

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Васинёвой Ирины Алексеевны  
«Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы  
в сборе на точных стендах»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.01 – «теоретическая механика»

Диссертация И. А. Васинёвой посвящена исследованию алгоритмов стендовой калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Точность работы инерциальных навигационных систем напрямую зависит от их инструментальных погрешностей; поэтому калибровка этих систем, т.е. оценивание инструментальных погрешностей с целью их дальнейшей алгоритмической компенсации, является важной прикладной задачей. Эта задача исследовалась во многих учреждениях и предприятиях, начиная с 1970-х годов; однако несмотря на значительное количество публикаций по этой теме и на существенные успехи в решении задачи калибровки, общая методически целостная теория калибровки к настоящему времени отсутствует, а многие вопросы, связанные с калибровкой БИНС, до сих пор остаются открытыми. В соответствии со сказанным, выбранная И. А. Васинёвой тема исследования является, безусловно, актуальной.

В первой главе диссертации автор приводит постановку задачи калибровки, проводит строгую математическую формализацию этой задачи для грубых и для точных стендов и проводит теоретический анализ наблюдаемости инструментальных погрешностей для некоторого заранее выбранного плана эксперимента.

Во второй главе проводится ковариационный анализ задачи калибровки: исследуются точности оценивания инструментальных погрешностей БИНС, определяемые решением ковариационного уравнения фильтра Калмана. Представлен широкомасштабный анализ влияния на точность оценивания тех или иных характеристик стенда и БИНС, а именно: количества осей стенда, наличия или отсутствия информации с датчиков углов стенда и точности этой информации, уровня шумов чувствительных элементов БИНС, конкретного вида программных движений стенда при калибровке. Также проведено исследование точности калибровки путём исследования погрешностей навигации (а именно, погрешностей определения широты и долготы) откалиброванной системы на некоторой траектории движения летательного аппарата. Проведённый ковариационный анализ показал существенное улучшение ошибки оценивания погрешностей по сравнению с их априорными значениями, что свидетельствует об эффективности обсуждаемого в работе алгоритма калибровки.

В третьей главе проведено исследование алгоритмов калибровки с привлечением вторичной информации – т.е. информации о том, что БИНС во время стендовой калибровки имеет постоянные координаты и нулевую скорость относительно Земли; эта информация может быть представлена в виде измерений, линейных по неизвестному вектору состояния динамической системы, представляющей собой уравнения ошибок БИНС. Дальнейшее

оценивание вектора состояния, включающего в свой состав инструментальные погрешности, осуществляется, как и во второй главе, с использованием фильтра Калмана.

Четвёртая глава диссертации посвящена обработке данных реального эксперимента и служит дополнительным подтверждением корректности результатов работы.

Следует отметить, что результаты диссертации могут быть использованы для калибровки БИНС на самых разных стендах: грубых и точных; одно-, двух- и трёхстепенных. Проведённая в работе математическая формализация задачи калибровки может быть эффективно использована и при исследовании других задач стендовой калибровки БИНС (например, задач, использующих другой план эксперимента). Важным прикладным результатом является также разработанный автором комплекс программ, реализующих рассмотренные в работе алгоритмы калибровки.

По тексту диссертации можно сделать следующие замечания.

1. Параллельно с ковариационным анализом, проведённым во второй главе, целесообразно было бы выполнить и статистическое моделирование «в реализациях», после чего сравнить статистические характеристики ошибок оценивания параметров, полученные путём ковариационного анализа и путём статистического моделирования. Такое сравнение послужило бы дополнительной проверкой корректности разработанных алгоритмов и их программной реализации.
2. Отсутствуют пояснения, почему фильтр Калмана является в рассматриваемой задаче оптимальным методом оценивания.
3. Уместно было бы привести в работе диаграмму, иллюстрирующую взаимную связь многочисленных систем координат, введённых в главе 1.

Однако перечисленные замечания не являются существенными, могут быть легко устранены и не снижают ценности и значимости результатов работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и является законченным научным исследованием, в котором получены новые результаты, имеющие как теоретическое, так и практическое значение. Используемая автором техника свидетельствует о богатстве его математического аппарата и показывает, что он владеет методами инерциальной навигации, теоретической механики, теории корректируемых систем и теории оценивания на высоком уровне. Необходимо отметить, что результаты, выносимые автором на защиту, были ранее представлены на конференциях, в том числе международных, и опубликованы в двух статьях из перечня ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

В соответствии со сказанным выше, можно сделать вывод, что диссертация И. А. Васинёвой «Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на точных стендах» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней ВАК, а её автор безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 «теоретическая механика».

Деревянкин Алексей Викторович



Российская Федерация

Город Москва.

Пятого июня две тысячи семнадцатого года.

Я, Сергеева Наталья Юрьевна, нотариус города Москвы, свидетельствую подлинность подписи Дервянкина Алексея Викторовича. Подпись сделана в моем присутствии. Личность подписавшего документ установлена по паспорту 45 08 061990, выданному паспортно-визовым отделением ОВД Пресненского района УВД ЦАО города Москвы 14.12.2005 г.

Зарегистрировано в реестре: № 2-415

Взыскано государственной пошлины (по тарифу): 100 руб.

Уплачено за оказание услуг правового и технического характера: 1000 руб.

МП

Н.Ю. Сергеева



*[Handwritten signature]*

