

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом 9
Тел.: +7 (495) 408-42-54, факс: +7 (495) 408-68-69
info@mipt.ru

04.03.2024 № 6.16-05/1699

на № _____ от _____

Исполняющему обязанности проректора
по научной работе федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»

доктору технических наук, профессору
Равиковичу Ю.А

Уважаемый Юрий Александрович!

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех) в ответ на Ваше письмо от 23.01.2024 г. №010/1862-1 направляет Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу Крылова Алексея Анатольевича «Разработка технологии калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11. Информационно-измерительные управляющие системы.

Приложения: 2 экземпляра отзыва на диссертацию.

Проректор по научной работе



В.А. Баган

Исполнитель:
Тарасенко А.Б.
tarasenko.ab@mipt.ru
тел.: +7 (985) 368-87-29

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом 9
Тел.: +7 (495) 408-42-54, факс: +7 (495) 408-68-69
info@mipt.ru

04.03.2024 № 6.16-05/1700

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе МФТИ



Баган Виталий
Анатольевич

2024 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу **Крылова Алексея Анатольевича** на тему «Разработка технологии калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

Актуальность выбранной темы. Современные тенденции к миниатюризации летательных аппаратов и расширению сфер их применения делают необходимым изучение возможностей обеспечения автономных полетов для малых беспилотных летательных аппаратов. На данный момент наиболее распространённым способом определения местоположения являются спутниковые навигационные системы, которые, однако, имеют недостаточную надёжность. Наиболее подходящим решением этой проблемы являются навигационные системы, в том числе на основе МЭМС гироскопов и акселерометров. Ввиду вышесказанного тематика диссертационной работы **актуальна**. В данной работе рассмотрена калибровка гироскопических блоков (ГИБ) на основе МЭМС датчиков в широком диапазоне воздействий и внешних условий для их последующего применения на заданных траекториях с небольшим временем полета (до 15 минут).

В диссертационной работе разработаны методики стендовой калибровки, при этом продемонстрировано, что по причине большого количества случайных погрешностей полная калибровка может занимать продолжительное время (более 150 часов). С другой стороны, длительная калибровка приводит к тому, что за время её выполнения статистические

погрешности уже могут измениться по величине. В связи с этим предложен подход к сокращению времени калибровки, основанный на оценке соотношения точности калибровки и времени калибровки, которые обеспечивают требуемую точность навигационных параметров. В качестве универсального статистического приема для нахождения этого соотношения предлагается использование доверительного интервала, а нахождение оптимальных наборов параметров предлагается устанавливать при помощи генетического алгоритма.

В работе приведены результаты натурных исследований характеристик реальных гироскопических блоков на МЭМС датчиках. Значительный интерес представляют исследования изменения величин погрешностей при хранении, влияния линейного ускорения на показания МЭМС гироскопов, изменение смещения нуля при температурной динамике. Эти исследования легли в основу моделей погрешностей и методик калибровки, позволяющих поэтапно калибровать эти погрешности для максимальной реализации потенциала точности инерциальных МЭМС-сенсоров.

Научные положения, выводы и рекомендации в рассматриваемой работе обоснованы и подтверждены в достаточном объеме.

Содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа изложена на 165 страницах, содержит 67 рисунков и 41 таблицу, список литературы составляет 205 работ отечественных и зарубежных авторов.

Во **введении** работы обоснована актуальность темы, указана основная цель, поставлены задачи, определены научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проанализированы основные погрешности МЭМС датчиков, дан обзор работ, посвященных физическим свойствам и методикам калибровки погрешностей, математическим методам оценивания погрешностей, способам внешней коррекции измерительных данных, а также существующим программно-аппаратным системам калибровки.

Во **второй главе** приведены модели погрешностей МЭМС гироскопов и акселерометров, а также методики их калибровки в составе гироскопического блока. Рассмотрены формулы определения погрешностей как для прямых измерений угловых скоростей и линейных ускорений, так и для измерений координат, проекций скоростей и углов ориентации, вычисленных БИНС. Помимо задания необходимых движений на стендовой аппаратуре рассматриваются задание различных температур (в том числе в динамике), проведение статистически необходимого количества включений, рассматривается способ докалибровки.

В **третьей главе** описан разработанный программный комплекс, являющийся ядром автоматизированного процесса калибровки. Программный комплекс включает в себя программное обеспечение, позволяющее автоматически управлять стендами, записями с ГИБ, производить расчет калибровочных параметров, оптимизировать план калибровки, производить прогноз ухода долговременных погрешностей.

В **четвертой главе** описаны результаты натурального эксперимента по калибровке реальных ГИБ согласно приведенным методикам. Результаты эксперимента совпали с результатами моделирования, что подтверждает правильность моделей и методик, а также корректность разработанного программного обеспечения. Сравнение результатов калибровки для двух разных способов получения данных (прямые измерения и прогноз) не выявило существенных отличий. Был сделан вывод о предпочтительности прямых измерений по причине снижения количества вычислений. Также приведен результат сравнения прогноза изменения погрешностей при хранении и реально измеренных значений, программа прогноза продемонстрировала высокую точность оценки.

Научная новизна состоит в следующем:

1) Выполнено подробное исследование влияния линейного ускорения на погрешности МЭМС гироскопов, гистерезиса смещения нуля, долговременной нестабильности смещения нуля и масштабного коэффициента. Даны рекомендации по определению систематических значений этих погрешностей и учету случайных.

2) Предложены методики калибровки погрешностей ГИБ на МЭМС гироскопах и акселерометрах, адаптированные к особенностям этого типа датчиков; методики объединены и реализованы в общем программном комплексе.

3) Разработан способ оптимизации параметров калибровки, позволяющий в 5 раз сократить время калибровки при достижении требуемых значений погрешностей.

Соответствие автореферата диссертационной работе. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные методики калибровки могут быть внедрены любым производителем ГИБ на МЭМС гироскопах и акселерометрах, что позволит повысить точность откалиброванных ГИБ в расширенных условиях его конечного применения.

Значимость результатов диссертации для науки и производства. Предложенный в работе подход по оптимизации времени калибровки, а также рассмотренный способ групповой калибровки ГИБ имеют значение при организации серийного производства ГИБ и инерциальных навигационных систем на их основе. Так как подобные системы обеспечивают одну из важнейших функций в работе малых беспилотных летательных

аппаратов, указанные результаты значимы для развития отечественной науки в рамках приоритетных направлений. Значимость научных результатов работы также подтверждена двумя актами о внедрении – в производственный процесс в АО «ГосНИИП» и в образовательный процесс в МАИ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Предложенные методики калибровки могут быть применены в опытно-конструкторских работах, а также серийном изготовлении гироскопических блоков и инерциальных навигационных систем с использованием МЭМС датчиков. Использование результатов диссертационной работы возможно в таких организациях как НИУ «МИЭТ», ПАО «МИЭА», АО «РПКБ», ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». Исследования в области повышения точности МЭМС датчиков в составе гироскопических блоков следует продолжить в МАИ, АО «ГосНИИП» и АО «ГИРООПТИКА». Полученные результаты могут послужить базой для углубленных научно-исследовательских работ.

Достоверность полученных результатов определяется применением современных методов оценивания параметров информационно-измерительных систем, релевантных математических моделей описания характеристик технических систем, сопоставимостью методик с методиками, используемыми в современной научной литературе, согласованностью результатов экспериментов и имитационного моделирования.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)» по пунктам:

- 1 - Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем;
- 2 - Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений;
- 7 - Методы и системы программного и информационного обеспечения процессов исследования и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем, в том числе с использованием систем искусственного интеллекта.

По диссертационной работе Крылова Алексея Анатольевича имеются следующие **замечания:**

1) В работе недостаточно полно проанализированы зарубежные датчики, желательно было бы дополнить работу сравнением систематических и случайных погрешностей с доступными датчиками зарубежного производства (например, Analog Devices и Silicon Sensing, а также восточных производителей).

2) Объяснение разделения начального смещения нуля и дрейфа нуля выглядит недостаточно подробным, имеет вид оценочного суждения.

3) Часто приводимые в работе обозначения и выражения могли бы быть значительно более лаконичны.

4) В первой главе проведен анализ различных средств коррекции, однако приведённые в таблице 1.10 оценки точности некоторых типов таких средств даны без уточнения условий работы и параметров прибора, от которых эта точность зависит. В практической части работы уделено мало внимания способам эксплуатационной калибровки, несмотря на упоминание в первой главе.

5) При изучении изменчивости ошибок инерциальных датчиков по времени хранения не было выполнено явного разделения влияния времени хранения и времени эксплуатации прибора.

6) Некоторые серии экспериментов выполнялись с недостаточной выдержкой в выключенном состоянии между включениями, что могло негативно повлиять на точность оценки погрешностей.

7) Процедура проверки остаточных погрешностей содержит значительные упрощения, зачастую неясно, какие величины сопоставляются до и после калибровки.

8) Рассмотренные в четвертой главе варианты оптимизации калибровки с помощью генетического алгоритма и метода нейронных сетей целесообразно дополнить сравнением с другими известными алгоритмами оптимизации с высоким быстродействием, такими как метод Нестерова, квазинытоновские методы. Применение того или иного алгоритма стоит дополнительно обосновать исследованием выбранной целевой функции в виде линейной комбинации погрешностей на гладкость и дифференцируемость.

9) Приложения к диссертации малозначительны, без них содержание работы не теряет ничего существенного.

10) Список литературы недостаточно полно охватывает тематику исследования, в частности, известные методики калибровки температурных составляющих статистических погрешностей при температурной динамике.

Заключение. Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа представляет собой законченную научно-техническую квалификационную работу. Научная новизна и положения, выносимые на защиту, доказаны и обоснованы. Диссертационная работа соответствует требованиям, указанным в «Положении о присуждении ученых степеней»,

утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор, Крылов Алексей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)».

Отзыв на диссертацию Крылова Алексея Анатольевича «Разработка технологии калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков» обсужден и одобрен 26.02.2024 г. протокол № 3 на заседании Лаборатории лазерных навигационных систем ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Д.ф.-м.н., профессор



Фомичев Алексей Алексеевич

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер.,9

Телефон: +7 (495) 408-61-55

Адрес электронной почты: fomichev.aa@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», лаборатория лазерных навигационных систем

Должность: Заведующий

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>

Самостоятельная работа



Самостоятельная работа

07.03.2024

Иванов