

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу  
Филатовой Гузели Амировны  
«Навигация автономного подводного аппарата при помощи  
бескарданной инерциальной навигационной системы»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности  
01.02.01 – Теоретическая механика

Диссертационная работа Г.А. Филатовой посвящена исследованию и решению важной прикладной задачи – построению навигационной системы автономного подводного аппарата (АПА) на базе бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС). Автономные подводные аппараты используются для исследования и освоения водных глубин, проведению обзорно-поисковых работ, геологоразведки и картографирования дна. Для эффективного применения АПА необходима высокая точность работы его навигационной системы. От решения навигационной задачи зависит успешность выполнения миссии АПА и ценность получаемых исследовательских данных. Поэтому задача построения высокоточной навигационной системы и разработка алгоритмов работы такой системы является актуальной.

Типовая навигационная система АПА включает в себя гироскопический датчик курса, датчики углов и угловых скоростей, глубиномер, доплеровский лаг. Бортовая навигационная система производит счисление пути. С помощью гидроакустической навигационной системы осуществляется коррекция счисленных координат. АПА оснащаются также приемниками СНС, которые могут функционировать только в надводном положении. В диссертационной работе предложена конфигурация навигационной системы АПА, включающая

БИНС среднего класса точности. Разработаны алгоритмы, в которых в качестве основной принимается информация БИНС, а информация остальных бортовых датчиков используется как корректирующая.

Работа содержит введение, 5 глав и заключение.

Во введении обосновывается актуальность темы. Проводится обзор литературы по применению БИНС для широкого круга прикладных задач, описанию навигационной системы счисления пути АПА и гидроакустической навигационной системы. Перечислены 5 публикаций автора по теме диссертации, 2 из которых опубликованы в изданиях из перечня ВАК. Указаны 3 доклада автора по материалам диссертационной работы, сделанные на Всероссийском съезде и международных конференциях.

В главе 1 изложена организация навигационного комплекса автономного подводного аппарата, его работа в штатном режиме. Перечислен состав бортовой системы навигации, указываются разновидности гидроакустической навигационной системы. Отмечается, что основное направление развития АПА – повышение их мобильности и экономической эффективности. Вместо использования стационарных маяков, которые необходимо устанавливать на дно и поднимать по окончании работ, предполагается использовать мобильный маяк, буксируемый автономным водным аппаратом. Обмен данными между АПА и сопровождающим судном осуществляется гидроакустической системой связи.

Приводятся технические характеристики автономного подводного аппарата «МАРК», для которого выполняются дальнейшие исследования. Предполагается, что на борту установлена БИНС среднего класса точности, содержащая блоки с 3 ньютометрами MEMS, 3 волоконнооптическими датчиками угловой скорости и бортовой вычислитель. В качестве корректирующей информации для БИНС предлагается использовать скоростную информацию от доплеровского лага, информацию о глубине

погружения, а также дальность до мобильной антенны приемника СНС, установленного на автономном водном аппарате.

Во второй главе предложены алгоритмы коррекции БИНС с учетом особенностей режимов работы АПА и состава его аппаратуры. Вводятся системы координат, записываются модельные уравнения БИНС. Определяются матрицы направляющих косинусов между осями введенных трехгранников. Вектор независимых параметров, описывающий состояние рассматриваемой системы, содержит 9 компонент: 3 координаты, 3 составляющих относительной скорости и 3 угловых параметра, задающих угловое положение объекта.

Уравнения ошибок БИНС представляет собой систему из 9 линейных дифференциальных уравнений. При выборе модели инструментальных погрешностей БИНС предполагается, что система перед установкой на аппарат прошла калибровку на стенде. Поэтому учитываются только те компоненты, которые меняются от запуска к запуску. Инструментальная погрешность каждого ньютометра и датчика угловой скорости представляется в виде суммы постоянной составляющей и высокочастотной составляющей, принимаемой за белый шум.

Коррекция производится по дополнительной информации о дальности до наводного маяка с известными координатами, глубине погружения и скорости, получаемой от доплеровского лага. Уравнения корректирующих измерений записываются в линеаризованном виде.

Приводится структура алгоритма коррекции с введением обратных связей.

В третьей главе анализируется работоспособность и точность предложенного алгоритма коррекции БИНС. Исследования проводятся с помощью комбинации моделирования и использования реальных данных, полученных на АПА.

Для моделирования выбраны априорные характеристики погрешностей датчиков БИНС среднего класса точности и погрешностей измерений. Рассматривались характерные движения АПА и автономного водного аппарата с маяком. Проводится ковариационный анализ точности алгоритмов коррекции.

Результаты анализа приведены в графическом виде. Изображены траектории движения АПА и сопровождающего автономного водного аппарата. Показаны зависимости среднеквадратических отклонений ошибок оценок траекторных и угловых параметров от времени. Задаваемые начальные значения среднеквадратических отклонений ошибок оценок на рассматриваемых интервалах движения аппаратов уменьшаются в несколько раз. Согласно результатам ковариационного анализа предложенные алгоритмы коррекции позволяют оценить также погрешности датчиков дополнительной информации.

Точность алгоритмов коррекции продемонстрирована также на примере моделирования прямолинейного движения АПА с постоянной скоростью. В качестве координат маяка гидроакустической навигационной системы взяты реальные данные, зарегистрированные в эксперименте. Оценки координат, полученные на выходе алгоритма, сравнивались с действительными параметрами. Результаты моделирования, представленные в работе в виде таблицы со статистическими характеристиками погрешности, подтверждают работоспособность алгоритма, согласуются с результатами ковариационного анализа и показывают точность на уровне первых метров.

В четвертой главе диссертационной работы излагается метод повышения точности навигационной системы подводного аппарата путем специального режима движения перед погружением. Сначала обосновывается вывод о том, что стендовая калибровка БИНС рассматриваемого класса точности не решает полностью проблемы оценки инструментальных погрешностей БИНС. Режим калибровки предлагается производить путем организации специального движения аппарата с установленной на нем БИНС перед погружением. Для

коррекции рекомендуется использовать позиционную и скоростную информацию приемника СНС.

Результаты ковариационного анализа при моделировании предложенного режима приведены в графическом виде. Предварительная калибровка перед погружением позволяет в несколько раз снизить среднеквадратическое отклонение ошибок оценки координат на первых этапах движения АПА под водой.

В главе 5 предложен алгоритм оценивания погрешности масштабного коэффициента гидроакустической навигационной системы. Из-за неоднородности водных слоев скорость звука в море не является постоянной. А вычисление расстояний в вычислительной системе АПА происходит по измеренному времени распространения сигнала и скорости звука. Для определения значения эффективной скорости звука, как правило, проводятся предварительные работы.

В модель корректирующего измерения дальности предложено ввести слагаемое, равное произведению погрешности масштабного коэффициента на величину измеряемой дальности. В вектор состояния уравнений ошибок включается погрешность масштабного коэффициента измерителя дальности.

Качество оценивания масштабного коэффициента исследовано при помощи ковариационного анализа. Результаты анализа приведены в графическом виде. Среднеквадратическое отклонение оценки ошибки масштабного коэффициента на рассматриваемом движении длительности порядка 500 с уменьшилось в 5 раз.

В качестве одного из выводов в главе сформулировано предложение с помощью разработанного алгоритма производить оценивание значения эффективной скорости звука в воде перед движением АПА по программной траектории.

В заключении перечислены основные результаты работы. В целом вся работа направлена на определение конфигурации навигационной системы автономного подводного аппарата. Центральное место в предложенной навигационной системе занимает БИНС среднего класса точности, а информация остальных датчиков используется как корректирующая. Проведенные исследования показали, что задача навигации АПА может быть решена с достаточно высокой точностью, определение координат АПА будет осуществляться с точностью до первых метров.

Список литературы содержит 46 наименований. Автореферат отражает все основные результаты, полученные в работе.

В качестве замечаний по диссертационной работе Г.А. Филатовой отмечу следующее.

1. При использовании данных приемника СНС в качестве корректора погрешности позиционной информации задаются в виде белого шума. Однако основной вклад в погрешность координат приемника СНС при его работе в стандартном режиме вносит медленно меняющаяся составляющая. Ошибки в выборе используемой в алгоритме модели погрешности корректора могут привести к дополнительной погрешности вычисления координат объекта.

2. Результаты ковариационного анализа представлены в работе в виде графиков изменения СО ошибок оценок погрешностей. В тексте диссертации и приведенном списке обозначений расшифровка аббревиатуры СО отсутствует.

Указанные недостатки не уменьшают значимость исследований, проведенных в диссертационной работе. Диссертационная работа является законченным научным исследованием, содержит алгоритмы работы навигационной системы автономного подводного аппарата и обоснование целесообразности и эффективности ее построения на базе бескарданной инерциальной навигационной системы.

Работа полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Филатова Гузель Амировна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

Официальный оппонент – заместитель начальника НИО-9  
Государственного научного центра Российской Федерации  
АО «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова»,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник

*И.А. Копылов*  
*23.05.2017г.*

Копылов Игорь Анатольевич

Контактные данные – телефон: (495) 556-55-20, e-mail: [nio9@lii.ru](mailto:nio9@lii.ru)

Подпись И.А. Копылова удостоверяю.

Первый заместитель Генерального директора по науке – начальник НИЦ  
АО «ЛИИ им. М.М. Громова», кандидат технических наук



*В.В. Цыплаков*  
*23.05.17*

В.В. Цыплаков