

## ОТЗЫВ

научного руководителя о кандидатской диссертации И.Е. Тарыгина  
«Расширенные температурные модели погрешностей измерений  
инерциальных датчиков в задаче калибровки», представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Работа И.Е. Тарыгина посвящена развитию метода калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС) на поворотных стендах с горизонтальной осью вращения. В таких системах на основе показаний инерциальных датчиков — одноосных измерителей абсолютной угловой скорости и удельной силы, действующей на блок чувствительных элементов, начальных условий и моделей вращения и гравитационного поля Земли численно решается прямая задача механики. Под калибровкой в диссертации понимается определение параметров априорно выбранной модели погрешностей инерциальных датчиков. Модель включает в себя смещения нулевых сигналов датчиков, ошибки их масштабных коэффициентов, малые отклонения осей чувствительности от осей ортогонального трёхгранника, и т.д., и учитывает зависимости этих параметров от температуры, её производной и пространственного градиента. Для оценки параметров модели используется разработанная профессором МГУ Н.А. Парусниковым методика калибровки БИНС на грубых стендах, основанная на сведении задачи к линейной задаче оптимального стохастического оценивания вектора состояния линейной динамической системы. Математическая модель задачи основана на классических уравнениях ошибок инерциальной навигации. При этом исходная методика не учитывала температурные вариации указанных параметров в процессе калибровки, что приводило к необходимости проводить калибровочные

эксперименты только после установления температурного равновесия в системе для каждой температурной точки в рабочем диапазоне системы.

В работе И.Е. Тарыгина указанная методика модифицирована для калибровки БИНС при переменной температуре. Это позволяет проводить эксперименты, не дожидаясь температурного равновесия, и сокращает в разы общее время, затрачиваемое на калибровку, что является практически значимым достижением автора. Данная модификация нетривиальна, так как приводит к существенному увеличению (в несколько раз) размерности оцениваемого вектора состояния, и, как следствие, к значительному изменению условий наблюдаемости и оцениваемости в задаче. Результаты исследования оцениваемости, приведённые в работе, представляют собой теоретический интерес с точки зрения применения различных подходов к определению наблюдаемости и оцениваемости в нестационарных системах высокого порядка. Кроме того, при практической реализации модифицированной методики калибровки автором рассмотрены и решены сопутствующие практические задачи:

- оценка производной температуры по времени при существенной дискретизации в измерениях термодатчиков;
- калибровка блока датчиков угловой скорости без акселерометров на точном поворотном стенде с термокамерой.

Работа содержит как аналитические исследования, так и результаты численного моделирования, а также экспериментальные результаты реальной калибровки систем различного класса точности. Все выносимые на защиту результаты диссертации являются новыми, обоснованными и получены лично автором. Они дополняют существующие подходы к калибровке БИНС рядом новых аналитических моделей и позволяют дать ряд практических рекомендаций при составлении плана калибровочных экспериментов.

В ходе работы над диссертацией И.Е. Тарыгин продемонстрировал владение современными методами анализа линейных динамических систем,

теоретической механики, механики управляемых систем, теории оценивания, обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных. Полученные результаты применялись и применяются в работах лаборатории управления и навигации МГУ совместно с АО «Инерциальные Технологии Технокомплекса» (г. Раменское), АО «Московский институт электромеханики и автоматики», АО «Арзамасское научно-производственное предприятие ТЕМП-АВИА», МОКБ «Марс» (г. Москва) и рядом других научно-исследовательских и производственных предприятий авиационно-космической отрасли, занимающихся разработкой бескарданных инерциальных навигационных систем.

Работа по структуре и содержанию является законченным научным трудом и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тексту диссертационной работы. Считаю, что диссертация И.Е. Тарыгина на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Расширенные температурные модели погрешностей измерений инерциальных датчиков» может быть представлена к защите в Диссертационном совете МГУ.011.7 по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории управления и навигации,  
А.В. Козлов  
тел.: +7 495 939-5933  
e-mail: [a.kozlov@navlab.ru](mailto:a.kozlov@navlab.ru)