

На правах рукописи



Крылов Алексей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КАЛИБРОВКИ
ГИРОИНЕРЦИАЛЬНЫХ БЛОКОВ НА ОСНОВЕ МЭМС ДАТЧИКОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2023

Работа 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:

кандидат технических наук, доцент, **Веремеенко Константин Константинович**.

Официальные оппоненты:

Тимошенко Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, НИУ МИЭТ, директор Института нано- и микросистемной техники;

Пономарев Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации».

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Защита диссертации состоится 20 марта 2024 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.12 ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=177422.

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

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



Ф.В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Наиболее распространёнными автономными инерциальными навигационными системами являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на основе гироинерциальных блоков (ГИБ). ГИБ обычно содержит взаимно ортогональные триады гироскопов и акселерометров. В составе навигационной системы в общем случае ГИБ может использоваться наряду с другими источниками первичной навигационной информации – приёмниками спутниковой навигационной информации, высотомерами, барометрами, видеокамерами и т.д.

В зависимости от класса точности инерциальных датчиков, обеспечивающих навигационную информацию, меняется сфера применения конечных навигационных систем. С начала 90-х годов XX века получили широкое распространение датчики на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), имеющие малые массогабаритные характеристики и низкую стоимость. В то же время МЭМС датчики имеют достаточно грубые измерительные характеристики, которые, тем не менее, с развитием технологии улучшаются и уже достигли точностей, достаточных для применения в навигации малых летательных аппаратов с небольшим временем полета.

МЭМС гироскопы и акселерометры, как и инерциальные датчики других типов, имеют систематические и случайные погрешности. Для уменьшения систематических погрешностей и учёта случайных погрешностей применяется калибровка датчиков. По причине тенденции к миниатюризации МЭМС датчиков в их составе, как правило, отсутствует мощный вычислитель, что приводит к тому, что погрешности не могут быть скомпенсированы средствами самого датчика и требуют внешней корректировки в составе конечного изделия. Это значит, что калибровочные коэффициенты и алгоритмы калибровки должны храниться внутри контроллера или иной аппаратуры хранения и обработки данных. Помимо этого, ряд температурных свойств МЭМС гироскопов и акселерометров зависит от состава, материалов и габаритов изделия, на которое они установлены. Поэтому калибровка МЭМС датчиков проводится совместно с калибровкой конечного блока. При этом она может осуществляться как с выходами по угловым скоростям и ускорениям, так и с выходами по навигационным параметрам, определяемым БИНС.

Особой проблемой являются случайные погрешности МЭМС датчиков. Существующие подходы описывают воздействие разных факторов на такие погрешности как дрейф нуля и погрешность масштабного коэффициента, однако не все случайные свойства погрешностей исследованы в полной мере и учтены в моделях и калибровочных комплексах. При использовании в малых БПЛА на динамических траекториях ГИБ подвергается значительным перегрузкам. Следовательно, блоки с МЭМС гироскопами должны быть откалиброваны с учетом этих воздействий. Поэтому разработка способов повышения точности ГИБ и БИНС на основе МЭМС гироскопов и акселерометров является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Из учёных, занимающихся вопросами калибровки инерциальных датчиков в составе навигационных систем, можно отметить таких специалистов как Н.А. Парусников, А.А. Голован, О.А. Степанов, О.С. Салычев и др. Вопросы погрешностей МЭМС датчиков описаны в работах В.В. Матвеева, В.Я. Распопова, С. Ф. Коновалова, В.Г. Пешехонова, С.П. Тимошенкова, А. С. Тимошенкова, И. Х. Шаймарданова, I.P. Prikhodko, A. M. Shkel и других. Вопросы применения различных математических методов к измерениям рассматриваются в работах С.С. Ривкина, О.А. Степанова, R. Fontanella и др.

Существующие методики калибровки гиринерциальных блоков на основе МЭМС датчиков в целом повторяют методики калибровки блоков на основе более точных датчиков с учетом упрощений, допустимых для более низких точностей. Однако, они не учитывают свойства случайных погрешностей МЭМС датчиков и возможность применения ГИБ на основе таких датчиков в более широких условиях, а также не рассматривают трудоемкость процесса калибровки. Таким образом, показана необходимость разработки новых моделей погрешностей и методик калибровки, повышающих точность калибруемых ГИБ и оптимизирующих процесс калибровки.

Объектом исследования является гиринерциальный блок, построенный на основе МЭМС гироскопов и акселерометров.

Предметом исследования являются методики улучшения характеристик гиринерциального блока путем разработки новых моделей погрешностей, снижения остаточных значений погрешностей после калибровки и выработки методических рекомендаций по учёту случайных погрешностей.

Цель работы состоит в улучшении точностных характеристик гиринерциальных блоков на основе МЭМС гироскопов и акселерометров, а также снижении трудоёмкости процесса калибровки путем разработки моделей погрешностей и методик калибровки для программно-алгоритмического комплекса калибровки.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **научные задачи**:

1) анализ погрешностей МЭМС датчиков (температурного дрейфа гироскопов и акселерометров, смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента гироскопов, зависящих от ускорения, нестабильностей смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента от включения к включению, а также при долговременном хранении);

2) разработка общей модели погрешностей гироскопов и акселерометров, а также модели функционирования ГИБ и БИНС с учётом этих моделей;

3) разработка методик калибровки ГИБ и БИНС по этим моделям с предварительной оценкой точности калибровки для систематической составляющей и возможностью учёта случайной составляющей;

4) разработка программно-аппаратного комплекса для обеспечения полного процесса калибровки по предложенным моделям и методикам, позволяющего управлять процессом калибровки, находить и задавать требуемые точности характеристик и объём испытаний, производить прогноз изменения погрешностей;

5) экспериментальное подтверждение разработанных модели и методик, выработка методических рекомендаций с учетом полученных результатов.

Методы исследования. При решении изложенных научных задач применялись методы теории инерциальных навигационных систем, оценивания результатов измерений, построения нейронных сетей, имитационного и полунатурного моделирования.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты.

1. Разработана методика 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%.

2. Разработана методика калибровки смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента МЭМС гироскопа, зависящих от величины линейного ускорения объекта, позволяющая уменьшить остаточное смещение нуля в 5-10 раз и снизить остаточную погрешность масштабного коэффициента до 0,01% при калибровке в составе гироскопического блока с акселерометрами.

3. Разработан новый подход к калибровке гироскопических блоков на МЭМС гироскопах и акселерометрах, учитывающий нестабильности погрешностей датчиков от включения к включению и на протяжении хранения, выработаны методические рекомендации по учету случайного характера этих погрешностей.

4. Предложен метод оптимального подбора параметров калибровки (количество повторений измерений и температурных точек), основанный на использовании генетического алгоритма и метода определения погрешности координаты через линейную комбинацию погрешностей, который позволяет сократить оцениваемое время калибровки в 5 раз при достижении требуемых значений погрешностей, а также снизить вычислительную сложность благодаря замене расчета алгоритма БИНС на формулу линейной комбинации в 60 раз.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в следующем:

1) проведенные исследования погрешностей МЭМС датчиков расширили теоретическое представление о модели погрешностей и заложили основу для разработки методик калибровки гироскопических блоков на МЭМС датчиках;

2) предложенный подход к формированию плана калибровки способствует развитию методологии серийного производства гироскопических блоков на МЭМС датчиках.

Практическая значимость заключается в следующем:

1) разработаны имитационные модели погрешностей МЭМС датчиков, гироскопических блоков и БИНС на их основе; эти модели необходимы для определения требуемых погрешностей датчиков на основе требований к навигационной системе на заданной траектории, а также для отладки калибровочных данных при калибровке ГИБ;

2) разработан программно-аппаратный комплекс для калибровки погрешностей ГИБ, реализующий методики калибровки согласно предложенной модели, а также управляющий параметрами и процессом калибровки;

3) составлены методические рекомендации по проведению калибровки, связанные со случайными погрешностями МЭМС датчиков и возможной неточностью паспортных данных;

4) предложенная методика калибровки ГИБ на основе МЭМС датчиков была реализована и внедрена в АО «ГосНИИП» во время проведения тематических НИР и ОКР, а исследования и теоретические положения вошли в учебные материалы, используемые в образовательном процессе ФГБОУ МАИ.

На защиту выносятся:

1) методика калибровки смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров при различной температурной динамике, позволяющая снизить остаточное смещение нуля на 40% при скорости изменения температуры $+2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и $-2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ по сравнению с классической табличной калибровкой;

2) методика калибровки смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента МЭМС гироскопа, зависящих от величины линейного ускорения объекта в диапазоне до $100g$, что позволяет уменьшить остаточное смещение нуля в 5-10 раз и снизить остаточную погрешность масштабного коэффициента до 0,01% при калибровке в составе гироскопического блока с акселерометрами;

3) метод линейной комбинации погрешностей гироскопов и акселерометров для определения погрешности координаты БИНС на заданной траектории, позволяющий снизить длительность вычислений в 60 раз по сравнению с применением алгоритма расчета погрешностей БИНС при сохранении точности определения погрешности координаты до 1%;

4) метод оптимального подбора параметров калибровки – количества повторений измерений и температурных точек, основанный на использовании генетического алгоритма и метода определения погрешности координаты через линейную комбинацию погрешностей, позволяющий сократить оцениваемое время калибровки согласно плану до 5 раз при достижении требуемых точностей.

Достоверность научных результатов определяется использованием современной методологии информационно-измерительных и управляющих систем, применением метрологически обоснованного оборудования, составлением релевантных математических моделей, согласованностью экспериментальных данных и данных имитационного моделирования.

Личный вклад автора заключается в построении математических моделей и методик калибровки погрешностей ГИБ на основе МЭМС-датчиков с учётом установленных автором особенностей этих погрешностей, в разработке

программно-алгоритмического комплекса, реализующего эти модели и методики, а также разработке методических рекомендаций по калибровке и использованию комплекса.

Внедрение результатов работы.

Научные достижения диссертационной работы, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены и используются при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в АО «ГосНИИП». Результаты работы используются в учебном процессе по курсам «Испытания приборов и систем» и «Программно-алгоритмическое обеспечение ПНК» кафедры «Пилотажно-навигационные и информационно-измерительные комплексы» МАИ.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на конференциях «XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам» в 2020 году (ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург), «Авиация и космонавтика» (МАИ, Москва) в 2019 и 2020 году, «XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (г. Алушта) в 2019 году, XXII и XXIII «конференциях молодых ученых с международным участием» (ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург) в 2020 и 2021 годах, VII и VIII «Молодёжных конференциях молодых ученых и специалистов» (ЦНИИ автоматизации и гидравлики, Москва) в 2017 и 2019 годах, III, V и VII «Научно-технических конференциях для специалистов организаций, входящих в АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» (НОЦ ВКО «Алмаз-Антей», Москва) в 2018, 2020 и 2022 годах.

Публикации. Научные результаты диссертации изложены в 22 работах, в том числе 5 статьях в рецензируемых изданиях, определённых ВАК Минобрнауки РФ, 2 статьях и 1 тезисах конференций в ведущих научных журналах и изданиях, включенных в международные системы цитирования, а также 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, результатов исследования и списка использованных источников. Объём диссертации составляет 165 страниц, в том числе 157 страниц – основная часть, 8 страниц – приложения. Работа содержит 67 рисунков и 41 таблицу. Список использованных источников включает 205 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель, объект, предмет исследования, указаны способы исследования и научная новизна, положения, выносимые на защиту, сведения о внедрении и апробации результатов работы, представлена структура работы.

В первой главе даются общие сведения о микроэлектромеханических гироскопах и акселерометрах, их погрешностях и способах их компенсации в составе гироинерциальных блоков. Проведен обзор применяемых моделей погрешностей, математических методов их идентификации и компенсации, построения систем калибровки на основе этих методов. Обоснована необходимость разделения смещения нуля на начальное смещение нуля и дрейф нуля в соответствии с разным физическим смыслом и статистическими характеристиками этих параметров. В условиях резко изменяющейся температуры соответствующие изменения размеров чувствительных элементов могут приводить к разным значениям дрейфа при различных температурных градиентах, что требует более подробного исследования. МЭМС гироскопы и акселерометры имеют значительные нестабильности от включения к включению и от времени хранения. В связи с этим необходимо провести исследование, с целью определить характеристики этих нестабильностей, а также способы их учета. Еще одним направлением исследования является чувствительность погрешностей МЭМС гироскопов к изменению действующего линейного ускорения. Предложено включить эти погрешности в общую модель погрешностей и разработать методики калибровки с ее учетом. Проанализированы существующие методы оценивания применительно к калибровке МЭМС датчиков, обоснован выбор обобщенного метода наименьших квадратов для начальной калибровки и оптимального фильтра Калмана для эксплуатационной калибровки. Проведено сравнение вариантов калибровки с прямыми выходами измерительной информации и выходами по навигационным параметрам с целью сравнения достижимой этими способами точности и выявления особенностей при каждом способе.

Нестабильность дрейфа нуля может быть описана как цветной шум, заданный формирующим фильтром:

$$\overline{dr}_i^c = C_w \overline{dr}_{i-1}^c + \overline{dr}_{i-1}^w,$$

где dr_i^c – значение смещения нуля в i -й временной интервал с момента включения;

C_w – дисперсия цветного шума.

Приведен обзор способов фильтрации для учета цветного шума, описанного по этой формуле с учетом значений параметров, характерных для МЭМС датчиков, сравнивались классический оптимальный фильтр Калмана, расширенный фильтр Калмана и фильтр Кузовкова. Проведенное математическое моделирование показало, что по совокупности параметров, таких как точность (в 2-10 раз) и простота вычислений (в 2-3 раза), для решения исходной задачи предпочтителен классический фильтр Калмана.

Вывод: проведенный обзор показывает, что требуется исследование температурного дрейфа при различной температурной динамике, нестабильностей погрешностей МЭМС гироскопов и акселерометров от включения к включению и от времени хранения, а также исследование погрешностей МЭМС гироскопов от величины действующего линейного ускорения.

Во второй главе предложены новые модели погрешностей МЭМС гироскопов и акселерометров, учитывающие исследуемые погрешности. В эти модели введены составляющие, зависящие от внешней температуры, времени с момента включения датчика, нестабильности от включения к включению, нестабильности от времени хранения. Так, модель суммарной случайной составляющей дрейфа гироскопа имеет вид:

$$\nu\omega_{\text{др случ}} = \nu\omega_{T\text{др}}(T) + \nu\omega_{Tt\text{др}}(T, t) + \nu\omega_{\text{дрхр}}(t_{\text{долг}}) + \nu\omega_{\text{дрвкл}}(t_{\text{день}}),$$

где $\nu\omega_{T\text{др}}(T)$ – случайная составляющая, зависящая от начальной температуры;

$\nu\omega_{Tt\text{др}}(T, t)$ – случайная составляющая, зависящая от времени и температурной динамики;

$\nu\omega_{\text{дрхр}}(t_{\text{долг}})$ – случайная составляющая, изменяющаяся от времени хранения;

$\nu\omega_{\text{дрвкл}}(t_{\text{день}})$ – случайная составляющая, изменяющаяся от включения к включению (случайная величина, имеющая некоторое постоянное среднее).

T – температура;

t – время с момента включения;

$t_{\text{день}}$ – время проведения серии испытаний, обычно в течение нескольких часов;

$t_{\text{долг}}$ – продолжительное время, связанное с хранением.

Модель суммарной случайной составляющей погрешности масштабного коэффициента имеет вид:

$$\upsilon K \omega_{MK \text{ случ}}(\omega_{\text{зад}}, T, t, a) = \upsilon K \omega_{T \text{ случ}}(T) + \upsilon K \omega_{Tt \text{ случ}}(T, t) + \upsilon K \omega_{\text{хр}}(t_{\text{долг}}) + \upsilon K \omega_{\text{вкл}}(t_{\text{день}}) + \upsilon K \omega_{\text{нл случ}}(\omega_{\text{зад}}) + \upsilon K \omega_a \text{ случ}(a),$$

где $\upsilon K \omega_{T \text{ случ}}(T)$ – случайная составляющая, зависящая от начальной температуры;

$\upsilon K \omega_{Tt \text{ случ}}(T, t)$ – случайная составляющая, зависящая от времени с момента включения и температурной динамики;

$\upsilon K \omega_{\text{хр}}(t_{\text{долг}})$ – случайная составляющая, изменяющаяся от времени хранения;

$\upsilon K \omega_{\text{вкл}}(t_{\text{день}})$ – случайная составляющая, изменяющаяся от включения к включению (случайная величина с постоянным средним);

$\upsilon K \omega_{\text{нл случ}}(\omega_{\text{зад}})$ – случайная составляющая, изменяющаяся от величины заданного действия (для гироскопов – угловой скорости), нелинейность;

$\upsilon K \omega_a \text{ случ}(a)$ – случайная составляющая, изменяющаяся от величины действия линейного ускорения.

Проведенные совмещенные исследования нестабильностей от включения к включению и хранения выявили уходы систематических значений смещения нуля (до 50%) и погрешности масштабного коэффициента (до 0,12%). Эти значения оказались больше изменений случайных составляющих в 3-5 раз для начального смещения и дрейфа нуля и в 4 раза для масштабного коэффициента. Изменение систематического значения смещения нуля на примере гироскопа производства АО «Гирооптика» в течение двух месяцев показано на рисунке 1.

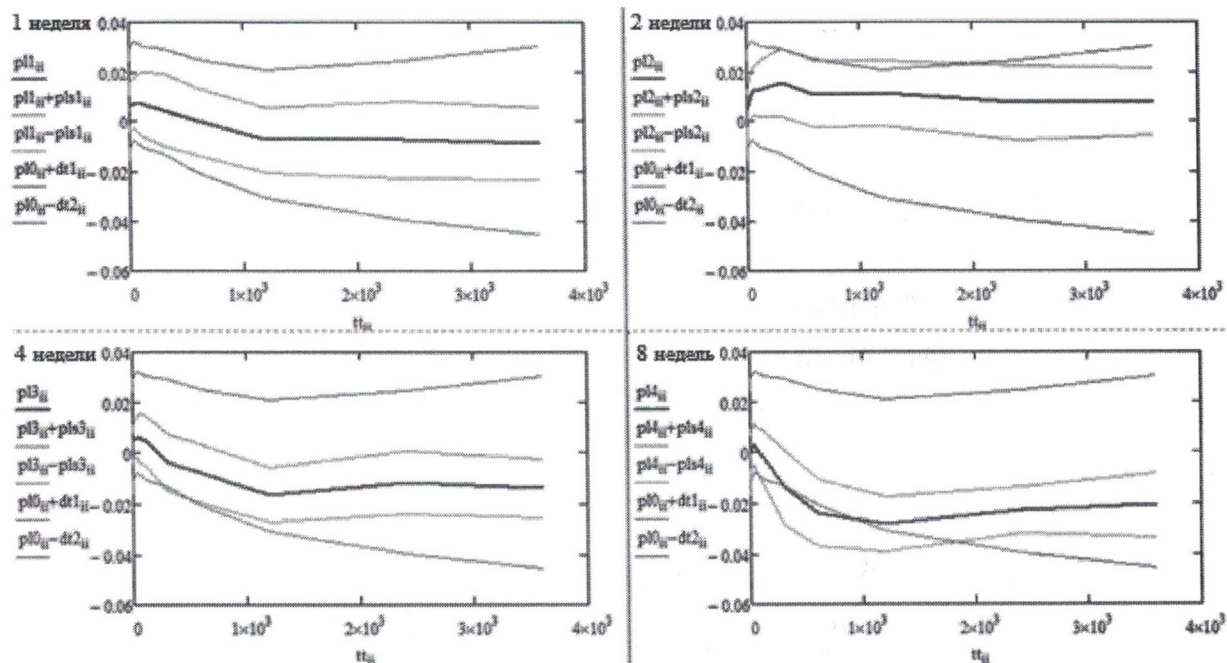


Рисунок 1 – Усредненные значения дрейфа (красные линии) и их разбросы (зелёные линии) от времени (в секундах), а также допустимые значения (лиловые линии) через неделю, две недели, месяц и два месяца после калибровки

Во время исследований МЭМС датчиков при различной температурной динамике – быстрому увеличению и падению внешней температуры было обнаружено явление гистерезиса смещения нуля – зависимости смещения нуля от динамики изменения температуры (рисунок 2).

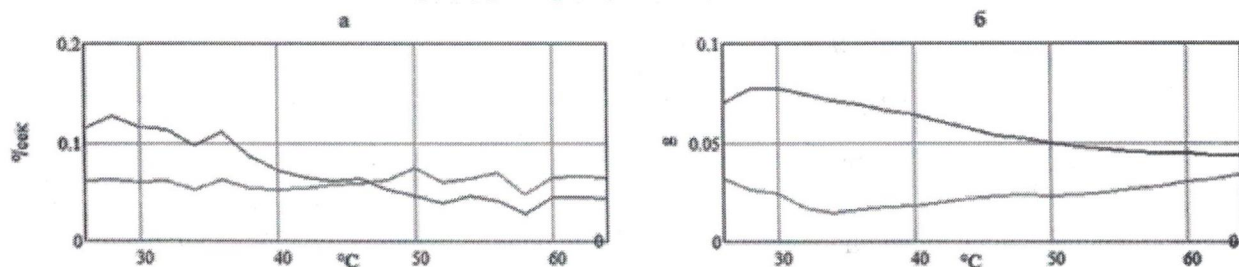


Рисунок 2 – Корреляция смещения нуля МЭМС гироскопов (а) и акселерометров (б) от температуры. Повышение температуры – красные кривые, понижение – синие

Для учета этого поведения погрешности была предложена методика с отслеживанием температурной динамики, снижающая остаточное значение смещения нуля на 40%. Данная методика актуальна для гироскопических блоков, используемых в условиях быстро изменяющейся высоты.

Также предложена методика по определению коэффициентов зависимости смещения нуля и систематической погрешности масштабного коэффициента гироскопа от заданного линейного ускорения. Путем вычитания значений

гироскопа при одной и той же угловой скорости с линейным ускорением и без него определяются корреляции в диапазоне до 100 g (рисунок 3 для смещения нуля). Приведенная методика позволила уменьшить остаточное смещение нуля гироскопа в 5-10 раз и уменьшить остаточную погрешность масштабного коэффициента с 0,1% до 0,01% относительно классической методики калибровки без учета влияния линейного ускорения.

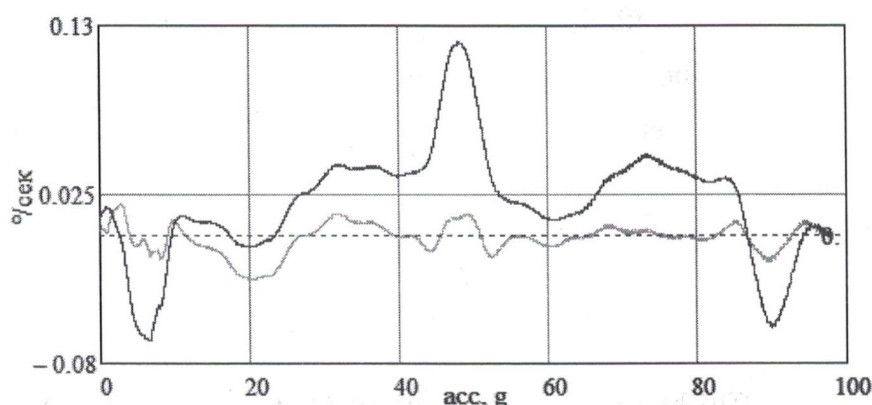


Рисунок 3 – Пример зависимости смещения нуля МЭМС гироскопа от линейного ускорения по одной оси действия в положительном направлении (красная линия – до калибровки, голубая линия – после калибровки)

Предложены разработанные методики по определению систематических составляющих смещения нуля и масштабного коэффициента для двух вариантов выходной информации. Произведено сравнение методик для этих вариантов, сделан вывод о предпочтительности использования информационных выходов с прямыми измерениями и методов постобработки для первичной калибровки. Для случая информационных выходов с параметрами навигации и ориентации выведены точные аналитические соотношения для методик калибровки погрешностей, связанные с наблюдаемостью каждого параметра. Соотношения выводятся из классических формул погрешностей параметров ориентации и навигации:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \Omega_Y^2 + \Omega_X^2 - \omega_0^2 & \dot{\Omega}_Z - \Omega_X \Omega_Y & -(\dot{\Omega}_Y + \Omega_X \Omega_Z) & 0 & 2\Omega_Z & -2\Omega_Y \\ -(\dot{\Omega}_Z + \Omega_X \Omega_Y) & \Omega_Y^2 + \Omega_X^2 - \omega_0^2 & \dot{\Omega}_X - \Omega_Y \Omega_Z & -2\Omega_Z & 0 & 2\Omega_X \\ \dot{\Omega}_Y - \Omega_X \Omega_Z & -(\dot{\Omega}_X + \Omega_Y \Omega_Z) & \Omega_Y^2 + \Omega_X^2 + 2\omega_0^2 & 2\Omega_Y & -2\Omega_X & 0 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 0 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta n_1 \\ \Delta n_2 \\ \Delta n_3 \end{pmatrix};$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 0 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta\Omega_1 \\ \Delta\Omega_2 \\ \Delta\Omega_3 \end{pmatrix},$$

где $\Delta\Omega_{1,2,3}$ – погрешности измерения угловых скоростей гироскопами относительно приборного трёхгранника;

$R_{1,2,3}$ – погрешности БИНС в определении координат;

$V_{1,2,3}$ – погрешности определения линейных скоростей $R_{1,2,3}$ соответственно;

α, β, γ – угловые погрешности ориентации трёхгранника относительно вычисленного;

ω_0 – частота Шулера;

$\Omega_{x,y,z}$ – проекции вектора абсолютной угловой скорости вращения приборного трёхгранника;

$\dot{\Omega}_{x,y,z}$ – производные проекций вектора абсолютной угловой скорости вращения выбранного трёхгранника.

Приведенные соотношения позволяют избежать формирования матриц больших рангов и снизить время вычислений в 3 раза. При этом даже при использовании упрощенных соотношений время вычисления для случая прямых измерений меньше в 4 раза. Это является аргументом выбора прямых измерений датчиков при их доступности.

Предложена формула для оценки времени проведения калибровки на основе времени задаваемых действий и количестве повторений в разных условиях:

$$Time = \sum_{E=Er_1}^{Er_{n1}} \sum_{T=T_1}^{T_{n2,E}} \sum_{M=Mot_1}^{Mot_{n3,T,E}} \sum_{R=Rep_1}^{Rep_{n4,T,E,M}} \sum_{t=0}^{t_{n5,T,E,M,R}} Meas_{E,T,M,R,t},$$

где $Meas$ – время, затрачиваемое на одно измерение;

t – номер измерения в записи для определенных повторения, погрешности;

действующей физической величины и температуры до длины записи $n5$;

R – номер повторения для определенных погрешности, величины и температуры до количества повторений $n4$;

M – номер величины действия (угловой скорости или линейного ускорения) для определенной температуры до количества действий $n3$;

T – номер температурной точки до их общего количества $n2$;

E – вид (номер) погрешности или группы погрешностей из общего количества $n1$.

Предложен способ докалибровки ГИБ на ровной поверхности в точностном кубе, который позволил учесть долговременные погрешности и снизить остаточные значения смещения нуля на 70-80% и остаточные погрешности масштабного коэффициента на 60-80%.

Вывод: таким образом, подтвержден первый пункт, выносимый на защиту, что разработана методика калибровки смещения нуля МЭМС гироскопов и акселерометров при различной температурной динамике, позволяющая снизить остаточное смещение нуля на 40% при скорости изменения температуры $+2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и $-2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ по сравнению с классической табличной калибровкой. Также подтвержден второй пункт, выносимый на защиту, что разработана методика калибровки смещения нуля и масштабного коэффициента МЭМС гироскопа, зависящих от величины линейного ускорения в диапазоне до $100g$, что позволяет уменьшить остаточное смещение нуля в 5-10 раз и снизить остаточную погрешность масштабного коэффициента до 0,01% при калибровке в составе гиринерциального блока с акселерометрами.

В третьей главе описана разработка программно-аппаратного комплекса управления процессом калибровки (рисунок 4).

Программный комплекс управления калибровкой



Рисунок 4 – Программно-алгоритмический комплекс управления калибровкой ГИБ

В зависимости от требований к БИНС и характеристик неоткалиброванного ГИБ на его основе составляется имитационная модель ГИБ, которая настраивается для соответствия требованиям и позволяет составить

обоснованный план калибровки, содержащий оценку по точности калибровки датчиков в составе ГИБ и времени, затрачиваемом на калибровку. На рисунке 5 показан пример составления плана исходя из показаний имитационного моделирования - область допустимых значений погрешностей МЭМС гироскопа в соответствии с требованиями к погрешности по координате для работы БИНС на заданной траектории (рассмотрены примеры с тремя траекториями). Для окончательного формирования плана калибровки может быть выбрано значение из области, дающее наименьшее время калибровки.

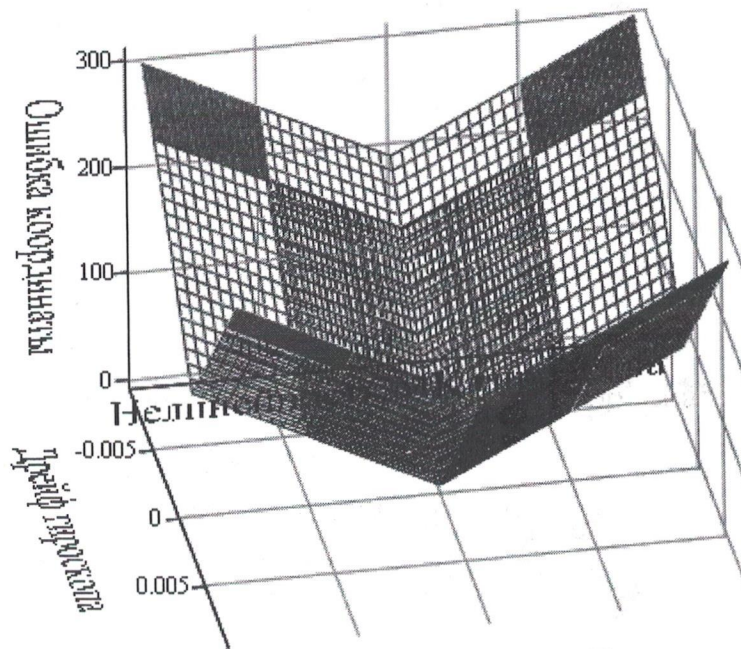


Рисунок 5 – Области допустимых значений для погрешностей МЭМС гироскопа (черные области – решения, выходящие за пределы допустимых значений, синие – допустимые, но не оптимальные решения, красные – оптимальные решения)

Выбор оптимального решения для калибровочного плана представляет собой оптимизационную задачу (с критерием минимального времени калибровки), которая может быть решена различными способами. Предложено решение этой задачи при помощи генетического алгоритма, имеющего результат работы модели БИНС на определённой траектории в качестве функции приспособленности. В качестве популяций используются возможные значения дрейфов, а также погрешностей масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров.

Проведенное исследование показало незначительный вклад взаимных влияний погрешностей (менее 1 %), а также изменение вклада каждой погрешности и каждой оси ГИБ для разных траекторий. Это позволило перейти от вычисления погрешности координаты полноценным алгоритмом БИНС на каждой

итерации к методу линейной комбинации погрешностей. Результаты применения этого метода позволили снизить длительность вычислений в 60 раз.

Разработана программа имитационного моделирования параметров, изменяющихся от времени хранения. На основе экспериментальных данных при помощи нейронной сети можно составить прогноз изменения погрешностей от времени хранения и оценивается его точность (пример для одного из датчиков на рисунке 6). Используемый способ показал точность предсказания ухода дрейфа нуля гироскопа $0,002 \text{ } ^\circ/\text{с}$ и точность предсказания ухода масштабного коэффициента $0,001 \%$ по тестовым данным.

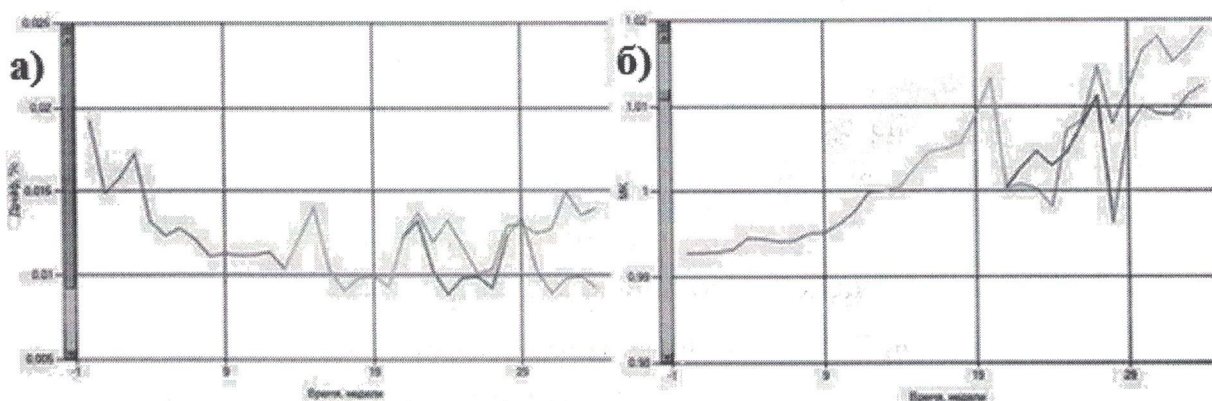


Рисунок 6 – Прогноз погрешностей хранения способом нейронной сети. Синяя линия – входные данные для тренировки, желтая линия – выходные данные для тренировки, красная и голубая линия – прогнозируемые данные (на основе 7-21 недель и 14-28 недель соответственно), зелёная – реальный результат. а) Дрейф нуля гироскопов. б) Масштабный коэффициент гироскопов

Вывод: таким образом, подтвержден третий пункт, выносимый на защиту, что разработан метод линейной комбинации погрешностей гироскопов и акселерометров для определения погрешности координаты БИНС на заданной траектории, позволяющий снизить длительность вычислений в 60 раз по сравнению с применением алгоритма расчета погрешностей БИНС при сохранении точности определения погрешности координаты до 1%.

В четвертой главе представлен анализ программно-алгоритмического комплекса калибровки по результатам испытаний партии из 4х гиринерциальных блоков. На основе примера технического задания построен план калибровки ГИБ с учетом технологических операций, выбраны оптимальные параметры для калибровки, произведена стендовая калибровка. По результатам испытаний оценено соответствие откалиброванных ГИБ модельным значениям случайных погрешностей (пример для дрейфов нуля ГИБ показан на рисунке 7).

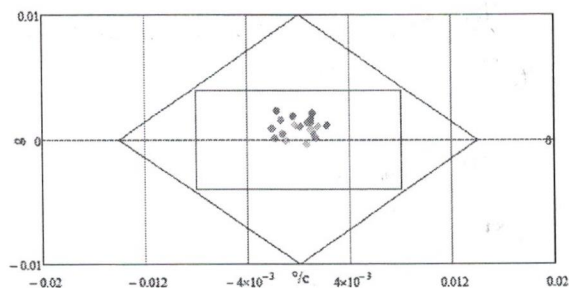


Рисунок 7 – Измеренные значения 4х ГИБ относительно известных случайных значений (красные границы) и допустимых значений (синие границы)

Было проведено сравнение классического плана калибровки с достижением максимально возможных точностей и плана калибровки с достижением более грубых, максимально допустимых точностей, определенных методом генетического алгоритма. Для погрешности координаты 10 метров на траектории малого БПЛА методом генетического алгоритма были получены следующие оптимальные варианты (таблица 1):

Таблица 1. Варианты значений погрешностей для ошибки координаты 10 метров

Значение погрешности координаты	Дрейф гироскопа, °/с	Погрешность МК гироскопа, %	Дрейф акселерометра, g	Погрешность МК акселерометра, %
Равномерное распределение погрешностей	0,005	0,04	0,005	0,04
Макс др.гир.	0,014	0,01	0,004	0,01
Макс погр. МК, гир.	0,008	0,05	0,004	0,01
Макс др.акс.	0,008	0,01	0,01	0,01
Макс погр. МК, акс.	0,008	0,01	0,004	0,05

Время калибровки по классическому способу должно занять 178,67 часа, по способу допустимых точностей (для варианта максимального дрейфа акселерометра) – 35,3 часа. То есть, при использовании оптимального плана калибровки, ее итоговое время было сокращено в 5 раз.

Проведена оценка изменения долговременной нестабильности за 3 месяца на основе данных за 1 месяц, результаты сравнены с реальными исследованиями за последующие 3 месяца. Продемонстрирована точность прогноза дрейфа нуля предложенным методом в $0,002^{\circ}/с$ или $0,0008g$ с разбросами конкретных

значений до $0,0028^\circ/\text{с}$ и $0,0035\text{г.}$, что допустимо, но в идеале требует большего количества исходных данных.

Сравнение точностных характеристик по прямым и косвенным информационным выходам показало, что достигаемые точности примерно на порядок лучше погрешностей МЭМС датчиков, то есть этот фактор не является определяющим. Преимущество в трудоемкости вычислений, показанное в главе 2, делает предпочтительным вариант с прямыми информационными выходами.

Выработаны методические рекомендации по учету случайных погрешностей – периодичности и объему докалибровки в процессе хранения и эксплуатации, а также приведен пример действий при докалибровке и полетной калибровке. В целом по результатам анализа было отмечено соответствие целей построения системы калибровки и полученных результатов. Описаны наиболее распространенные технические отказы датчиков и ГИБ, а также предложены способы их учета при использовании автоматизированного комплекса управления процессом калибровки.

Вывод: таким образом, подтвержден четвертый пункт, выносимый на защиту, что разработан метод оптимального подбора параметров калибровки – количества повторений измерений и температурных точек, основанный на использовании генетического алгоритма и метода определения погрешности координаты через линейную комбинацию погрешностей, позволяющий сократить оцениваемое время калибровки согласно плану до 5 раз при достижении требуемых точностей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Предложена методика снижения остаточного смещения нуля при различной температурной динамике, она позволяет снизить смещение нуля на 40% по сравнению с классической табличной калибровкой при температурной динамике $+2^\circ\text{C}/\text{мин}$ и $-2^\circ\text{C}/\text{мин}$.

2. Предложена методика калибровки смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента, зависящих от величины линейного ускорения по трем осям. Применение этой методики позволило уменьшить остаточное смещение нуля гироскопа в 5-10 раз и уменьшить остаточную погрешность масштабного коэффициента с 0,1% до 0,01% относительно классической методики калибровки без учета влияния линейного ускорения.

3. Составлена новая модель погрешностей МЭМС датчиков, учитывающая нестабильности от включения к включению и от времени хранения. В основе модели лежат экспериментальные исследования, продемонстрировавшие изменения систематических значений начального смещения, дрейфа и масштабного коэффициента от времени хранения и незначительные изменения дисперсии от включения к включению. Предложено описание дрейфа нуля МЭМС датчиков как цветного шума с уменьшающейся от времени с момента включения дисперсией.

4. Приведено сравнение способов калибровки по прямым измерениям и параметрам ориентации и навигации. Из основного уравнения погрешностей для требуемых движений и позиционирований выведены упрощенные формулы, которые позволяют проводить вычисление коэффициентов быстрее в 3 раза. При этом вычисление при использовании прямых информационных выходов происходит в 4 раза быстрее, чем для случая косвенных даже при использовании упрощенных формул. Сделан вывод о предпочтительности использования прямых измерений при стендовой калибровке.

5. Предложен метод линейной комбинации погрешностей для замены полноценного алгоритма ориентации и навигации на заданной траектории. Результаты применения метода линейной комбинации вместо алгоритма БИНС продемонстрировали снижение длительности вычислений в 60 раз.

6. Проведено сравнение классического плана калибровки с достижением максимально возможных точностей и плана калибровки с достижением предельно допустимых погрешностей, определенных методом генетического алгоритма. Сравнение длительности процесса калибровки по предложенной формуле показало уменьшение времени в 5 раз при использовании генетического алгоритма.

7. Описано применение нейронных сетей для прогнозирования долговременных характеристик МЭМС датчиков с точностью способа порядка $0,002^\circ/\text{с}$ для дрейфа гироскопов и $0,0008\text{g}$ для дрейфа акселерометров с разбросами конкретных значений до $0,0028^\circ/\text{с}$ и $0,0035\text{g}$.

Таким образом, решена научно-техническая задача разработки модели погрешности и методик калибровки МЭМС гироскопов и акселерометров в составе ГИБ для программно-алгоритмического комплекса калибровки, обеспечивающего улучшение точностных характеристик калибруемых ГИБ, а также снижение трудоёмкости процесса калибровки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ по специальности 2.2.11. (05.11.16):

1. Крылов А.А. Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС-гироскопов в составе ГИБ. / А.А. Крылов, Д.В. Корниук // Труды МАИ – 2018 – №103 – С. 1-18 (перечень ВАК от 01.04.2019, № 989).
2. Крылов А.А. Технологические подходы к устранению дрейфа нуля микромеханических гироскопов. / А.А. Крылов, Д.В. Корниук // Известия Тульского государственного университета – Технические науки – 2018 – №5 – С. 93-97 (перечень ВАК от 30.11.2018, № 2030).
3. Крылов А.А. Особенности идентификации смещения нуля в гиринерциальном блоке на микроэлектромеханических датчиках. / А.А. Крылов // Датчики и системы – 2020 – № 4 (246) – С. 43-48 (перечень ВАК от 21.12.2021, № 916).
4. Крылов А.А. Фильтрация цветного шума микроэлектромеханических датчиков. / А.А. Крылов // Датчики и системы – 2021 – №6 (259) – С. 25-32 (перечень ВАК от 21.12.2021, № 916).
5. 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 (перечень ВАК от 24.10.2023, № 1039).

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных:

6. Krylov A.A. Comparative analysis of calibration variants for inertial measurement unit based on microelectromechanical system. / A.A. Krylov and K.K. Veremeenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 868, 18th International Conference "Aviation and Cosmonautics" (AviaSpace-2019) – 2020 – С. 1-14 DOI: 10.1088/1757-899X/868/1/012037
7. Krylov A.A. Technology for Elimination of MEMS Gyroscope Zero Offset under the Influence of Linear Acceleration and the Occurrence of Skewnesses in the Locations of Sensor Block Installation. / A.A. Krylov // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS) – 2020 (St. Petersburg, Russia) – 2020 – С. 176-180. DOI: 10.23919/ICINS43215.2020.9133905
8. 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

В других изданиях:

9. Крылов А.А. Исследование неустойчивости дрейфа нуля МЭМС-гироскопов и способов её учёта при калибровке. / А.А. Крылов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2020 – №1 – С. 64-69.
10. Крылов А.А. Устранение смещения нуля МЭМС-гироскопов при различной температурной динамике. / А.А. Крылов, П.С. Кузнецов // «Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – 2019 – №2 – С. 34-39.
11. Крылов А.А. Построение оптимального плана калибровки ГИБ на МЭМС-датчиках. / А.А. Крылов // 19-я «Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19-ой Международной конференции – 2020 – С. 276-277.
12. Крылов А.А. Сравнительный анализ вариантов калибровки дрейфа нуля гироскопов на основе микроэлектромеханических датчиков. «Навигация и управление движением. / А.А. Крылов // Материалы «XXII конференции молодых ученых с международным участием». Санкт-Петербург – 2020 – С. 29-31.
13. Крылов А.А. Сравнительный анализ вариантов калибровки гироскопов на основе МЭМС-датчиков. / / А.А. Крылов, К.К. Веремеенко // 18-я международная конференция «Авиация и космонавтика - 2019». Тезисы 18-ой Международной конференции – 2019 – С. 94-95.
14. Крылов А.А. Технология устранения влияния ускорения на показания МЭМС-гироскопов. / А.А. Крылов // «XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». Сборник трудов – 2019 – С. 129-130.
15. Крылов А.А. Технология настройки и калибровки гироскопов в составе ГИБ-73М. / А.А. Крылов // Сборник статей молодых ученых: К 85-летию АО «ГосНИИП». Под общей редакцией Б.Н. Гаврилина. Москва – 2018 – С. 194-205.
16. Крылов А.А. Исследование неустойчивости масштабного коэффициента МЭМС гироскопов и выработка методических рекомендаций для ее учета. / А.А. Крылов // 12-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Сборник аннотаций конкурсных работ – 2020 – С. 90-91.

17. Крылов А.А. Уменьшение смещения нуля МЭМС-датчиков при температурном гистерезисе. / А.А. Крылов // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей" – 2021 – № 2 (37) – С. 48-56.
18. Крылов А.А. Построение прогноза изменения характеристик микроэлектромеханических датчиков. / А.А. Крылов // "Навигация и управление движением. Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Санкт-Петербург – 2021 – С. 258-261.
19. Крылов А.А. Моделирование требований к МЭМС датчикам первичной информации на основе допустимых погрешностей БИНС на заданной траектории. / А.А. Крылов // Сборник тезисов VII научно-технической конференции для специалистов организаций, входящих в АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей». Москва – 2022 – С. 44-45.

Публикации объектов интеллектуальной собственности:

20. Крылов А.А. Программа расчёта калибровочных коэффициентов гироскопического блока на микроэлектромеханических датчиках. / Крылов А.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614273 – дата рег. 22.03.2021.
21. Крылов А.А. Программа расчёта погрешностей инерциальной навигационной системы на микроэлектромеханических датчиках при заданной траектории. / Крылов А.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664663 – дата рег. 10.09.2021.
22. Крылов А.А. Программа расчёта погрешностей датчиков для инерциальной навигационной системы при помощи генетического алгоритма. / Крылов А.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664930 – дата рег. 15.09.2021.