

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** 24.2.327.12

**Соискатель:** Крылов Алексей Анатольевич

**Тема диссертации:** «Разработка технологии калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков»

**Специальность:** 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

На заседании 20 марта 2024 года, протокол № 3, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, установленным Положением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016 г., 29 мая, 28 августа 2017 г., 1 октября 2018 г., 20 марта, 11 сентября 2021 г., 26 сентября 2022 г., 26 января, 18 марта, 26 октября 2023 г., и принял решение присудить Крылову Алексею Анатольевичу ученую степень кандидата технических наук.

**Присутствовали:** председатель диссертационного совета д.т.н., профессор Бусурин Владимир Игоревич, учёный секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент Васильев Федор Владимирович, члены диссертационного совета: д.т.н., профессор Кондратенко Владимир Степанович, д.т.н., доцент Андрианова Наталья Николаевна, д.т.н., Баранов Александр Михайлович, д.ф.-м.н., профессор Борисов Анатолий Михайлович, д.т.н., профессор Елинсон Вера Матвеевна, д.т.н., профессор Желтов Сергей Юрьевич, д.т.н., профессор Кириллов Владимир Юрьевич, д.т.н., доцент Микаева Светлана Анатольевна, д.т.н., профессор Назаров Александр Викторович, д.т.н., с.н.с. Пенкин Владимир Тимофеевич, д.т.н., доцент Протасов Владислав Иванович, д.т.н., профессор Суминов Игорь Вячеславович.

Учёный секретарь диссертационного  
совета 24.2.327.12, к.т.н., доцент

Начальник отдела у  
Т.А. Аникина



Ф.В. Васильев

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.12,**  
созданного на базе Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский университет)»  
(МАИ)

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,  
по диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 20 марта 2024 № 3

О присуждении **Крылову Алексею Анатольевичу**, гражданину  
Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

**Диссертация** «Разработка технологии калибровки гироскопического блока на основе МЭМС датчиков» по специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки) принята к защите 20 декабря 2023 г (протокол № 2) диссертационным советом 24.2.327.12, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), 125993, г. Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4., утверждённым приказом Министерства образования и науки Российской Федерации №1315/нк от 22.06.2023.

**Соискатель** Крылов Алексей Анатольевич 23 января 1991 года рождения.

В 2013 г. с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по направлению подготовки магистров «Информатика и вычислительная техника». Диплом об окончании магистратуры выдан 01 июля 2013 года, серия 107705 0009328, рег. № 2558м.

В 2021 г. окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)» по направлению подготовки 27.06.01 «Управление в технических системах». Диплом об окончании аспирантуры выдан 06 июля 2021 года, серия 107718 1244220, номер 2021/ЗО-0744Д, работает в Акционерном Обществе «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения» в отделе 130 в



должности начальника сектора 133.

**Диссертация выполнена** на кафедре 305 «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель** — Веремеенко Константин Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 305 «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Официальные оппоненты:**

**Тимошенков Сергей Петрович**, доктор технических наук, профессор, директор «Института нано- и микросистемной техники» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (ФГАОУ ВО «НИУ МИЭТ»), г. Зеленоград, Москва;

**Пономарев Юрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (ФБГОУ ВО «МГТУ им. Баумана»), г. Москва,

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** — федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «МФТИ»), г. Долгопрудный, в своём положительном отзыве, рассмотренном на заседании Лаборатории лазерных навигационных систем, протокол № 3 от 26.02.2024, подписанном заведующим Лаборатории лазерных навигационных систем, доктором физико-математических наук Фомичевым А.А. и утверждённом проректором по научной работе МФТИ, кандидатом физико-математических наук Баган В.А., указала, что научные положения, выводы и рекомендации в работе Крылова А.А. обоснованы и подтверждены в достаточном объёме.

Работа соответствует паспорту специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки) по пунктам 1, 2 и 7.

Автореферат соответствует основному содержанию работы, отражает

основные положения и выводы диссертационной работы.

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

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 гироинерциальных блоков следует продолжить в МАИ, АО «ГосНИИП» и АО «ГИРООПТИКА».

**Соискатель имеет 22 (двадцать две) научные публикации** по теме диссертации, в том числе 5 (пять) работ, опубликованных в изданиях, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией РФ для публикации результатов диссертационных исследований.

Большинство работ опубликованы автором без соавторов, несколько - в соавторстве, при этом вклад соискателя был определяющим. Опубликованные результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. Материалы диссертации отображены в трудах 11 (одиннадцати) всероссийских и международных научно-технических конференций. Соискатель является автором 3 (трёх) свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ по теме диссертационной работы.

#### **Наиболее значимые работы по теме диссертации:**

1. Крылов А.А. Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС-гироскопов в составе ГИБ. / А.А. Крылов, Д.В. Корнюк // Труды МАИ – 2018 – №103 – С. 1-18.

Описываются подходы к методике калибровки смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров при различной температурной динамике. Предлагается определять зависящие от температуры коэффициенты дрейфа на различных начальных температурах и применять их в соответствии с измеряемой температурной динамикой, изменяющейся от различных внешних условий и внутреннего саморазогрева.

2. Крылов А.А. Особенности идентификации смещения нуля в гироинерциальном блоке на микроэлектромеханических датчиках. / А.А. Крылов // Датчики и системы – 2020 – № 4 (246) – С. 43-48.



Рассматривается методика калибровки смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров 6-позиционным методом, при этом учитывается смещение нуля гироскопа, зависящее от линейного ускорения 1 g. При калибровке учитываются случайные погрешности МЭМС датчиков, такие как нестабильность от включения к включению и шум нулевого сигнала.

3. Крылов А.А. Фильтрация цветного шума микроэлектромеханических датчиков. / А.А. Крылов // Датчики и системы – 2021 – №6 (259) – С. 25-32.

Сравниваются подходы к фильтрации цветного шума модификациями фильтра Калмана. Сравнение происходит путем моделирования с параметрами, характерными для МЭМС датчиков.

4. Крылов А.А. Оптимизация калибровочных параметров микроэлектромеханических датчиков для бесплатформенной инерциальной навигационной системы при помощи генетического алгоритма. / А.А. Крылов // Датчики и системы – 2022 – №6 (265) – С. 44-52.

Приводится описание метода линейной комбинации погрешностей датчиков для определения погрешностей БИНС. Описывается способ нахождения оптимальных коэффициентов для дрейфов нуля и погрешностей масштабного коэффициента гироскопов и акселерометров, соответствующих заданной погрешности координаты и определяемых при помощи генетического алгоритма.

5. Krylov A.A. Optimal calibration plan for Inertial Measurement Unit based on microelectromechanical system. / A.A. Krylov // Journal of Physics: Conference Series. "19th International Conference "Aviation and Cosmonautics", AviaSpace 2020" – 2021 – С. 1-13. DOI:10.1088/1742-6596/1925/1/012008.

Описывается метод оптимального подбора параметров калибровки путем применения генетического алгоритма. Генетический алгоритм определяет наборы максимально допустимых погрешностей для заданной погрешности координаты. Каждый набор требуемых значений погрешностей может быть оценен по времени достижения оценкой объема калибровки каждой погрешности методом доверительного интервала. Оптимальный план калибровки выбирается по объему требуемых измерений, соответствующему наименьшему времени.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных автором работах.

На диссертационную работу поступили следующие отзывы (все положительные):

**Отзыв на диссертацию ведущей организации — ФГАОУ ВО «МФТИ».**

Отзыв утверждён проректором по научной работе МФТИ, кандидатом физико-математических наук Баган В.А.

К отдельным замечаниям по диссертации отнесено следующее:

- 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, квазиньютоновские 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.

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

**Отзыв на диссертацию официального оппонента Тимошенкова Сергея Петровича**, доктора технических наук, профессора, директора «Института нано- и микросистемной техники» ФГАОУ ВО «НИУ МИЭТ». Подпись Тимошенкова С.П. заверена учёным секретарём МИЭТ Козловым А.В.

В замечаниях по диссертационной работе указано:

- 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 приводятся 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).

При этом отмечено, что указанные замечания не затрагивают основные идеи и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа «Разработка технологии калибровки гироскопических 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)».

**Отзыв на диссертацию официального оппонента Пономарева Юрия Анатольевича**, кандидата технических наук, доцента кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» ФБГОУ ВО «МГТУ им. Баумана». Подпись Пономарева Ю.А. заверена начальником управления кадрового сопровождения и администрирования Силкиной К.П.

В замечаниях по диссертационной работе указано:

- 1) Не вполне очевиден смысл сравнения результатов методик калибровки, отличающихся типами информационных выходов. Достижение более быстрых вычислений за счет использования упрощенных формул при отсутствии прямых сигналов гироскопов и акселерометров действительно возможно. Однако, точность конечных данных может быть определена исходя из используемых формул и упрощений, так как источники измерительной информации заведомо одинаковые.
- 2) В методике калибровки погрешностей гироскопов, зависящих от линейного ускорения нет точного описания, как отделены друг от друга и как определяются смещение нуля и погрешность масштабного коэффициента, зависящие от линейного ускорения.
- 3) В главе 1 рассматриваются различные источники внешней информации, которые могут быть использованы для докалибровки, однако в дальнейшем в работе рассматривается только докалибровка на столе, установленном в горизонт. Для докалибровки на столе не указаны требования к точности его установки.
- 4) В разделе 2.4.2 рассматривается калибровка при изменении температуры со скоростью  $+2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ,  $-2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , а также постоянной температуре. Было бы любопытно сравнить эти результаты с другими скоростями изменения температуры.
- 5) Неясно, отличаются ли чем-то имитационная модель ГИБ и имитационная модель параметров калибровки в разделе 3.2.
- 6) Недостаточно четко прописана схема построения оптимального плана калибровки. Была бы полезна схема отбраковки блоков с заведомо неподходящими для решения задачи датчиками.
- 7) Не вполне понятен смысл раздела 4.3, не показано, как указанные особенности работы МЭМС датчиков и измерительного оборудования могут ухудшать качество калибровки.
- 8) Разработанные методики калибровки проверены только на одном типе МЭМС датчиков одного производителя, что не позволяет сделать заключение на основании эксперимента о применимости



предложенных методик для ГИБ на базе различных типов МЭМС датчиков.

При этом отмечено, что указанные замечания не являются критическими и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа «Разработка технологии калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков» соответствует требованиям, указанным в «Положении о присуждении учёных степеней», утверждённом постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной 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)».

**На автореферат поступило 10 (десять) отзывов.** Все отзывы положительные. Отзывы содержат следующие замечания.

**1. Отзыв на автореферат диссертации от ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,** составленный ведущим научным сотрудником лаборатории № 1 «Динамических информационно-управляющих систем», доктором технических наук Каршаковым Е.В., подпись которого заверена ведущим инженером Гордеевой Ю.Ю., содержит ряд замечаний.

Выносимые на защиту 1) методика калибровки при температурной динамике, 2) методика калибровки гироскопов при действии ускорений, 3) метод линейной комбинации погрешностей гироскопов и акселерометров – в автореферате описаны недостаточно подробно. В автореферате отражен только результат применения данных методик. Поэтому суть защищаемых положений можно понять, только ознакомившись с текстом диссертации.

Есть разногласия в понимании понятий расширенного и обобщенного фильтров Калмана, а понятие оптимальный фильтр Калмана звучит как тавтология. Также фильтр Кузовкова, приводимый автором в одном ряду с фильтром Калмана, не является общеизвестным, и его упоминание требует пояснений.

Одна из математических ошибок содержится и в диссертации, и в автореферате. А именно, формирующие уравнения на стр. 10 автореферата выписаны некорректно и описание составляющих дано не верно. Если следовать тексту, то в самом уравнении не сходятся размерности.

**2. Отзыв на автореферат диссертации от ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»,** составленный начальником бюро МЭС НИИ радиофотоники и оптоэлектроники, кандидатом технических наук Гилевым Д.Г., подпись которого заверена Зам. Директора по организационному развитию и управлению персоналом Кузнецовым И.К., содержит следующие замечания:

- 1) Не совсем понятно приведенное уравнение формирования цветного шума. Это известное в науке и технике соотношение или выведенное автором? Также непонятно, как выбор способа оптимальной фильтрации при наличии цветного шума связан с методиками калибровки.
- 2) В автореферате никаким образом не продемонстрирована связь приведенных формул случайных погрешностей и методик калибровки.
- 3) В автореферате не указаны критерии оптимизации плана калибровки.
- 4) Заявление, что 1% вклада взаимных влияний погрешностей в общую погрешность траектории является «незначительным», требует обоснования.
- 5) Непонятен критерий выбора варианта калибровки из наборов погрешностей в таблице 1 автореферата.

**3. Отзыв на автореферат диссертации от ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»**, составленный начальником отдела навигационных алгоритмов, кандидатом технических наук, доцентом Колеватовым А.П., подпись которого заверена Директором НТЦ - Первым заместителем Генерального Директора по науке – Главным конструктором Субботиным А.В. и утвержденный генеральным директором А.Г. Андреевым. В качестве недостатков отмечено, что в автореферате отсутствуют обоснование требований к стендовому оборудованию.

**4. Отзыв на автореферат диссертации от ООО «Лаборатория Микроприборов»**, составленный генеральным директором, главным конструктором, доктором технических наук А.С. Тимошенковым, содержит замечание:

- непонятен источник формулы цветного шума и смысл ее дальнейшего использования в методиках калибровки.

**5. Отзыв на автореферат диссертации от НПО «НаукаСофт»**, составленный главным научным сотрудником лаборатории навигации и управления, доктором технических наук Чернодаровым А.В. и утвержденный генеральным директором, доктором технических наук, доцентом Горшковым П.С., содержит следующие замечания:

- 1) Не ясно, в какой системе отсчета определялись погрешности координат и скоростей (см. уравнения на стр. 13).
- 2) Не показано, с какой дискретностью по температурам и ускорениям оценивались при калибровке дрейфы МЭМС датчиков и как это учитывалось в непрерывных уравнениях инерциального счисления параметров движения.
- 3) В работе полагается, что при калибровке измерительные оси гиринерциального блока взаимно ортогональны, т.е. матрица для



угловых погрешностей ориентации является кососимметричной с наличием нулевых элементов (см. уравнения на стр. 13 и 14). Такое допущение для МЭМС датчиков, на наш взгляд, является не вполне корректным.

**6. Отзыв на автореферат диссертации от АО «ГИРООПТИКА»,** составленный заместителем генерального директора Федоровым М.В., подпись которого заверена начальником отдела кадров Ломовой М.Ю., содержит следующие замечания:

- 1) Подписи к рисункам подразумевают, что автореферат должен быть распечатан в цветном варианте. Черно-белая печать существенно снижает понятность рисунков.
- 2) В автореферате почему-то представлены только модели случайных погрешностей гироскопов.
- 3) Формулы на страницах 13-14 являются довольно известными формулами расчета погрешностей параметров ориентации и навигации. Автор вывел на их основе в диссертации соотношения применительно к задаваемым калибровочным условиям. Не очень понятно, почему в автореферате автор отразил общеизвестные формулы, а не свои результаты.
- 4) Не очень понятна цель испытаний партии из 4х ГИБ в четвертой главе и некие модели, с которыми сравнивались результаты.

**7. Отзыв на автореферат диссертации от АО «ЦНИИмаш»,** составленный начальником отдела гироскопических приборов систем управления изделий РКТ, кандидатом технических наук Николаевым М.В., подпись которого заверена главным учёным секретарём, доктором технических наук Ключниковым В.Ю., содержит следующие замечания:

- 1) На странице 3 автореферата автор вводит аббревиатуру ГИБ – гиринерциальный блок. При этом указывается, что «ГИБ обычно содержит взаимно ортогональные триады гироскопов и акселерометров». Однако автору следует учесть, что в российской гироскопической практике, несмотря на отсутствие ГОСТов по терминологии, для сборки трех гироскопов и акселерометров принято использовать аббревиатуру БИБ – бесплатформенный инерциальный блок.
- 2) В предложенных методиках оценки калибровки не учитывается влияние шумов квантования МЭМС датчиков.
- 3) Не приводится точность определения азимута в режиме гироскопирования БИНС на МЭМС датчиках

**8. Отзыв на автореферат диссертации от АО «ГосМКБ "Вымпел" им. И.И. Торопова»,** составлен директором научно-испытательного центра, доктором технических наук Ермолаевым Андреем Юрьевичем и

заместителем начальника отделения 300, кандидатом технических наук. Мордвиновым Игорем Геннадьевичем, утвержденный заместителем генерального директора по НИОКР АО «ГосМКБ «Вымпел», кандидатом технических наук Беляевым А.Н., содержит следующие замечания:

- 1) В автореферате не представлены результаты калибровки по сокращенному объему повторений, рассчитанному при помощи применения генетического алгоритма (для сравнения с полной калибровкой).
- 2) Не показано явно, насколько долго результаты калибровки можно назвать «актуальными» без значительного ухода. Минимальное время, за которое оценивается и прогнозируется уход, рассматривается как одна неделя.
- 3) В методике калибровки смещения нуля при температурной «динамике» рассмотрено, на наш взгляд, недостаточно «динамик». Для заявленного применения в высокоманевренном БПЛА скорости изменения внешней температуры могут существенно различаться.

**9. Отзыв на автореферат диссертации от ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,** составленный доцентом кафедры «Приборы управления», кандидатом технических наук Телухиным С.В., подпись которого заверена специалистом по кадровой работе Докторовой М.Б., содержит следующие замечания:

- 1) Черно-белая печать делает цветные рисунки трудно читаемыми.
- 2) Из текста автореферата не понятно, как описание дрейфа нуля (при этом также непонятно, гироскопа или акселерометра) моделью цветного шума используется в общей методике калибровки.
- 3) В автореферате слабо раскрыт пункт новизны, связанный с «новым подходом к калибровке».
- 4) Из текста автореферата не ясно, как влияет выбор тестовой траектории на выбор оптимального решения для калибровочного плана и, следовательно, длительность калибровки.
- 5) Недостаточно четко указаны применения ГИБ в составе БИНС, чтобы судить, что погрешность траектории 1%, вызываемая взаимным действием погрешностей датчиков, считать незначительной.

**10. Отзыв на автореферат диссертации от ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»,** составленный Главным специалистом, кандидатом физико-математических наук, доцентом Фомичевым Александром Владимировичем, утвержденный генеральным директором ПАО «МИЭА», доктором технических наук, профессором А.Г. Кузнецовым:

- 1) С. 3 Датчики с «грубыми измерительными характеристиками» можно



назвать просто «грубыми»

- 2) С.3. Тезис «для учета случайных погрешностей применяется калибровка датчиков» сомнителен: калибровке всегда подлежит нечто систематическое. По-видимому, идет речь либо о влиянии случайных погрешностей на калибровку и учете этого влияния в предлагаемой методике, либо об оценке погрешностей, меняющихся от включения к включению, в текущем запуске.
- 3) С.3. Фраза «по причине тенденции к миниатюризации» громоздка.
- 4) С.4. Фраза «не все случайные свойства погрешностей исследованы в полной мере» плохо формализована. Что она означает?
- 5) С 4. Фраза «а также не рассматривают трудоемкость процесса калибровки» о других методиках калибровки не точна. Обычно трудоемкость принимается во внимание и оптимизируется.
- 6) С. 5. Что такое «методы теории оценивания результатов измерений»? Видимо, просто «теории оценивания»?
- 7) С. 5. Утверждается, что смещение нуля уменьшено на 40%. В сравнении с чем? С другими методиками, с паспортным значением?
- 8) С. 6 Тот же вопрос об улучшении точности по п.2. в начале страницы.
- 9) С.7 и далее по тексту. Из автореферата не совсем ясна сущность метода линейной комбинации. Возможность анализа источников ошибок «по отдельности» следует из принципа суперпозиции решений линейных систем дифференциальных уравнений, которыми описываются ошибки БИНС.
- 10) С. 10 Предложена модель «суммарной случайной составляющей дрейфа гироскопа», содержащая сумму четырех фракций. На практике оценке доступен суммарный дрейф гироскопа. Как разделить эти фракции, тем более, если они случайные?
- 11) Говорится о цвете графиков, но в распечатанном автореферате графики черно-белые.
- 12) С. 13. Приводятся уравнения ошибок, не очень удачно названные «классическими формулами погрешностей параметров ориентации и навигации». Почему именно эта форма записи уравнений ошибок является «классической»? Из какой литературы заимствована и почему?

Несмотря на перечисленные недостатки, все отзывы положительные, во всех отзывах отмечено, что указанные недостатки не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается их большим опытом, а также высокой научно-практической компетентностью в области проектирования, конструирования, настройки и

калибровки инерциальных датчиков и гироинерциальных блоков - объекта диссертационного исследования. Высокая научная и практическая компетентности официальных оппонентов и ведущей организации подтверждаются публикациями в научных изданиях. Оппоненты являются сотрудниками разных организаций и не имеют совместных публикаций с соискателем.

**Выбор Тимошенкова С.П.**, доктора технических наук, профессора, в качестве **официального оппонента** обусловлен его широкой известностью и профессиональной компетентностью в области в сфере МЭМС технологий, проектирования МЭМС датчиков, исследования влияния различных факторов на их характеристики, применения МЭМС датчиков в составе навигационных и управляющих систем. За последние 5 лет Тимошенковым С.П. в рецензируемых отечественных и международных журналах опубликовано 12 работ по профилю диссертации.

**Выбор Пономарева Ю.А.**, кандидата технических наук, в качестве **официального оппонента** обоснован его высокой компетентностью в области проектирования МЭМС датчиков, компенсации погрешностей акселерометров, разработке инерциальных систем. За последние 5 лет Пономаревым Ю.А. сделано 6 публикаций по профилю диссертации (в том числе 4 статьи в рецензируемых отечественных и международных журналах и 2 патента на изобретение).

**Выбор МФТИ** в качестве **ведущей организации** обосновывается её достижениями в сфере разработки бесплатформенных инерциальных навигационных систем, а также в области исследований методик компенсации погрешностей различных инерциальных датчиков. Специалисты ведущей организации имеют большой практический опыт в компенсации различных погрешностей датчиков в зависимости от внешних факторов, что отражено в их публикациях. За последние 5 лет МФТИ опубликовано 13 работ по теме диссертации, в том числе 3 патента на изобретение.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– **разработана** методика калибровки смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров при различных температурных градиентах, включающая в себя разработку алгоритма, отслеживающего изменение температуры по термодатчикам в составе ГИБ;

– **разработана** методика калибровки погрешностей МЭМС гироскопов в составе гироинерциального блока с акселерометрами при действии линейного ускорения до 100 g, по которой разность показаний гироскопов при одинаковых угловых скоростях и различных линейных ускорениях компенсируется как смещение нуля или погрешность масштабного коэффициента, при этом остаточное смещение нуля снижается в 5-10 раз, а



остаточная погрешность масштабного коэффициента снижается до 0,01 %;

– **предложена** обобщённая методика калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков, учитывающая нестабильность погрешностей от включения к включению, нестабильность в запуске, а также прогноз изменения систематических погрешностей при хранении и их докалибровку;

– **доказана** возможность применения метода линейной комбинации погрешностей датчиков для определения погрешности координаты БИНС на заданной траектории по известным значениям погрешностей гироскопов и акселерометров с точностью до 1 %, что актуально для применения к системам на основе МЭМС датчиков для кратковременного полёта длительностью не более 5 минут;

– **новые понятия** не вводились.

**Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:**

– **доказано**, что применение генетического алгоритма для подбора оптимальных наборов значений погрешностей датчиков при известной погрешности координаты позволяет сократить время калибровки до 5 раз;

– **изложены** принципы нового подхода к калибровке гироскопического блока на основе МЭМС датчиков, при котором объем калибровочных измерений определяется при помощи доверительного интервала;

– **раскрыты** эффекты явления гистерезиса смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров при различной температурной динамике и появления дополнительных смещений нуля и погрешностей масштабных коэффициентов МЭМС гироскопов при действии линейного ускорения;

– **изучены** изменения значений систематических погрешностей МЭМС датчиков в процессе хранения и способ аппроксимации этих изменений нейронной сетью;

– **проведена модернизация** моделей погрешностей МЭМС датчиков, составленная на основе проведенных исследований нестабильностей погрешностей смещения нуля и масштабного коэффициента в запуске, от включения к включению и в процессе хранения;

**Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:**

– **разработан и внедрен** при проведении НИР и ОКР в АО «ГосНИИП» и в учебный процесс МАИ программно-алгоритмический комплекс калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков;

– **определена** погрешность предлагаемого метода линейной комбинации погрешностей датчиков для определения погрешности координаты, имеющая существенное значение для определения сферы его

применения;

- **создано** программное обеспечение, позволяющее рассчитать оптимальные параметры калибровки в части допустимых значений погрешностей и сокращающее время требуемой калибровки до 5 раз;

- **представлены** методические рекомендации по прогнозированию ухода систематических значений погрешностей и их докалибровке.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- **для экспериментальных работ** использовалось известное метрологически поверенное оборудование (стенды Acutronic), имеющее точности, значительно превосходящие точности калибруемых гироскопических блоков;

- **теория** построена на известных законах инерциальной навигации и методах оценивания результатов измерений;

- **идея базируется** на принципе минимизации остаточных погрешностей гироскопического блока, получаемых в результате стендовой калибровки;

- **использованы** релевантные математические модели описания погрешностей датчиков;

- **установлено** соответствие значений натуральных экспериментов гироскопических блоков со значениями, предсказываемыми моделями погрешностей.

#### **Личный вклад автора состоит в:**

- обосновании новых моделей погрешностей МЭМС гироскопов и акселерометров путём исследований их значений при многократных повторениях с различными временными интервалами;

- нахождении упрощённого аналитического выражения для определения погрешности координаты БИНС на заданной траектории по известным значениям погрешностей гироскопов и акселерометров путём исследования совместного влияния различных погрешностей на погрешности координаты и ориентации;

- разработке методики калибровки смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров, учитывающая различные значения смещения нуля при различной скорости изменения внешней температуры и позволяющая снизить смещение нуля в этих условиях на 40 %;

- разработке методики калибровки смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента МЭМС гироскопа, зависящих от величины линейного ускорения объекта, позволяющая снизить остаточные погрешности при калибровке в составе гироскопического блока с акселерометрами;

- обосновании выбора прямых информационных выходов угловых



скоростей и линейных ускорений для калибровки по сравнению с информационными выходами БИНС более быстрой скоростью вычисления параметров при схожей точности оценки систематических погрешностей,

выполненных лично автором.

В ходе защиты диссертации **не было высказано критических замечаний**, которые ставили бы под сомнение обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизну.

Соискатель Крылов А.А. обстоятельно и аргументировано ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы.

На заседании 20 марта 2024 г. **диссертационный совет принял решение:**

за решение научно-технической задачи разработки методик калибровки МЭМС гироскопов и акселерометров в составе гироинерциального блока для программно-алгоритмического комплекса калибровки, имеющей существенное значение для развития средств информационно-измерительного обеспечения беспилотных летательных аппаратов, присудить Крылову Алексею Анатольевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за — 14, против — нет, недействительных бюллетеней — нет.

Председатель  
диссертационного совета 24.2.327.12

д.т.н., профессор

В.И. Бусурин

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.12

к.т.н., доцент

Ф.В. Васильев

20.03.2024 г.

Начальник отдела У  
Т.А. Аникина

