

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Юхимца Дмитрия Александровича «Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления скоростным движением подводных аппаратов» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации

Актуальность темы исследования

В настоящее время Развитие подводной робототехники идет бурными темпами, что обусловлено увеличением объемов добычи полезных ископаемых на дне Мирового океана, а также большим количеством протяженных подводных коммуникаций, проложенных на большой глубине. Кроме того, в последнее время в мире наблюдается тенденция к созданию полностью автономных подводных комплексов по добыче полезных ископаемых, в том числе и минерального сырья. Очевидно, что эффективное решение этих задач без существенного увеличения роли подводной робототехники не представляется возможным.

При этом в процессе выполнения различных подводных работ необитаемые подводные аппараты (НПА) различной конструкции должны совершать точные перемещения по пространственным траекториям часто рядом с объектами работ. Для этого НПА должны иметь высококачественные системы управления (СУ), позволяющие обеспечить требуемую точность движения этих НПА при изменении их параметров, а также действия внешних возмущений и наличии перекрестных связей между их каналами управления. Кроме того, большую часть затрат при выполнении подводных работ составляют затраты на оплату работы судов обеспечения и вспомогательного оборудования. Поэтому уменьшение времени выполнения подводных работ является актуальной задачей. Решение этой задачи связано с повышением скорости перемещения НПА, что в свою очередь должно учитываться при синтезе их СУ, так как в этом случае происходит увеличение негативных эффектов взаимодействия НПА с окружающей жидкостью.

Поэтому задача, решаемая в диссертации и заключающаяся в разработке новых методов синтеза высокоточных СУ НПА, позволяющих этим НПА двигаться по пространственным траекториям с желаемой точностью и высокими скоростями, является актуальной.

Краткое содержание диссертационной работы

Текст диссертации состоит из введения, шести глав и заключения, а список литературы содержит 253 источника.

Во введении обосновывается актуальность решаемой задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту и дается краткое описание диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы проанализированы НПА как объекты управления и выделены особенности, затрудняющие синтез высококачественных СУ, а также проведен анализ видов математических моделей НПА, используемых для синтеза и исследования их СУ. Показано, что НПА являются нелинейными динамическими объектами, имеющими неопределенные и переменные параметры, а также перекрестные связи между отдельными степенями свободы. Поэтому для синтеза высокоточных СУ необходимо использовать математические модели НПА, которые наиболее полно учитывают указанные особенности. Также проанализированы существующие подходы к синтезу СУ НПА и на основе результатов анализа был сделан вывод о том, что указанные методы либо приводят к созданию сложно реализуемых СУ, либо могут быть использованы только в отдельных режимах движения НПА, когда негативные особенности их взаимодействия с окружающей средой минимальны. При этом обосновывается необходимость решения в процессе синтеза СУ НПА дополнительной задачи, заключающейся в учете влияния режима движения НПА по криволинейным траекториям на точность работы их СУ. На основе результатов анализа в главе формулируются цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации разработан метод синтеза децентрализованных СУ для НПА, способных перемещаться по шести степеням свободы. При этом в процессе синтеза указанных СУ в уравнениях динамики, описывающих движение НПА по отдельным степеням свободы, перекрестные связи между ними представляются в качестве внешних неизвестных возмущений, описываемых интервальными неравенствами. Указанные децентрализованные СУ состоят из шести подсистем управления каждой степенью свободы НПА. При этом каждая подсистема управления представляется в виде системы подчиненного регулирования, содержащей три вложенных контура управления: контур управления движителями НПА, контур управления скоростью и контур управления положением (ориентацией). Для каждого из этих контуров в главе последовательно разрабатываются методы синтеза СУ. Основная цель синтеза СУ движителями и скоростью НПА состоит в том, чтобы описать нелинейный динамический объект управления с неопределенными и переменными параметрами с помощью линейных дифференциальных уравнений с известными параметрами. В этом случае существенно упрощается синтез СУ положением НПА, которая позволяет гарантировано обеспечить этим НПА

желаемые динамические свойства при их движении по пространственным траекториям. Особенностью предложенных децентрализованных СУ НПА является использование адаптивных СУ управления скоростью НПА на основе систем с переменной структурой, которые позволяют увеличить быстродействие указанных СУ НПА в благоприятных режимах работы. При этом для обеспечения работоспособности этой адаптивной СУ скоростью движения НПА был предложен и обоснован метод преобразования непрерывных программных сигналов скорости движения в последовательность ступенчатых сигналов. В главе приводятся результаты математического моделирования, которые показывают эффективность предложенных методов.

В третьей главе разработан метод синтеза СУ для НПА, движительный комплекс которого состоит из одного поворотного движителя, способного формировать силу тяги с заданной ориентацией. При этом для компенсации опрокидывающего момента, который действует на НПА со стороны вращающегося винта, используется вращение насадки винта, закрепленной на устройстве ориентации движителя. В главе разрабатывается структура СУ, обеспечивающей одновременное управление пространственным движением НПА и компенсацию опрокидывающего момента. Также в главе разрабатываются методы формирования программных сигналов, обеспечивающих движение НПА в различных режимах и учитывающие особенности формирования вектора силы тяги поворотным движителем НПА.

В четвертой главе разработаны методы автоматического формирования таких программных сигналов, задающих движение НПА по желаемой пространственной траектории, которые будут отработаны СУ НПА с заданной точностью на предельно высокой скорости. В диссертации разработано два взаимодополняющих метода формирования программных сигналов движения НПА: метод автоматического формирования программной скорости движения НПА и метод коррекции положения целевой точки, движущейся по программной траектории. Первый подход позволяет обеспечить предельно высокую скорость движения НПА по криволинейным траекториям, автоматически снижая величину программной скорости при движении по участкам траектории с большой кривизной и повышая ее на участках скорости с малой кривизной. Это позволяет учесть возможный вход отдельных движителей НПА в насыщения, а также возрастание величин негативных эффектов взаимодействия НПА с окружающей средой при увеличении скорости их движения. Второй подход основан на изменении положения целевой точки, движущейся по заданной траектории, и формировании таких новых виртуальных траекторий,

отрабатывая которые с помощью бортовой СУ с большой динамической ошибкой, НПА двигались бы по исходной траектории с заданной точностью. Указанный подход позволяет увеличить точность работы существующих СУ, основанных на линейных регуляторах. При этом указанные подходы могут применяться совместно, обеспечивая НПА предельно высокую скорость движения по заданной траектории с заданной точностью, даже при использовании простых СУ. В главе показаны результаты математического моделирования и экспериментальных исследований на НПА двух видов, которые подтверждают эффективность разработанных методов.

В пятой главе диссертации разработан метод формирования сигналов обратных связей, необходимых для реализации СУ НПА. Указанные метод основан на использовании сигма-точечного фильтра Калмана и позволяет учесть разную частоту поступления данных от различных датчиков, а также отсутствие отдельных датчиков. В результате использования предложенного подхода удается формировать сигналы обратной связи с частотой, необходимой для качественной работы СУ НПА, независимо от частоты обновления отдельных датчиков. Также в главе разработан метод идентификации параметров НПА, который обладает относительно небольшой вычислительной сложностью, что позволяет использовать его в процессе работы НПА.

В шестой главе разработан подход к построению моделирующего комплекса для полунатурного моделирования программных реализаций СУ НПА. Предлагается модульная структура указанного моделирующего комплекса, которая позволяет использовать для реализации математических моделей НПА универсальную среду моделирования Matlab. Также в главе разработан алгоритм автоматической синхронизации вычислительных процессов программной реализации СУ НПА и среды Matlab.

В заключении даны общие выводы по работе.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Результаты, полученные в работе, подтверждены с помощью математического моделирования, при этом их достоверность обеспечивается корректностью использованных математических моделей динамики НПА. Кроме того, основные положения диссертации подтверждены с помощью экспериментальных исследований на реальных образцах НПА.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Можно отметить следующие новые результаты, полученные в диссертации.

1. Разработаны методы управления нелинейными динамическими объектами с переменными параметрами на основе использования адаптивных нейронных сетей, которые за счет использования непрерывно обновляемых обучающих выборок небольшого размера позволяют обеспечивать высокое качество управления этими объектами без точного знания их математической модели.

2. Разработан метод синтеза системы управления скоростью движения НПА на основе адаптивных систем с переменной структурой, которые за счет представления программных сигналов скорости в виде последовательности ступенчатых задающих сигналов позволяют гарантировать работу алгоритма настройки параметров этой системы. Были получены условия, позволяющие выбрать такой шаг изменения этих сигналов, который имеет минимально допустимую величину, обеспечивающую работоспособность указанного алгоритма.

3. Разработан подход к управлению НПА с одним поворотным движителем, который за счет специального формирования программных сигналов движения этих НПА, учитывающих особенности формирования вектора тяги указанным поворотным движителем, позволяет обеспечить ему высокую точность управления в различных режимах движения.

4. Разработан новый метод синтеза СУ НПА, в котором точность движения НПА по заданным программным траекториям обеспечивается не за счет использования высокоточных СУ, а за счет специальной коррекции программных сигналов движения. Отработка данных сигналов с помощью даже простых СУ гарантирует движение НПА по указанным траекториям с высокой скоростью и заданной точностью в условиях наличия ограничений на движители НПА, а также в условиях существенных взаимовлияний между их степенями свободы.

5. Разработан метод идентификации параметров НПА, который за счет разбиения математической модели на две части и представления уравнений динамики в виде выражений, линейных относительно параметров НПА, имеет вычислительную сложность в шесть раз меньше, чем традиционные методы идентификации, что позволяет использовать на бортовом компьютере НПА.

6. Разработан подход к реализации моделирующего комплекса, позволяющего обеспечивать предварительную проверку качества программных реализаций СУ НПА, в котором для реализации математических моделей НПА можно использовать универсальные среды моделирования. При этом совместная работа указанного комплекса и среды моделирования реализуется за счет разработанного алгоритма

автоматической синхронизации вычислительных процессов двух отдельных приложений.

Практическая значимость и апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, позволяют создавать СУ, которые обеспечат движение НПА с повышенной скоростью, что приведет к уменьшению времени выполнения различных подводных операций без снижения их качества. В результате снизится стоимость выполнения подводных работ. Кроме того, использование высокоточных СУ НПА, имеющих простую реализацию и обеспечивающих быстрое движение этих НПА по пространственным траекториям позволит реализовывать новые функции НПА.

СУ контурного управления на основе коррекции программных сигналов движения реализованы и использованы в составе нескольких НПА, где продемонстрировали свою эффективность. Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в процессе проектирования новой подводной робототехники в соответствующих научно-исследовательских (ЦНИИ РТК, ИПМТ ДВО РАН, в МГТУ им. Баумана, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ИПУ им. Трапезникова РАН и др.) и производственных организациях.

Замечания по диссертационной работе

Можно отметить следующие недостатки диссертации.

1. При разработке СУ движителями ставится задача придания им желаемых динамических свойств, позволяющих описать их линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Однако не показано как это условие будет выполняться в случае использования СУ на основе адаптивных нейронных сетей.

2. Одни и те же движители используются для формирования сил тяги и моментов по разным степеням свободы. При этом при синтезе СУ скорость НПА не учитывается возможное насыщение отдельных движителей и изменение общего коэффициента усиления, когда происходит движение по нескольким степеням свободы одновременно.

3. Для управления НПА с одним поворотным движителем разрабатывается СУ, основанная на линейных регуляторах. При этом не пояснено, почему в этом случае не используется разработанная ранее децентрализованная СУ.

4. При разработке метода синтеза системы формирования программной скорости движения НПА предполагается, что для управления НПА используется СУ, позволяющая описать движение НПА с помощью

линейного уравнения с постоянными коэффициентами. Однако не показано, как будет происходить синтез этой системы в случае, когда для управления НПА используется СУ, основанная на линейных регуляторах.

5. В тексте диссертации присутствуют опечатки в обозначениях переменных, в частности, в выражении (4.22).

Общая оценка работы

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, решающей актуальную народно-хозяйственную задачу. Результаты, полученные в диссертации являются обоснованными. Диссертационная работа «Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления скоростным движением подводных аппаратов» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, ее содержание - специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации», а автор данной диссертации - Юхимец Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по указанной специальности.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы приводов, мехатроника и робототехника» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Стажков Сергей Михайлович

20 июля 2015г.

Адрес: 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1;

e-mail: stazhkov@mail.ru

тел.: +7 (812) 317 8227.

Подпись д.т.н. Стажкова С.М. удостоверяю

Секретарь Ученого совета

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова



М.Н. Охочинский

20 июля 2015г.