

Исполняющему обязанности  
проректора по научной работе  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Московский авиационный  
институт (национальный исследовательский  
университет)» МАИ  
доктору технических наук, профессору  
Равиковичу Юрию Александровичу

Уважаемый Юрий Александрович!

В ответ на ваше письмо №010/1862-3 от 23.01.2024 по вопросу назначения меня в качестве официального оппонента по диссертационной работе Крылова Алексея Анатольевича на тему «Разработка технологии калибровки гироскопических блоков на основе МЭМС датчиков», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11 «Информационно-измерительные управляющие системы (технические науки)» отправляю в Ваш адрес отзыв в двух экземплярах.

Доцент кафедры ИУ-2  
«Приборы и системы ориентации,  
стабилизации и навигации»,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана



Ю.А. Пономарев

## Отзыв

официального оппонента Пономарева Юрия Анатольевича 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)»

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа изложена на 165 страницах, содержит 67 рисунков и 41 таблицу.

### **Актуальность выбранной темы.**

Калибровка блоков гироскопов и акселерометров – узкоспециализированная техническая задача, которая требует хорошего понимания не только общих принципов погрешностей датчиков, но и свойств, связанных с физическими принципами их работы. Многие отечественные производители МЭМС датчиков, такие как РПКБ, МИЭТ, МИЭА имеют много публикаций, посвященных компенсации тех или иных погрешностей, как правило, обнаруженных при тестировании и испытаниях собственных изделий. Крупные работы, посвященные проблеме, как правило рассматривают калибровку блоков с МЭМС датчиками как калибровку блоков с “грубыми” датчиками, без попытки более подробно рассмотреть источники возникновения ошибок. В связи с этим, выбранная тема кажется **актуальной** в силу попытки построения методики калибровки, отталкиваясь от свойств МЭМС датчиков.

**Цель** диссертационной работы - повышение точности ГИБ и снижение трудоемкости калибровки – четко сформулирована и обоснована, **задачи** описывают последовательное движение к этой цели.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.**

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, полно отражает основные положения и выводы диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений.

Во **введении** работы описаны основная цель и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, вынесенные на защиту.

В **первой главе** приведен обзор погрешностей МЭМС датчиков, сделан вывод о необходимости исследования влияния линейного ускорения на сигнал МЭМС гироскопов, поведения погрешностей при различной величине изменения температуры, а также совместного действия различных нестабильностей.

Во **второй главе** приведены модели погрешностей с учетом проведенных исследований. Предложены методики калибровки, касающиеся различных аспектов: наблюдаемости, температурной нестабильности, нестабильности от включения к включению. Предложена методика упрощенной докалибровки при хранении для компенсации погрешностей, возникающих при хранении. Предложена формула, оценивающая время калибровки согласно общей методике, включающей все описанные аспекты.

В **третьей главе** приведено описание программно-алгоритмического комплекса калибровки. Особый интерес представляет Программа управления планом калибровки, использующая генетический алгоритм для подбора оптимальных параметров калибровки. Также стоит отметить Программу прогноза уходов систематических значений, позволяющую оценить длительность “жизни” проведенной калибровки относительно требуемых значений погрешностей. Комплекс в совокупности автоматизирует методики калибровки, что позволяет приблизить реальное время калибровки к расчетному.

В **четвертой главе** приведены результаты применения разработанных методик калибровки. Большая часть результатов совпадает с предсказанными по моделям погрешностей результатами. Благодаря выбору оптимальных параметров калибровки удалось сократить время калибровки в 5 раз для определенных значений допустимых погрешностей. Прогноз ухода погрешностей показал хорошую точность, однако привел к выводу о необходимости пересмотра подхода к формированию первичных данных.



В **заключении** приведен перечень основных результатов диссертационной работы.

К **научной новизне** диссертационной работы можно отнести следующие пункты:

1) Предложены методики калибровки погрешностей ГИБ на МЭМС гироскопах и акселерометрах, учитывающие особенности этого типа датчиков, методики объединены и реализованы в общем программном комплексе.

2) Исследованы влияние линейного ускорения на погрешности МЭМС гироскопов, гистерезис смещения нуля, долговременная нестабильность смещения нуля и масштабного коэффициента. Предложены методики калибровки систематических значений этих погрешностей и рекомендации по учету случайных.

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

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

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

#### **Соответствие паспорту специальности.**

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

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

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.



## Заключение оппонента о соответствии диссертационной работы требованиям ВАК.

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 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

Пономарев Юрий Анатольевич  
к.т.н. по специальности 05.11.03.

«Приборы навигации», ФГБОУ ВО

МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры ИУ-2

«Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»,

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1,

Тел. + 7 (926) 127 86 57

e-mail: [yu-baksa@yandex.ru](mailto:yu-baksa@yandex.ru)

«21» февраля 2024 г.



Пономарев Ю.А.

Подпись официального оппонента Пономарева Юрия Анатольевича, к.т.н., доцента кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана «подтверждаю».



(подпись)

(Фамилия И.О.)

ВЕРНО

Начальник Управления кадрового  
сопровождения и администрирования

МГТУ им. Н.Э. Баумана

К. П. Силкина



