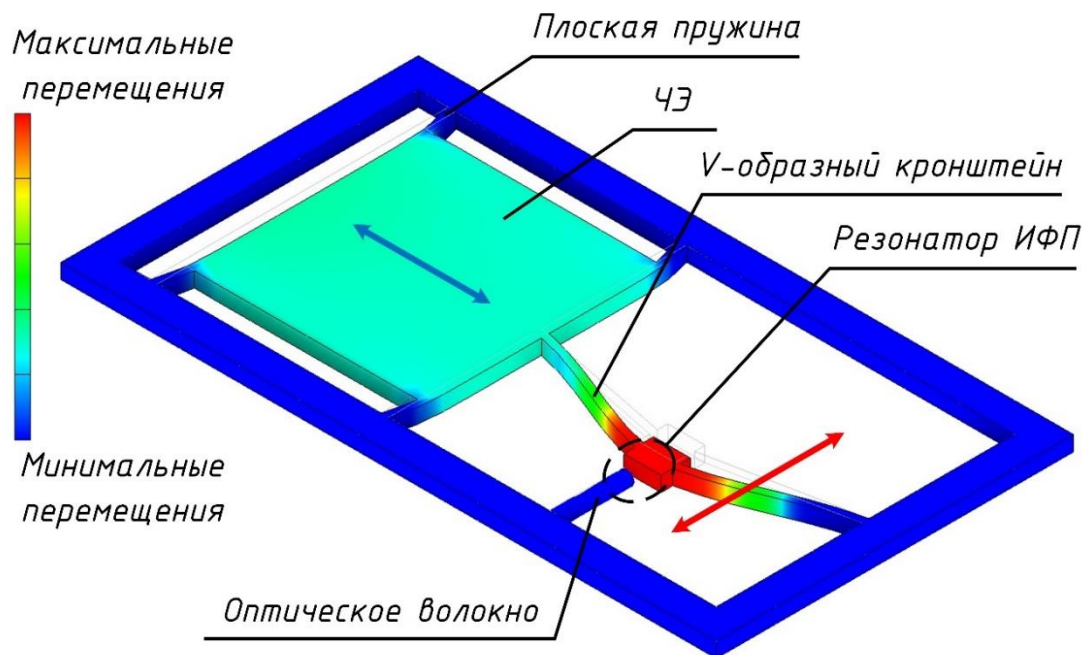


Рисунок 55 – Схема конструкции с продольным перемещением ЧЭ

Перемещения усиливаются кронштейном V-образной формы. Зеркало, расположенное посередине V-образного кронштейна, и торцевая поверхность сколотого оптического волокна образуют резонатор интерферометра [99]. Также используются балочные элементы, например в виде простых в изготовлении пластин из кварца. В таком случае анализируется не изменение положения ЧЭ, а его деформация. При реализации грубо-точного метода для съёма информации в преобразователе ускорения предлагается использовать интерферометр Фабри-Перо и блоки обработки и преобразования.

При рабочих перемещениях ЧЭ порядка единиц микрометров результат обычной обработки выходных сигналов интерферометра содержит достаточно большую погрешность измерений, связанную с частотой дискретизации данного

способа получения информации, диапазоном измерения и искаженностью сигналов случайными помехами различной природы. Для повышения устойчивости к влиянию случайных помех можно задействовать алгоритмы, основанные на преобразовании Фурье. Но такие алгоритмы требуют наличия полной реализации сигнала, что ограничивает их быстродействие. Поэтому предпочтение отдаётся использованию рекуррентных алгоритмов обработки дискретной последовательности отсчётов интерферометрического сигнала [100]. При применении гомодинных лазерных интерферометров возникает квадратурная фазовая ошибка, вызванная перекрестными помехами во время расщепления луча [101]. Один из недостатков гетеродинных лазерных интерферометров – сложность оптической схемы, требующей дополнительных оптических компонентов, обусловленная использованием пространственно разделённых лучей с разными частотными составляющими [102].

Использование грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов, основанного на совместной аналоговой и цифровой обработке, позволяет улучшить точностные характеристики МОЭМ-преобразователя ускорения без усложнения оптической схемы. К грубым отсчётам, связанным с долями ширины полосы интерференционной картины, добавляются точные отсчёты, определяемые по величине сигналов в каждом интервале. Грубые отсчёты формируются в системе двух интерферометров Фабри-Перо, максимумы на интерферометрических картинах которых смещены на четверть ширины полосы. Связанный с шириной полосы период  $\tau$  аналогового выходного сигнала каждого интерферометрического канала делится на четыре интервала. С учётом двух каналов в каждой полосе интерференционной картины можно выделить восемь интервалов, анализ которых позволяет организовать переключение между каналами и сформировать добавку. Количество разрядов выходного значения преобразователя, выделяемых на добавку, может варьироваться в зависимости от реализуемой точности.

Разработана структурная схема МОЭМ-преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов (Рисунок 56). На его выходе формируется  $n$ -разрядный код, в котором  $m$  разрядов выделяются на

подсчёт целых отсчётов (грубая составляющая);  $k=(n-m)$  разрядов формируют добавку (точная составляющая). Например, для представленной структурной схемы (Рисунок 56) значения  $n$ ,  $m$ ,  $k$  составляют 12; 6 и 6 соответственно.

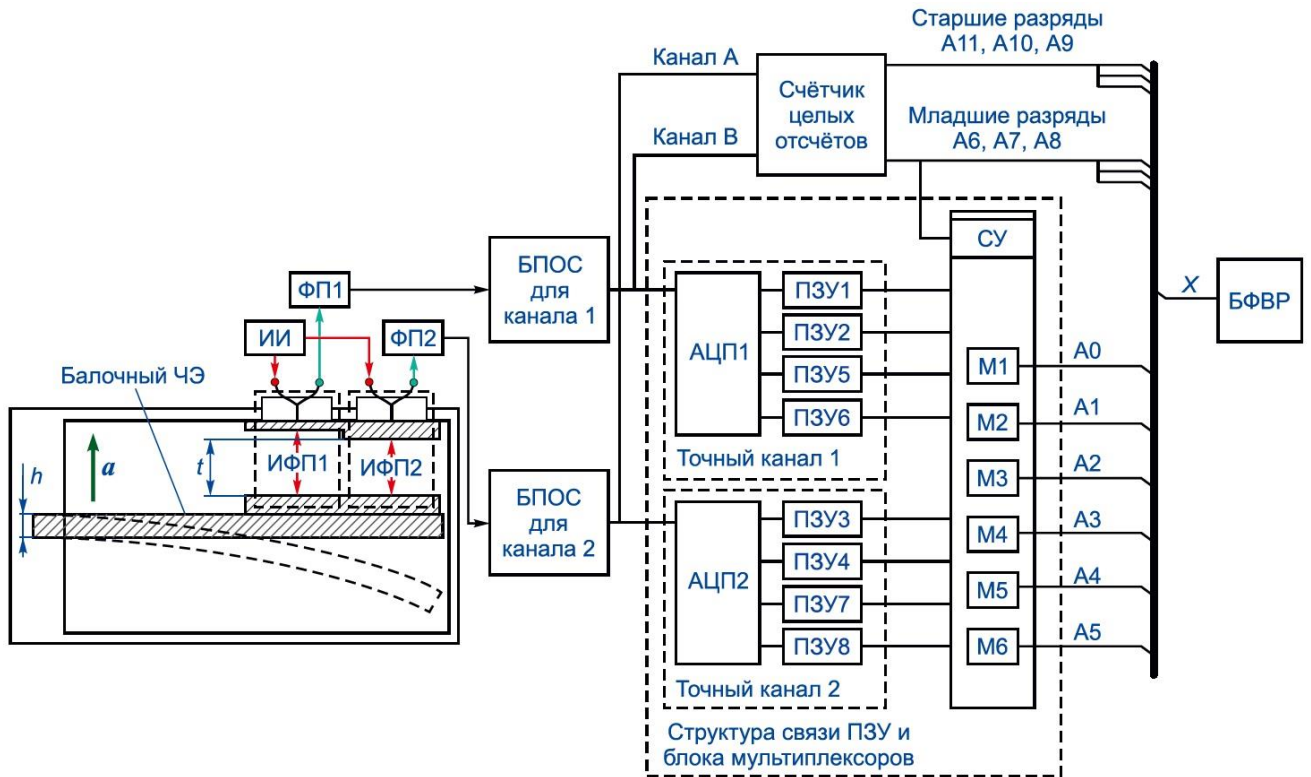


Рисунок 56 – Структурная схема МОЭМ-преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки сигналов

Структурная схема содержит следующие элементы: балочный ЧЭ толщиной  $h$ ; два интерферометрических канала; блоки предварительной обработки сигналов (БПОС) для канала 1 и канала 2; блоки «Точный канал 1» и «Точный канал 2»; мультиплексоры М1–М6; схему управления (СУ) мультиплексорами и блок подсчёта целых отсчётов. Интерферометрические каналы включают источник излучения ИИ, блоки интерферометров Фабри-Перо ИФП1, ИФП2 и фотоприёмники ФП1, ФП2. Блоки предварительной обработки сигналов состоят из преобразователя «ток-напряжение» и усилителя. Блоки «точный канал 1» и «точный канал 2» содержат аналогово-цифровые преобразователи АЦП1, АЦП2 и постоянные запоминающие устройства ПЗУ1, ..., ПЗУ8 для хранения данных о добавке. При этом добавка представляет собой добавочный двоичный код, однозначно связанный с мощностью сигнала на каждом из восьми выделенных

интервалов. Счётчик целых отсчётов содержит компараторы и логическую схему обработки. Блок мультиплексоров, в зависимости от управляющих сигналов, с помощью ПЗУ1, ..., ПЗУ8 формирует на выходе преобразователя добавку.

Для корректного определения направления ускорения требуются два оптических канала схемы. Оптическое излучение источника модулируется в зависимости от микроперемещений ЧЭ  $t$ , вызванных измеряемым ускорением  $a$ , и поступает на фотоприемники. Оптический сигнал преобразуется в фототок, а затем – в напряжение, пропорциональное оптической мощности. Выходное напряжение усиливается и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в двоичный код, который подаётся на постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и является адресом ячейки, где хранится информация о добавочном сигнале. Так как обработка грубо-точным методом предполагает деление периода сигнала каждого канала на четыре равных интервала, то в каждом канале расположены четыре ПЗУ.

Грубую составляющую результатов измерений формирует счётчик целых отсчётов, реализованный на основе компаратора и последующей логической схемы обработки. На выходе счётчика формируются целые отсчёты значений микроперемещений в двоичном коде.

В зависимости от номера интервала двоичный код – адрес ячейки памяти – поступает в соответствующее ПЗУ. Далее из ПЗУ выходное двоичное число передаётся на мультиплексоры, управляемые младшими разрядами счётчика целых отсчётов. Это обеспечивает формирование добавки в виде шести разрядов двоичного кода, уточняющей грубые результаты. Конкатенация целых отсчётов и добавки формирует выходное число  $X$ .

При условии, что целый отсчёт равен  $0,4 \cdot 10^{-7}$  м при количестве разрядов 64, итоговая погрешность составляет около  $0,006 \cdot 10^{-7}$  м. С помощью такого метода грубо-точной обработки интерференционных сигналов можно уменьшить погрешность измерений более чем на порядок.

#### 4.4.2 Математическая модель двухканального интерференционного узла считывания информации

Интерференционные информационно-измерительные системы относят к самым чувствительным и точным. Фазовые сдвиги можно измерять с высокой ( $10^{-3}$ – $10^{-6}$  рад) точностью, и при малой рабочей длине волны принципиально достижимы высокие точностные характеристики.

Теория многопроходных интерферометров определяет зависимость пропускания  $T$  интерферометра от фазового набега  $\delta$  между зеркалами с отражательной способностью  $R$ , которая описывается формулой Эйри [93]:

$$T(\delta[t(a)]) = (1-R)^2 / \left( (1-R)^2 + 4 \cdot R \cdot \left( \sin(\delta[t(a)]/2) \right)^2 \right).$$

Фазовый набег  $\delta$  рассчитывают [93] по формуле:

$$\delta[t(a)] = (4 \cdot \pi \cdot t(a)) / \lambda,$$

где  $t$  – расстояние между зеркалами интерферометра (база интерферометра);  $a$  – измеряемое ускорение;  $\lambda$  – длина волны излучения в среде между зеркалами.

Коэффициент отражения варьируется в диапазоне 0 – 1. Представлена зависимость пропускания  $T$  интерферометра от перемещения  $t$  при различных значениях отражательной способности  $R$  (Рисунок 57).

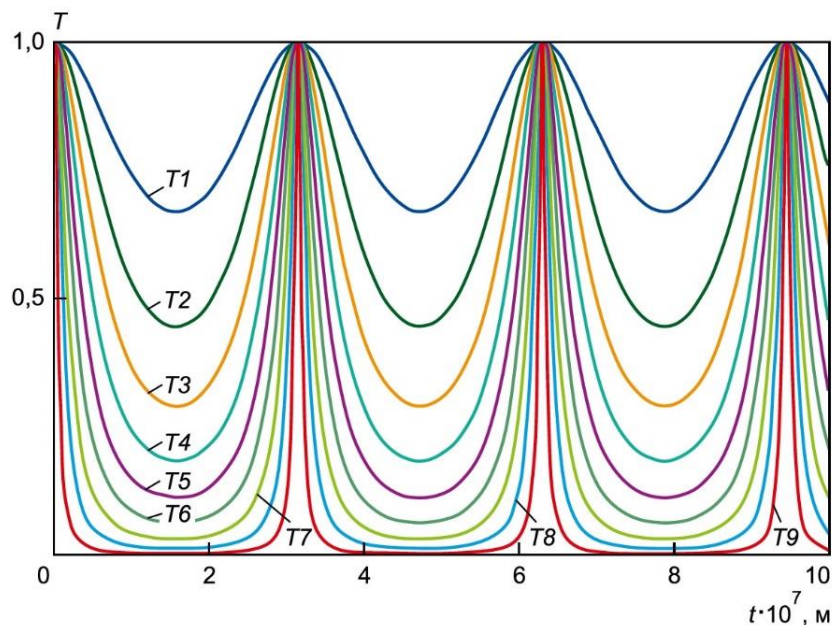


Рисунок 57 – Зависимость пропускания  $T$  интерферометра от перемещения  $t$  при  $R=0,1 \dots 0,9$  – кривые  $T1, T2, \dots, T9$  соответственно

Результаты измерений перемещений порядка  $0,2 - 2,7$  мкм традиционным интерферометрическим методом будут содержать большую погрешность, что делает неэффективным использование этого метода.

Отражательная способность  $R$  существенно влияет на зависимость пропускания интерферометра от перемещения. Резкие пики максимумов позволяют считывать информацию с точностью до  $\lambda/2$ . Для работы со значениями в дробной части полосы необходимо получить более плавную зависимость пропускания интерферометра от базы  $t$ .

Интерференционная картина при изменении расстояния  $t$  между зеркалами имеет ярко выраженные экстремумы. Для получения приемлемой чувствительности в зонах дробной части полосы проведено моделирование характеристик при различных значениях отражательной способности зеркал интерферометра. Отражательная способность зеркал  $R$  с интервалом  $\Delta R=0,1$  варьируется в диапазоне  $0,1 - 0,9$  для кривых  $T1 - T9$  (Рисунок 57).

При отражательной способности, близкой к единице, зависимость пропускания интерферометра от перемещения представляет собой последовательность максимумов, индицируется только момент перехода через определённое значение расстояния  $t$ . При уменьшении отражательной способности  $R$  зависимости будут более плавными. В то же время сильное уменьшение коэффициента отражения приводит к уменьшению перепадов пропускательной способности интерферометра. Так, при отражательной способности  $R=0,9$  диапазон пропускания составляет  $0 - 1$ , а при  $R=0,1 - 0,75 - 1$ .

При использовании зеркал с промежуточными значениями отражательной способности, например  $R=0,3$ , обеспечивается возможность работы в дробной части полосы при достаточно большом диапазоне перепадов пропускательной способности интерферометра.

Интервалы между максимумами выбираются для обеспечения приемлемой чувствительности к перемещению в пределах каждого интервала. Необходимо определять границы, что позволит согласовать переходы от одного интервала к другому и обеспечить учёт показаний при переходе между ними.

Представлены зависимости пропускания двух интерферометров от перемещения (Рисунок 58).

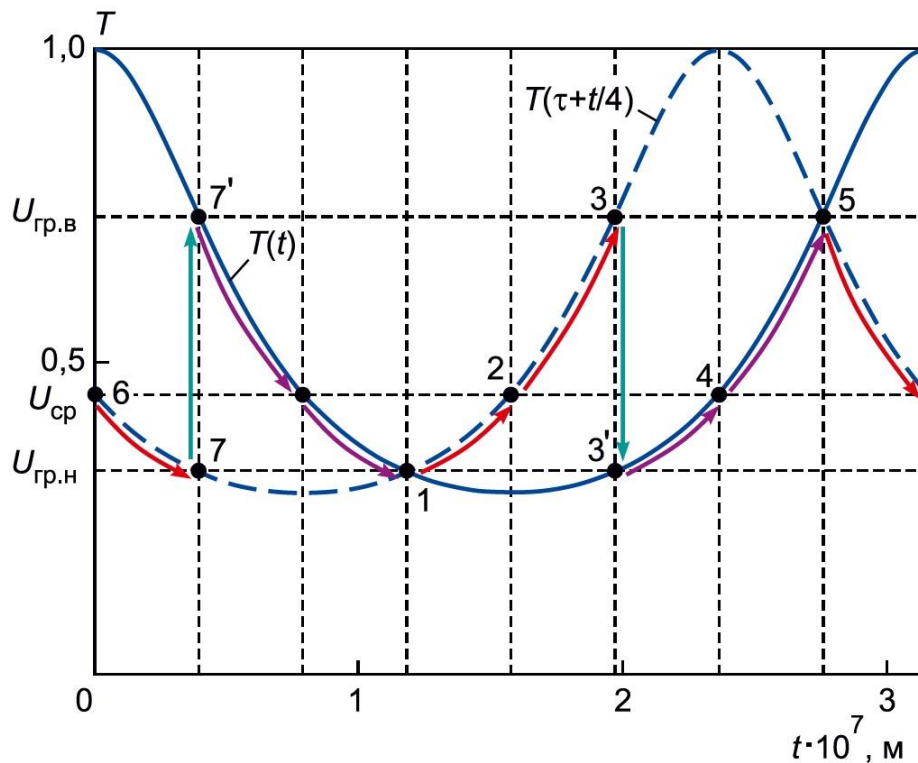


Рисунок 58 – Зависимость пропускания  $T$  двух интерферометров от перемещения  $t$  при  $U_{гр.н}=0,32$  В;  $U_{гр.в}=0,74$  В;  $U_{ср}=0,45$  В; стрелками показано переключение между каналами при движении в сторону увеличения зазора

Для выбора уровня напряжения срабатывания период зависимости пропускания интерферометра от перемещения делится на четыре равных интервала, и фиксируются значения выходных оптических сигналов, соответствующие границам выделенных областей. Уровень, где графики зависимостей пересекают эти границы, определяет напряжение срабатывания  $U_{ср}$ . Точки 2, 4, 6, 8 определяются пересечением сигналов каналов с напряжением срабатывания, а точки 1, 7 и 3, 5 – это нижняя  $U_{гр.н}$  и верхняя  $U_{гр.в}$  граничные точки, ниже и выше которых соответственно начинаются зоны с низкой чувствительностью. В указанных зонах работать нецелесообразно, поэтому организуют переключения между каналами. Переключения между интерферометрическими каналами происходят в точках 1, 3, 5, 7. Так как в пределах каждой зоны чувствительность не является постоянной, значения пересчитываются в соответствии с формой сигнала.



Для подсчёта целого числа полос сигналы обоих оптических каналов обрабатывают с использованием компараторов и логических схем, разработанных на основе уравнений движения в стороны увеличения и уменьшения зазора (переключение между каналами при движении в сторону увеличения зазора (Рисунок 58) показано стрелками). Напряжение срабатывания выбирается в точках 2, 4, 6, 8.

#### 4.4.3 Алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения

Предложен алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины (Рисунок 59), позволяющий увеличить чувствительность к субмикрометровым перемещениям.

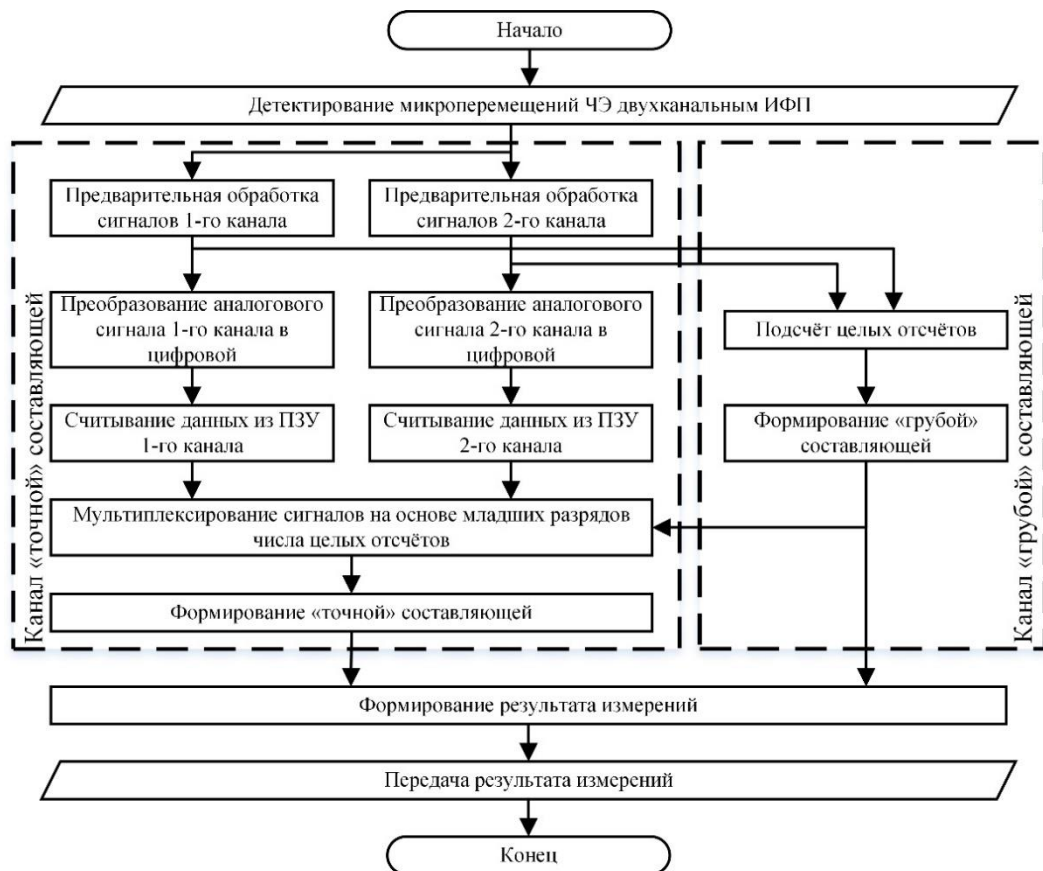


Рисунок 59 – Алгоритм функционирования преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки информации

Сигналы фотоприёмников преобразуются в напряжения, которые усиливаются и поступают в блок для подсчёта целых отсчётов с помощью компараторов. С выхода счётчика двоичный код (например, шестиразрядный) поступает в блок формирования выходного результата (БФВР), и является его грубой составляющей. Дополнительно анализируется каждый интервал между максимумами и подсчитывается промежуточный результат внутри него.

Формирование добавки происходит путём подачи сигналов каналов *A*, *B* (Рисунок 56) на АЦП, с которых двоичный код, являющийся адресом, поступает на ПЗУ (для первого канала – ПЗУ1, ПЗУ2, ПЗУ5, ПЗУ6; для второго канала – ПЗУ3, ПЗУ4, ПЗУ7, ПЗУ8). Данные ячеек ПЗУ по выбранным адресам в виде двоичного кода поступают на мультиплексоры, на выходе которых, в зависимости от участка работы, формируется добавка. Например, для работы на первом участке на управляющий вход мультиплексоров поступает кодовая комбинация «001», и тогда на выходе каждого мультиплексора появится сигнал, пришедший из ПЗУ1. Аналогично, кодовые комбинации (010, 011, 100, 101, 110, 111, 000) остальных участков поступают на вход мультиплексоров в виде двоичного кода, соответствующего номеру участка, на котором идет работа, и обеспечивают подключение соответствующего ПЗУ. Структура связи ПЗУ и блока мультиплексоров для определения добавки представлена на рисунке (Рисунок 56).

С учётом текущего участка работы на выходе мультиплексоров формируется добавка в виде двоичного кода, например шестиразрядного. Двоичный код с блока мультиплексоров поступает в БФВР, дополняя грубую составляющую точной.

При формировании шестиразрядного двоичного кода грубого канала один отсчёт составляет около 40 нм. С использованием также шести разрядов для формирования добавки в полном диапазоне одного грубого отсчёта можно выделить 64 уровня, что будет соответствовать итоговой погрешности измерения примерно 0,6 нм. В результате формируется двенадцатиразрядный код, обеспечивающий малую погрешность измерения, зависящую от погрешностей аналоговых сигналов.

Смоделирована работа преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов. На основе структурной схемы и алгоритма функционирования преобразователя, разработана математическая модель, графическое представление которой приведено на иллюстрации (Рисунок 60).

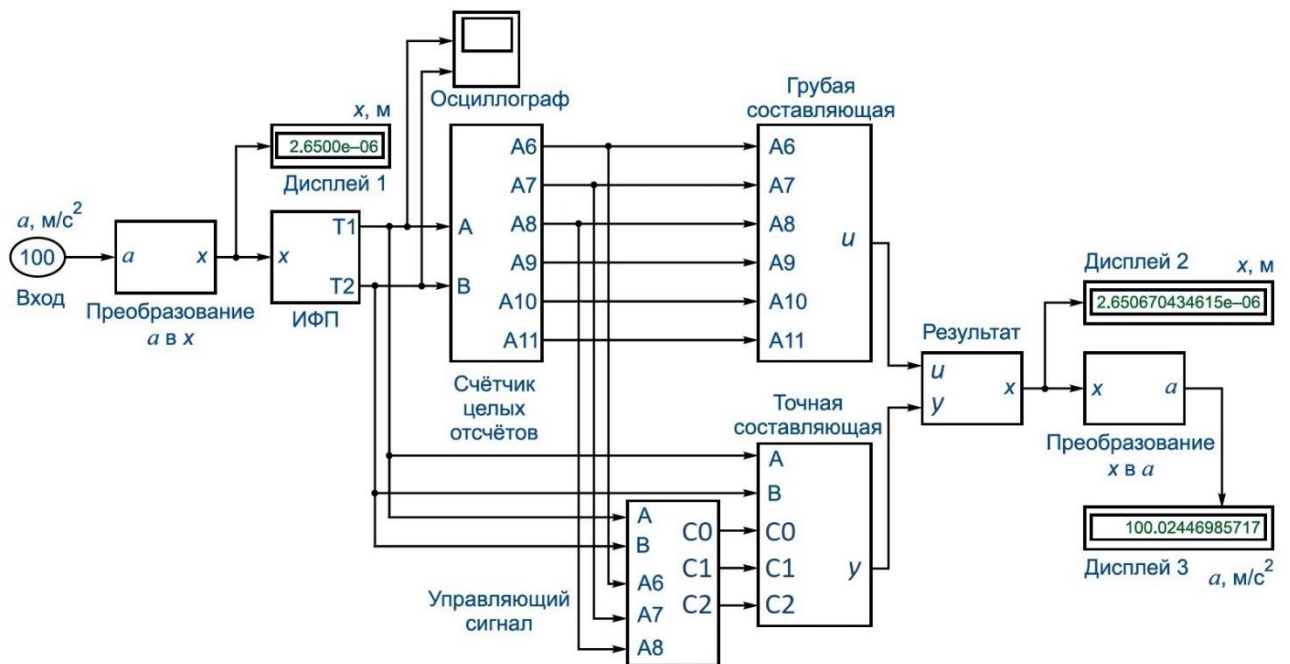


Рисунок 60 – Математическая модель преобразователя ускорения на основе грубо-точного метода обработки интерференционных сигналов

Входное ускорение приводит к деформациям ЧЭ. Значение перемещения подаётся на блок интерферометра Фабри-Перо (ИФП), который представляет собой зависимость пропускания интерферометра от перемещения. На выходе блока моделирования работы ИФП формируются сигналы каналов  $A$ ,  $B$ . Часть сигналов каналов поступает в блок счётчика целых отсчётов, в котором реализованы компараторы и логические схемы, осуществляющие подсчёт целого числа полос интерференционной картины. Старшие шесть разрядов с выхода счётчика целых отсчётов поступают в блок формирования грубой составляющей результата. Другая часть сигналов поступает в блок определения точной составляющей, который включает в себя АЦП, ПЗУ и мультиплексоры, управляющиеся тремя младшими разрядами счётчика целых отсчётов. Конкатенация грубого и точного

результатов формирует выходное значение, зависящее от воздействующего линейного ускорения.

Например, при подаче на вход ускорения  $a=100 \text{ м/с}^2$ , производящего перемещение  $x=2,65 \text{ мкм}$ , на выходе формируется код, значение которого соответствует перемещению  $x=2,6507 \text{ мкм}$ , производимому ускорением  $a=100,02 \text{ м/с}^2$ . Грубо-точный метод обработки позволяет интерферометрической системе измерять перемещения порядка десятков и единиц нанометров. Погрешность преобразования составляет десятые доли нанометров для перемещения, сотые доли метра, делённого на секунду в квадрате, – для линейного ускорения, и не превышает 0,02 %.

#### **4.5 Экспериментальное исследование параметров узлов преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием**

Проведены полунатурные исследования оптического туннельного эффекта. К торцевой поверхности плоскопараллельной пластины толщиной 0,63 мм, выполненной из кварцевого стекла КУ-1, на оптически прозрачный клей, полимеризующийся в ультрафиолетовом излучении, закреплено оптическое волокно. В торец пластины введено видимое оптическое излучение. При этом внутри пластины сохранялось полное внутреннее отражение.

Визуально проверено наличие перехода оптического излучения из одного оптического элемента в другой: в треугольную призму и плоскопараллельную пластину.

Для треугольной призмы был проведён следующий эксперимент: призма ставилась на пластину и через небольшой промежуток времени на границу сред добавлялась капля спиртового раствора. Эксперимент проводился при отсутствии окружающего освещения. Показан переход излучения из пластины в треугольную призму при наличии воздушного зазора и оптическом контакте через спиртовой раствор (Рисунок 61).

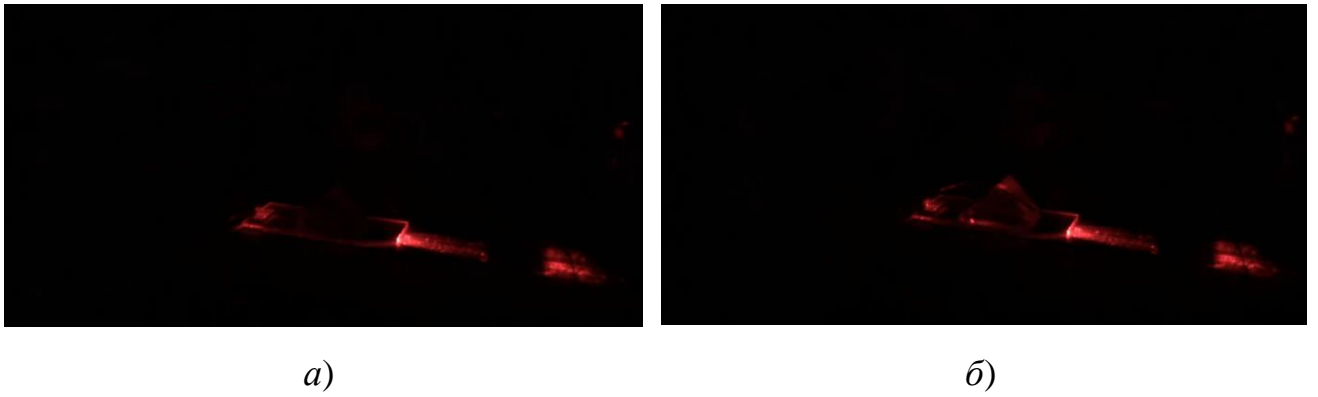


Рисунок 61 – Результаты эксперимента: *а)* до добавления спиртового раствора; *б)* после добавления

Для получения количественных характеристик об энергии, уходящей из одной пластины (большой) в другую (малую), на торец малой кварцевой пластины на оптически прозрачный клей приклеен фотодиод. Представлена схема регистрации туннелируемой оптической мощности (Рисунок 62).

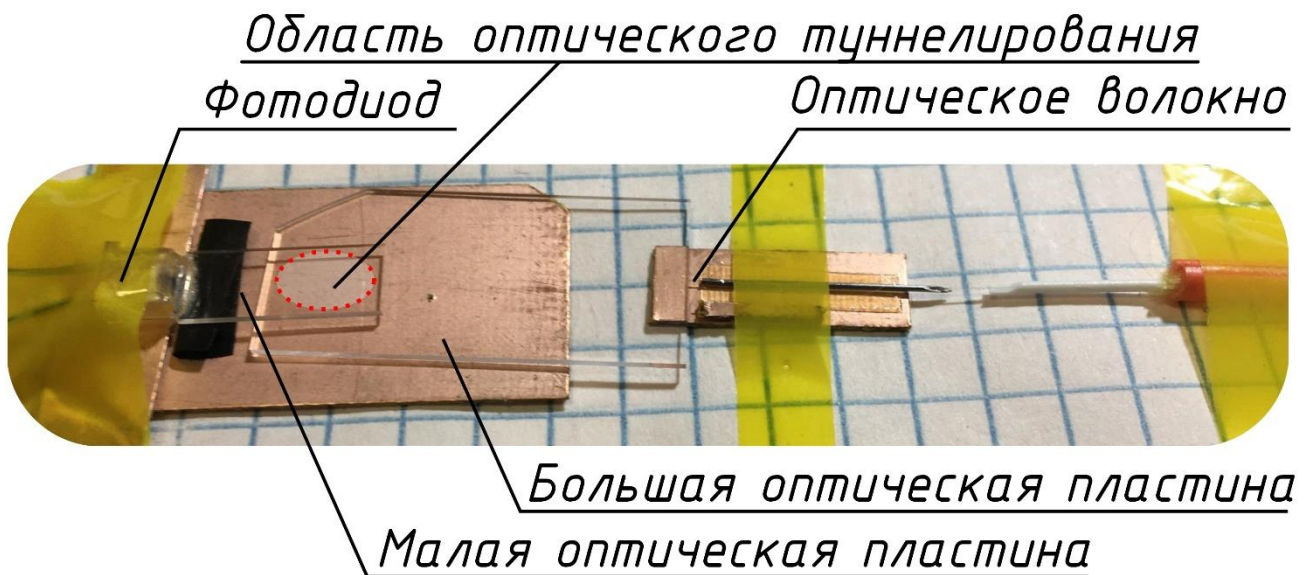
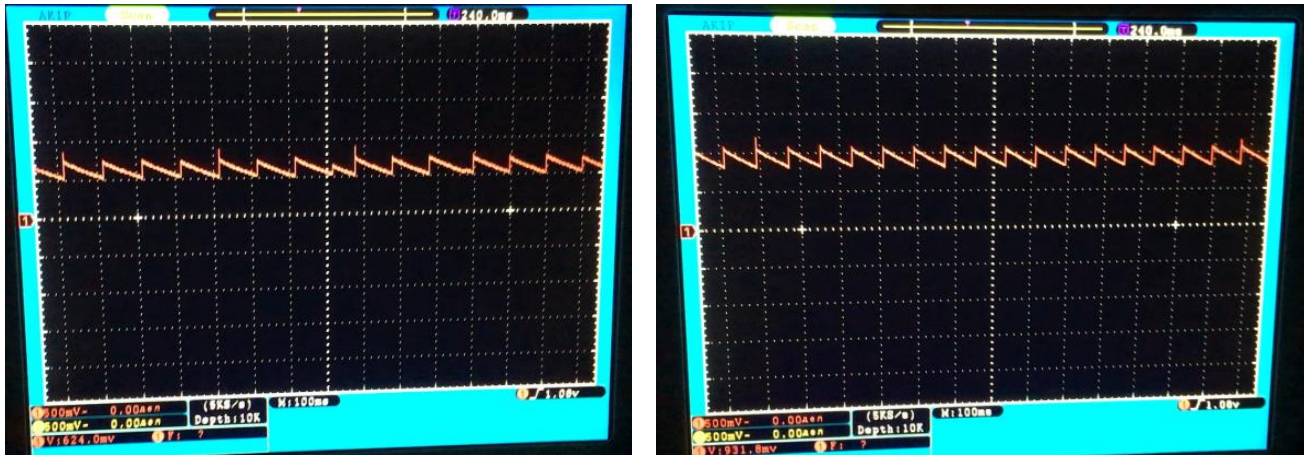


Рисунок 62 – Схема регистрации туннелируемой оптической мощности

Выполнено исследование влияния силы соприкосновения между парой оптических пластин на модуляцию оптической мощности между ними. При однократном изменении силы наблюдаются следующие значения напряжения на выходе преобразователя «ток-напряжение», подключённого к фотодиоду (Рисунок 63).

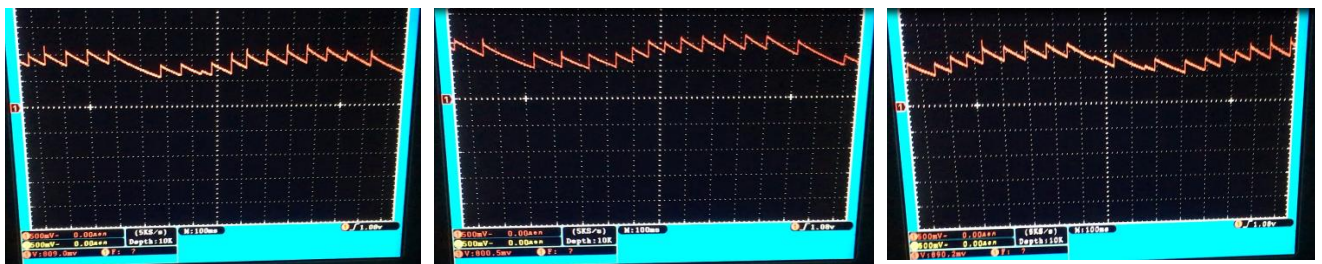


а)

б)

Рисунок 63 – Осциллограммы изменения значения напряжения на выходе преобразователя «ток-напряжение»: а) без прижатия пластин друг к другу; б) с прижатием

При повторяющихся изменениях силы осциллограммы имеют следующий вид (Рисунок 64).



а)

б)

в)

Рисунок 64 – Осциллограммы изменения значения напряжения на выходе преобразователя «ток-напряжение» при повторяющихся изменениях силы: а) в начале эксперимента; б) в середине эксперимента; в) в конце эксперимента

Можно сделать вывод, что между пластинами возникает оптическое туннелирование, однако диапазон модулированных значений (от 0,65 В до 0,95 В) довольно мал. Одним из путей решения данной проблемы может быть введение оптического излучения в пластину под большим углом.

Для исследования ОТЭ может быть использован преобразователь субмикрометровых перемещений, общий вид которого представлен на иллюстрации (Рисунок 65), включающий: призму ПВО, пьезопакет, мембрану, оптические волокна и соединители.

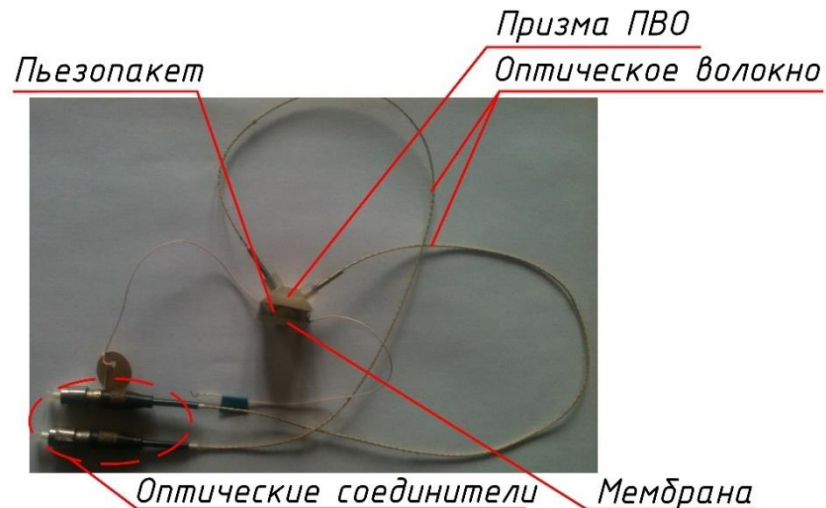


Рисунок 65 – Общий вид преобразователя субмикрометровых перемещений

Субмикрометровый зазор изменяется от внешнего воздействия, приложенного к мембране, и дополнительно корректируется при помощи пьезопакета.

Разработан макет преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием (Рисунок 66), включающий: ЧЭ, которым является кварцевая плоскопараллельная пластина, в торец которой вводится оптическое излучение; источник излучения; два элемента считывания, которыми являются цилиндрические призмы; корпус. На торцевой стороне каждой цилиндрической призмы расположен ФП, детектирующий изменение оптической мощности.



Рисунок 66 – Макет преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием

Для получения и первичной обработки сигналов с пары ФП используется схема, построенная на базе микроконтроллерной платформы. Стенд для получения и обработки сигналов с оптического преобразователя ускорения представлен на рисунке (Рисунок 67).

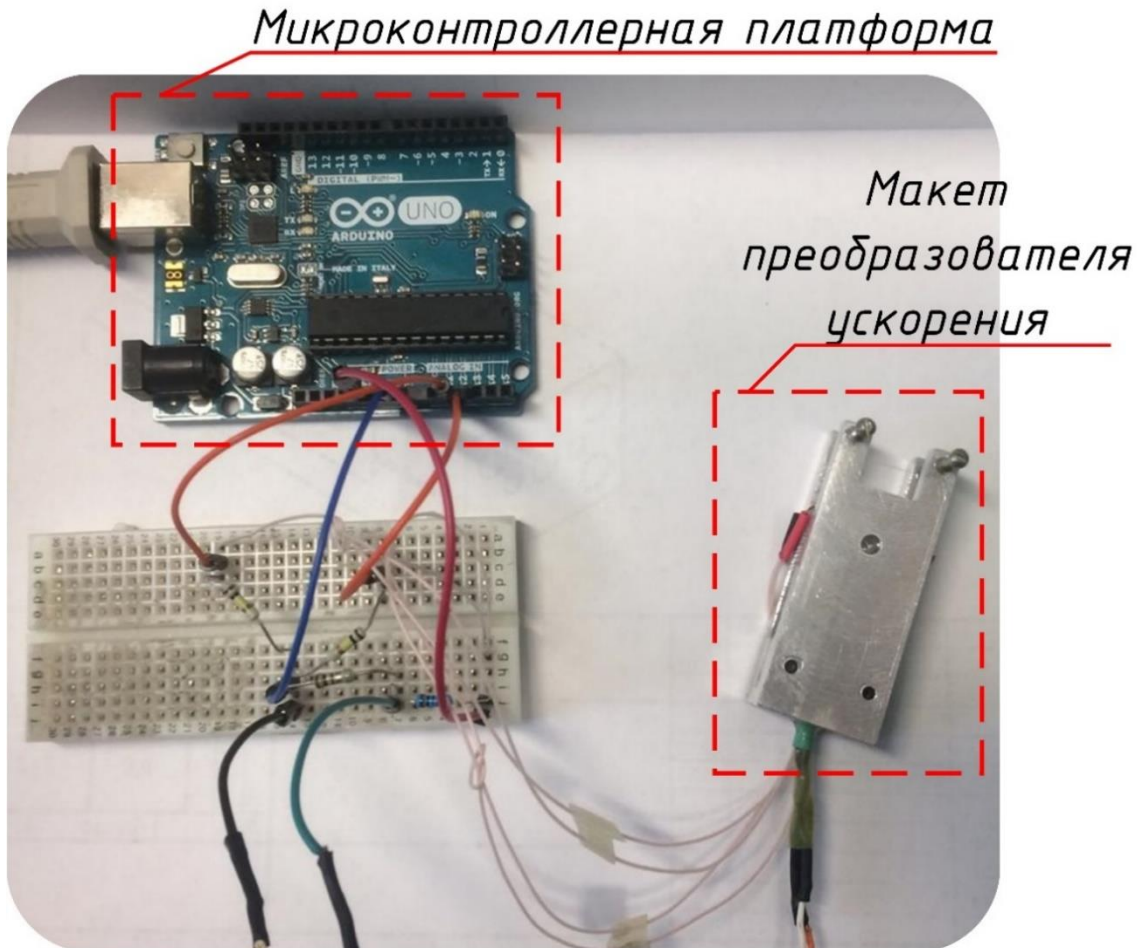


Рисунок 67 – Стенд для получения и обработки сигналов с оптического преобразователя ускорения

Микроконтроллерная платформа подключается к персональному компьютеру и передаёт в монитор *SOM*-порта значения с ФП, соответствующие линейным ускорениям корпуса преобразователя. Исследована работа макета преобразователя ускорения в двух режимах: линейное изменение ускорения от плюс  $g$  до минус  $g$  путём поворота корпуса вокруг продольной оси; ступенчатое изменение ускорения путём воздействия ударной нагрузки.



Представлены временные диаграммы изменения значений на АЦП ( $ADC$ ), полученных с ФП (Рисунок 68): *а*) при линейном изменении ускорения; *б*) при ударных нагрузках.

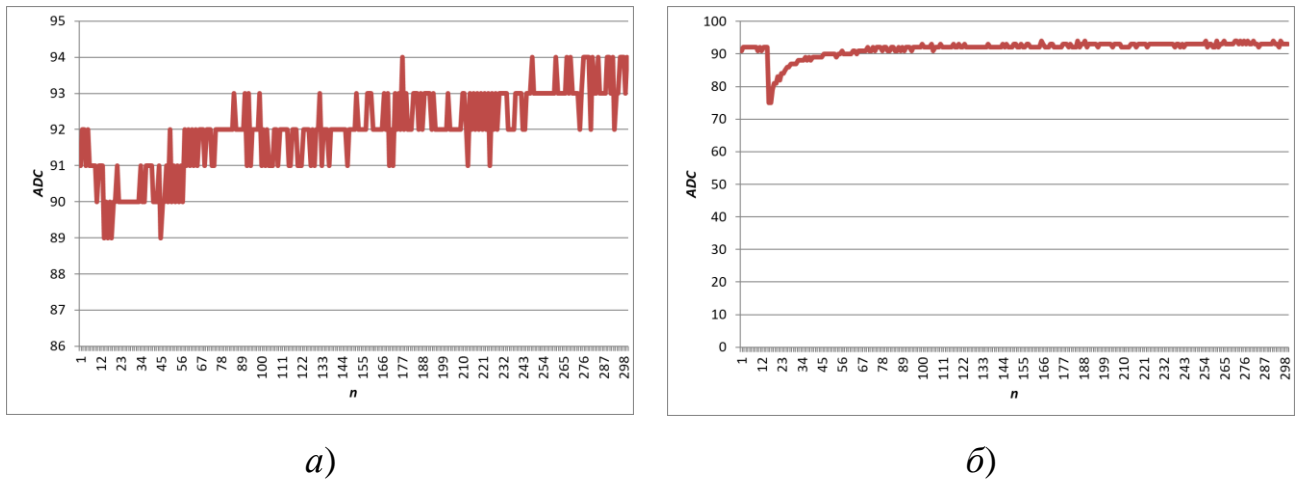


Рисунок 68 – Значения на АЦП, полученные с ФП: *а*) при линейном изменении ускорения; *б*) при ударных нагрузках

На диаграммах (Рисунок 68) по оси времени отложены номера моментов считывания информации  $n$ , происходящие каждые 10 мс, каждому шагу дискретизации соответствует значение сигнала  $ADC$  на 8-разрядном АЦП.

Проведённые исследования подтверждают работоспособность макета преобразователя ускорения. По временным диаграммам можно сделать вывод, что: линейное изменение ускорения от плюс  $g$  до минус  $g$  модулирует значение на АЦП в диапазоне 90 – 94; при скачкообразном изменении ускорения происходит ступенчатое изменение значения  $ADC$  с 92 до 76; т.е. ускорению плюс  $g$  соответствует значение  $ADC=90$ ,  $0 \cdot g - 92$ , минус  $g - 94$ , а оцененное значение ускорения во время ударной нагрузки составляет  $8 \cdot g$ .

## 4.6 Разработка методики проектирования МОЭМ-преобразователя линейного ускорения

### 4.6.1 Алгоритм выбора структуры и параметров МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием

Предложена методика проектирования МОЭМ-преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет

основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям. Предлагаемая методика упрощает процесс проектирования МОЭМ-преобразователя линейных ускорений, рекомендуя готовые решения на основе требуемых характеристик преобразователя. Данная методика предполагает использование ЧЭ балочного типа и может быть представлена в виде алгоритма (Рисунок 69).

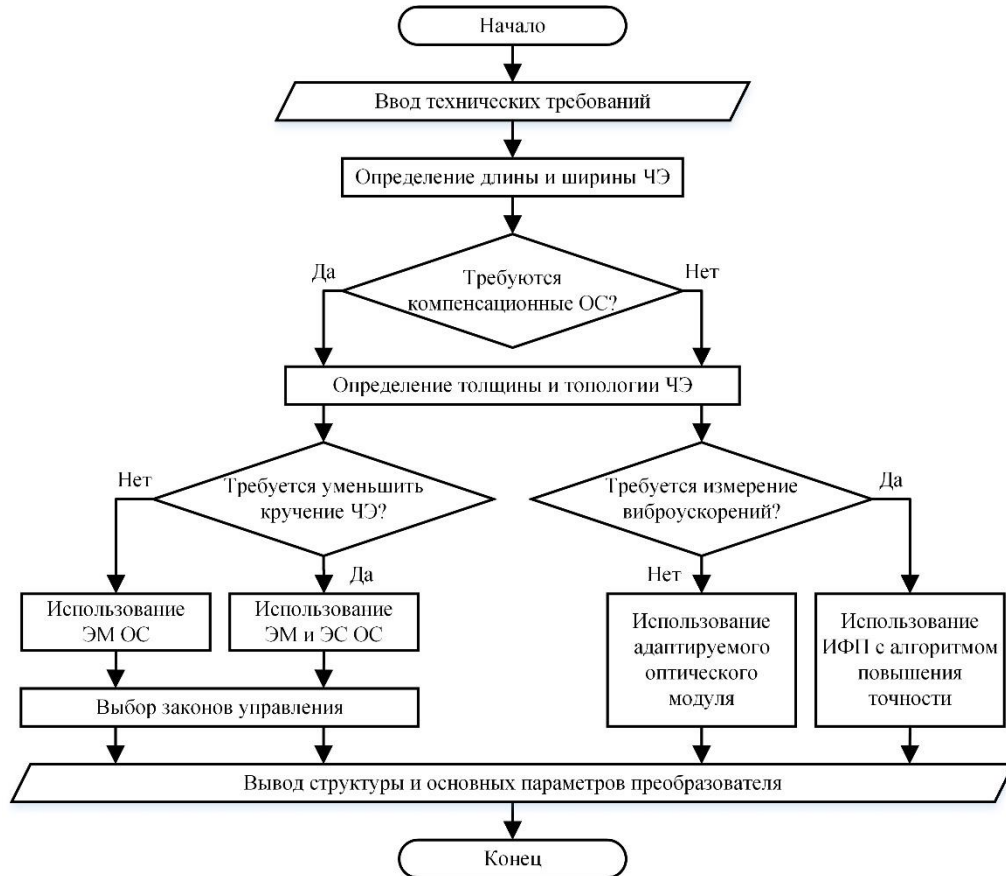


Рисунок 69 – Алгоритм выбора структуры и параметров МОЭМ-преобразователя

Вначале из массогабаритных ограничений определяются длина и ширина ЧЭ. Далее происходит выбор: требуются ли компенсационные обратные связи, стабилизирующие положение ЧЭ. Использование обратных связей рекомендуется при наличии возмущений, дестабилизирующих ЧЭ, влияние которых требуется минимизировать, например, сил, направленных вдоль основной оси чувствительности, или моментов кручения вокруг продольной оси ЧЭ. При этом определяется и вид оптического модулятора, влияющий на точность измерений. Предлагается выбирать модуляторы на основе оптического туннельного эффекта при наличии ОС – для перемещений ЧЭ в пределах длины волны оптического

излучения; интерферометрические модуляторы – при отсутствии ОС, для перемещений порядка единиц-десятков длин волн оптического излучения.

Затем по требуемым статическим параметрам преобразователя, к которым относятся, например, диапазон измеряемых ускорений и погрешность, определяются конструктивные параметры ЧЭ, влияющие на чувствительность преобразователя: толщина ЧЭ, его топология и профиль. Далее происходит выбор: требуется ли уменьшение влияния моментов кручения вокруг продольной оси ЧЭ у преобразователя с ОС или требуется ли измерение виброускорений преобразователем без ОС. Если измерение виброускорений не требуется, то рекомендуется использование адаптируемого оптического модуля, в противном случае приоритетным является выбор алгоритмов повышения точности ИФП.

При наличии ОС, стабилизирующих ЧЭ, могут быть дополнительно сформированы рекомендации по: количеству оптических модуляторов, детектирующих положение ЧЭ; типам ОС (электромагнитная или комбинированная электромагнитная и электростатическая); местам их расположения в корпусе. С учетом динамических параметров преобразователя с ОС – частоты входных ускорений и допустимого запаздывания – могут быть определены параметры системы стабилизации ЧЭ: тип закона управления (пропорциональный, интегральный, дифференциальный или их сочетание) и коэффициенты регуляторов.

МОЭМ-преобразователи ускорения, спроектированные по предлагаемой методике, могут быть эффективно использованы в измерительных и управляющих системах авиационных и космических объектов.

#### **4.6.2 Разработка программы синтеза оптического преобразователя линейного ускорения**

На основании методики проектирования МОЭМ-преобразователя линейного ускорения разработана программа синтеза, которая позволяет по требуемым характеристикам преобразователя определять параметры его конструкции и

дополнительные свойства. Внешний вид основного окна программы синтеза преобразователя ускорения представлен на иллюстрации (Рисунок 70).

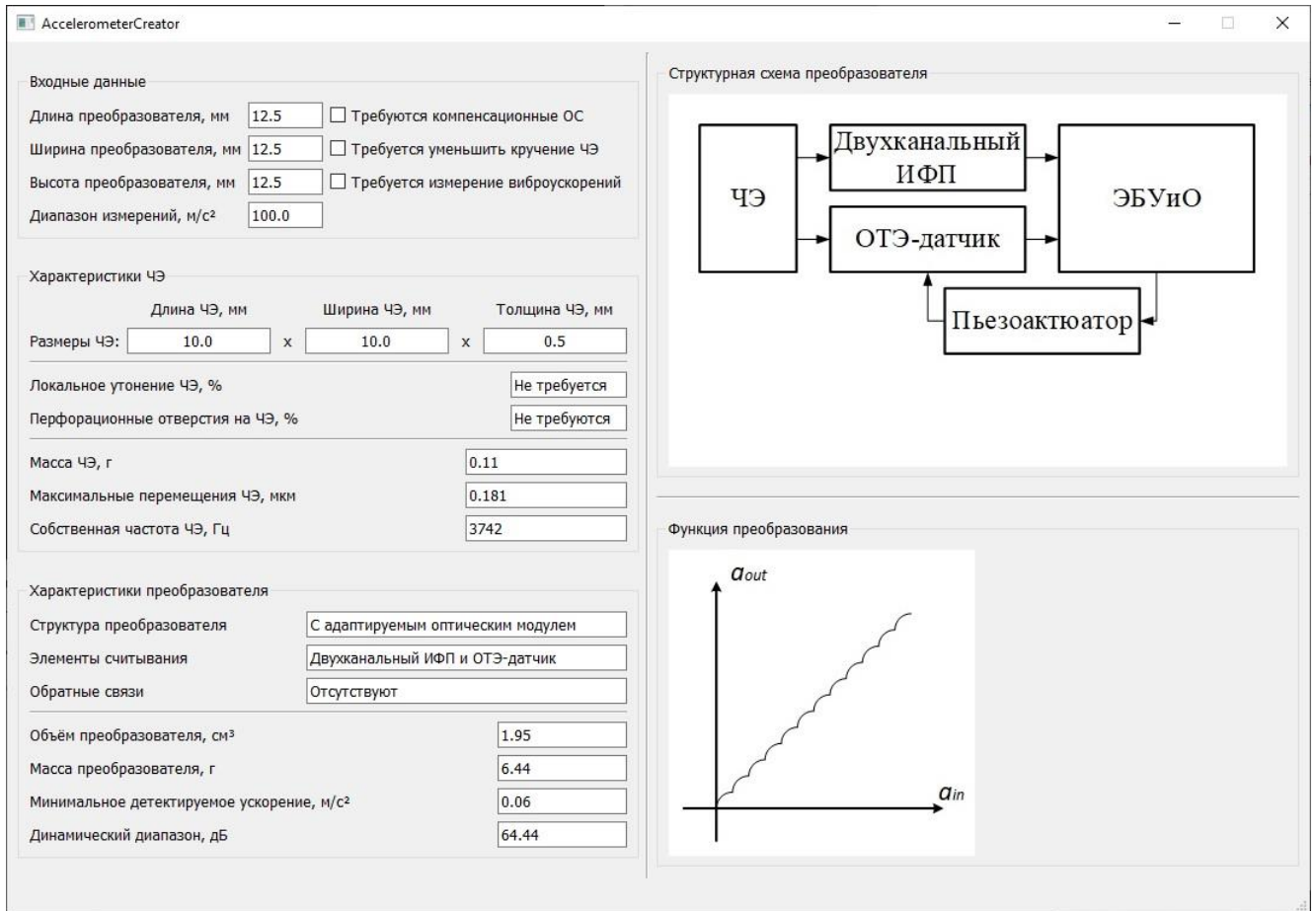


Рисунок 70 – Внешний вид основного окна программы

Все поля для ввода и вывода данных разделены на пять групп: «Входные данные», «Характеристики ЧЭ», «Характеристики преобразователя», «Структурная схема преобразователя» и «Функция преобразования».

Для выполнения расчетов требуется передать программе значения требуемых длины, ширины, высоты преобразователя и диапазона измерений, заполнив поля «Длина преобразователя, мм», «Ширина преобразователя, мм», «Высота преобразователя, мм» и «Диапазон измерений, м/с<sup>2</sup>» соответственно, расположенные в группе «Входные данные». Далее требуется установить требуемые флаги, к которым относятся: «Требуются компенсационные ОС», «Требуются уменьшить кручение ЧЭ» и «Требуются измерение виброускорений». Не все комбинации значений флагов являются допустимыми, например, при установленном флаге «Требуются компенсационные ОС» нельзя установить флаг

«Требуется измерение виброускорений». Значения длины, ширины и высоты преобразователя должны находиться в диапазоне от 5 до 50 мм, а диапазона измерений – от нуля до 1000 м/с<sup>2</sup>. По умолчанию используются значения «12.5» для длины, ширины и высоты преобразователя, для диапазона измерений – «100.0», а все флаги сняты. После изменения значения хотя бы одного из полей или флагов, расположенных в группе «Входные данные», автоматически выполнится расчёт, результаты которого будут представлены в соответствующих полях.

В полях, относящихся к группе «Характеристики ЧЭ», представлены размеры ЧЭ (т.е. его длина, ширина и толщина), топология ЧЭ (наличие и значение локального утонения или перфорационных отверстий) и масса ЧЭ. При отсутствии утонений и отверстий на ЧЭ будут определены значения собственной частоты и максимальных перемещений свободного края в установившемся режиме без учёта действия компенсирующих сил. Собственная частота ЧЭ может быть найдена по формуле [92]:

$$\omega = \sqrt{\frac{G_{FSE}}{m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot E \cdot J_{SE}}{L^3 \cdot m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot E \cdot J_{SE}}{L^3 \cdot m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot E}{L^3 \cdot (\rho \cdot L \cdot b \cdot h)} \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot h^2}{3 \cdot \rho \cdot L^4}},$$

где  $G_{FSE}$  – коэффициент жесткости ЧЭ,  $m$  – масса ЧЭ,  $E$  – модуль Юнга материала ЧЭ,  $J_{SE}$  – момент инерции сечения ЧЭ,  $L, b, h$  – соответственно длина, ширина и толщина балочного ЧЭ,  $\rho$  – плотность материала ЧЭ.

В полях, относящихся к группе «Характеристики преобразователя», представлены текстовые описания его структуры, элементов считывания и обратных связей. Также отображаются значения объёма и массы преобразователя, минимального детектируемого ускорения и его динамического диапазона. Дополнительно представлены общие виды структурной схемы преобразователя и его функции преобразования.

Выполнена проверка корректности функционирования программы синтеза на четырёх различных примерах. В первом случае у преобразователя не требовались ни компенсационные ОС, ни уменьшение кручения ЧЭ, ни измерение виброускорений (Рисунок 71).

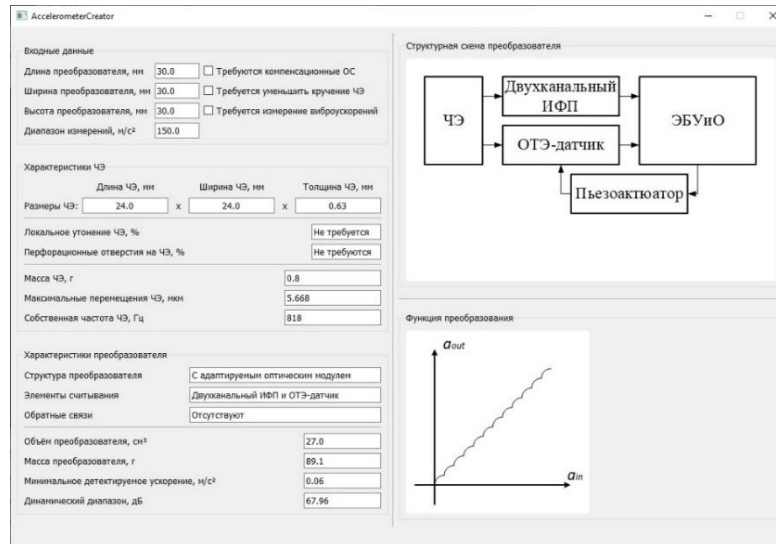


Рисунок 71 – Результат работы программы для условий: преобразователь без ОС и измерения виброускорений

Результатом работы программы является рекомендация выбора структуры с адаптируемым оптическим модулем: считывающим узлом, включающим двухканальный ИФП и ОТЭ-датчик; без ОС.

Во втором примере рассмотрен случай, в котором преобразователю требуется ОС, но нет необходимости уменьшения кручения ЧЭ (Рисунок 72).

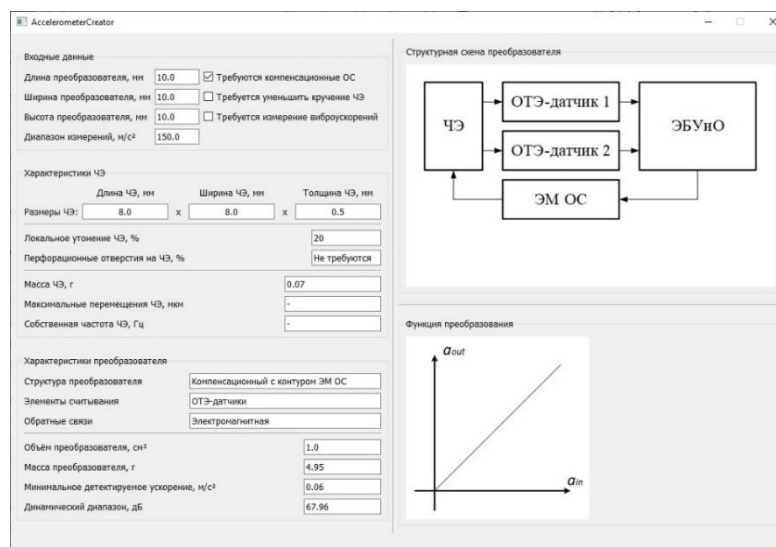


Рисунок 72 – Результат работы программы для условий: преобразователь с ОС, уменьшение кручения ЧЭ не требуется

Результатом является рекомендация использования компенсационного преобразователя с контуром ЭМ ОС, считывание в котором осуществляется средствами ОТЭ-датчиков.

В третьем случае требуется уменьшить кручение ЧЭ компенсационного преобразователя ускорения (Рисунок 73), а в четвёртом – при отсутствии ОС требуется измерение виброускорений (Рисунок 74).

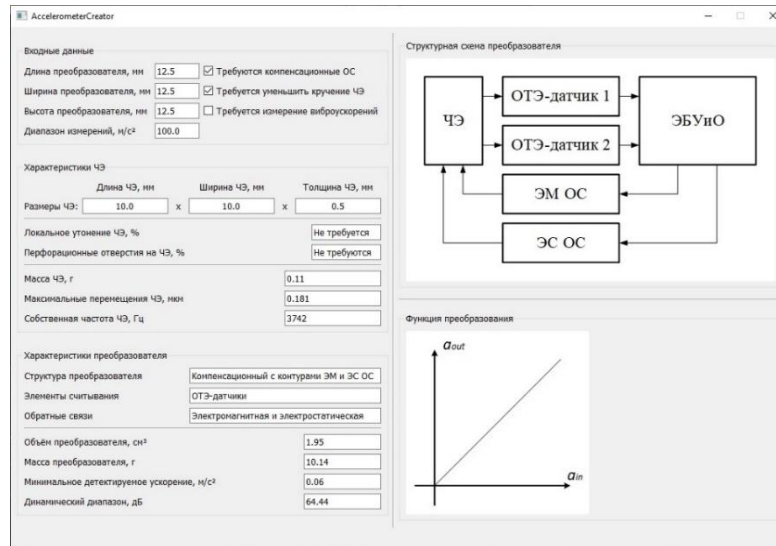


Рисунок 73 – Результат работы программы для условий: преобразователь с ОС и требуется уменьшить кручение ЧЭ

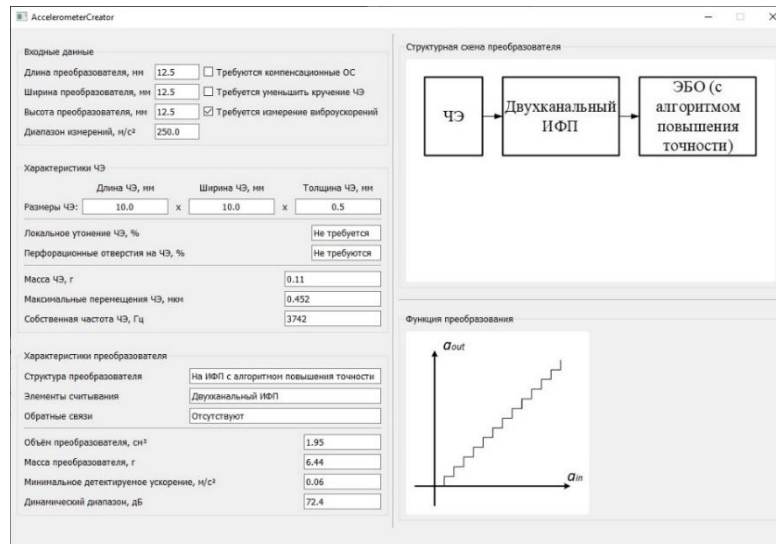


Рисунок 74 – Результат работы программы для условий: преобразователь без ОС, требуется измерения виброускорений

Рекомендовано использование компенсационного преобразователя с контурами ЭМ и ЭС ОС для третьего случая, а для четвёртого – рекомендован

преобразователь с интерферометрическим считыванием, результаты измерений которого уточняются средствами алгоритма повышения точности.

Разработанная программа позволит ускорить процесс выбора структуры и расчёта параметров конструкции МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием. Текст программы синтеза оптического преобразователя линейного ускорения представлен в Приложении Ж.

#### **4.7 Выводы по четвёртой главе**

Выполнен анализ влияния конструктивных параметров ЧЭ и ОТЭ-модулятора, газового демпфирования, коэффициента обратной связи и внешних дестабилизирующих факторов на характеристики МОЭМ-преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.

Разработан алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла МОЭМ-преобразователя линейного ускорения. Предложенный алгоритм обработки информации о линейном ускорении позволяет уменьшить погрешность измерения за счёт формирования точной добавки к грубой составляющей. С учётом зависимости пропускания интерферометров с малой отражательной способностью от перемещения определены условия переключения между двумя каналами для обхода зон с низкой чувствительностью. При моделировании работы устройства обработки информации преобразователя установлено, что с использованием грубо-точного метода формирования выходного сигнала прецизионный преобразователь ускорения с интерферометрическим считыванием обеспечивает повышенную (на уровне единиц нанометров) точность измерений перемещений. Таким образом, подобный преобразователь можно эффективно использовать в системах управления и навигации летательных аппаратов.

Определены минимально детектируемое линейное ускорение и динамический диапазон МОЭМ-преобразователя. Выполнено экспериментальное исследование оптического узла считывания преобразователя линейного ускорения.



Предложена методика проектирования оптического преобразователя линейного ускорения, определяющая структуру и параметры конструкции микро-опто-электромеханического преобразователя по требуемым характеристикам. На основе методики проектирования разработана программа синтеза оптического преобразователя линейного ускорения, использование которой позволит ускорить процесс разработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные научные результаты:

1. Разработан микро-опто-электромеханический адаптируемый преобразователь линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки сигналов.
2. Разработаны новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующие совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования.
3. Разработан алгоритм функционирования преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, позволяющий наиболее эффективно использовать совокупность двух разнотипных оптических преобразователей перемещения.
4. Разработана математическая модель преобразователя линейного ускорения с двухканальным адаптируемым оптическим модулем, отличающаяся совместной обработкой дискретных сигналов интерферометрического канала считывания и непрерывных сигналов канала считывания с датчиком на эффекте оптического туннелирования.
5. Разработаны новые структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейного ускорения; предложен метод комбинированной стабилизации ЧЭ, использующий совместно электромагнитную и электростатическую обратные связи.
6. Разработана математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненная модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования.
7. Разработан алгоритм функционирования компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием, отличающийся наличием дополнительной

калибровки и позволяющий уменьшить влияние технологических погрешностей узлов на выходные характеристики преобразователя.

8. Разработана структурная схема микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя линейных ускорений, позволяющая снизить чувствительность к побочным угловым ускорениям.

9. Проведён численный эксперимент, показавший правильность разработанных математических моделей; исследовано влияние параметров узлов и внешних дестабилизирующих факторов на характеристики микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с оптическим считыванием.

10. Разработан алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины; выбрано значение отражательной способности зеркал.

11. Определены минимально детектируемое линейное ускорение и динамический диапазон микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения; проведены полунатурные исследования оптического канала считывания.

12. Предложена методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, представленная в виде алгоритма, на основе которого разработана программа синтеза, позволяющая автоматизировать определение структуры и расчёт параметров преобразователя по требуемым характеристикам.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

1) <i>ADC</i>	аналого-цифровой преобразователь
2) <i>I/U</i>	преобразователь «ток-напряжение»
3) АЦП	аналого-цифровой преобразователь
4) АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
5) БПиПОС	блок приёма и первичной обработки сигнала
6) БПОС	блок предварительной обработки сигналов
7) БФВР	блок формирования выходного результата
8) БФИ	блок формирования излучения
9) ВОЛС	волоконно-оптическая линия связи
10) ВОО	волоконно-оптический ответвитель
11) Д	дифференцирующая цепочка
12) ДУ	дифференциальное уравнение
13) ИИ	источник излучения
14) ИФП	интерферометр Фабри-Перо
15) К	компаратор
16) КБ	компенсационный блок
17) М	мультиплексор
18) МОЭМ	микро-опто-электромеханический
19) МУ	механический умножитель
20) МЭМС	микроэлектромеханические системы
21) Об	обкладка
22) ОС	обратная связь
23) ОТЭ	оптический туннельный эффект
24) ОУ	операционный усилитель
25) ПА	пьезоактюатор
26) ПЗУ	постоянное запоминающее устройство
27) ПП	показатель преломления

28) ППВО	призма полного внутреннего отражения
29) ПФ	передаточная функция
30) ПЭ	пьезоэлемент
31) РС	реверсивный счётчик
32) СС	схема селекции
33) СУ	схема управления
34) ТВГ	твердотельный волновой гироскоп
35) Ус	усилитель
36) Ф	формирователь
37) ФП	фотоприёмник
38) ЧЭ	чувствительный элемент
39) ЭБО	электронный блок обработки
40) ЭБУиО	электронный блок управления и обработки
41) ЭМ	электромагнитный
42) ЭС	электростатический

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бусурин В.И., Коробков К.А., Шлеенкин Л.А. Метод «грубо-точного» считывания для преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем // Датчики и Системы. 2020. № 8. С. 27–34. DOI: 10.25728/datsys.2020.8.4.
2. Бусурин В.И., Коробков В.В., Коробков К.А., Шлеенкин Л.А. Метод комбинированной стабилизации чувствительного элемента компенсационного преобразователя ускорения с оптическим считыванием // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 10. С. 5–13. DOI: 10.25791/pribor.10.2020.1211.
3. Бусурин В.И., Штек С.Г., Коробков В.В., Жеглов М.А., Коробков К.А. Исследование компенсационного преобразователя ускорения с дифференциальным оптическим считыванием // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 3. С. 29–38. DOI: 10.25791/pribor.3.2021.1247.
4. Busurin V.I., Korobkov V.V., Korobkov K.A., Koshevarova N.A. Micro-Opto-Electro-Mechanical System Accelerometer Based on Coarse-Fine Processing of Fabry–Perot Interferometer Signals. Measurement Techniques, 2021. Vol. 63. № 11. Pp. 883–890. doi: 10.1007/s11018-021-01869-6.
5. Busurin V.I., Korobkov K.A., Shleenkin L.A., Makarenkova N.A. Compensation Linear Acceleration Converter Based on Optical Tunneling. 2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 25 – 27 May 2020, Saint Petersburg, Russia. Pp. 1–4, doi: 10.23919/ICINS43215.2020.9133810.
6. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Коробков К.А. Разработка преобразователя ускорений на эффекте оптического туннелирования // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: сб. тр. XXVII Междунар. научн.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2018 г., Алушта. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. с. 182.

7. Нгуен В.В., Бусурин В.И., Коробков К.А. Анализ характеристик микро-опто-электрическо-механического компенсационного преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». 19 – 23 ноября 2018 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2018. с. 187-188.
8. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Коробков К.А. Булычев Р.П. Разработка метода «грубо-точной» обработки информации в преобразователе ускорений с оптическим считыванием // VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. с. 643-644.
9. Бусурин В.И., Коробков К.А., Нгуен В.В. Анализ характеристик микро-опто-электромеханического компенсационного преобразователя ускорений на основе оптического туннельного эффекта // Микроэлектроника и информатика – 2019. 26-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2019. с. 79.
10. Бусурин В.И., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Микрооптоэлектромеханический преобразователь ускорения на основе «грубо-точного» метода измерения // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Сборник трудов. Алушта, 14 – 20 сентября 2019 г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2019. с. 30-31.
11. Бусурин В.И., Штек С.Г., Жеглов М.А., Коробков К.А., Булычев Р.П. Разработка контура «грубо-точной» стабилизации чувствительного элемента преобразователя ускорений с оптическим считыванием // IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. с. 605-606.

12. Коробков К.А. Разработка оптического преобразователя ускорений с резервированием канала считывания микроперемещений // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2020. с. 248-249.
13. Дубицкий В.А., Коробков К.А. Разработка имитационной модели микроэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2020. с. 234.
14. Кошеварова Н.А., Коробков К.А. Разработка алгоритма работы преобразователя ускорений на основе интерферометра Фабри-Перо // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2020. с. 249-250.
15. Коробков К.А., Шлеёнкин Л.А., Бусурин В.И. Разработка адаптируемого узла «грубо-точного» измерения ускорений с оптическим считыванием // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 14–20 сентября 2020 г., Алушта. – СПб.: ГУАП, 2020. с. 113-114.
16. Коробков В.В., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Разработка алгоритма работы преобразователя ускорений на основе интерферометра Фабри-Перо // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 14–20 сентября 2020 г., Алушта. – СПб.: ГУАП, 2020. с. 114-115.
17. Коробков К.А., Бусурин В.И. Методика определения параметров преобразователя линейных ускорений // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2020. с. 275-276.
18. Бусурин В.И., Штек С.Г., Жеглов М.А., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Анализ погрешностей компенсационного преобразователя ускорения с дифференциальным оптическим считыванием // X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. с. 419-420.



19. Кошеварова Н.А., Коробков К.А. Преобразователь ускорения на основе интерферометра Фабри-Перо и электромагнитной обратной связи // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. – Мб. [Электронное издание]. с. 269-270.
20. Бусурин В.И., Горбачев Н.П., Макаренко Н.А., Коробков К.А., Александров Д.Н. Разработка микрооптоэлектромеханического интеллектуального преобразователя ускорения с дифференциальным считыванием // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Тезисы докладов XXX Междунар. науч.-техн. конф., 14–20 сентября 2021 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2021. с. 91.
21. Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А. Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 260 с. – ISBN 978-5-7038-4351-2.
22. Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С. Микросистемные датчики физических величин: Монография в двух частях – М.: Техносфера, 2018. – 550 с. – ISBN 978-5-94836-498-8.
23. Гребенников В.И., Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В. Маятниковый акселерометр с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021. № 2. С. 71–93. DOI: 10.31857/S0002338821020062.
24. Мезенцев А.П., Ачильдиев В.М., Абрамов В.С., Терешкин А.И., Шульгин Г.К. Способ комплексных испытаний бесплатформенных инерциальных измерительных блоков на основе микромеханических гироскопов и акселерометров и устройство для его осуществления / Патент РФ на изобретение № RU 2256880 С1 от 20.07.2005.
25. Jackson R.G. Novel Sensors and Sensing (1st ed.). – Boca Raton: CRC Press. 2004. – 310 p. – ISBN 978-0750309899.

26. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с. ISBN 978-5-94836-111-6.
27. Rasras M.S., Elfadel I. (Abe) M., Ngo HD. MEMS Accelerometers. – Basel: MDPI Books. 2019. – 252 p. – ISBN 978-3-03897-414-7.
28. Udd E., Spillman W.B. Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists (2nd ed.). – Hoboken: Wiley. 2011. – 512 p. – ISBN 978-0-470-12684-4.
29. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с. ISBN 978-5-94836-191-8.
30. Петров П.Э., Андреев П.Г., Андрианов А.Р., Наумова И.Ю. Современные датчики измерения линейного ускорения // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 1. С. 126–127.
31. Денисенко М.А., Исаева А.С. Интегральный микромеханический туннельный акселерометр на основе управляемой самоорганизации механически напряженных полупроводниковых слоев // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 2 (196). С. 25–33.
32. Тихонов А.И., Тихоненков В.А., Мокров Е.А. Упругие элементы датчиков механических величин: Учебно-методические пос. Ульяновск.: УГТУ, 1998. 120 с.
33. Распопов В.Я. Микромеханический акселерометр прямого преобразования // Датчики и системы. 2002. № 8. С. 5–8.
34. Мезенцев А.П., Доронин В.П., Новиков Л.З., Харламов С.В. Основные проблемы создания инерциальных измерительных блоков на базе микромеханических гироскопов и акселерометров // Гироскопия и навигация. 1997. № 1. С. 7–14.
35. Косцов Э.Г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектромеханики // Автометрия. 2009. Т. 45, № 3 С. 3–52.
36. Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Гнусарёв Д.С. Перспективы развития БИНС на современных гироскопах и акселерометрах в ракетно-космической технике // В сборнике: Проблемы управления,

- обработки и передачи информации (УОПИ-2018). Сборник трудов VI Международной научной конференции, посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина. Под редакцией А.А. Львова, М.С. Светлова. 2019. С. 29–53.
37. Зусман Г.В. Современные микромеханические преобразователи и их применение в вибродиагностике и некоторых других областях // Контроль. Диагностика. 2017. № 4. С. 44–57.
38. Прибиль И.А. Устройство МЭМС-датчиков // Аллея науки. 2018. Т. 3. № 7 (23). С. 543–547.
39. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Меркулова И.И., Бычков А.В., Халютин О.С. Распределенный измерительно-вычислительный комплекс на базе волоконно-оптических и микромеханических датчиков // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2017. Т. 2. С. 160–162.
40. Багинский И.Л., Косцов Э.Г. Емкостные МЭМС-акселерометры сверхвысоких ускорений // Автометрия. 2017. Т. 53. № 3. С. 107–116.
41. Ашмарин В.В., Миронов П.Н. Перспективы развития микрогабаритных датчиков и вычислительных компонентов ИСУ БЛА // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 1. С. 18–38.
42. Hraniak V.F., Kukharchuk V.V., Kucheruk V.Y., Katsyv S.Sh., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K. Mathematical Model Of Capacitance Micromechanical Accelerometer In Static And Dynamic Operating Modes. Bulletin Of The Karaganda University. Physics Series, 2020. №2. Pp. 60–67.
43. Тимошенко С.П., Михеев А.В., Тимошенко А.С., Полушкин В.М. Перспективы разработки и производства микроакселерометров, микрогироскопов и инерциальных навигационных систем на основе МЭМС // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4 (99). С. 468–469.
44. Волков В.С., Баринов И.Н., Дарвин В.Ю. Микрооптомеханический преобразователь на основе карбида кремния для высокотемпературных датчиков давления // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2012. Т. 2. С. 166–167.

45. Д. Бэйли, Э. Райт. Волоконная оптика: теория и практика / Пер. с англ. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. 320 с.
46. Торопков А.А. Инерциальные системы (БИНС) МЭМС российской разработки // Компоненты и технологии. 2020. № 1 (222). С. 12–13.
47. Бусурин В.И., Фам А.Т. Микрооптоэлектромеханический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта // Автометрия. 2016. Т. 52. № 2. С. 124–130.
48. Бусурин В.И., Коробков В.В., Фам А.Т. Исследование возможности расширения диапазона измерения микроопто-электромеханического преобразователя угловых скоростей // В книге: 14-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2015" Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2015. С. 208–210.
49. Мельникова Е.Н., Мельников В.Е. Некоторые особенности компенсационных акселерометров с маятниковым чувствительным элементом на упругом подвесе // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 6. С. 21–25.
50. Коновалов С.Ф., Майоров Д.В., Полинков А.В., Пономарёв Ю.А., Чулков В.Е., Семёнов А.Е. Опыт создания триады акселерометров с общей магнитной системой на базе компенсационных акселерометров с кварцевым маятником. В кн.: Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова, Санкт-Петербург, 02–04 октября 2018. С. 35–45.
51. Бусурин В.И., Звей Ней Зо. Моделирование и компенсация температурной погрешности преобразователя давления на основе оптического туннелирования // Вестник МАИ. 2012. № 1. с. 149–156.
52. Бусурин В.И., Сапогов В.А., Йин Наинг Вин. Анализ влияния температуры на начальный зазор и на вторые движения кольцевого резонатора трёх осевого оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 2017 г., г. Москва, с. 158–159.

53. Харламов М.С., Гусева О.С., Коновалов С.Ф. Особенности применения реактивного ионного травления кварца при изготовлении маятниковых узлов Q-flex акселерометров // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 3. С. 198–209.
54. Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Козлов А. И. и др. Исследование технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов инфракрасных фотоприёмников на основе многослойных структур с квантовыми ямами // Автометрия. 2015. 51, № 2. С. 110–118.
55. Аунг Т., Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24. № 5. С. 511-520.
56. Вавилов В.Д., Поздяев В.И., Улюшкин А.В. Оптимизация параметров микросистемного акселерометра при случайной вибрации // Датчики и системы. 2009. № 2. Стр. 2–5.
57. Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Скоробогатов В.В., Смирнов Е.С. Способ обеспечения виброустойчивости маятникового акселерометра линейных ускорений с цифровой обратной связью и виброустойчивый маятниковый акселерометр / Патент РФ на изобретение №RU 2615221 С2 от 20.11.2016.
58. Будкин В.Л., Паршин В.А., Прозоров С.В., Саломатин А.К., Соловьев В.М. Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации // Микросистемная техника. 2000. № 2, С. 31–34.
59. Лучко С.В., Ватутин М.А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2005. Т. 48. №6. Стр. 62–66.
60. Шевцова Е.В. Влияние сжимаемости газа на вибрационные погрешности акселерометров с плоским газовым демпфером // Гироскопия и навигация. 2005. №1. Стр. 95.
61. Малютин Д.М., Малютина М.Д., Грязев Б.В. Коррекция динамических свойств микромеханического акселерометра прямого

- преобразования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 3. Стр. 49–53.
62. Лысенко И.Е., Ежова О.А. Разработка и исследование конструкции микромеханического сенсора линейных ускорений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 4 (189). С. 223–232.
63. Тимошенко С.П., Михеев А.В., Каменский А.М., Артёмов Е.И., Полушкин В.М., Петрова Н.А., Боев Л.Р., Пузиков В.В. Инерциальные микроэлектромеханические системы (акселерометры и гироскопы) // Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 471–474.
64. Лихошерст В.В. Расчет параметров и характеристик микромеханических акселерометров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 6, Стр. 66–71.
65. Цзин Ци., Евстафьев С., Вертянов Д. Проектирование МЭМС на системном уровне: Изучение методологий анализа и имитационного моделирования // Компоненты и технологии. 2020. № 7 (228). С. 26–34.
66. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Меркулова И.И. Инновационные технологии комплексирования волоконно-оптических и микромеханических инерциальных навигационных систем // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2017. № 1. С. 309–314.
67. Чернодаров А.В., Патрикеев А.П., Меркулова И.И., Иванов С.И. Комплексирование распределенных инерциальных навигационных систем на базе волоконно-оптических и микроэлектромеханических измерителей // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 6. Стр. 111–120.
68. Ачильдиев В.М., Дрофа В.Н., Рублев В.М. Микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 3.
69. Бусурин В.И., Мулин П.В., Коробков В.В., Йин Наинг Вин. Анализ влияния линейного ускорения на характеристики кольцевого оптоэлектронного трех осевого преобразователя угловых скоростей // VII международная

- конференция по фотонике и информационной оптике, сборник научных трудов НИЯУ МИФИ. 2018 г., г. Москва, с. 224–225.
70. Бусурин В.И., Ёин Наинг Вин, Семушева С.М. Исследование характеристик кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Микроэлектроника и информатика – 2015 «22-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов», 2015 г., г. Зеленоград, с. 117.
71. Busurin V.I., Zheglov M.A., Shleenkin L.A., Korobkov K.A., Bulychev R.P. Development of an Algorithm to Suppress Frequency Splitting of an Axisymmetric Resonator of a Wave Solid-State Gyroscope with Optical Detection. *Measurement Techniques*, 2020. Vol. 62. № 10. Pp. 879–884. doi: 10.1007/s11018-020-01708-0.
72. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Шлеёнкин Л.А., Коробков К.А., Булычев Р.П. Разработка алгоритма подавления расщепления частот осесимметричного резонатора волнового твердотельного гироскопа с оптическим детектированием // Измерительная техника. 2019. № 10. С. 29–34. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-10-29-34.
73. Жеглов М.А., Бусурин В.И., Коробков К.А., Булычев Р.П., Ёин Наинг Вин. Микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости с кольцевым резонатором. Патент РФ на изобретение № 2702703 от 09 октября 2019. Бюл. № 28.
74. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Мулин П.В., Коробков К.А., Булычев Р.П. Обеспечение балансировки резонатора с осесимметричной структурой в твердотельном волновом гироскопе // VII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. с. 560-561.
75. Бусурин В.И., Мулин П.В., Коробков К.А., Ёин Наинг Вин. Компенсация погрешностей трёхосевого вибрационного кольцевого преобразователя угловых скоростей с оптическим считыванием // Микроэлектроника и информатика – 2018. 25-я Всероссийская межвузовская научно-техническая

- конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2018. с. 85.
76. Busurin V.I., Kazaryan A.V., Win Y.N., Korobkov K.A. Experimental Investigation of the Characteristics of the Information Sensing Module Based on the Optical Tunneling Effect of the Angular Velocity Transducer by Using a Piezoelectric Module. Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2019: Proceedings of the V International Forum (November 20–22, 2019, Izhevsk, Russian Federation), 2019. Pp. 6–12, DOI: 10.22213/2658-3658-2019-6-12.
77. Андреев П.Г., Андреева Т.В., Юрков Н.К. Использование искусственной нейронной сети типа GRNN в задачах прогнозирования // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2017. Т. 2. С. 63–66.
78. Бусурин В.И., Можаяев В.А., Шеленков В.М. Сенсорные технологии. Под ред. В.И. Бусурина. – М.: Издательство МАИ, 2013. 92 с.
79. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. пер. с англ. Под ред. Е. Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
80. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие, 2-е изд. Тула: Гриф и К. 2004. – 476 с.
81. Вавилов В.Д., Поздяев В.И. Конструирование интегральных датчиков. – М.: Издательство МАИ, 1993. 68 с.
82. Аверин И.А., Пауткин В.Е. Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 2. с. 24–32.
83. Крекотень Ф.В. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры // Петербургский журнал электроники. 2011. № 1. С. 81–96.
84. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. – М.: МАИ, 2012. – 168 с.



85. Бусурин В.И. Оптические и волоконно-оптические устройства и системы / В.И. Бусурин, А.В. Казарьян, Е.С. Неретин. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 112 с.
86. Бусурин В. И., Коробков В. В., Горшков Б. Г., Дьячков В. В. ТВМ-преобразователь угловой скорости с интерферометрическим считыванием информации // Датчики и системы. 2017. № 5. С. 37–43.
87. Бусурин В. И., Коробков В. В., Нгуен Тхань Зыонг, Данг Ван Хуен. Волновой микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с интерферометром Фабри-Перо // Датчики и системы. 2019. № 3. С. 27–33.
88. Busurin V. I., Korobkov V. V., Naing Htoo Lwin, Phan Anh Tuan. Static and dynamic characteristics of angular velocity and acceleration transducers based on optical tunneling effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 737, 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012045>.
89. Busurin V.I., Win Y.N. Zheglov M.A. Effect of Linear Acceleration on the Characteristics of an Optoelectronic Ring Transducer of Angular Velocity and Its Compensation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. V. 55. Pp. 309–316 (2019). DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699019030142>.
90. Бусурин В.И., Коробков В.В., Коробков К.А., Кошеварова Н.А. Микрооптоэлектромеханический преобразователь ускорения на основе грубо-точного метода обработки сигналов интерферометра Фабри-Перо // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-34-41>.
91. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. Серия Механика в техническом университете. Т. 2. Изд. 10-е, перераб. И доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
92. Вавилов В.Д. Интегральные датчики: Учебник. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. Ун-т, 2003. 503 с.
93. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: изд. 2-е. Пер. с англ. – М.: Наука, 1973. 713 с.

94. Попов В.С., Николаев С.А. Общая электротехника с основами электроники. – М., «Энергия», 1972. 504 с. С ил.
95. Ломоносов В.Ю. Поливанов К.М. Михайлов О.П. Электротехника. – М.: «Энергоатомиздат», 1990. 400 с.: ил.
96. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Казарьян А.В., Коробков В.В. Волоконно-оптический преобразователь ускорения на основе оптического туннельного эффекта. Патент РФ на изобретение № 2539681 от 20 января 2015 г.
97. Осипов М. Н., Попов М. А. Измерения малых динамических смещений интерферометром Майкельсона со сферическими волновыми фронтами // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 4. С. 55–57.
98. Minghui Zhao, Kangli Jiang, Hongwu Bai, Hairong Wang, Xueyong Wei, *Microsystem Technologies*, 2020, vol. 26, pp. 1961–1969. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04747-3>.
99. Edward Davies, David S. George, Malcolm C. Gower, Andrew S. Holmes, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 215, pp. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.08.002>.
100. Вольнский М. А., Гуров И. П., Скаков П. С. Рекуррентный алгоритм обработки интерферометрических сигналов на основе мультиоблачной модели предсказания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014 г. № 4 (92). С. 18–22.
101. Junning Cui, Zhangqiang He, Yuanwei Jiu, Jiubin Tan, Tao Sun, *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 25, pp. 7086–7092. <https://doi.org/10.1364/AO.55.007086>.
102. Ki-Nam Joo, Jonathan D. Ellis, Jo W. Spronck, Paul J. M. van Kan, Robert H. Munnig Schmidt, *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 3, pp. 386–388. <https://doi.org/10.1364/OL.34.000386>.

**ПРИЛОЖЕНИЕ****Приложение А****(обязательное)****Акт о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ГОСНИИП»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный конструктор  
АО «ГосНИИП»

С.Г. Штек

2021 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
Коробкова Кирилла Андреевича на тему «Разработка и исследование  
микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя  
линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки  
сигналов» в работы, проводимые в АО «ГосНИИП»

Мы, нижеподписавшиеся сотрудники АО «ГосНИИП», заместитель генерального конструктора-главный конструктор по направлению, кандидат технических наук Жеглов М.А., начальник сектора, кандидат технических наук Гончаров В.Б., начальник сектора, кандидат технических наук Манбеков Д.Р. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Коробкова Кирилла Андреевича:

- математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненная модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, позволяющая повысить точность расчета характеристик;
- алгоритм повышения точности интерферометрического считывающего узла микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения на основе анализа дробной части полосы интерференционной картины, позволяющий увеличить чувствительность к индуцированным ускорением субмикрометровым перемещениям;

Рисунок А.1 – Первая страница акта о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ГОСНИИП»

– методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям; использованы в АО «ГосНИИП» при выполнении работы «Разработка экспериментального образца твердотельного микро-опто-электромеханического акселерометра».

Заместитель генерального  
конструктора-главный конструктор  
по направлению АО «ГосНИИП»,  
кандидат технических наук



Жеглов М.А.

Начальник сектора 422,  
кандидат технических наук



Гончаров В.Б.

Начальник сектора 424,  
кандидат технических наук



Манбеков Д.Р.

Рисунок А.2 – Вторая страница акта о внедрении результатов диссертационной работы в АО «ГОСНИИП»

**Приложение Б**  
**(обязательное)**

**Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ФГБОУ ВО  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)» (МАИ), доктор технических  
наук, доцент

Д.А. Козорез

« 15 » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы  
Коробкова Кирилла Андреевича на тему «Разработка и исследование  
микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя  
линейного ускорения на основе методов двухканальной обработки  
сигналов» в учебном процессе МАИ

Мы, нижеподписавшиеся, директор дирекции института № 3, кандидат технических наук, доцент Следков Ю.Г., профессор кафедры № 301, доктор технических наук, профессор Бусурин В.И., доцент кафедры № 301, кандидат физико-математических наук, доцент Казарьян А.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Коробкова Кирилла Андреевича:

- структурные и функциональные схемы микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения, использующие совместную обработку сигналов интерферометрического канала и канала оптического туннелирования, обеспечивающие уменьшение минимально детектируемого линейного ускорения;
- математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения с комбинированной электромагнитной и электростатической обратной связью, дополненная модулем линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования, позволяющая повысить точность расчета характеристик;
- методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения, обеспечивающая автоматизированное определение структуры и расчет основных параметров преобразователя по заданным техническим требованиям; внедрены в учебный процесс на кафедре № 301, а именно:

- структурные и функциональные схемы

**Рисунок Б.1 – Первая страница акта об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе**

микро-опто-электромеханического адаптируемого преобразователя линейного ускорения использованы в материалах лекций (2 часа) по дисциплине «Оптические и волоконно-оптические устройства и системы» (Раздел «Оптические датчики») направления 27.04.04 «Управление в технических системах»;

– математическая модель компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения и методика проектирования микро-опто-электромеханического преобразователя линейного ускорения использованы в лабораторной работе «Исследование статических характеристик преобразователя линейного ускорения с оптическими типами считывания» по дисциплине «Оптические и волоконно-оптические устройства и системы» направления 27.04.04 «Управление в технических системах».

Директор дирекции института № 3,  
кандидат технических наук, доцент



Следков Ю.Г.

Профессор кафедры № 301, доктор  
технических наук, профессор



Бусурин В.И.

Доцент кафедры № 301, кандидат  
физико-математических наук,  
доцент



Казарьян А.В.

Рисунок Б.2 – Вторая страница акта об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе

## Приложение В (рекомендуемое)

### Уведомление о приеме и регистрации заявки на изобретение

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

**Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение**



**«Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)**

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

#### УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

<b>30.04.2021</b>	<b>W21027188</b>	<b>2021112754</b>
<i>Дата поступления (дата регистрации)</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

<p><b>ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ</b> <small>(дата регистрации) оригинал документов заявки</small></p>	<p style="text-align: center;">(21) <b>РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ВХОДЯЩИЙ №</b></p>
(85) <b>ДАТА ПЕРЕВОДА</b> международной заявки на национальный этап		
<input type="checkbox"/> (86) <small>даты международной заявки и даты публикации заявки</small> <input type="checkbox"/> (87) <small>номер и дата международной публикации международной заявки</small> <input type="checkbox"/> (96) <small>номер европейской заявки и дата ее подачи</small> <input type="checkbox"/> (97) <small>номер и дата публикации европейской заявки</small>	<p><b>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ</b> <small>(полный адрес, включая в том числе или исключительный адрес)</small> 125993, Волоколамское шоссе, д. 4, Терентьев Вадим Васильевич (125993, Volokolamskoye shosse, d. 4, Terentyev Vadim Vasilyevich)</p> <p>Телефон: 84991584059 Факс: Адрес электронной почты: <a href="mailto:fv@fiips.ru">fv@fiips.ru</a> <b>АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ</b> <small>(указывается при подаче заявки на секретные изобретения)</small></p>	
<p><b>ЗАЯВЛЕНИЕ</b> о выдаче патента Российской Федерации на изобретение</p>		
<p>В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация</p>		
<p>(54) <b>НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ</b> Микро-опто-электромеханический компенсационный преобразователь линейных ускорений с контурами грубо-точной стабилизации чувствительного элемента</p>		
<p>(71) <b>ЗАЯВИТЕЛЬ</b> (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (согласно учредительным документам), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Moscow Aviation Institute (National Research University)) 125993, Российская Федерация, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, МАИ (125993, Rossiyskaya Federatsiya, Moskva, Volokolamskoye shosse, d.4, MAI)</p>		<p><b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</b></p> <p>ОГРН 1 03 77 39 18082 0</p> <p>КПП</p> <p>ИНН 77 12 03845 5</p> <p>СНИЛС</p> <p>ДОКУМЕНТ (серия, номер)</p> <p>КОД СТРАНЫ (если он установлен) RU</p>
<p><input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является:  <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (указать наименование)  <input type="checkbox"/> исполнителем работ по:  <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту заказчик работ (указать наименование)          Контракт от №</p>		
<p>(74) <b>ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ</b> (указывается фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, выполняющего функции представителя для заявителя от его имени в Федеральной службе по интеллектуальной собственности или выполняющего эти функции в силу закона)</p>		<p><input type="checkbox"/> патентный поверенный  <input checked="" type="checkbox"/> представитель по доверенности  <input type="checkbox"/> представитель по закону</p>

Общее количество документов в листах	17	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)		Автоматизированная система
Количество платежных документов	1	
<p>Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: <a href="http://www.fips.ru/registers-web">www.fips.ru/registers-web</a></p>		

Рисунок В.1 – Уведомление о приеме и регистрации заявки на изобретение

## Приложение Г (рекомендуемое)

### Математические модели в среде графического программирования

В среде графического программирования статическая модель ЧЭ может быть представлена двумя пропорциональными звеньями (Рисунок Г.1).

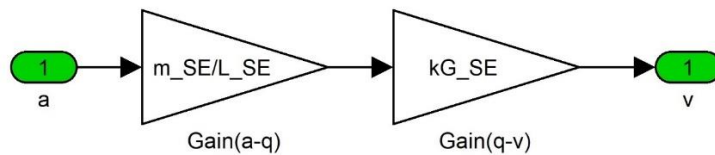


Рисунок Г.1 – Статическая модель ЧЭ в среде графического программирования

Модель ИФП в среде графического программирования (Рисунок Г.2) включает 3 подсистемы:

1. «*IFP\_SENS*» – подсистема двухканального интерферометра (Рисунок Г.3);
2. «*SD-PhD-IU-Amp*» – подсистема схемы обработки, включающая ИИ, ФП, преобразователь «ток-напряжение» и усилитель (Рисунок Г.4.);
3. «*Processing\_Scheme*» – вычислительная схема, осуществляющая подсчёт пиков на интерференционной картине (Рисунок Г.5).

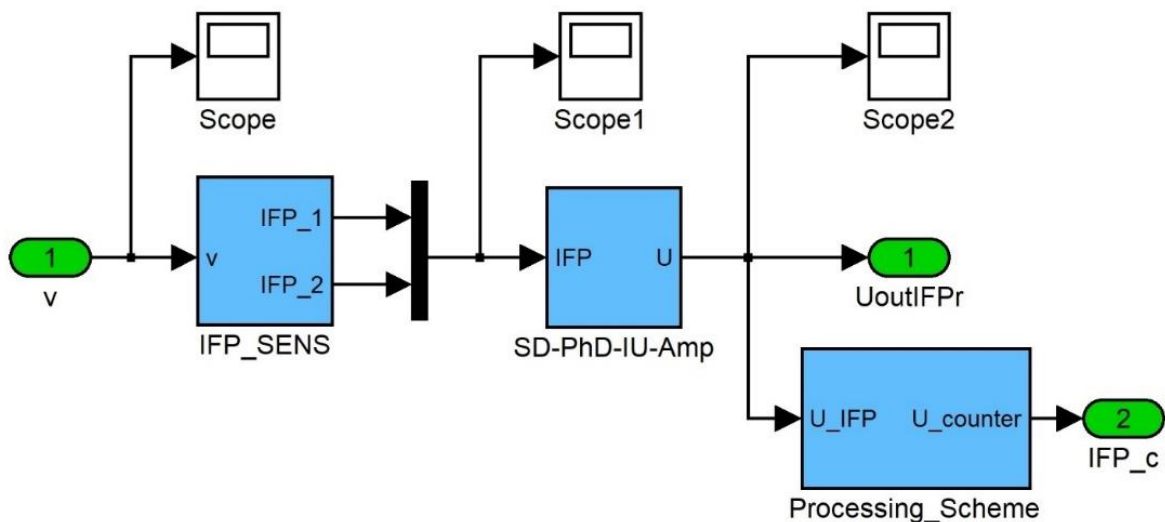


Рисунок Г.2 – Модель ИФП в среде графического программирования



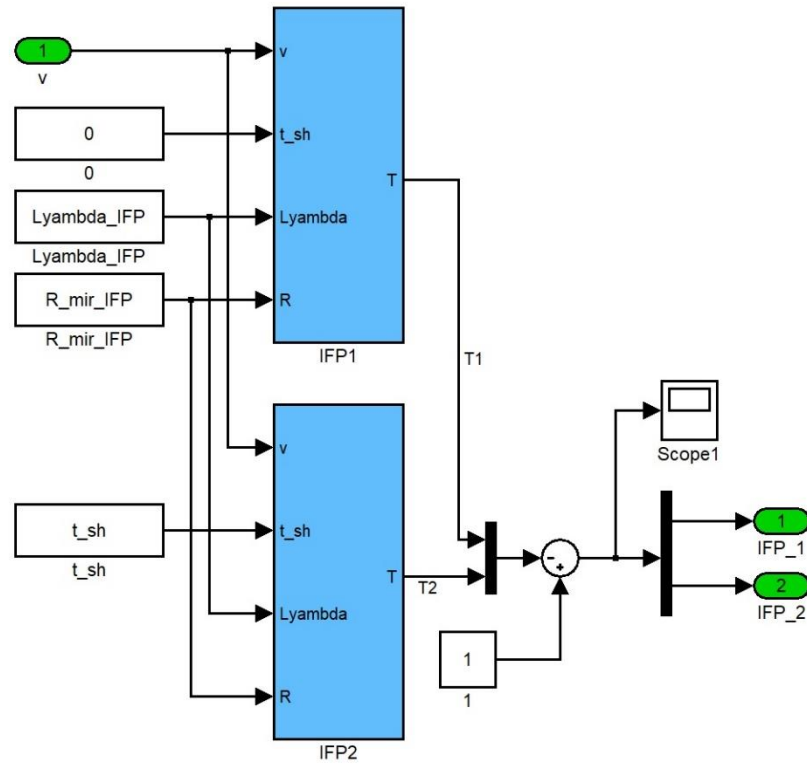


Рисунок Г.3 – Подсистема двухканального интерферометра в среде графического программирования

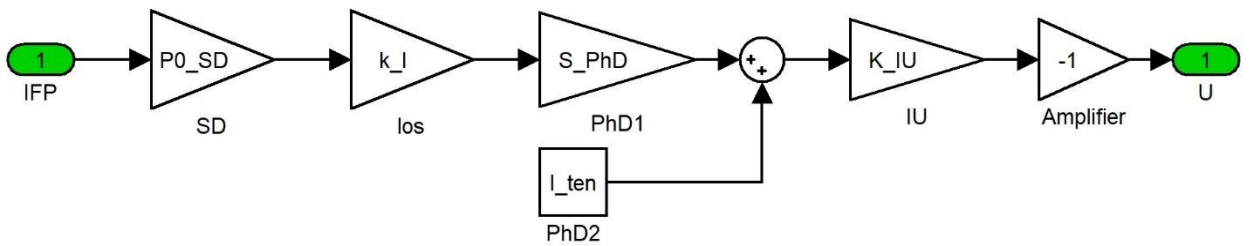


Рисунок Г.4 – Подсистема схемы обработки ИФП в среде графического программирования

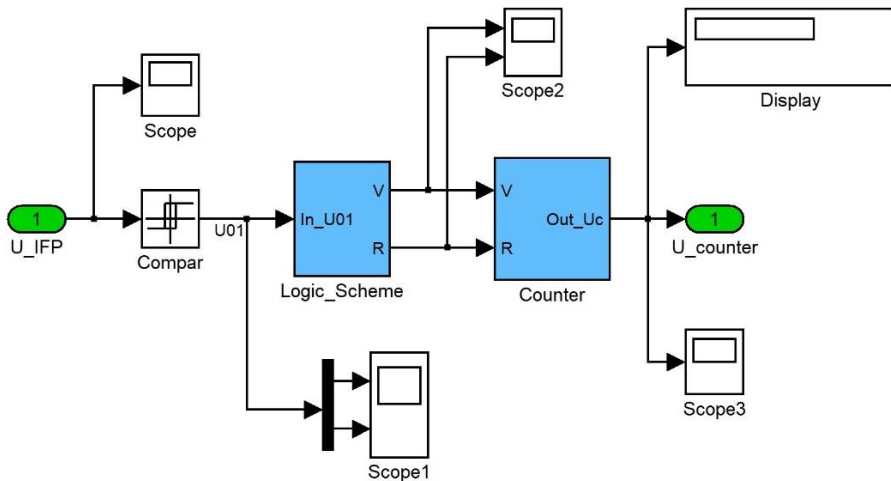


Рисунок Г.5 – Вычислительная схема ИФП в среде графического программирования

Подсистема двухканального интерферометра «*IFP\_SENS*» (Рисунок Г.3) включает две идентичные модели резонатора интерферометра «*IFP1*» и «*IFP2*» (Рисунок Г.6).

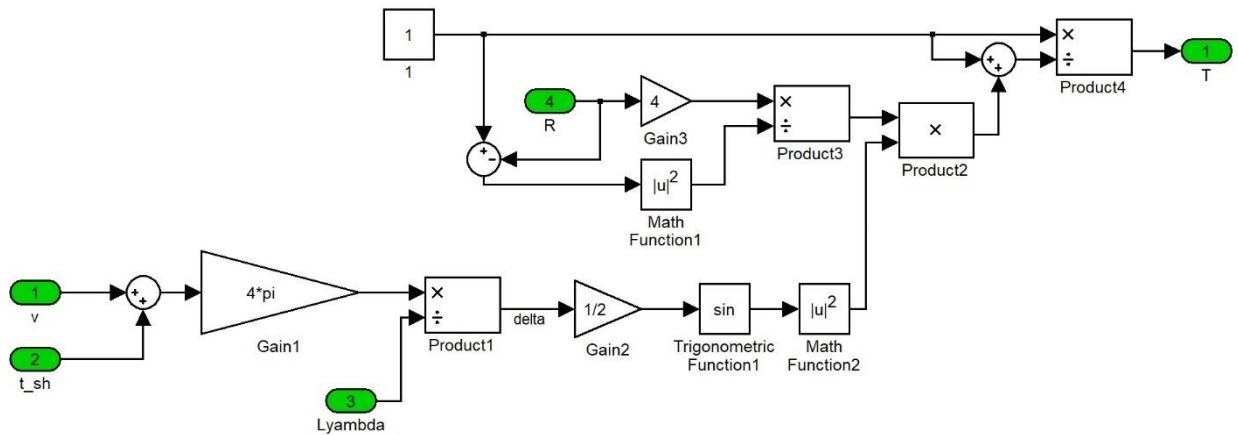


Рисунок Г.6 – Модель резонатора интерферометра

Подсистема вычислительной схемы «*Processing\_Scheme*» (Рисунок Г.5) включает 2 модели:

1. «*Logic\_Scheme*» – модель логической схемы (Рисунок Г.7);
2. «*Counter*» – модель реверсивного счётчика (Рисунок Г.8).

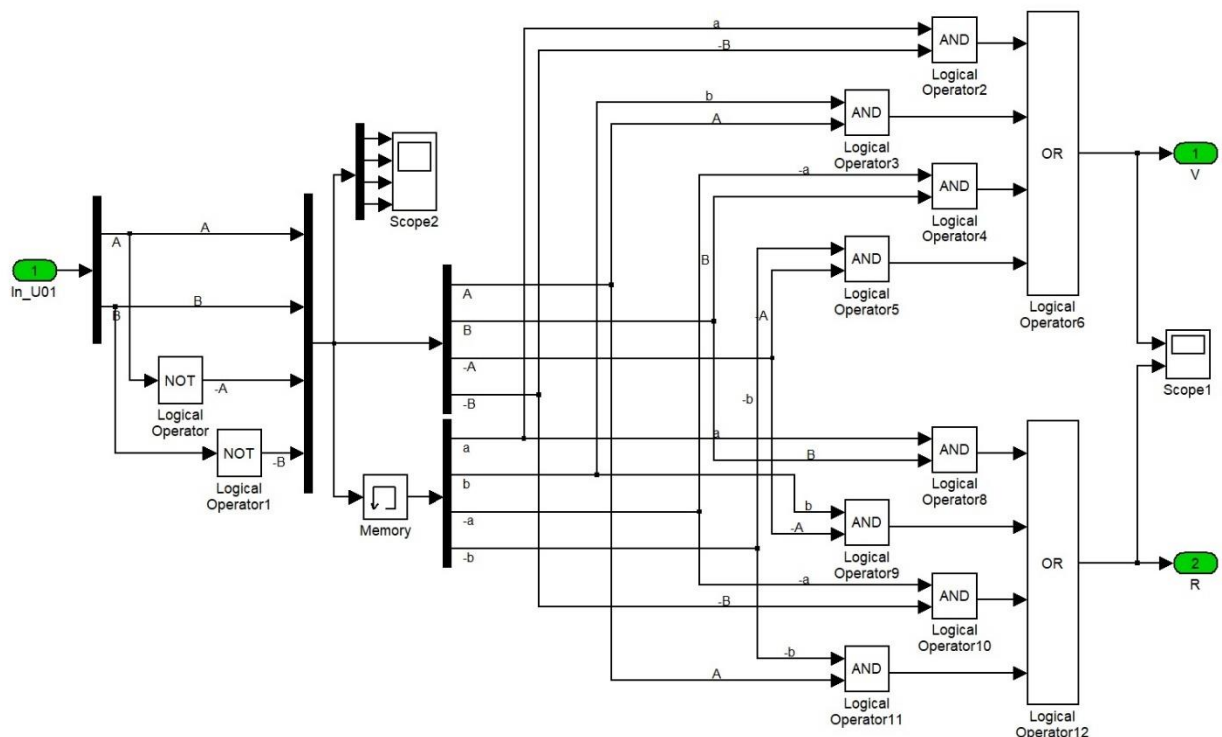


Рисунок Г.7 – Модель логической схемы

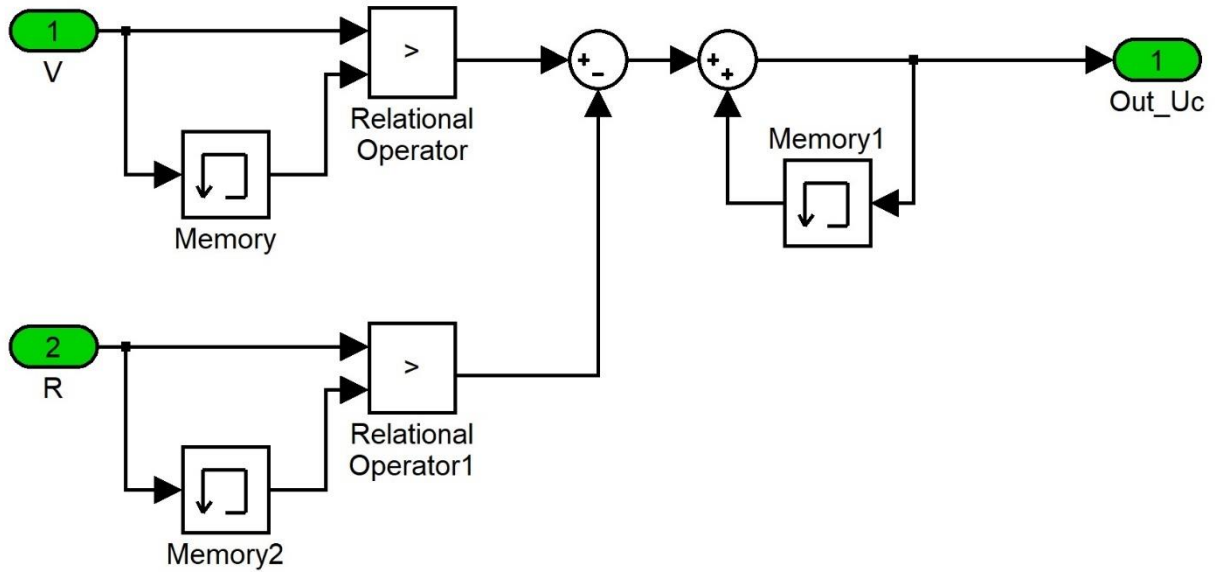


Рисунок Г.8 – Модель реверсивного счётчика

Модель ОТЭ-датчика в среде графического программирования (Рисунок Г.9) включает 2 подсистемы:

1. «*OTE\_SENS*» – подсистема оптического модулятора (Рисунок Г.10);
2. «*SD-PhD-IU-Amp*» – подсистема схемы обработки, включающая ИИ, ФП, преобразователь «ток-напряжение» и усилитель (Рисунок Г.11.).

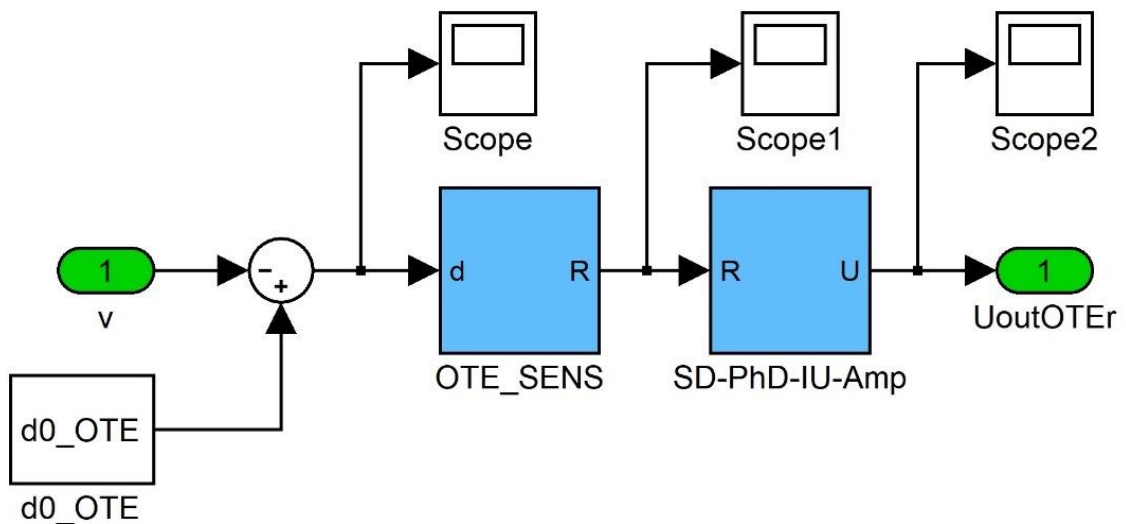


Рисунок Г.9 – Модель ОТЭ-датчика в среде графического программирования

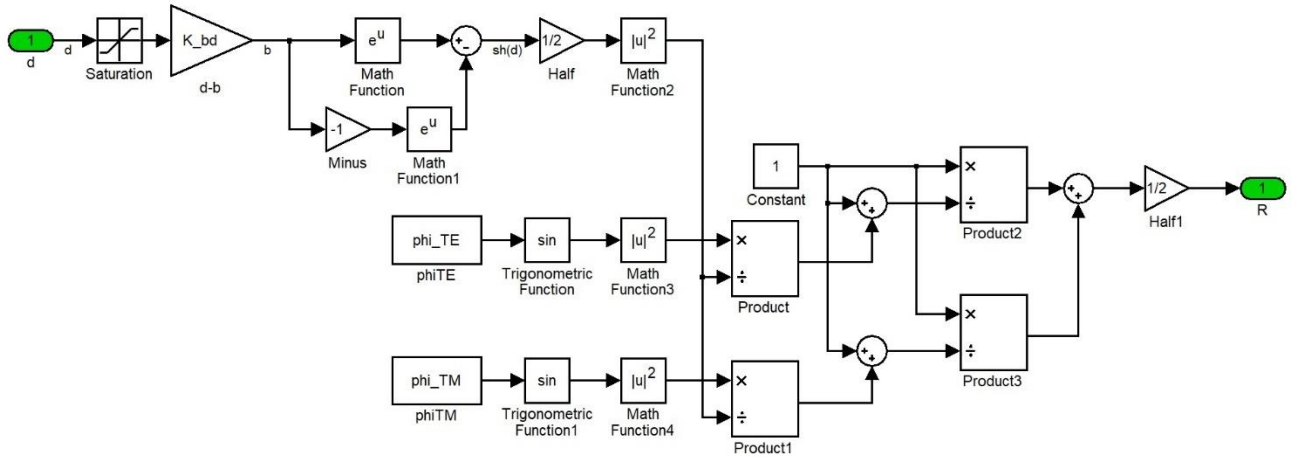


Рисунок Г.10 – Подсистема оптического модулятора

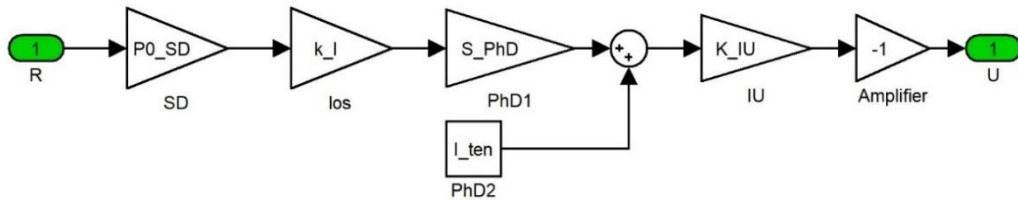


Рисунок Г.11 – Подсистема схемы обработки ОТЭ-датчика

Модель модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на ОТЭ в среде графического программирования включают в себя две подсистемы «R-RIF» (Рисунок Г.12) и «RIF-dOTE» (Рисунок Г.13), описывающие выражения (19) и (20) соответственно.

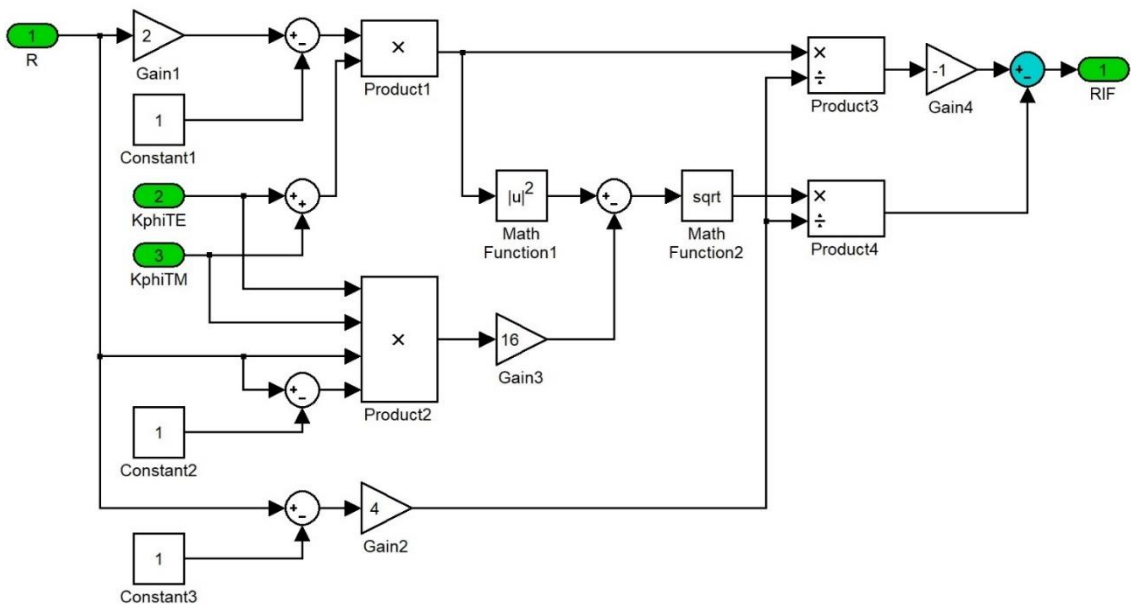


Рисунок Г.12 – Подсистема «R-RIF»

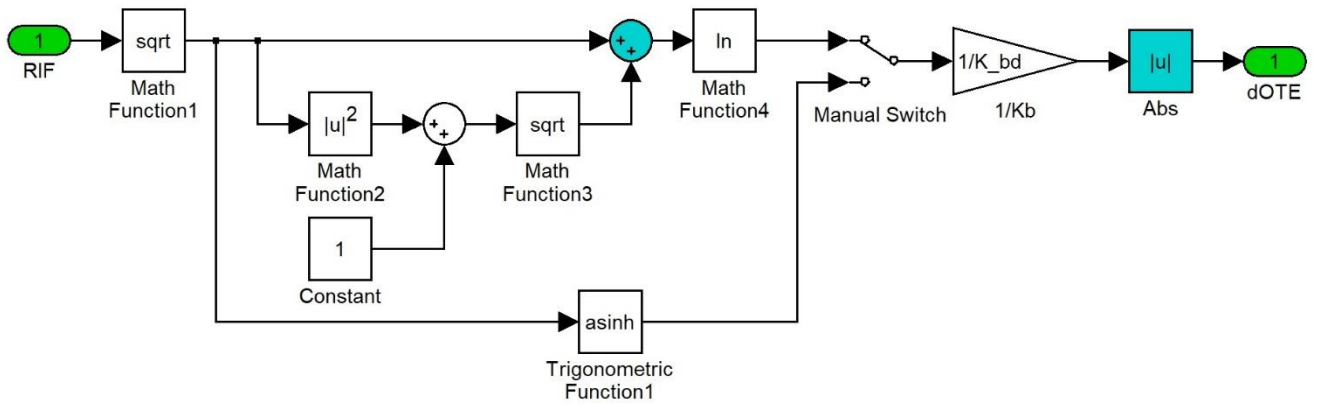


Рисунок Г.13 – Подсистема «RIF-dOTE»

Модель преобразователя с двухконтурной обратной связью с обозначениями передаточных функций динамических звеньев в среде графического программирования (Рисунок Г.14).

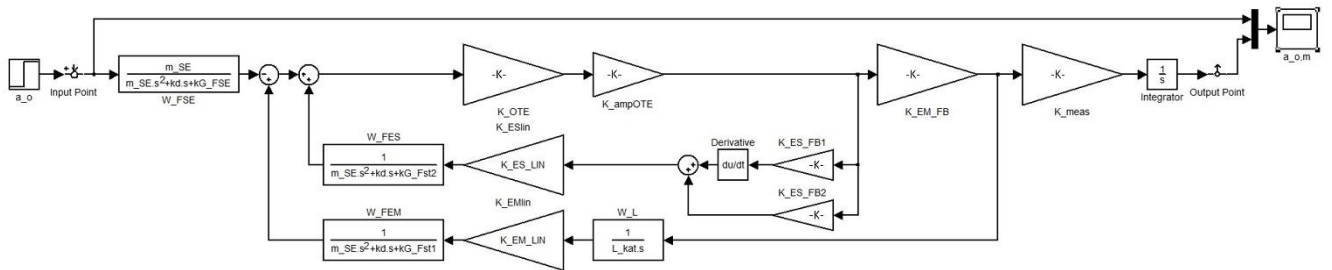


Рисунок Г.14 – Модель преобразователя с двухконтурной обратной связью с обозначениями передаточных функций динамических звеньев в среде графического программирования

**Приложение Д**  
**(рекомендуемое)**

**Алгебраические преобразования и упрощения**

Алгебраические преобразования зависимости отражательной способности:

$$R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)]) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(180^\circ)}{e^{2b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(2 \cdot \varphi_{TM} + 180^\circ)} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(180^\circ)}{e^{2b[d_{OTE}(a)]} + e^{-2b[d_{OTE}(a)]} + 2 \cdot \cos(2 \cdot \varphi_{TE} + 180^\circ)} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (-1)}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot ((-1) \cdot \cos(2 \cdot \varphi_{TM}))} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (-1)}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot ((-1) \cdot \cos(2 \cdot \varphi_{TE}))} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} - 2 + e^{-2b}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot ((-1) \cdot (\cos^2(\varphi_{TM}) - \sin^2(\varphi_{TM})))} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} - 2 + e^{-2b}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot ((-1) \cdot (\cos^2(\varphi_{TE}) - \sin^2(\varphi_{TE})))} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} - 2 + e^{-2b}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (\sin^2(\varphi_{TM}) - \cos^2(\varphi_{TM}))} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} - 2 + e^{-2b}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (\sin^2(\varphi_{TE}) - \cos^2(\varphi_{TE}))} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} - 2 \cdot e^b \cdot e^{-b} + e^{-2b}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TM}) - \sin^2(\varphi_{TM}) - \cos^2(\varphi_{TM}))} \right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{e^{2b} - 2 \cdot e^b \cdot e^{-b} + e^{-2b}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TE}) - \sin^2(\varphi_{TE}) - \cos^2(\varphi_{TE}))} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TM}) - (\sin^2(\varphi_{TM}) + \cos^2(\varphi_{TM})))} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TE}) - (\sin^2(\varphi_{TE}) + \cos^2(\varphi_{TE})))} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TM}) - 1)} + \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TE}) - 1)} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TM}) - 1)} + \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 2 \cdot (2 \cdot \sin^2(\varphi_{TE}) - 1)} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TM}) - 2} + \frac{(e^b - e^{-b})^2}{e^{2b} + e^{-2b} + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TE}) - 2} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{(e^{2b} + e^{-2b} - 2) + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TM})} + \frac{(e^b - e^{-b})^2}{(e^{2b} + e^{-2b} - 2) + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TE})} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(e^b - e^{-b})^2}{(e^b - e^{-b})^2 + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TM})} + \frac{(e^b - e^{-b})^2}{(e^b - e^{-b})^2 + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TE})} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\frac{(e^b - e^{-b})^2}{4}}{\frac{(e^b - e^{-b})^2 + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TM})}{4}} + \frac{\frac{(e^b - e^{-b})^2}{4}}{\frac{(e^b - e^{-b})^2 + 4 \cdot \sin^2(\varphi_{TE})}{4}} \right);$$

$$R_{OTE}(b[d_{OTE}(a)]) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left( \frac{e^{b[d_{OTE}(a)]} - e^{-b[d_{OTE}(a)]}}{2} \right)^2}{\left( \frac{e^{b[d_{OTE}(a)]} - e^{-b[d_{OTE}(a)]}}{2} \right)^2 + \sin^2(\varphi_{TM})} +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \frac{\left( \frac{e^{b[d_{OTE}(a)]} - e^{-b[d_{OTE}(a)]}}{2} \right)^2}{\left( \frac{e^{b[d_{OTE}(a)]} - e^{-b[d_{OTE}(a)]}}{2} \right)^2 + \sin^2(\varphi_{TE})}.$$

Решение и упрощение уравнения для получения математического описания модуля линеаризации функции преобразования узлов считывания на эффекте оптического туннелирования:

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\frac{R_{IF} + K_{\varphi TE}}{R_{IF}}} + \frac{1}{\frac{R_{IF} + K_{\varphi TM}}{R_{IF}}} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_{IF}}{R_{IF} + K_{\varphi TE}} + \frac{R_{IF}}{R_{IF} + K_{\varphi TM}} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_{IF} \cdot (R_{IF} + K_{\varphi TM})}{(R_{IF} + K_{\varphi TE}) \cdot (R_{IF} + K_{\varphi TM})} + \frac{R_{IF} \cdot (R_{IF} + K_{\varphi TE})}{(R_{IF} + K_{\varphi TE}) \cdot (R_{IF} + K_{\varphi TM})} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_{IF}^2 + R_{IF} \cdot K_{\varphi TM} + R_{IF}^2 + R_{IF} \cdot K_{\varphi TE}}{(R_{IF} + K_{\varphi TE}) \cdot (R_{IF} + K_{\varphi TM})} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot R_{IF}^2 + R_{IF} \cdot K_{\varphi TM} + R_{IF} \cdot K_{\varphi TE}}{R_{IF}^2 + R_{IF} \cdot K_{\varphi TE} + R_{IF} \cdot K_{\varphi TM} + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot R_{IF}^2 + (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF}}{R_{IF}^2 + (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_{IF}^2 + (R_{IF}^2 + (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}) - K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}}{R_{IF}^2 + (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}} \right);$$

$$R_{OTE} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{R_{IF}^2 - K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}}{R_{IF}^2 + (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}} + 1 \right);$$



$$2 \cdot R_{OTE} - 1 = \frac{R_{IF}^2 - K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}}{R_{IF}^2 + (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}};$$

$$(2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot R_{IF}^2 + (2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} +$$

$$+ (2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM} - R_{IF}^2 + K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM} = 0;$$

$$2 \cdot (R_{OTE} - 1) \cdot R_{IF}^2 + (2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}) \cdot R_{IF} + 2 \cdot R_{OTE} \cdot K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM} = 0;$$

$$R_{IF1,2} = \frac{-((2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}))}{2 \cdot (2 \cdot (R_{OTE} - 1))} \pm$$

$$\pm \frac{\sqrt{((2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}))^2 - 4 \cdot (2 \cdot (R_{OTE} - 1)) \cdot (2 \cdot R_{OTE} \cdot K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM})}}{2 \cdot (2 \cdot (R_{OTE} - 1))};$$

$$R_{IF1,2} = -\frac{(2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM})}{4 \cdot (R_{OTE} - 1)} \pm$$

$$\pm \frac{\sqrt{((2 \cdot R_{OTE} - 1) \cdot (K_{\varphi TE} + K_{\varphi TM}))^2 - 16 \cdot R_{OTE} \cdot (R_{OTE} - 1) \cdot K_{\varphi TE} \cdot K_{\varphi TM}}}{4 \cdot (R_{OTE} - 1)}.$$

Определение  $d_{OTE}$  для получения математического описания модуля  
линеаризации:

$$e^{K_b \cdot d_{OTE}} - e^{-K_b \cdot d_{OTE}} = 2 \cdot d_{OTEIF};$$

$$e^{K_b \cdot d_{OTE}} - \frac{1}{e^{K_b \cdot d_{OTE}}} = 2 \cdot d_{OTEIF};$$

$$e^{2 \cdot K_b \cdot d_{OTE}} - 2 \cdot d_{OTEIF} \cdot e^{K_b \cdot d_{OTE}} - 1 = 0.$$

Выполним замену  $e^{K_b \cdot d_{OTE}} = x$ :

$$x^2 - 2 \cdot d_{OTEIF} \cdot x - 1 = 0;$$

$$x_{1,2} = \frac{-(-2 \cdot d_{OTEIF}) \pm \sqrt{(-2 \cdot d_{OTEIF})^2 - 4 \cdot (1) \cdot (-1)}}{2 \cdot (1)};$$

$$x_{1,2} = \frac{2 \cdot d_{OTEIF} \pm \sqrt{4 \cdot d_{OTEIF}^2 + 4}}{2};$$

$$x_{1,2} = \frac{2 \cdot d_{OTEIF} \pm 2 \cdot \sqrt{d_{OTEIF}^2 + 1}}{2};$$

$$x_{1,2} = d_{OTEIF} \pm \sqrt{d_{OTEIF}^2 + 1}.$$

Выберем решение и выполним обратную замену:

$$e^{K_b \cdot d_{OTE}} = d_{OTEIF} + \sqrt{d_{OTEIF}^2 + 1};$$

$$K_b \cdot d_{OTE} = \ln\left(d_{OTEIF} + \sqrt{d_{OTEIF}^2 + 1}\right).$$

Получение уравнения перемещения  $v_I(z)$  половины ЧЭ, находящейся ближе к заделке:

$$v_I(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot M_A \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot R_A \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 \right);$$

$$v_I(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( -F_{EM} \cdot \frac{L}{2} - F_{ES} \cdot L - q_{SE} \cdot \frac{L^2}{2} \right) \cdot z^2 \right) +$$

$$+ \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( \frac{1}{6} \cdot (F_{EM} + F_{ES} + q_{SE} \cdot L) \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 \right);$$

$$v_I(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -F_{EM} \cdot \frac{L}{4} \cdot z^2 - F_{ES} \cdot \frac{L}{2} \cdot z^2 - q_{SE} \cdot \frac{L^2}{4} \cdot z^2 \right) +$$

$$+ \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \frac{1}{6} \cdot z^3 + F_{ES} \cdot \frac{1}{6} \cdot z^3 + q_{SE} \cdot \frac{L}{6} \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 \right).$$

Получение уравнения перемещения  $v_{II}(z)$  крайней половины ЧЭ:

$$v_{II}(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot M_A \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot R_A \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 - \frac{1}{6} \cdot F_{EM} \cdot \left( z - \frac{L}{2} \right)^3 \right);$$

$$v_{II}(z) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \left( -F_{EM} \cdot \frac{L}{2} - F_{ES} \cdot L - q_{SE} \cdot \frac{L^2}{2} \right) \cdot z^2 \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( \frac{1}{6} \cdot (F_{EM} + F_{ES} + q_{SE} \cdot L) \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 - \frac{1}{6} \cdot F_{EM} \cdot \left( z - \frac{L}{2} \right)^3 \right); \\
v_{II}(z) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( -F_{EM} \cdot \frac{L}{4} \cdot z^2 - F_{ES} \cdot \frac{L}{2} \cdot z^2 - q_{SE} \cdot \frac{L^2}{4} \cdot z^2 \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \frac{1}{6} \cdot z^3 + F_{ES} \cdot \frac{1}{6} \cdot z^3 + q_{SE} \cdot \frac{L}{6} \cdot z^3 - \frac{1}{24} \cdot q_{SE} \cdot z^4 - \frac{1}{6} \cdot F_{EM} \cdot \left( z - \frac{L}{2} \right)^3 \right).
\end{aligned}$$

Определение уравнения перемещений точки с координатой  $(L/2)$ , находящейся посередине ЧЭ:

$$\begin{aligned}
v_{II} \left( z = \frac{L}{2} \right) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L}{4} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^3 - \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{L}{2} - \frac{L}{2} \right)^3 \right) \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{ES} \cdot \left( -\frac{L}{2} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^3 \right) \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^2}{4} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{L}{6} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^3 - \frac{1}{24} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^4 \right) \right); \\
v_{II} \left( \frac{L}{2} \right) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L^3}{16} + \frac{L^3}{48} \right) + F_{ES} \cdot \left( -\frac{L^3}{8} + \frac{L^3}{48} \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^4}{16} + \frac{L^4}{48} - \frac{L^4}{384} \right) \right); \\
v_{II} \left( \frac{L}{2} \right) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{3 \cdot L^3}{48} + \frac{L^3}{48} \right) + F_{ES} \cdot \left( -\frac{6 \cdot L^3}{48} + \frac{L^3}{48} \right) \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( q_{SE} \cdot \left( -\frac{24 \cdot L^4}{384} + \frac{8 \cdot L^4}{384} - \frac{L^4}{384} \right) \right); \\
v_{II} \left( \frac{L}{2} \right) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{2 \cdot L^3}{48} \right) + F_{ES} \cdot \left( -\frac{5 \cdot L^3}{48} \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{17 \cdot L^4}{384} \right) \right).
\end{aligned}$$

Определение уравнения перемещений  $v_B$  точки с координатой  $(L)$ , соответствующей свободному краю ЧЭ:

$$v_B = v_{II}(z=L) = \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L}{4} \cdot L^2 + \frac{1}{6} \cdot L^3 - \frac{1}{6} \cdot \left( L - \frac{L}{2} \right)^3 \right) \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{ES} \cdot \left( -\frac{L}{2} \cdot L^2 + \frac{1}{6} \cdot L^3 \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^2}{4} \cdot L^2 + \frac{L}{6} \cdot L^3 - \frac{1}{24} \cdot L^4 \right) \right); \\
v_{II}(L) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{L^3}{6} - \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^3 \right) \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{ES} \cdot \left( -\frac{L^3}{2} + \frac{L^3}{6} \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^4}{4} + \frac{L^4}{6} - \frac{L^4}{24} \right) \right); \\
v_{II}(L) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{L^3}{6} - \frac{L^3}{48} \right) \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{ES} \cdot \left( -\frac{L^3}{2} + \frac{L^3}{6} \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{L^4}{4} + \frac{L^4}{6} - \frac{L^4}{24} \right) \right); \\
v_{II}(L) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{12 \cdot L^3}{48} + \frac{8 \cdot L^3}{48} - \frac{L^3}{48} \right) \right) + \\
& + \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{ES} \cdot \left( -\frac{3 \cdot L^3}{6} + \frac{L^3}{6} \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{6 \cdot L^4}{24} + \frac{4 \cdot L^4}{24} - \frac{L^4}{24} \right) \right); \\
v_B = v_{II}(L) &= \frac{1}{E \cdot J_{SE}} \cdot \left( F_{EM} \cdot \left( -\frac{5 \cdot L^3}{48} \right) + F_{ES} \cdot \left( -\frac{2 \cdot L^3}{6} \right) + q_{SE} \cdot \left( -\frac{3 \cdot L^4}{24} \right) \right).
\end{aligned}$$

Определение ПФ контура электромагнитной стабилизации  $W_{EMlin}$ :

$$W_{EMlin}(s) = K_{EMlin} \cdot W_L(s) = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2} \cdot \frac{1}{L_{coil} \cdot s};$$

$$W_{EMlin}(s) = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2} \cdot \frac{1}{\frac{\mu_0 \cdot \mu_{core} \cdot S_{core} \cdot n_{turn}^2}{l_{coil}} \cdot s};$$

$$W_{EMlin}(s) = \frac{n_{turn}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{core}}{16 \cdot d_{EM}^2} \cdot \frac{l_{coil}}{\mu_0 \cdot \mu_{core} \cdot S_{core} \cdot n_{turn}^2 \cdot s};$$

$$W_{EMlin}(s) = \frac{l_{coil}}{16 \cdot d_{EM}^2 \cdot \mu_{core} \cdot s}.$$

Определение ПФ преобразователя линейного ускорения с двухконтурной обратной связью:

$$W_{OTEnES} = \frac{W_{OTEsens}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}.$$

$$W_{OTEnESnEM} = \frac{W_{OTEnES} \cdot W_{EMFB}}{1 - W_{OTEnES} \cdot W_{EMFB} \cdot W_{FEM} \cdot W_{EMlin}};$$

$$W_{OTEnESnEM} = \frac{\frac{W_{OTEsens}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}} \cdot W_{EMFB}}{1 - \frac{W_{OTEsens}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}} \cdot W_{EMFB} \cdot W_{FEM} \cdot W_{EMlin}}};$$

$$W_{OTEnESnEM} = \frac{\frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}}{1 - \frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB} \cdot W_{FEM} \cdot W_{EMlin}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}};$$

$$W_{OTEnESnEM} = \frac{\frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}}{\frac{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}} - \frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB} \cdot W_{FEM} \cdot W_{EMlin}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}};$$

$$W_{OTEnESnEM} = \frac{\frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}}{\frac{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} - W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB} \cdot W_{FEM} \cdot W_{EMlin}}{1 - W_{OTEsens} \cdot W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB}}};$$

$$W_{OTEnESnEM} = \frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB}}{1 - W_{OTEsens} \cdot (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB})}.$$

$$W_{AT} = -W_{FSE} \cdot W_{OTEnESnEM} \cdot W_{meas};$$

$$W_{AT} = -W_{FSE} \cdot \frac{W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB}}{1 - W_{OTEsens} \cdot (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB})} \cdot W_{meas};$$

$$W_{AT} = \frac{-W_{FSE} \cdot W_{OTEsens} \cdot W_{EMFB} \cdot W_{meas}}{1 - W_{OTEsens} \cdot (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB})};$$

$$W_{AT} = \frac{W_{FSE} \cdot (-W_{OTEsens}) \cdot W_{EMFB} \cdot W_{meas}}{1 + (-W_{OTEsens}) \cdot (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB})}$$

Подстановка (33) – (36) в (37):

$$W_{AT} = \frac{W_{FSE} \cdot (-K_{OTE} \cdot K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot \left(K_{meas} \cdot \frac{1}{s}\right)}{1 + (-K_{OTE} \cdot K_{ampOTE}) \cdot \left(W_{FES} \cdot K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2}) + W_{FEM} \cdot \left(K_{EMlin} \cdot \frac{1}{L_{coil} \cdot s}\right) \cdot K_{EMFB}\right)};$$

Подстановка (26) – (28) в (37) и получение числителя передаточной функции:

$$W_{ATnum} = \left(\frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}}\right) \cdot (K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE})) \cdot K_{EMFB} \cdot \left(K_{meas} \cdot \frac{1}{s}\right);$$

$$W_{ATnum} = \left(\frac{m}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}}\right) \cdot \left(\frac{K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas}}{s}\right);$$

$$W_{ATnum} = \frac{m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas}}{(m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot s}$$

Подстановка (26) – (28) в (37) и получение знаменателя передаточной функции:

$$W_{ATden} = (K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE})) \cdot \left(\left(\frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}}\right) \cdot K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})\right) +$$

$$+ (K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE})) \cdot \left(\left(\frac{1}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}}\right) \cdot \left(K_{EMlin} \cdot \frac{1}{L_{coil} \cdot s}\right) \cdot K_{EMFB}\right) + 1;$$

$$W_{ATden} = 1 + (K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE})) \cdot \left(\frac{K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}} + \frac{K_{EMlin} \cdot K_{EMFB}}{(m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot (L_{coil} \cdot s)}\right);$$

$$W_{ATden} = 1 + (K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE})) \cdot \left(\frac{K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}} + \frac{K_{EMlin} \cdot K_{EMFB}}{L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s}\right).$$

ПФ примет вид:

$$W_{AT} = \frac{\frac{m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas}}{(m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot s}}{1 + \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \right) \cdot \left( \frac{K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}} + \frac{K_{EMlin} \cdot K_{EMFB}}{L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s} \right)};$$

$$W_{AT} = \frac{\frac{m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas}}{(m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot s}}{1 + \frac{\left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \right) \cdot K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2})}{m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES}} + \frac{\left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \right) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB}}{L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s}};$$

Выполним замену:

$$W_{num1} = m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas};$$

$$W_{den1} = (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE}) \cdot s;$$

$$W_{num2} = K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2});$$

$$W_{den2} = m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES};$$

$$W_{num3} = K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB};$$

$$W_{den3} = L_{coil} \cdot (m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM}) \cdot s;$$

Получим и упростим:

$$W_{AT} = \frac{\frac{W_{num1}}{W_{den1}}}{1 + \frac{W_{num2}}{W_{den2}} + \frac{W_{num3}}{W_{den3}}};$$

$$W_{AT} = \frac{\frac{W_{num1}}{W_{den1}}}{1 + \frac{W_{num2} \cdot W_{den3}}{W_{den2} \cdot W_{den3}} + \frac{W_{num3} \cdot W_{den2}}{W_{den2} \cdot W_{den3}}};$$

$$W_{AT} = \frac{\frac{W_{num1}}{W_{den1}}}{\frac{W_{den2} \cdot W_{den3}}{W_{den2} \cdot W_{den3}} + \frac{W_{num2} \cdot W_{den3}}{W_{den2} \cdot W_{den3}} + \frac{W_{num3} \cdot W_{den2}}{W_{den2} \cdot W_{den3}}};$$

$$W_{AT} = \frac{\frac{W_{num1}}{W_{den1}}}{\frac{W_{den2} \cdot W_{den3} + W_{num2} \cdot W_{den3} + W_{num3} \cdot W_{den2}}{W_{den2} \cdot W_{den3}}};$$

$$W_{AT} = \frac{W_{num1} \cdot W_{den2} \cdot W_{den3}}{W_{den1} \cdot (W_{den2} \cdot W_{den3} + W_{num2} \cdot W_{den3} + W_{num3} \cdot W_{den2})};$$

$$W_{AT} = \frac{W_{num1} \cdot W_{den2} \cdot W_{den3}}{W_{den1} \cdot W_{den2} \cdot W_{den3} + W_{den1} \cdot W_{num2} \cdot W_{den3} + W_{den1} \cdot W_{num3} \cdot W_{den2}}.$$

Выполнение обратных подстановок позволит получить окончательный вид числителя и знаменателя ПФ:

$$W_{ATnum}(s) = \left( m \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right);$$

$$W_{ATden}(s) = \left( \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot s \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right) + \left( \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot s \right) \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot \left( K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2} \right) \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right) + \left( \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot s \right) \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right);$$

ИЛИ:

$$W_{ATnum}(s) = m \cdot L_{coil} \cdot K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMFB} \cdot K_{meas} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right);$$

$$W_{ATden}(s) = \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right) + \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{ESlin} \cdot \left( K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2} \right) \right) \cdot \left( L_{coil} \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FEM} \right) \cdot s \right) + \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FSE} \right) \cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right);$$



$$\cdot \left( K_{OTE} \cdot (-K_{ampOTE}) \cdot K_{EMlin} \cdot K_{EMFB} \right) \cdot \left( m \cdot s^2 + K_D \cdot s + G_{FES} \right);$$

при выполнении сокращения.

Определение ПФ преобразователя для перемещений ЧЭ по измеряемому ускорению:

$$W_x = - \frac{W_{FSE}}{1 + (-W_{OTEsens}) \cdot (W_{FES} \cdot W_{ESlin} \cdot W_{ESFB} + W_{FEM} \cdot W_{EMlin} \cdot W_{EMFB})};$$

$$W_x = - \frac{W_{FSE}}{1 + (-K_{OTE} \cdot K_{ampOTE}) \cdot \left( W_{FES} \cdot K_{ESlin} \cdot (K_{ESFB1} \cdot s + K_{ESFB2}) + W_{FEM} \cdot \left( K_{EMlin} \cdot \frac{1}{L_{coil} \cdot s} \right) \cdot K_{EMFB} \right)}.$$

## Приложение Е (рекомендуемое)

### Дополнительный анализ деформаций чувствительного элемента при различных его топологиях

В системе трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования исследованы различные топологии чувствительного элемента круглой формы. Варьировались параметры торсионов (длина, ширина, толщина), их количество, а также, размер консольной части чувствительно элемента.

Представлены четыре топологии чувствительного элемента (Рисунок Е.1): а) на четырёх толстых ножках; б) на одной короткой толстой ножке с прорезью; в) на двух толстых ножках; г) на одной короткой тонкой ножке с прорезью. Толщина ЧЭ равна 0,6 мм, толщина «толстой» ножки – 0,4 мм, а толщина «тонкой» – 0,1 мм.

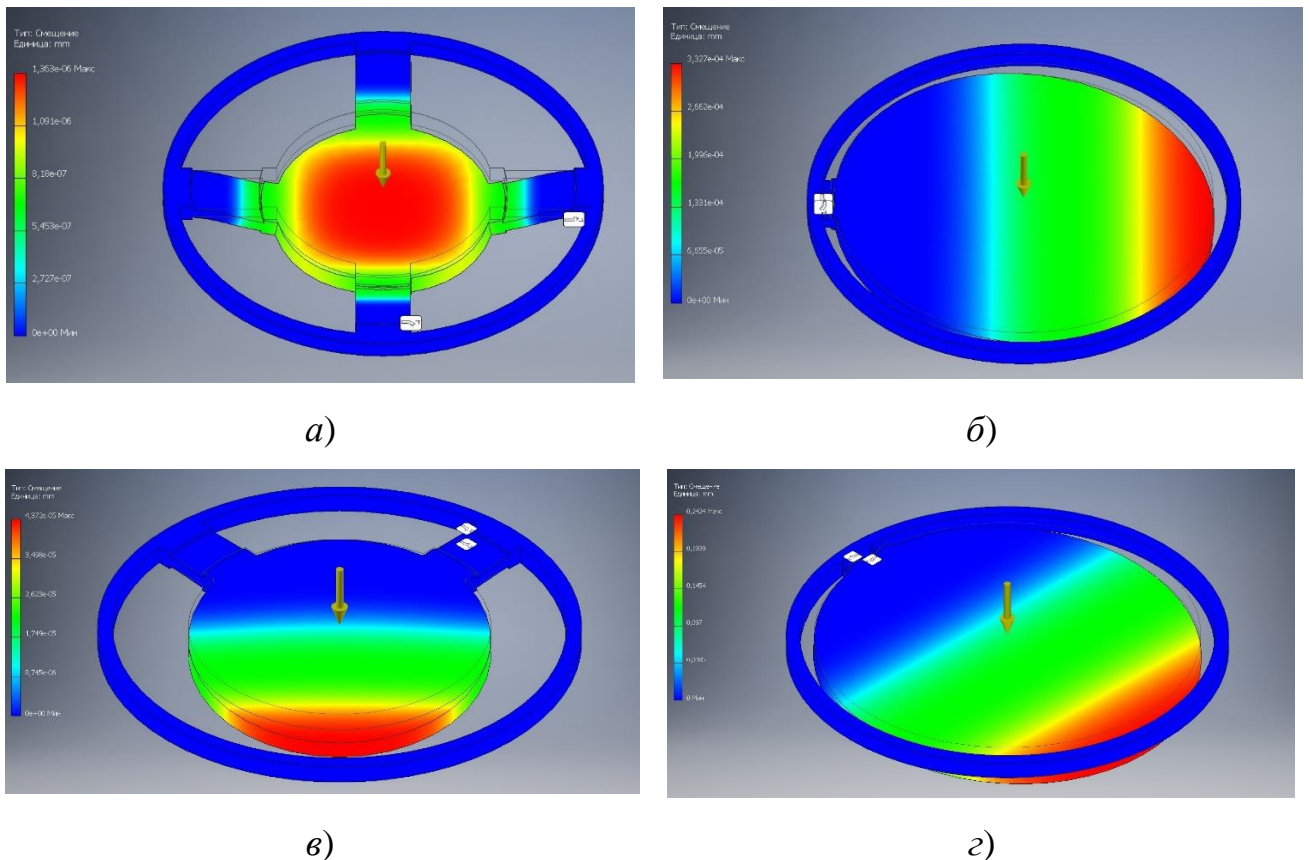
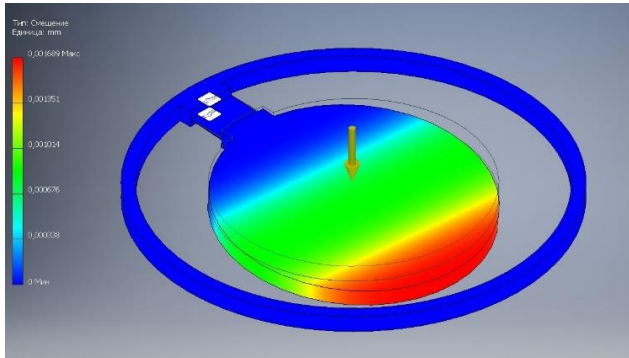
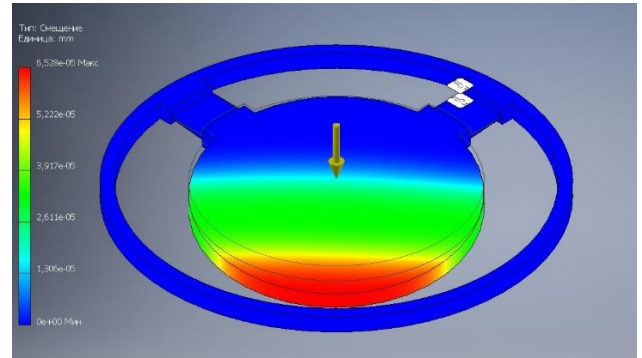


Рисунок Е.1 – Топологии круглого ЧЭ: а) на четырёх толстых ножках; б) на одной толстой ножке с прорезью; в) на двух толстых ножках; г) на одной тонкой ножке с прорезью

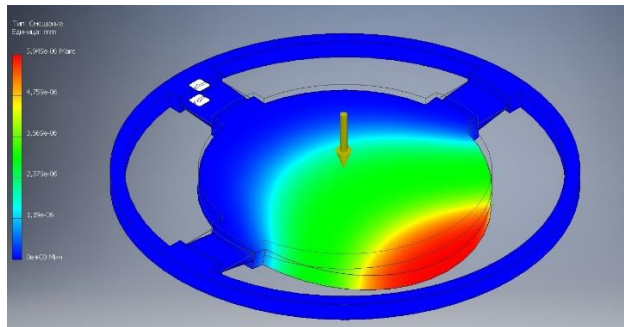
Представлены топологии круглого ЧЭ на тонких длинных ножках при варьировании их количества и месторасположения (Рисунок Е.2): *а)* одна ножка; *б)* две перпендикулярно расположенные ножки; *в)* три ножки под углами 90 градусов; *г)* три ножки под углами 120 градусов; *д)* четыре ножки.



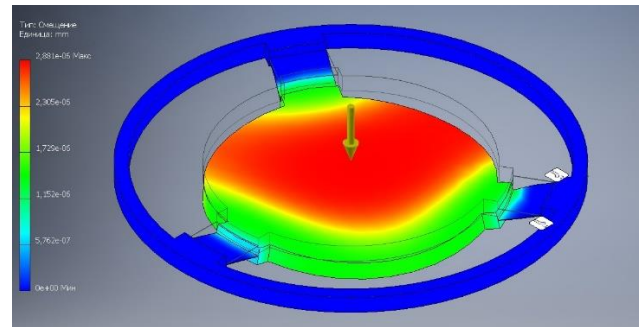
а)



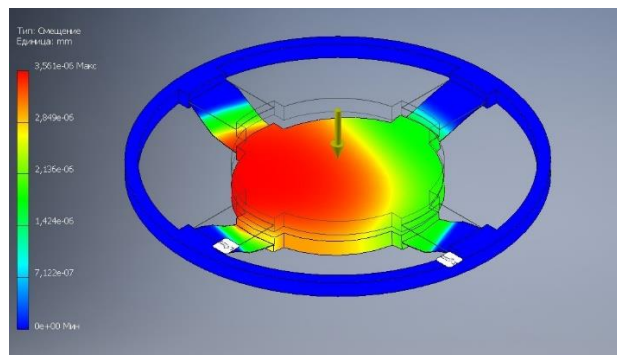
б)



в)



г)



д)

Рисунок Е.2 – Топологии круглого ЧЭ на тонких длинных ножках: *а)* одна ножка; *б)* две перпендикулярно расположенные ножки; *в)* три ножки под углами 90 градусов; *г)* три ножки под углами 120 градусов; *д)* четыре ножки

Однако с точки зрения удобства изготовления и монтажа наиболее приоритетной является квадратная структура.

## Приложение Ж

### (рекомендуемое)

#### Текст программы синтеза оптического преобразователя линейного ускорения

Программный модуль, отвечающий за приём, обработку и вывод данных.

```

from PyQt5.QtGui import QPixmap # Импорт классов из библиотеки
from PyQt5 import QtWidgets # Импорт классов из библиотеки
import sys # Подключение модуля, обеспечивающего доступ
# к переменным и функциям, взаимодействующим с интерпретатором
import os # Подключение модуля для работы с операционной системой
import math # Подключение дополнительного математического модуля
import GUI # Подключение модуля, отвечающего за создание графического
пользовательского интерфейса

class AccelerometerCreator(QtWidgets.QMainWindow, GUI.Ui_MainWindow): # Создание
класса
    def __init__(self): # Функция для доступа к переменным и методам в моуле
графического интерфейса
        super().__init__() # Инициализация встроенной функции для работы с
классами
        self.setupUi(self) # Инициализация графического интерфейса
        self.main_function() # Инициализация функции приёма, обработки и вывода
информации
        # Обработка изменения данных в полях и флагах интерфейса
        self.lineEdit.editingFinished.connect(self.main_function) # Поле длины
преобразователя
        self.lineEdit_2.editingFinished.connect(self.main_function) # Поле ширины
преобразователя
        self.lineEdit_3.editingFinished.connect(self.main_function) # Поле высоты
преобразователя
        self.lineEdit_6.editingFinished.connect(self.main_function) # Поле
диапазона измерений
        self.checkBox.clicked.connect(self.main_function) # Флаг обратных связей
        self.checkBox_2.clicked.connect(self.main_function) # Флаг кручения
        self.checkBox_3.clicked.connect(self.main_function) # Флаг виброускорений

    def main_function(self): # Описание основной функции приёма, обработки и
вывода информации
        # Подключение изображений (структурных схем и функций преобразования)
        figure1address = os.path.abspath('Figures\\1.jpg') # Структурная схема 1
        figure2address = os.path.abspath('Figures\\2.jpg') # Структурная схема 2
        figure3address = os.path.abspath('Figures\\3.jpg') # Структурная схема 3
        figure4address = os.path.abspath('Figures\\4.jpg') # Структурная схема 4
        figure5address = os.path.abspath('Figures\\5.jpg') # Функция
преобразования 1
        figure6address = os.path.abspath('Figures\\6.jpg') # Функция
преобразования 2
        figure7address = os.path.abspath('Figures\\7.jpg') # Функция
преобразования 3
        figure8address = os.path.abspath('Figures\\8.jpg') # Функция
преобразования 4

        # Считывание и проверка флагов
        feedback = int(self.checkBox.checkState()) # Флаг обратных связей
        if feedback == 0:
            self.checkBox_2.setCheckState(0)

```

```

if feedback == 2:
    self.checkBox_3.setChecked(0)
    torsion = int(self.checkBox_2.checkedState()) # Флаг кручения
    vibration = int(self.checkBox_3.checkedState()) # Флаг виброускорений
# Обработка флагов и вывод структуры
if (feedback == 0) and (vibration == 0):
    self.lineEdit_15.setText("С адаптируемым оптическим модулем")
    self.lineEdit_16.setText("Двухканальный ИФП и ОТЭ-датчик")
    self.lineEdit_17.setText("Отсутствуют")
    self.label_22.setPixmap(QPixmap(figure1address))
    self.label_23.setPixmap(QPixmap(figure5address))
if (feedback == 0) and (vibration == 2):
    self.lineEdit_15.setText("На ИФП с алгоритмом повышения точности")
    self.lineEdit_16.setText("Двухканальный ИФП")
    self.lineEdit_17.setText("Отсутствуют")
    self.label_22.setPixmap(QPixmap(figure2address))
    self.label_23.setPixmap(QPixmap(figure6address))
if (feedback == 2) and (torsion == 0):
    self.lineEdit_15.setText("Компенсационный с контуром ЭМ ОС")
    self.lineEdit_16.setText("ОТЭ-датчики")
    self.lineEdit_17.setText("Электромагнитная")
    self.label_22.setPixmap(QPixmap(figure3address))
    self.label_23.setPixmap(QPixmap(figure7address))
if (feedback == 2) and (torsion == 2):
    self.lineEdit_15.setText("Компенсационный с контурами ЭМ и ЭС ОС")
    self.lineEdit_16.setText("ОТЭ-датчики")
    self.lineEdit_17.setText("Электромагнитная и электростатическая")
    self.label_22.setPixmap(QPixmap(figure4address))
    self.label_23.setPixmap(QPixmap(figure8address))

# Считывание и проверка значений в полях информации
    minimum_detectable_acceleration = float(0.06) # Минимальное детектируемое
ускорение
    transducer_length = str(self.lineEdit.displayText()) # Считывание длины
преобразователя
    transducer_width = str(self.lineEdit_2.displayText()) # Считывание ширины
преобразователя
    transducer_height = str(self.lineEdit_3.displayText()) # Считывание
высоты преобразователя
    measuring_range = str(self.lineEdit_6.displayText()) # Считывание
диапазона измерений

    def number_format(value_str): # Описание функции проверки формата
значений
        value_str = value_str.replace(',', '.')
        value_str = value_str.replace(' ', '')
        amount_points = int(value_str.count('.'))
        numbers = value_str.isdigit()
        value_str_new = value_str.replace('.', '0')
        if ((amount_points > 1) or
            ((amount_points == 1) and ((value_str_new.isdigit() is False)
or (len(value_str) == 1))) or
            ((amount_points < 1) and (numbers is False))):
            value_str = 0
        return value_str
    transducer_length = float(number_format(transducer_length)) # Длина
преобразователя
    transducer_width = float(number_format(transducer_width)) # Ширина
преобразователя
    transducer_height = float(number_format(transducer_height)) # Высота
преобразователя
    measuring_range = float(number_format(measuring_range)) # Диапазон
измерений

```

```

def range_limiting(value, minimum_value, maximum_value): # Описание
функции проверки значений
    if value < minimum_value:
        value = minimum_value
    if value > maximum_value:
        value = maximum_value
    return value
transducer_length = range_limiting(transducer_length, 5.0, 50.0) #
Проверка значения длины
transducer_width = range_limiting(transducer_width, 5.0, 50.0) # Проверка
значения ширины
transducer_height = range_limiting(transducer_height, 5.0, 50.0) #
Проверка значения высоты
measuring_range = range_limiting(measuring_range,
minimum_detectable_acceleration, 1000.0) # Проверка
# значения диапазона измерений
self.lineEdit.setText(str(transducer_length)) # Вывод длины
преобразователя
self.lineEdit_2.setText(str(transducer_width)) # Считывание ширины
преобразователя
self.lineEdit_3.setText(str(transducer_height)) # Считывание высоты
преобразователя
self.lineEdit_6.setText(str(measuring_range)) # Считывание диапазона
измерений
transducer_length = float(self.lineEdit.displayText()) # Считывание длины
преобразователя
transducer_width = float(self.lineEdit_2.displayText()) # Считывание
ширины преобразователя
transducer_height = float(self.lineEdit_3.displayText()) # Считывание
высоты преобразователя
measuring_range = float(self.lineEdit_6.displayText()) # Считывание
диапазона измерений
# Расчёт длины и ширины чувствительного элемента
se_length = round(float((min(transducer_length, transducer_width,
transducer_height))*0.8), 1) # Длина
se_width = round(float((min(transducer_length, transducer_width,
transducer_height))*0.8), 1) # Ширина
# Определение толщины чувствительного элемента
if se_length > 20 and feedback == 0:
    se_height = round(float(0.63), 2)
else:
    se_height = round(float(0.5), 2)
# Определение топологии чувствительного элемента
if se_length < 10:
    if feedback == 2:
        self.lineEdit_7.setText("20")
        self.lineEdit_8.setText("Не требуются")
    else:
        if 0 <= se_length < 6.25:
            self.lineEdit_7.setText("15")
            self.lineEdit_8.setText("Не требуются")
        if 6.25 <= se_length < 7.5:
            self.lineEdit_7.setText("10")
            self.lineEdit_8.setText("Не требуются")
        if 7.5 <= se_length < 8.75:
            self.lineEdit_7.setText("Не требуется")
            self.lineEdit_8.setText("10")
        if 8.75 <= se_length < 10:
            self.lineEdit_7.setText("Не требуется")
            self.lineEdit_8.setText("5")
    else:
        self.lineEdit_7.setText("Не требуется")

```

```

self.lineEdit_8.setText("Не требуются")

quartz_density = float(2.2) # Плотность кварцевого стекла
se_elasticity_modulus = float(730*(10**9)) # Модуль Юнга кварцевого
стекла
# Расчёт массы чувствительного элемента
se_mass = round(float((se_length * se_width * se_height *
quartz_density)/1000), 2)
# Расчёт максимальных перемещений чувствительного элемента
se_maximum_displacements = round(float(((3 * quartz_density * ((se_length
/ 10) ** 4)) / (
2 * se_elasticity_modulus * ((se_height / 10) ** 2))) *
measuring_range * (10 ** 6)), 3)
# Расчёт собственной частоты чувствительного элемента
se_free_frequency = int((math.sqrt(
(2*se_elasticity_modulus*((se_height/10)**2))/(3*quartz_density*((se_length/10)**4
)))/(2*math.pi))
# Расчёт объёма преобразователя
transducer_volume = round(float((transducer_length * transducer_width *
transducer_height)/1000), 2)
# Расчёт массы преобразователя
if feedback == 2:
    feedback_km = 1.5
else:
    feedback_km = 1.0

if torsion == 2:
    torsion_km = 1.05
else:
    torsion_km = 1.0
transducer_mass = round(float(1.5 * feedback_km * torsion_km *
transducer_volume * quartz_density), 2)
# Расчёт динамического диапазона преобразователя
dynamic_range =
round(float(20*(math.log10(math.fabs(measuring_range/minimum_detectable_accelerati
on))))), 2)
# Вывод результатов расчёта
self.lineEdit_4.setText(str(se_length)) # Вывод длины чувствительного
элемента
self.lineEdit_5.setText(str(se_width)) # Вывод ширины чувствительного
элемента
self.lineEdit_9.setText(str(se_height)) # Вывод толщины чувствительного
элемента
self.lineEdit_18.setText(str(se_mass)) # Вывод массы чувствительного
элемента
# Вывод максимальных перемещений и собственной частоты чувствительного
элемента
if se_length < 10:
    self.lineEdit_19.setText("-") # Вывод максимальных перемещений
чувствительного элемента
    self.lineEdit_14.setText("-") # Вывод собственной частоты
чувствительного элемента
else:
    self.lineEdit_19.setText(str(se_maximum_displacements)) # Вывод
максимальных перемещений
    self.lineEdit_14.setText(str(se_free_frequency)) # Вывод собственной
частоты чувствительного элемента
    self.lineEdit_10.setText(str(transducer_volume)) # Вывод объёма
преобразователя
    self.lineEdit_11.setText(str(transducer_mass)) # Вывод массы
преобразователя

```

```

        self.lineEdit_12.setText(str(minimum_detectable_acceleration)) # Вывод
минимального детектируемого ускорения
        self.lineEdit_13.setText(str(dynamic_range)) # Вывод динамического
диапазона преобразователя

def main(): # Описание основной функции (main())
    app = QtWidgets.QApplication(sys.argv) # Создание нового экземпляра
QtWidgets.QApplication
    window = AccelerometerCreator() # Создание объекта класса
AccelerometerCreator
    window.show() # Демонстрация окна интерфейса
    app.exec_() # Запуск приложения

if __name__ == '__main__': # Если программа запускается напрямую (а не
импортируется)
    main() # Запуск функции main()

```

**Программный модуль, отвечающий за создание графического пользовательского интерфейса.**

```

from PyQt5 import QtCore, QtGui, QtWidgets

class Ui_MainWindow(object):
    def setupUi(self, MainWindow):
        MainWindow.setObjectName("MainWindow")
        MainWindow.setEnabled(True)
        MainWindow.resize(834, 734)
        MainWindow.setMaximumSize(QtCore.QSize(1250, 750))
        MainWindow.setToolButtonStyle(QtCore.Qt.ToolButtonIconOnly)
        MainWindow.setDocumentMode(False)
        self.centralwidget = QtWidgets.QWidget(MainWindow)
        self.centralwidget.setObjectName("centralwidget")
        self.horizontalLayout_2 = QtWidgets.QHBoxLayout(self.centralwidget)
        self.horizontalLayout_2.setObjectName("horizontalLayout_2")
        spacerItem = QtWidgets.QSpacerItem(40, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
        self.horizontalLayout_2.addItem(spacerItem)
        self.horizontalLayout = QtWidgets.QHBoxLayout()
        self.horizontalLayout.setObjectName("horizontalLayout")
        self.verticalLayout_4 = QtWidgets.QVBoxLayout()
        self.verticalLayout_4.setObjectName("verticalLayout_4")
        spacerItem1 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
        self.verticalLayout_4.addItem(spacerItem1)
        self.groupBox = QtWidgets.QGroupBox(self.centralwidget)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.groupBox.setFont(font)
        self.groupBox.setObjectName("groupBox")
        self.gridLayout_7 = QtWidgets.QGridLayout(self.groupBox)
        self.gridLayout_7.setObjectName("gridLayout_7")

```



```

self.gridLayout = QtWidgets.QGridLayout()
self.gridLayout.setObjectName("gridLayout")
self.lineEdit_3 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_3.setFont(font)
self.lineEdit_3.setInputMask("")
self.lineEdit_3.setMaxLength(4)
self.lineEdit_3.setCursorPosition(4)
self.lineEdit_3.setObjectName("lineEdit_3")
self.gridLayout.addWidget(self.lineEdit_3, 2, 2, 1, 1)
spacerItem2 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem2, 1, 1, 1, 1)
spacerItem3 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem3, 2, 3, 1, 1)
self.label_18 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_18.setFont(font)
self.label_18.setObjectName("label_18")
self.gridLayout.addWidget(self.label_18, 3, 0, 1, 1)
spacerItem4 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem4, 0, 1, 1, 1)
spacerItem5 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem5, 3, 3, 1, 1)
self.checkBox_2 = QtWidgets.QCheckBox(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.checkBox_2.setFont(font)
self.checkBox_2.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.PointingHandCursor))
self.checkBox_2.setObjectName("checkBox_2")
self.gridLayout.addWidget(self.checkBox_2, 1, 4, 1, 1)
self.lineEdit = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit.setFont(font)
self.lineEdit.setInputMask("")
self.lineEdit.setMaxLength(4)
self.lineEdit.setCursorPosition(4)
self.lineEdit.setObjectName("lineEdit")
self.gridLayout.addWidget(self.lineEdit, 0, 2, 1, 1)
spacerItem6 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem6, 1, 3, 1, 1)
self.checkBox = QtWidgets.QCheckBox(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.checkBox.setFont(font)
self.checkBox.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.PointingHandCursor))
self.checkBox.setObjectName("checkBox")
self.gridLayout.addWidget(self.checkBox, 0, 4, 1, 1)
self.label_2 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_2.setFont(font)
self.label_2.setObjectName("label_2")
self.gridLayout.addWidget(self.label_2, 1, 0, 1, 1)
self.label_4 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()

```

```

font.setPointSize(10)
self.label_4.setFont(font)
self.label_4.setObjectName("label_4")
self.gridLayout.addWidget(self.label_4, 2, 0, 1, 1)
self.checkBox_3 = QtWidgets.QCheckBox(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.checkBox_3.setFont(font)
self.checkBox_3.setObjectName("checkBox_3")
self.gridLayout.addWidget(self.checkBox_3, 2, 4, 1, 1)
spacerItem7 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem7, 3, 1, 1, 1)
spacerItem8 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem8, 2, 1, 1, 1)
self.lineEdit_6 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_6.setFont(font)
self.lineEdit_6.setInputMask("")
self.lineEdit_6.setMaxLength(7)
self.lineEdit_6.setCursorPosition(5)
self.lineEdit_6.setObjectName("lineEdit_6")
self.gridLayout.addWidget(self.lineEdit_6, 3, 2, 1, 1)
spacerItem9 = QtWidgets.QSpacerItem(40, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem9, 3, 4, 1, 1)
spacerItem10 = QtWidgets.QSpacerItem(18, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout.addItem(spacerItem10, 0, 3, 1, 1)
self.lineEdit_2 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_2.setFont(font)
self.lineEdit_2.setInputMask("")
self.lineEdit_2.setMaxLength(4)
self.lineEdit_2.setCursorPosition(4)
self.lineEdit_2.setObjectName("lineEdit_2")
self.gridLayout.addWidget(self.lineEdit_2, 1, 2, 1, 1)
self.label = QtWidgets.QLabel(self.groupBox)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label.setFont(font)
self.label.setObjectName("label")
self.gridLayout.addWidget(self.label, 0, 0, 1, 1)
self.gridLayout_7.addLayout(self.gridLayout, 0, 0, 1, 1)
self.verticalLayout_4.addWidget(self.groupBox)
spacerItem11 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_4.addItem(spacerItem11)
self.groupBox_2 = QtWidgets.QGroupBox(self.centralwidget)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.groupBox_2.setFont(font)
self.groupBox_2.setObjectName("groupBox_2")
self.gridLayout_8 = QtWidgets.QGridLayout(self.groupBox_2)
self.gridLayout_8.setObjectName("gridLayout_8")
self.verticalLayout = QtWidgets.QVBoxLayout()
self.verticalLayout.setObjectName("verticalLayout")
self.gridLayout_2 = QtWidgets.QGridLayout()
self.gridLayout_2.setObjectName("gridLayout_2")

```

```

        spacerItem12 = QtWidgets.QSpacerItem(28, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
        self.gridLayout_2.addItem(spacerItem12, 0, 0, 1, 1)
        self.label_5 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.label_5.setFont(font)
        self.label_5.setObjectName("label_5")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.label_5, 1, 0, 1, 1)
        self.label_6 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.label_6.setFont(font)
        self.label_6.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.ArrowCursor))
        self.label_6.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.label_6.setObjectName("label_6")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.label_6, 0, 1, 1, 1)
        spacerItem13 = QtWidgets.QSpacerItem(28, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
        self.gridLayout_2.addItem(spacerItem13, 0, 2, 1, 1)
        self.label_9 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.label_9.setFont(font)
        self.label_9.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.label_9.setObjectName("label_9")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.label_9, 0, 5, 1, 1)
        spacerItem14 = QtWidgets.QSpacerItem(28, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
        self.gridLayout_2.addItem(spacerItem14, 0, 4, 1, 1)
        self.label_8 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.label_8.setFont(font)
        self.label_8.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.label_8.setObjectName("label_8")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.label_8, 0, 3, 1, 1)
        self.lineEdit_4 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.lineEdit_4.setFont(font)
        self.lineEdit_4.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.IBeamCursor))
        self.lineEdit_4.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.lineEdit_4.setReadOnly(True)
        self.lineEdit_4.setObjectName("lineEdit_4")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.lineEdit_4, 1, 1, 1, 1)
        self.label_7 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.label_7.setFont(font)
        self.label_7.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.label_7.setObjectName("label_7")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.label_7, 1, 2, 1, 1)
        self.lineEdit_9 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
        font = QtGui.QFont()
        font.setPointSize(10)
        self.lineEdit_9.setFont(font)
        self.lineEdit_9.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.IBeamCursor))
        self.lineEdit_9.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.lineEdit_9.setReadOnly(True)
        self.lineEdit_9.setObjectName("lineEdit_9")
        self.gridLayout_2.addWidget(self.lineEdit_9, 1, 5, 1, 1)
        self.label_14 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)

```

```

font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_14.setFont(font)
self.label_14.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
self.label_14.setObjectName("label_14")
self.gridLayout_2.addWidget(self.label_14, 1, 4, 1, 1)
self.lineEdit_5 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_5.setFont(font)
self.lineEdit_5.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.IBeamCursor))
self.lineEdit_5.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
self.lineEdit_5.setReadOnly(True)
self.lineEdit_5.setObjectName("lineEdit_5")
self.gridLayout_2.addWidget(self.lineEdit_5, 1, 3, 1, 1)
self.verticalLayout.addLayout(self.gridLayout_2)
self.line = QtWidgets.QFrame(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.line.setFont(font)
self.line.setFrameShape(QtWidgets.QFrame.HLine)
self.line.setFrameShadow(QtWidgets.QFrame.Sunken)
self.line.setObjectName("line")
self.verticalLayout.addWidget(self.line)
self.gridLayout_3 = QtWidgets.QGridLayout()
self.gridLayout_3.setObjectName("gridLayout_3")
self.lineEdit_8 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_8.setFont(font)
self.lineEdit_8.setText("")
self.lineEdit_8.setReadOnly(True)
self.lineEdit_8.setObjectName("lineEdit_8")
self.gridLayout_3.addWidget(self.lineEdit_8, 1, 3, 1, 1)
self.label_10 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_10.setFont(font)
self.label_10.setObjectName("label_10")
self.gridLayout_3.addWidget(self.label_10, 0, 0, 1, 1)
self.lineEdit_7 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_7.setFont(font)
self.lineEdit_7.setText("")
self.lineEdit_7.setReadOnly(True)
self.lineEdit_7.setObjectName("lineEdit_7")
self.gridLayout_3.addWidget(self.lineEdit_7, 0, 3, 1, 1)
spacerItem15 = QtWidgets.QSpacerItem(208, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_3.addItem(spacerItem15, 0, 1, 1, 2)
self.label_11 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_11.setFont(font)
self.label_11.setObjectName("label_11")
self.gridLayout_3.addWidget(self.label_11, 1, 0, 1, 2)
spacerItem16 = QtWidgets.QSpacerItem(98, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_3.addItem(spacerItem16, 1, 2, 1, 1)
self.verticalLayout.addLayout(self.gridLayout_3)
self.line_4 = QtWidgets.QFrame(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()

```

```

font.setPointSize(10)
self.line_4.setFont(font)
self.line_4.setFrameShape(QtWidgets.QFrame.HLine)
self.line_4.setFrameShadow(QtWidgets.QFrame.Sunken)
self.line_4.setObjectName("line_4")
self.verticalLayout.addWidget(self.line_4)
self.gridLayout_4 = QtWidgets.QGridLayout()
self.gridLayout_4.setObjectName("gridLayout_4")
spacerItem17 = QtWidgets.QSpacerItem(118, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_4.addItem(spacerItem17, 2, 1, 1, 1)
spacerItem18 = QtWidgets.QSpacerItem(118, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_4.addItem(spacerItem18, 0, 1, 1, 1)
self.lineEdit_18 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_18.setFont(font)
self.lineEdit_18.setReadOnly(True)
self.lineEdit_18.setObjectName("lineEdit_18")
self.gridLayout_4.addWidget(self.lineEdit_18, 0, 2, 1, 1)
self.label_21 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_21.setFont(font)
self.label_21.setObjectName("label_21")
self.gridLayout_4.addWidget(self.label_21, 0, 0, 1, 1)
self.lineEdit_14 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_14.setFont(font)
self.lineEdit_14.setReadOnly(True)
self.lineEdit_14.setObjectName("lineEdit_14")
self.gridLayout_4.addWidget(self.lineEdit_14, 2, 2, 1, 1)
self.label_17 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_17.setFont(font)
self.label_17.setObjectName("label_17")
self.gridLayout_4.addWidget(self.label_17, 2, 0, 1, 1)
self.lineEdit_19 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_19.setFont(font)
self.lineEdit_19.setReadOnly(True)
self.lineEdit_19.setObjectName("lineEdit_19")
self.gridLayout_4.addWidget(self.lineEdit_19, 1, 2, 1, 1)
spacerItem19 = QtWidgets.QSpacerItem(40, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_4.addItem(spacerItem19, 1, 1, 1, 1)
self.label_24 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_2)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_24.setFont(font)
self.label_24.setObjectName("label_24")
self.gridLayout_4.addWidget(self.label_24, 1, 0, 1, 1)
self.verticalLayout.addLayout(self.gridLayout_4)
self.gridLayout_8.addLayout(self.verticalLayout, 0, 0, 1, 1)
self.verticalLayout_4.addWidget(self.groupBox_2)
spacerItem20 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_4.addItem(spacerItem20)
self.groupBox_3 = QtWidgets.QGroupBox(self.centralwidget)

```

```

font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.groupBox_3.setFont(font)
self.groupBox_3.setObjectName("groupBox_3")
self.verticalLayout_3 = QtWidgets.QVBoxLayout(self.groupBox_3)
self.verticalLayout_3.setObjectName("verticalLayout_3")
self.verticalLayout_2 = QtWidgets.QVBoxLayout()
self.verticalLayout_2.setObjectName("verticalLayout_2")
self.gridLayout_9 = QtWidgets.QGridLayout()
self.gridLayout_9.setObjectName("gridLayout_9")
self.label_3 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_3.setFont(font)
self.label_3.setObjectName("label_3")
self.gridLayout_9.addWidget(self.label_3, 0, 0, 1, 2)
self.lineEdit_15 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_15.setFont(font)
self.lineEdit_15.setReadOnly(True)
self.lineEdit_15.setObjectName("lineEdit_15")
self.gridLayout_9.addWidget(self.lineEdit_15, 0, 3, 1, 1)
spacerItem21 = QtWidgets.QSpacerItem(88, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_9.addItem(spacerItem21, 2, 1, 1, 2)
self.label_20 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_20.setFont(font)
self.label_20.setObjectName("label_20")
self.gridLayout_9.addWidget(self.label_20, 1, 0, 1, 1)
self.label_19 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_19.setFont(font)
self.label_19.setObjectName("label_19")
self.gridLayout_9.addWidget(self.label_19, 2, 0, 1, 1)
self.lineEdit_17 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_17.setFont(font)
self.lineEdit_17.setReadOnly(True)
self.lineEdit_17.setObjectName("lineEdit_17")
self.gridLayout_9.addWidget(self.lineEdit_17, 2, 3, 1, 1)
self.lineEdit_16 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_16.setFont(font)
self.lineEdit_16.setReadOnly(True)
self.lineEdit_16.setObjectName("lineEdit_16")
self.gridLayout_9.addWidget(self.lineEdit_16, 1, 3, 1, 1)
spacerItem22 = QtWidgets.QSpacerItem(88, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_9.addItem(spacerItem22, 1, 1, 1, 2)
self.verticalLayout_2.addLayout(self.gridLayout_9)
self.line_2 = QtWidgets.QFrame(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.line_2.setFont(font)
self.line_2.setFrameShape(QtWidgets.QFrame.HLine)
self.line_2.setFrameShadow(QtWidgets.QFrame.Sunken)
self.line_2.setObjectName("line_2")

```

```

self.verticalLayout_2.addWidget(self.line_2)
self.gridLayout_10 = QtWidgets.QGridLayout()
self.gridLayout_10.setObjectName("gridLayout_10")
self.label_12 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_12.setFont(font)
self.label_12.setObjectName("label_12")
self.gridLayout_10.addWidget(self.label_12, 0, 0, 1, 2)
spacerItem23 = QtWidgets.QSpacerItem(128, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_10.addItem(spacerItem23, 0, 2, 1, 2)
self.lineEdit_10 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_10.setFont(font)
self.lineEdit_10.setReadOnly(True)
self.lineEdit_10.setObjectName("lineEdit_10")
self.gridLayout_10.addWidget(self.lineEdit_10, 0, 4, 1, 1)
self.label_13 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_13.setFont(font)
self.label_13.setObjectName("label_13")
self.gridLayout_10.addWidget(self.label_13, 1, 0, 1, 1)
spacerItem24 = QtWidgets.QSpacerItem(148, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_10.addItem(spacerItem24, 1, 1, 1, 3)
self.lineEdit_11 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_11.setFont(font)
self.lineEdit_11.setReadOnly(True)
self.lineEdit_11.setObjectName("lineEdit_11")
self.gridLayout_10.addWidget(self.lineEdit_11, 1, 4, 1, 1)
spacerItem25 = QtWidgets.QSpacerItem(48, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_10.addItem(spacerItem25, 2, 3, 1, 1)
self.lineEdit_12 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.lineEdit_12.setFont(font)
self.lineEdit_12.setReadOnly(True)
self.lineEdit_12.setObjectName("lineEdit_12")
self.gridLayout_10.addWidget(self.lineEdit_12, 2, 4, 1, 1)
self.label_16 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_16.setFont(font)
self.label_16.setObjectName("label_16")
self.gridLayout_10.addWidget(self.label_16, 3, 0, 1, 1)
self.label_15 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_15.setFont(font)
self.label_15.setObjectName("label_15")
self.gridLayout_10.addWidget(self.label_15, 2, 0, 1, 3)
spacerItem26 = QtWidgets.QSpacerItem(148, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.gridLayout_10.addItem(spacerItem26, 3, 1, 1, 3)
self.lineEdit_13 = QtWidgets.QLineEdit(self.groupBox_3)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)

```

```

self.lineEdit_13.setFont(font)
self.lineEdit_13.setReadOnly(True)
self.lineEdit_13.setObjectName("lineEdit_13")
self.gridLayout_10.addWidget(self.lineEdit_13, 3, 4, 1, 1)
self.verticalLayout_2.addLayout(self.gridLayout_10)
self.verticalLayout_3.addLayout(self.verticalLayout_2)
self.verticalLayout_4.addWidget(self.groupBox_3)
spacerItem27 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_4.addItem(spacerItem27)
self.horizontalLayout.addLayout(self.verticalLayout_4)
self.horizontalLayout_2.addLayout(self.horizontalLayout)
spacerItem28 = QtWidgets.QSpacerItem(40, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.horizontalLayout_2.addItem(spacerItem28)
self.line_3 = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.line_3.setFont(font)
self.line_3.setFrameShape(QtWidgets.QFrame.VLine)
self.line_3.setFrameShadow(QtWidgets.QFrame.Sunken)
self.line_3.setObjectName("line_3")
self.horizontalLayout_2.addWidget(self.line_3)
spacerItem29 = QtWidgets.QSpacerItem(40, 20,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.horizontalLayout_2.addItem(spacerItem29)
self.verticalLayout_5 = QtWidgets.QVBoxLayout()
self.verticalLayout_5.setObjectName("verticalLayout_5")
spacerItem30 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_5.addItem(spacerItem30)
self.groupBox_4 = QtWidgets.QGroupBox(self.centralwidget)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.groupBox_4.setFont(font)
self.groupBox_4.setObjectName("groupBox_4")
self.gridLayout_5 = QtWidgets.QGridLayout(self.groupBox_4)
self.gridLayout_5.setObjectName("gridLayout_5")
self.label_22 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_4)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_22.setFont(font)
self.label_22.setText("")
self.label_22.setObjectName("label_22")
self.gridLayout_5.addWidget(self.label_22, 0, 0, 1, 1)
self.verticalLayout_5.addWidget(self.groupBox_4)
spacerItem31 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_5.addItem(spacerItem31)
self.line_5 = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.line_5.setFont(font)
self.line_5.setFrameShape(QtWidgets.QFrame.HLine)
self.line_5.setFrameShadow(QtWidgets.QFrame.Sunken)
self.line_5.setObjectName("line_5")
self.verticalLayout_5.addWidget(self.line_5)
spacerItem32 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_5.addItem(spacerItem32)
self.groupBox_5 = QtWidgets.QGroupBox(self.centralwidget)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)

```



```

self.groupBox_5.setFont(font)
self.groupBox_5.setObjectName("groupBox_5")
self.gridLayout_6 = QtWidgets.QGridLayout(self.groupBox_5)
self.gridLayout_6.setObjectName("gridLayout_6")
self.label_23 = QtWidgets.QLabel(self.groupBox_5)
font = QtGui.QFont()
font.setPointSize(10)
self.label_23.setFont(font)
self.label_23.setText("")
self.label_23.setObjectName("label_23")
self.gridLayout_6.addWidget(self.label_23, 0, 0, 1, 1)
self.verticalLayout_5.addWidget(self.groupBox_5)
spacerItem33 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 40,
QtWidgets.QSizePolicy.Minimum, QtWidgets.QSizePolicy.Expanding)
self.verticalLayout_5.addItem(spacerItem33)
self.horizontalLayout_2.addLayout(self.verticalLayout_5)
spacerItem34 = QtWidgets.QSpacerItem(20, 252,
QtWidgets.QSizePolicy.Expanding, QtWidgets.QSizePolicy.Minimum)
self.horizontalLayout_2.addItem(spacerItem34)
MainWindow.setCentralWidget(self.centralwidget)
self.menubar = QtWidgets.QMenuBar(MainWindow)
self.menubar.setGeometry(QtCore.QRect(0, 0, 834, 21))
self.menubar.setObjectName("menubar")
MainWindow.setMenuBar(self.menubar)
self.statusbar = QtWidgets.QStatusBar(MainWindow)
self.statusbar.setObjectName("statusbar")
MainWindow.setStatusBar(self.statusbar)

self.retranslateUi(MainWindow)
QtCore.QMetaObject.connectSlotsByName(MainWindow)

def retranslateUi(self, MainWindow):
    _translate = QtCore.QCoreApplication.translate
    MainWindow.setWindowTitle(_translate("MainWindow",
"AccelerometerCreator"))
    self.groupBox.setTitle(_translate("MainWindow", "Входные данные"))
    self.lineEdit_3.setText(_translate("MainWindow", "12.5"))
    self.label_18.setText(_translate("MainWindow", "Диапазон измерений,
м/с2"))
    self.checkBox_2.setText(_translate("MainWindow", "Требуется уменьшить
кручение ЧЭ"))
    self.lineEdit.setText(_translate("MainWindow", "12.5"))
    self.checkBox.setText(_translate("MainWindow", "Требуется компенсационные
ОС"))
    self.label_2.setText(_translate("MainWindow", "Ширина преобразователя,
мм"))
    self.label_4.setText(_translate("MainWindow", "Высота преобразователя,
мм"))
    self.checkBox_3.setText(_translate("MainWindow", "Требуется измерение
виброускорений"))
    self.lineEdit_6.setText(_translate("MainWindow", "100.0"))
    self.lineEdit_2.setText(_translate("MainWindow", "12.5"))
    self.label.setText(_translate("MainWindow", "Длина преобразователя, мм"))
    self.groupBox_2.setTitle(_translate("MainWindow", "Характеристики ЧЭ"))
    self.label_5.setText(_translate("MainWindow", "Размеры ЧЭ:"))
    self.label_6.setText(_translate("MainWindow", "Длина ЧЭ, мм"))
    self.label_9.setText(_translate("MainWindow", "Толщина ЧЭ, мм"))
    self.label_8.setText(_translate("MainWindow", "Ширина ЧЭ, мм"))
    self.label_7.setText(_translate("MainWindow", "x"))
    self.label_14.setText(_translate("MainWindow", "x"))
    self.label_10.setText(_translate("MainWindow", "Локальное утонение ЧЭ,
%"))

```

```

        self.label_11.setText(_translate("MainWindow", "Перфорационные отверстия
на ЧЭ, %"))
        self.label_21.setText(_translate("MainWindow", "Масса ЧЭ, г"))
        self.label_17.setText(_translate("MainWindow", "Собственная частота ЧЭ,
Гц"))
        self.label_24.setText(_translate("MainWindow", "Максимальные перемещения
ЧЭ, мкм"))
        self.groupBox_3.setTitle(_translate("MainWindow", "Характеристики
преобразователя"))
        self.label_3.setText(_translate("MainWindow", "Структура
преобразователя"))
        self.label_20.setText(_translate("MainWindow", "Элементы считывания"))
        self.label_19.setText(_translate("MainWindow", "Обратные связи"))
        self.label_12.setText(_translate("MainWindow", "Объём преобразователя,
см³"))
        self.label_13.setText(_translate("MainWindow", "Масса преобразователя,
г"))
        self.label_16.setText(_translate("MainWindow", "Динамический диапазон,
дБ"))
        self.label_15.setText(_translate("MainWindow", "Минимальное детектируемое
ускорение, м/с²"))
        self.groupBox_4.setTitle(_translate("MainWindow", "Структурная схема
преобразователя"))
        self.groupBox_5.setTitle(_translate("MainWindow", "Функция
преобразования"))

if __name__ == "__main__":
    import sys
    app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
    MainWindow = QtWidgets.QMainWindow()
    ui = Ui_MainWindow()
    ui.setupUi(MainWindow)
    MainWindow.show()
    sys.exit(app.exec_())

```