

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора

Харина Евгения Григорьевича

на диссертационную работу Васинёвой Ирины Алексеевны на тему:

**«Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе
на точных стендах»**

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика.

Бескарданые (бесплатформенные) инерциальные навигационные системы (БИНС) входят в состав пилотажно – навигационного оборудования большинства летательных аппаратов (ЛА) гражданской и военной авиации. Эти системы являются автономными. Модель погрешностей БИНС описывается системой дифференциальных уравнений, на основе которой в навигационных комплексах проводится комплексная обработка информации (КОИ) БИНС и корректоров – систем дальней и ближней навигации, спутниковых навигационных систем (СНС) и др.

Комплексная обработка информации проводится с целью обеспечения высокоточной информации в определении координат, составляющих путевой скорости и курса, в том числе при пропадании информации от корректоров, что необходимо для решения задач общего и специального самолетовождения, боевых задач ЛА ВКС.

Калибровка БИНС на точных стендах является необходимым этапом повышения точностных характеристик системы в эксплуатации. В диссертации показано, что для калибровки БИНС в сборе должна использоваться информация об ориентации приборного трехгранника БИНС, получаемая при помощи ДУС и акселерометров при вращении БИНС на стенде, что дает возможность калибровки обоих блоков чувствительных элементов БИНС одновременно. Определенные в процессе калибровки параметры

инструментальных погрешностей инерциальных датчиков компенсируются в режимах выставки и навигации.

Разработка методов и алгоритмов калибровки БИНС на *точном* стенде с использованием информации об ориентации платформы стенда относительно его основания является *актуальной задачей, имеющей большое научное и практическое значение.*

Построение и анализ математической модели, методов и алгоритмов калибровки бескарданных инерциальных навигационных систем в сборе на точных стендах являются *целью диссертации.* Для достижения этой цели автор провел исследования по построению алгоритмов калибровки БИНС в сборе на точном стенде с использованием дополнительной информации об углах ориентации платформы стенда, показана наблюдаемость всех параметров модели инструментальных погрешностей датчиков. Путем ковариационного анализа показано повышение точности калибровки БИНС за счет привлечения информации точных стендов, исследовано влияние программного движения стенда на точность калибровки.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке новых методов и алгоритмов, методики для калибровки на точных стендах с использованием информации об ориентации платформы стенда относительно его основания. Показано, что использование новых измерений позволяет без усложнения плана калибровки на грубых стендах по разработанной ранее методике и увеличения времени повысить качество калибровки БИНС и повысить точность автономной навигации. Показано, что разработанный автором закон управления платформой стенда обеспечивает высокую степень наблюдаемости оценок инструментальных погрешностей и при этом легко реализуется. *Достоверность* работы алгоритмов подтверждается согласованностью результатов аналитического анализа наблюдаемости, ковариационного анализа и результатами обработки материалов эксперимента на стенде с реальной штатной системой.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные алгоритмы могут быть использованы на предприятиях - разработчиках БИНС и на предприятиях, занимающихся летными испытаниями ПНО на летательных аппаратах ГА и МО.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации 99 страниц текста с 28 рисунками и 8 таблицами. Список литературы содержит 37 наименований.

Во *введении* автор выполнил обзор состояния вопроса калибровки БИНС и обосновал актуальность решаемой проблемы – разработка методов и алгоритмов калибровки БИНС на *точном* стенде с использованием информации об ориентации платформы стенда относительно его основания.

В *первой главе* дана постановка задачи разработки методики калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на точных стендах. Методика калибровки изложена в общем виде, автором разработана математическая модель калибровки БИНС, которая включает в себя описания: уравнений ошибок БИНС, моделей инструментальных погрешностей БИНС, моделей измерений, в том числе и модели измерений дополнительной информации об углах ориентации платформы стенда. Ставится задача оценки вектора состояния погрешностей БИНС, в состав которого входят параметры инструментальных погрешностей. Оценка вектора состояния производится с использованием фильтра Калмана.

Следует отметить, что в диссертации большое внимание уделено проблеме анализа наблюдаемости системы без использования измерений от стенда и с их использованием, который позволяет получить наблюдаемые комбинации оцениваемых параметров. В результате проведенного анализа наблюдаемости установлено, что наряду со всеми параметрами моделей инструментальных погрешностей БИНС наблюдается параметр несинхронности информации БИНС и стенда, а также параметры инструментальных погрешностей стенда по отдельности, за исключением двух неразделяемых комбинаций.

Во *второй главе* проведен сравнительный ковариационный анализ точности оценки параметров инструментальных погрешностей при различных вариантах калибровки. Проводилась оценка вариантов при использовании одностепенных и двустепенных стендов. При этом для каждого типа стенда рассматривались варианты методики - с использованием дополнительной информации от стенда и без нее. Сравнивались результаты калибровки на одностепенных и двустепенных стендах без использования дополнительной информации от стенда. Исследована и оценена зависимость точности калибровки БИНС от уровня шумов дополнительной информации и датчиков БИНС, влияние программного движения стенда.

Моделирование автономной навигации БИНС по результатам калибровки с использованием дополнительной информации от стенда и без нее показало эффективность калибровки с использованием дополнительной информации от точного стенда.

В *третьей главе* автором представлена математическая модель задачи калибровки БИНС при использовании вторичной информации - уравнения ошибок БИНС, модели корректирующих измерений. Проведена оценка вектора состояния погрешностей БИНС, включающего в том числе параметры инструментальных погрешностей датчиков. Проведена редукция исходной задачи, позволяющая за счет части компонентов корректирующего вектора понизить порядок исходной задачи оценивания. Проведен сравнительный ковариационный анализ точности оценки параметров инструментальных погрешностей при калибровке с использованием первичной и вторичной информации.

В *четвертой главе* автор приводит результаты двух экспериментов калибровки на трехосном прецизионном стенде, на котором была установлена серийная БИНС. Был применен алгоритм калибровки при помощи вторичной информации, обеспечивающий необходимую точность оценки. В обоих экспериментах БИНС после выставки была переведена в режим навигации.

Первый эксперимент использовался для оценки параметров инструментальных погрешностей, т.е. для калибровки, а второй - для компенсации погрешностей на основе оценок, полученных в первом эксперименте. В диссертации на рисунке приведены погрешности БИНС в определении координат для двух вариантов - до и после компенсации определенных в результате калибровки параметров инструментальных погрешностей. Анализ показал, что исходные погрешности уменьшились примерно в 3 раза.

Оценивая диссертационную работу в целом, можно констатировать, что на основе проведенных исследований автором решена задача калибровки на точных стендах, создано программно - методическое обеспечение калибровки, позволяющее автоматизировать процесс калибровки БИНС в серийном производстве.

Основные результаты работы докладывались на научно - технических семинарах и конференциях, в том числе международных. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 – в тезисах докладов. Автореферат отражает основные положения диссертации.

К недостаткам работы можно отнести:

- ✓ не приведена общая структурная схема калибровки БИНС, ее наличие позволило бы более четко сформулировать постановку задачи;
- ✓ отсутствие описания алгоритма калибровки в целом (хотя бы в виде структурной схемы) затрудняет понимание решения задачи калибровки БИНС;
- ✓ в диссертационной работе не приведены материалы летных испытаний БИНС, которые могли бы быть хорошим подтверждением эффективности разработанных алгоритмов и методики калибровки на точных стендах;

