

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПМ им.Келдыша РАН,
академик РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Б.Н.Четверушкин

«_08_»__ сентября__ 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН
на диссертационную работу Юхимца Дмитрия Александровича

"Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления
скоростным движением подводных аппаратов", представленную на соискание

ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 –
системный анализ, управление и обработка информации

Актуальность темы диссертационной работы

В процессе выполнения подводных операций с помощью подводных аппаратов (ПА) часто требуется обеспечивать отслеживание пространственных траекторий с высокими скоростями в условиях неопределенности внешних воздействий и взаимовлияния управляемых степеней свободы. Точность движения определяется не только качеством используемых систем управления (СУ), но и информационно-измерительным обеспечением процесса формирования программных траекторий и режимов движения ПА. При движении по криволинейным участкам траекторий с высокой скоростью возможен вход отдельных движителей ПА в насыщение и, как следствие, сход с задаваемых траекторий. Диссертация посвящена актуальной проблеме разработки таких методов синтеза СУ, которые не только формируют управление движителями ПА, но и одновременно трансформируют программные сигналы, поступающие на входы этих СУ. Это позволяет обеспечивать движение ПА по произвольным пространственным траекториям на предельно возможных скоростях при сохранении заданной динамической точности этого движения.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 253 источника. Содержание работы отражено на 315 страницах текста, включающего 96 рисунков.

Во введении даётся обоснование актуальности работы, формулируются её цель и задачи, приводится краткая характеристика работы.

В первой главе выполняется анализ современного состояния исследований по теме диссертации. Отмечается, что несмотря на большое количество уже разработанных методов синтеза СУ ПА, пока в них не удалось формировать такие управляющие воздействия, которые, учитывая произвольные формы траекторий движения ПА, гарантировали бы управление без входа движителей в насыщение. При этом используемые СУ должны обладать относительной простотой, позволяющей решать задачи управления в реальном масштабе времени с использованием типовых бортовых микропрцессоров. В конце главы формулируется цель диссертации, и определяются задачи исследования.

Во второй главе разрабатывается и исследуется метод синтеза децентрализованной СУ, состоящей из шести подсистем управления отдельными степенями свободы ПА, каждая из которых содержит по три вложенных контура управления: контур управления движителями, скоростью движения, а также положением и ориентацией ПА. В главе последовательно

разрабатываются методы синтеза СУ для каждого из этих вложенных контуров. При этом основной целью синтеза является обеспечение компенсации негативного влияния непредсказуемых внешних воздействий и перекрестных связей между степенями свободы на точность реализации движения. Заметим, что степени свободы по определению независимы это стандартный термин теоретической механики. Видимо, речь идет о степенях подвижности (см. ГОСТы).

В третьей главе разработан метод синтеза СУ ПА с механическим устройством формирования ориентации и величины тяги единственного поворотного движителя, с одновременной компенсацией негативного опрокидывающего момента, действующего на ПА со стороны винта при его вращении с разными скоростями в воде. Получено аналитическое решение обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя, а также разработан алгоритм генерации программных сигналов управления и траекторий движения для такого типа ПА.

В четвертой главе диссертации предложены методы синтеза систем программного управления различных по конструкции ПА. Эти системы обеспечивают предельно высокую скорость перемещения ПА по гладким пространственным траекториям с сохранением заданной динамической точности. Разработаны два типа систем формирования программных сигналов, которые могут работать одновременно или раздельно. Первая система предназначена для автоматического вычисления целевой точки движения ПА, скользящей по виртуальной траектории, не совпадающей с отслеживаемой траекторией движения ПА. Вторая система, предназначенная для сохранения точности движения ПА по отслеживаемым траекториям, автоматически ограничивает текущую программную скорость этого движения для предотвращения входа в насыщение некоторых движителей. Приведены результаты математического моделирования и достаточно подробных экспериментальных исследований на двух подводных аппаратах (раздел 4.5), которые подтверждают высокую эффективность предложенных методов и разработанных на их основе СУ.

В пятой главе разработан алгоритм комплексной обработки данных, поступающих от бортовых датчиков ПА, который практически независимо от частоты обновления сигналов с этих датчиков, строит сигналы обратных связей с частотой работы СУ ПА. В главе разработан также метод идентификации неизвестных параметров модели движения ПА (в том числе присоединенных масс, моментов инерции и гидродинамических коэффициентов вязкого трения). Метод обладает небольшой вычислительной сложностью при наблюдении поведения аппарата на достаточно малом интервале времени, за счет того, что появляется возможность применения простого линейного фильтра.

В шестой главе разработан подход к созданию эффективного моделирующего комплекса для полунатурного моделирования синтезированных СУ на основе предложенных методов. Особенностью этого подхода является использование среды моделирования Matlab для создания модели ПА. Для исследования разрабатываемых СУ эти реальные микропроцессорные устройства подключались к компьютеру с математической моделью ПА, которая исполняла сигналы управления вместо реального аппарата.

Основным результатом следует назвать построение и реализацию алгоритма синхронизации всех вычислительных процессов, протекающих в макетируемой СУ ПА и в среде Matlab с виртуальной моделью ПА. Это достаточно простое, но эффективное решение базируется на корректном опросе и сопоставлении показаний таймеров. Применяемый в этом разделе термин «автоматическая синхронизация» следует считать тавтологией и было бы лучше заменить просто словом «алгоритм синхронизации».

В заключении даны выводы по диссертационной работе.

Новизна исследований и полученных научных результатов

Можно отметить следующие научные результаты диссертации, которые представляются новыми.

1. Технология построения систем контурного управления ПА, в которых алгоритм автоматического изменения параметров управляющих сигналов обеспечивает перемещение

ПА по пространственным программным траекториям с предельно высокой скоростью при сохранении динамической точности отслеживания траекторий независимо от типов используемых СУ и ограничений мощности движителей. Эта технология позволяет синтезировать децентрализованные робастные системы управления, обеспечивающие заданное качество управления в условиях неопределенности, внешних возмущений и при наличии взаимовлияний между всеми степенями свободы ПА. В качестве информационного обеспечения такого управления автоматического подводного аппарата предложен алгоритм комплексирования показаний датчиков.

2. Метод синтеза СУ для ПА с одним поворотным маршевым движителем, позволяющей одновременно с управлением перемещением ПА по траектории обеспечивать компенсацию негативного момента противовращения, действующего на ПА со стороны его винтового движителя.

3. Реализация моделирующего комплекса для полунатурного моделирования работы синтезированных на основе предложенных методов СУ ПА. Разработанный подход основывается на созданном алгоритме автоматической синхронизации вычислительных процессов, который позволяет моделировать различные внешние среды и устройства ПА, отрабатывать работу синтезированных СУ, включая возможность их частичного макетирования, совмещающегося с работой компьютерной математической модели.

Новизна положений, изложенных в диссертационной работе, подтверждается также патентами, полученными при участии соискателя.

Значимость результатов и рекомендации по их использованию

Практическое значение результатов, полученных в диссертации, определяется тем, что на основе предложенных методов упрощается реализация систем управления, обеспечивающих предельно высокую скорость движения ПА при сохранении заданной динамической точности отслеживания сложных траекторий с учетом ограничений мощности движителей. Этот подход нашел применение при создании экспериментального автономного ПА «МАРК», разработанного в Дальневосточном федеральном университете, что, видимо, подтверждается соответствующими актами.

Полученные результаты целесообразно использовать в организациях, выполняющих исследования робототехнических систем, в частности, в МГТУ им. Баумана, ИПМТ ДВО РАН, ИПУ им. Трапезникова РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Санкт-Петербургском государственном техническом университете, а также в конструкторских и научно-исследовательских подразделениях различных ведомств и предприятий, занимающихся разработкой и производством подводной робототехники различного назначения.

Общая оценка диссертационной работы

Рецензируемая диссертационная работа представляет собой завершенное научное исследование на актуальную тему и решение крупной научной проблемы создания высокоэффективных управляющих систем для нового поколения скоростных подводных аппаратов. Все методы проверялись с использованием компьютерного моделирования, а в главе 4 приведены результаты натурных испытаний двух НПА (сигарообразного и катамаранного типов), что позволяет говорить о достоверности полученных результатов, выполненные макетные эксперименты и математическое моделирование убедительно подтверждают эффективность разработанной технологии для создания алгоритмов СУ ПА.

В качестве недостатков диссертации можно отметить следующее.

1. В диссертации разрабатываются две группы методов синтеза СУ, основанные на использовании робастного и линейного управления движением ПА. Однако недостаточно подробно пояснено, почему нельзя ограничиться разработкой и использованием только высококачественных робастных СУ и каковы границы применимости используемых в работе математических моделей движения ПА (раздел 2.1).

2. Не раскрыт термин «придать желаемые динамические свойства объекту управления»,

используемый при разработке метода синтеза децентрализованной СУ ПА (стр.15,51,61 и т.д.). Поскольку объект управления является неизменяемой частью системы, то не понятно, как можно изменить его динамические свойства без учета возможного выхода на динамические ограничения управляющих сигналов.

3. В работе предложен метод управления движителями ПА, основанный на использовании нейронных сетей, настраиваемых в реальном масштабе времени. Однако, не приведен анализ вычислительной сложности алгоритмов адаптации этих сетей, а также не показано в каких случаях использование нейронных сетей для управления движителями имеет преимущество по сравнению с другими СУ. Поэтому выводы, изложенные на стр.148, п.2 по поводу фактической идентификации параметров ПА на очень коротком интервале времени и построения управления только на этих данных, следовало бы обосновать более тщательно.

4. Для подтверждения высокой эффективности разработанных методов управления желательно привести более подробные результаты натурных экспериментов и моделирования движения ПА по траекториям с различной кривизной (п.6.3.2).

5. В работе недостаточно подробно описан предложенный метод идентификации параметров ПА. В частности, не пояснено, как на основе системы шести алгебраических уравнений первого порядка идентифицируются 33 параметра ПА.

6. На стр.9 в автореферате написано: «Рис. 1. Обобщенная структурная схема подходов и задач положенных в основу диссертации» (нет запятой) и приводится ссылка на этот рисунок: «Обобщенная структурная схема подходов и задач, которые могут быть положены в основу диссертации, представлена на рис.1.». К сожалению, такие хаотичные связи, опечатки, неясности (подходы, задачи или методы - 8 из 8 названий блоков на этом рисунке начинаются со слова метод) или нестыковки часто встречаются не только в автореферате (стр.9), но и в диссертации, например, на стр.36 диссертации перечислены только «методы»: «.....решаются задачи, структура которых, показана на рис. 1.3.». Возникает и другой вопрос: эти методы могут быть положены или уже положены в основу диссертации?

Аналогичные неточности можно найти и в других разделах, например, на рис. 2. в автореферате из структурной схемы СУ НПА неясно по каким измерениям строится обратная связь в контуре управления движителями.

7. В разделе 5.1.3 диссертации (стр.250-256) рассматривается тестирование работы алгоритма комплексирования методом математического моделирования в предположении, что в показаниях датчиков присутствуют помехи типа «белый шум». Периоды обновления данных, получаемых от указанных датчиков, могут различаться в десятки раз, а некоторые из них могут в разы превышать период выработки сигналов управления НПА, что существенно снижает точность его управления, особенно при движении на высоких скоростях. Поэтому одной из главных задач системы комплексирования данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков НПА, названа необходимость формирования данных для выработки сигналов управления с периодом, равным периоду дискретизации его СУ.

Из этого раздела неясно как будет вести себя алгоритм при достаточно длительном пропадании сигналов или при других предположениях о статистических свойствах шума. Следует также отметить, что эти проблемы рассматриваются достаточно давно, например, в докторской диссертации И.Белоусова около 15 лет назад решались проблемы управления роботов с запаздыванием через интернет, комплексирование показаний датчиков, в том числе для управления манипуляторами в космосе. Вопросы комплексирования - традиционны для робототехники и систем сбора данных, например, на НИС «Академик М.Келдыш» с начала 80х годов работает судовая система реального времени сбора навигационных и других данных из 8 лабораторий и всех постов судна. Для справки приведем соответствующие (только наши) публикации на эту тему, не отраженные в списке литературы:

Пряничников В.Е. Навигационные алгоритмы для ПА и их реализация на ВЦ НИС «Академик М.Келдыш» / Пряничников В.Е. // Техн. средства и методы изучения океанов и морей: труды конфер.-М.: ИО АН СССР. – 1985. – С.107–108.

Пряничников В.Е. Совмещение фильтрации ультразвуковых данных и программного

управления линейным приводом. // Приборы+автоматизация, 2008, №12, 8с., с.22-29.

Пряничников В.Е. Алгоритмическое обеспечение дистанционных сенсоров мобильных роботов. – «Мехатроника, автоматизация, управление» № 10, 2008. с.10-21

Кирсанов К.Б., Левинский Б.М., Пряничников В.Е., Интеграционное программное обеспечение интеллектуальных роботов. – Информационно-измерительные и управляющие системы, М.: Радиотехника, №6, т.7, 2009, с.35-43

Кирсанов К.Б., Левинский Б.М., Пряничников В.Е. Организация обработки и хранения шлейфов поступающих от сенсоров данных в многопоточных программных системах. - Труды Международной конференции "Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы", СПб: Политехника-сервис, 2009 - 206 с., с.145-146

8. На стр.184 и в списке литературы присутствует термин «предективное формирование», который вызывает сомнения и, видимо, может быть заменен на более адекватный (см. ссылку 90). Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Предективное формирование траектории подводного аппарата с одним поворотным движителем // Сб. трудов 5-ой научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление». С.-Петербург. – 2008. – С.306-309.).

Следует отметить, что отмеченные недостатки не оспаривают значимость полученных в диссертации практических и научных результатов. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации. Выводы и рекомендации, полученные в диссертации, вполне можно считать обоснованными. Доклад Д.А.Юхимца и отзыв на его диссертацию обсуждались на объединенном семинаре по робототехническим системам в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН 20.11.2014 г. и 08.09.2015 г.

Заключение

Диссертационная работа "Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления скоростным движением подводных аппаратов" является законченной научной работой, которая отвечает требованиям положения "О присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, ее содержание соответствует специальности 05.13.01 - системный анализ, управление и обработка информации, а автор диссертации, Юхимец Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по данной специальности.

д.ф.-м.н., профессор,
зав.отделом ИПМ им. Келдыша РАН
тел.: +74992505615, e-mail: golubev@keldysh.ru

Ю.Ф. Голубев

д.ф.-м.н., профессор,
г.н.с. ИПМ им. Келдыша РАН
тел.: +74992505615, e-mail: platonov@keldysh.ru

А.К. Платонов

д.т.н., профессор,
в.н.с. ИПМ им. Келдыша РАН
тел.: +79037697288, e-mail: v.e.pr@yandex.ru

В.Е. Пряничников