

И.о. проректора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)»
д.т.н., профессору Ю.А. Равиковичу

125993, г. Москва, Волоколамское
шоссе, д. 4

Уважаемый Юрий Александрович!

Сообщаю Вам, что я, Тимошенко Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ, в качестве официального оппонента ознакомился с диссертацией и авторефератом Крылова Алексея Анатольевича на тему «Разработка технологии калибровки гиросинерциальных блоков на основе МЭМС датчиков» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные управляющие системы (технические науки)» подготовил и направляю ОТЗЫВ

Приложение Отзыв на 5 листах в 2-х экз.



(подпись)

Тимошенко Сергей Петрович

(фамилия, имя, отчество оппонента)

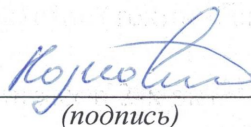
« 26 » 02 2024 г.

Подпись Тимошенко Сергея Петровича удостоверяю.
(фамилия, имя, отчество оппонента полностью)

Ученый
МИЭТ

(должность)

М.П.



(подпись)

Козлов А.В.

(Фамилия И.О.)

ОТЗЫВ

официального оппонента Тимошенко Сергея Петровича 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 (технические науки)»

В диссертационной работе Крылова Алексея Анатольевича представлен способ разработки технологии калибровки ГИБ на основе МЭМС датчиков.

На данный момент большинство МЭМС гироскопов и акселерометров, используемых в системах ориентации, навигации и стабилизации летательных аппаратов, имеют характеристики, зависящие от объекта применения и условий эксплуатации. Такие датчики требуют калибровки в составе более крупных объектов – ГИБ, БИНС, ИСУ. При этом обычно применяется как стендовая калибровка, так и эксплуатационная (в том числе полетная) калибровка. Большая часть погрешностей учитывается при стендовой калибровке, поэтому значительная часть публикаций по калибровке МЭМС датчиков посвящена именно ей. Как верно отмечает автор диссертации, МЭМС датчикам присущи значительные величины нестабильностей погрешностей, а также разнообразие этих нестабильностей. С учетом этого, очевидна актуальность выбранной темы. Разработка новой методики калибровки, учитывающей эти погрешности, выглядит довольно трудоемко. В связи с тем, что изделия на МЭМС датчиках всегда позиционируются как относительно дешевые, очевидной выглядит цель снижения трудоемкости процесса калибровки. Поставленные в работе задачи логичны и последовательно ведут к достижению главной цели.

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 содержит 205 наименований. Анализ содержания диссертации показывает, что она соответствует специальности 2.2.11. – Информационно-измерительные и управляющие системы. Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Во введении работы сформулированы основная цель работы, задачи работы, представлены пункты, характеризующие научную новизну работы, ее теоретическую и практическую значимость, а также пункты, вынесенные на защиту.

В первой главе проведен анализ погрешностей МЭМС датчиков, моделей погрешностей, методик калибровки погрешностей, а также разработанных программно-аппаратных комплексов калибровки. Показано, что нестабильности МЭМС датчиков, а также их характеристики при воздействии линейного ускорения и различных температурных градиентах нуждаются в подробном исследовании.

Во второй главе составлены модели систематических и случайных погрешностей. Проведены исследования изменения долговременных характеристик МЭМС гироскопов и акселерометров. Показаны зависимости смещения нуля и масштабного коэффициента МЭМС гироскопов от величины воздействующего линейного ускорения. Описано явление температурного гистерезиса смещения нуля. Предложена комплексная методика, позволяющая находить постоянные значения систематических погрешностей. Методика предлагает обоснованные длины записей измерений, количества повторений записей, рассчитываемые методом доверительного интервала. В конце главы предложена формула по расчету трудоемкости полезного времени калибровки.

В третьей главе описан разработанный автором программно-алгоритмический комплекс калибровки. Помимо программного обеспечения, реализующего изложенную во второй главе методику, а также технические нюансы взаимодействия со стендовым оборудованием, комплекс содержит программу планирования калибровки и программу прогноза изменения погрешностей. Программа планирования калибровки представляет собой полуавтоматический подбор параметров калибровки, в основе которого лежат алгоритмы оптимизации времени калибровки. Первым этапом оптимизации является выбор наборов параметров ГИБ, который обеспечит точность конечной БИНС на выбранном полетном задании методом генетического алгоритма. Вторым этапом является выбор одного из наборов параметров ГИБ с наименьшим временем калибровки.

В четвертой главе показаны численные результаты использования разработанного программно-алгоритмического комплекса. В целом, точности

откалиброванных по методике ГИБ совпали с предсказанными по моделям погрешностей, что подтверждает правильность разработанной методики. При использовании программы планирования калибровки был предложен вариант калибровки, сокращающий время калибровки в 5 раз по сравнению с полной калибровкой. Программа прогноза изменения долговременных характеристик смещения нуля позволила оценить дрейф нуля гироскопов с точностью $0,002^\circ/\text{с}$ и дрейф нуля акселерометров с точностью $0,0008\text{g}$.

В заключении приведены основные научные результаты диссертационной работы.

В качестве научной новизны диссертационной работы стоит отметить следующее:

1) Описано явление гистерезиса смещения нуля, то есть изменения смещения нуля при различных температурных градиентах. Предложена методика калибровки с компенсацией от показаний термодатчика.

2) Предложен и обоснован новый комплексный подход к калибровке МЭМС датчиков, учитывающий нестабильности от включения к включению и в запуске.

3) Предложен метод оптимального подбора параметров калибровки, сокращающий ее время при достижении требуемых параметров откалиброванного ГИБ.

Практическая ценность работы заключается в том, что модели погрешностей, методика калибровки, а также подходы к оптимизации могут быть применены для улучшения точностей и ускорения калибровки любых ГИБ и БИНС на МЭМС гироскопах и акселерометрах.

Достоверность полученных результатов определяется применением релевантных математических моделей, строгостью использования экспериментальных данных и методов статистического анализа.

Апробация работы подтверждена обсуждением основных ее результатов на ведущих российских и международных конференциях.

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 и 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 могут быть сделаны следующие замечания:

- 1) В разделе 1.7.2 приводится сравнение точностей методов внешней коррекции, однако сама работа останавливается на единственном корректоре – данных стенда или модельных значениях движения стенда. Это исследование не связано с главной целью диссертационной работы. Также в сравнительной таблице приводятся данные от различных авторов, использовавших различные системы, датчики, корректоры, математические методы, условия получения результата. Непонятно, насколько корректно сопоставлять столь различные результаты.
- 2) В разделах 2.1.2-2.1.3 приводятся модели погрешностей без обоснования включения составляющих. Далее в главе 2 эти составляющие раскрываются, в некоторых исследованиях приводятся значения. Однако, не приводится сравнений значений погрешностей для различных производителей, что сделало бы более наглядной важность тех или иных составляющих.
- 3) Достижимая погрешность 1% при использовании метода линейной комбинации (рисунок 3.15, раздел 3.3.2) довольно велика и требует обоснования допустимости применения.
- 4) Нигде четко не описан (хотя из изложения очевиден) способ выбора конечного варианта калибровки из нескольких, предложенных генетическим алгоритмом (таблица 4.4).

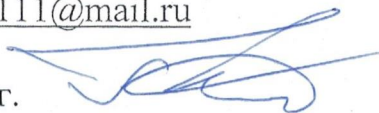
Указанные замечания не затрагивают основные идеи и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение оппонента о соответствии работы требованиям ВАК. Диссертационная работа «Разработка технологии калибровки giroинерциальных блоков на основе МЭМС датчиков» 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)».

Официальный оппонент
Тимошенко Сергей Петрович
д.т.н. по специальности 05.27.06.

“Технология и оборудования для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники”, ФГАОУ ВО «НИУ «МИЭТ», профессор, директор Института нано- и микросистемной техники, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1, Тел. + 7 (499) 000-0000
e-mail: miet@miet.ru, spt111@mail.ru

«26» 02 2024 г.

 С.П. Тимошенко Ф.И.О.

Подпись официального оппонента Тимошенко Сергея Петровича, д.т.н., проф., директора Института нано- и микросистемной техники ФГАОУ ВО «НИУ «МИЭТ» «подтверждаю».

учёный секретарь МИЭТ



А.В.Козлов

(должность)

(подпись)

(Фамилия И.О.)

М.П.



Сотзулар озмакамен

07.03.2024

Жакип