

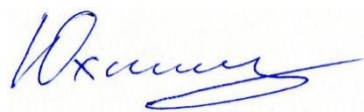
ЮХИМЕЦ Дмитрий Александрович

**МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ И
ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Yuximets', is centered on the page.

Владивосток – 2015

Работа выполнена в лаборатории робототехнических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Научный консультант: Филаретов Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный изобретатель РФ, заведующий лабораторией робототехнических систем ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток

Официальные оппоненты: Еремин Евгений Леонидович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и управляющих систем, ФГБОУ ВПО Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Стажков Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, автоматики и управления, ФГБОУ ВПО Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Ющенко Аркадий Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Робототехнические Системы» РК-10, ФГБОУ ВПО Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г. Москва

Ведущая организация: ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «30» октября 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 при Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г.Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН и на сайте <http://iacp.dvo.ru/russian/institute/dissertation/represent.html>.

Автореферат разослан « » июня 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 005.007.01, кт.н.



Н.Н. Петрунько

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В процессе освоения Мирового океана большую роль играют необитаемые подводные аппараты (НПА), которые позволяют исключить присутствие человека в опасных и экстремальных условиях при выполнении подводных работ. При этом по мере расширения области применения НПА происходит усложнение технологических операций, эффективное выполнение которых в большой степени определяется наличием качественной системы управления (СУ). Создание таких систем является одним из основных направлений развития современной подводной робототехники, большой вклад в теорию и практику которой внесли отечественные и зарубежные ученые М.Д. Агеев, Е.Н. Пантов, В.С. Ястребов, Т.И. Fossen, Т.Т. Tarn, D.R. Yorgel и др.

НПА является сложным, нелинейным и многомерным динамическим объектом управления с переменными и неопределенными параметрами, в котором присутствуют существенные взаимовлияния между всеми степенями свободы. Поэтому синтез высокоточных СУ НПА представляет собой сложную проблему. При этом ее решение во многом определяется задачами, выполняемыми конкретными НПА, которые условно можно разделить на два типа. К первому типу можно отнести задачи, требующие высокой маневренности и точности перемещений вблизи объектов наблюдений и работ, которые обычно выполняются НПА, имеющими скорость движения до 1 м/с, но сложную форму и большое количество движителей. Эти НПА испытывают повышенные силовые и моментные воздействия со стороны окружающей вязкой средой ввиду их больших габаритов и сложной формы. Ко второму типу можно отнести задачи, требующие быстрого (более 1 м/с) и точного движения НПА по сложным криволинейным, но достаточно гладким протяженным пространственным траекториям, которые могут решаться с помощью НПА, имеющих обтекаемую форму и движительный комплекс, обеспечивающий их перемещение по ограниченному количеству степеней свободы.

Для качественного решения задач первого типа ввиду сложности конструкций и специфических динамических свойств НПА, как правило, требуется использовать высокоточные робастные и адаптивные СУ, имеющие большую сложность реализации, а задачи второго типа могут быть решены с помощью более простых, но не менее эффективных СУ.

Следует отметить, что точность движения НПА по любым пространственным траекториям зависит не только от типа их СУ, но и от программных сигналов, поступающих на их входы и задающих параметры движения НПА по этим траекториям. Указанные параметры в итоге определяют эффекты взаимовлияний между всеми степенями свободы НПА и существенно влияют на динамическую точность их управления.

Мировой опыт разработки и эксплуатации НПА различного вида и назначения показывает, что создаваемые в настоящее время СУ для этих сложных объектов управления с переменными и часто неизвестными параметрами далеки от совершенства. Для повышения точности управления НПА (особенно скоростными) при выполнении сложных операций требуется разработка новых подходов и методов синтеза их СУ, обладающих новыми возможностями и повышенными показателями качества работы.

Цель работы. Создание и теоретическое обоснование новых подходов и методов синтеза СУ НПА, которые за счет автоматической настройки параметров регуляторов и программных сигналов обеспечивают высокоточное движение НПА различного вида и назначения по сложным пространственным траекториям с высокой скоростью в условиях существенной неопределенности и переменности их параметров и параметров взаимодействия с окружающей вязкой средой при наличии значительных взаимовлияний между всеми степенями свободы НПА и ограничений мощности их усилительных и исполнительных устройств.

Задачи исследования. Достижение указанной цели предусматривает решение следующих теоретических и практических задач.

Разработка подходов и методов синтеза СУ, обеспечивающих высокоточное управление движением НПА в условиях существенной переменности и неопределенности их параметров при наличии значительных взаимовлияний между их степенями свободы и каналами управления.

Разработка метода синтеза СУ скоростным движением НПА с одним поворотным движителем, учитывающего особенности кинематики движительного комплекса и обеспечивающего точное перемещение НПА по гладким пространственным траекториям.

Разработка методов синтеза СУ режимами движения НПА по гладким пространственным траекториям, обеспечивающих предельно быстрое перемещение этих аппаратов при одновременном сохранении заданной динамической точности управления.

Разработка методов формирования программных сигналов на основе нового принципа управления, обеспечивающего высокоточное контурное управления движением НПА с помощью простейших регуляторов с учетом ограничений мощности используемых движителей.

Разработка методов комплексной обработки информации, поступающей с различной (часто низкой) частотой от минимального набора навигационно-пилотажных датчиков НПА, для сохранения качественной работы используемых СУ.

Разработка методов построения программного комплекса для моделирования движения НПА, позволяющего проводить полунатурное моделирование отдельных алгоритмов и СУ НПА в целом без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории линейных и нелинейных систем автоматического управления, теории систем с переменной структурой, теории нейронных сетей, оптимальной фильтрации, идентификации параметров нелинейных систем, методы математического моделирования динамических систем, а также методы планирования экспериментов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в создании новых подходов и методов синтеза СУ пространственным движением НПА, а также методов формирования их программных сигналов, которые за счет их согласованной работы обеспечивают высокоточное движение этих НПА по заданным гладким траекториям в условиях неопределенности и переменности параметров НПА, наличия существенных взаимовлияний между всеми каналами управления и ограничений на сигналы управления их движителями.

В частности, основными научными достижениями являются.

1. Разработанная структура и последовательность синтеза СУ для высокоскоростного и высокоточного движения НПА по сложным пространственным траекториям. Эта структура обеспечивает совместную качественную работу СУ НПА и системы формирования их программных сигналов, реализуя максимально возможную скорость движения НПА при сохранении заданной динамической точности этого движения.

2. Методы синтеза СУ движителями НПА на основе использования самонастраивающихся систем с эталонными моделями и прогнозирующих нейронечетких сетей, позволяющие обеспечить этим движителям заданные динамические свойства, гарантирующие увеличение точности работы СУ НПА в целом.

4. Метод синтеза адаптивной децентрализованной СУ скоростью движения НПА, которая позволяет увеличить точность и быстродействие всей СУ НПА за счет автоматической настройки ее параметров на основе информации о характеристиках сигналов управления и без непосредственного измерения или идентификации параметров этих НПА.

5. Метод синтеза СУ для НПА с одним поворотным маршевым движителем, позволяющей одновременно управлять движением этого НПА по пространственной траектории и обеспечивать компенсацию момента противовращения, действующего на НПА со стороны движителя, а также методы формирования траекторий движения этого НПА, позволяющие ему подойти к заданной точке пространства с заданной ориентацией в условиях ограничений маневренности.

6. Методы управления движением НПА по пространственным траекториям, построенные на основе нового принципа управления, позволяющего автоматически формировать такие программные сигналы, которые позволяют обеспечить заданную точность движения НПА по указанным траекториям с максимально возможной

скоростью независимо от типа используемой СУ, автоматически учитывая ограничения мощности двигателей НПА.

7. Метод комплексной обработки сигналов, поступающих от бортовых навигационно-пилотажных датчиков НПА, построенный на базе сигма-точечного фильтра Калмана и позволяющий формировать все необходимые сигналы обратных связей с частотой работы СУ НПА независимо от частоты обновления данных на выходах некоторых бортовых датчиков.

8. Структура моделирующего комплекса для полунатурного моделирования движений произвольных НПА, оснащаемых различными СУ, в условиях эксплуатации, приближенных к реальным. Этот комплекс позволяет использовать ранее созданные среды моделирования сторонних производителей.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечивается корректным применением использованных в работе методов исследования и подтверждается полученными в диссертации результатами численного моделирования и экспериментальных исследований. Результаты исследований, полученные в диссертации, соответствуют основным общепризнанным положениям теории автоматического управления.

Практическая значимость и реализация результатов работы заключается в увеличении производительности выполнения подводных операций за счет использования разработанных подходов и методов синтеза СУ, позволяющих увеличить скорость движения НПА по сложным пространственным траекториям при сохранении заданной динамической точности управления с использованием (по возможности) простых для реализации, но высококачественных СУ, а также в уменьшении времени разработки и тестирования СУ НПА за счет использования разработанных моделирующих комплексов для исследования работы СУ НПА в режимах эксплуатации, приближенных к реальным.

С использованием разработанных методов можно создать более эффективные образцы подводной робототехники нового поколения с расширенными функциональными возможностями и областями применения.

Результаты диссертации использованы в Дальневосточном федеральном университете при создании действующих образцов НПА и в учебном процессе кафедры «Автоматизация и управление» (направления подготовки магистров 220400.68 – Управление в технических системах, 221000.68 – Мехатроника и робототехника). Указанные результаты использовались при выполнении научных исследований в ИАПУ ДВО РАН в рамках госбюджетных тем 0/20.050/943 «Проблемы анализа и синтеза сложных управляемых систем» (2005-2007 гг.), «Проблемы анализа и синтеза сложных управляемых систем и управление в неопределенных средах» (2008-2010 гг.), грантов РФФИ (05-08-33627-а, 10-07-00395-а, 11-07-98502-р_восток_а) и по госконтрактам №07.514.11.4085 от 17.10.2011 (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-

технологического комплекса России на 2007-2013 годы») и №02.740.11.0166 от 25.06.2009 (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных и российских научных конференциях: 8th IFAC Symp. on Computer Aided Control System Design (2000, Selford, UK), DAAAM Symp. on Intelligent Automation and Manufacturing (2001, Jena, Germany; 2007, Zadar, Croatia; 2008, Trnava, Slovakia; 2009, Vienna, Austria), 7-th Int. Biennial ASME Conf. on Engineering Systems Design and Analysis (2004, Manchester, UK), 14 IFAC Congress (2005, Praha, Czech Republic), 6-th Asian Control Conf. (2006, Bali, Indonesia), IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (2007, Harbin, China), IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (2008, Xian, China), 8th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp. (2008, Bangkok, Thailand), Int. Conf. on Control, Automation and Systems ICCAS (2010, Seoul KINTEX, Korea), First Russia and Pacific conf. on Computer Technology and Applications (2010, Vladivostok, Russia), 8th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (2011, Noordwijkerhout, Netherlands), 7th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System (2013, Berlin, Germany), 5-я международная научно-практическая конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока» (2003, Владивосток), международная школа-семинар «Адаптивные роботы» (2004, С.-Петербург), IV Всероссийская конф. «Математика, информатика, управление» (2005, Иркутск), 2-я международная конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» (2007, Владивосток), 7-я научно-техническая конф. «Кибернетика и высокие технологии XXI» (2007, Воронеж), научно-техническая конф. «Мехатроника автоматизация, управление» (2007, п. Дивноморское, 2008, 2010, С.-Петербург), 2-я Всероссийская конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (2009, Москва), научно-техническая конф. «Экстремальная робототехника» (2009, п. Дивноморское, 2011, С.-Петербург), Всероссийская научная конф. «Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления» (2011, Владивосток), Всероссийская мультikonф. по проблемам управления (2011, 2013, п. Дивноморское), Всероссийское совещание по проблемам управления (2014, Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 68 научных работ, из них 19 статей в журналах из списка ВАК РФ (в том числе одна публикация в иностранном журнале, индексирующемся в базе Scopus), 1 монография, 10 патентов на изобретения и 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах [1-43,45-46,48-51] автором созданы методы синтеза различных систем управления, систем автоматической настройки программных сигналов, обработки информации, получаемой от датчиков, а также дано обоснование этих методов и выполнено

математическое моделирование. В работах [51-66] предложены структуры управляющих устройств и программные реализации алгоритмов, построенных на основе предложенных методов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, включающего 253 источника. Основное содержание работы изложено на 315 страницах машинописного текста. Работа содержит 97 рисунков и 3 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решения проблемы создания новых методов синтеза высокоточных СУ НПА, в том числе и тех, которые предназначены для их движения по сложным пространственным траекториям на повышенных скоростях. Сформулированы цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и ее содержание по главам, а также представлены основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа опубликованных источников выявлены проблемы и трудности, возникающие в процессе синтеза высококачественных СУ для НПА различного вида и назначения, определены недостатки предлагаемых подходов и методов, решающих сходные задачи, а также определены возможные пути для успешного достижения поставленной цели.

В частности, было показано, что синтезируемые многими авторами робастные и адаптивные СУ не всегда полностью учитывают динамические свойства и особенности НПА, а также существенную переменность их параметров и параметров взаимодействия с окружающей вязкой средой в процессе их движения по сложным пространственным траекториям, идентифицировать которые удастся не всегда. Кроме того, синтезируемые СУ позволяют обеспечить высокую динамическую точность движения НПА только при условии, что формируемые этими СУ сигналы управления реально отрабатываются движительным комплексом НПА, ограничения мощности которого учитываются редко. В результате при повышении скорости движения или при перемещении НПА по траекториям с большой кривизной некоторые его двигатели входят в насыщение, что неминуемо приводит к резкому снижению точности управления (или даже к возникновению аварийных ситуаций). То есть при синтезе высокоточных СУ НПА необходимо учитывать не только особенности динамики этих аппаратов (переменность многих их параметров), но и формировать такие программные сигналы движения, которые будут гарантированно (всегда) отрабатываться этими СУ с заданной точностью. Тем не менее, проведенный анализ показал, что большинство известных методов синтеза, имея высокую сложность практической реализации, не учитывают появление реально существующих насыщений и ограничений исполнительных устройств НПА.

Кроме того, многие СУ не учитывают различную частоту обновления выходных сигналов многочисленных датчиков НПА, которые обеспечивают формирование соответствующих обратных связей. В результате даже те системы, которые при моделировании показывают высокое качество управления, на практике становятся вообще неработоспособными.

По результатам проведенного анализа в конце главы окончательно были сформулированы и обоснованы цель и задачи исследования, результатом которого должны стать новые подходы и методы, позволяющие синтезировать СУ для высокоскоростного и высокоточного управления движением НПА различного вида и назначения по произвольным пространственным траекториям в условиях существенной переменности (часто не идентифицируемой) параметров НПА и параметров их взаимодействия с окружающей жидкостью.

Обобщенная структурная схема подходов и задач, которые могут быть положены в основу диссертации, представлена на рис.1.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема подходов и задач положенных в основу диссертации

Как видно из представленной схемы, в диссертации предполагается создать две основные группы подходов и методов для достижения поставленной цели. Первая группа должна позволить синтезировать высокоточные СУ для высокоманевренных НПА с шестью степенями свободы, выполняющих ответственные операции вблизи объектов работ. Эти СУ должны строиться на базе создаваемых методов синтеза

децентрализованных адаптивных регуляторов, позволяющих обеспечивать НПА желаемые динамические свойства при любых изменениях их параметров в условиях сильных взаимовлияний между всеми степенями свободы. При этом для гарантированного обеспечения высокой динамической точности управления НПА по произвольным пространственным траекториям должны быть созданы эффективные методы формирования режимов их движения, позволяющие учесть возможный вход отдельных движителей НПА в насыщения.

Вторая группа методов предназначена для синтеза СУ НПА, имеющими специальную обтекаемую форму, ограниченное количество степеней свободы и предназначенными для высокоскоростного и точного движения вдоль протяженных пространственных траекторий.

Эти методы должны учитывать особенности конструкции движительных комплексов скоростных НПА. При этом для повышения точности движения по криволинейным пространственным траекториям должны использоваться новые принципы управления, позволяющие синтезировать простые регуляторы и реализовывать новые подходы к построению программных сигналов, учитывающие возможное насыщение отдельных движителей в процессе быстрых перемещений НПА.

Совместное использование новых методов формирования режимов движения НПА и методов одновременной коррекции их программных сигналов должно позволить синтезировать высокоточные СУ, для разных типов НПА, работающих на предельно высоких скоростях.

Необходимым условием практической реализации синтезируемых СУ является разработка методов комплексной обработки данных, поступающих от различных датчиков НПА. Эти методы должны быстро формировать и обновлять все необходимые сигналы обратных связей с требуемой частотой.

Важной задачей является также разработка новых эффективных методов математического и полунатурного моделирования работы СУ НПА с целью ускорения процесса их проектирования и снижения затрат на разработки.

Во второй главе, разработан достаточно легко реализуемый метод синтеза децентрализованных адаптивных СУ НПА, обеспечивающих этим НПА высокую динамическую точность при их движении вблизи объектов работ по любым пространственным траекториям в условиях сильных взаимовлияний между их степенями свободы и каналами управления, а также при наличии переменных параметров их взаимодействий с окружающей вязкой средой.

Модель НПА представляет собой систему из двенадцати дифференциальных уравнений, записанных в матричной форме

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}(\mathbf{v}) + \mathbf{D}(\mathbf{v}))\mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{v}, \quad (2)$$

где $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - матрица инерции, включающая присоединенные массы и моменты инерции жидкости; $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - матрица кориолисовых и центробежных сил; $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - матрица гидродинамических сил и моментов; $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^6$ - вектор гидростатических сил и моментов; $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ - вектор проекций линейной и угловой скоростей движения НПА на оси жестко связанной с ним системы координат (ССК); $\boldsymbol{\tau} = [\tau_{tx}, \tau_{ty}, \tau_{tz}, M_{tx}, M_{ty}, M_{tz}]^T$ - вектор проекций сил тяги движителей НПА на оси ССК; $\mathbf{x} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ - вектор положения и ориентации НПА в абсолютной системе координат (АСК); $\mathbf{J}(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - блочная матрица перехода из ССК в АСК.

В модели (1), (2) динамика каждого движителя НПА описывается уравнениями вида:

$$J_o \dot{\omega}_t + k_{\tau 2} \omega_t + M_f = k_{\tau 2} u, \quad \tau_t = F_\tau f_\tau(\omega_t, H_{hd}), \quad M_f = F_m f_m(\omega_t, H_{hd}), \quad (3)$$

где H_{hd} – гидродинамический шаг винта; F_τ, F_m – обобщенные коэффициенты тяги и момента; J_o – момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; $k_{\tau 1}, k_{\tau 1}$ – постоянные коэффициенты; u – сигнал управления движителем НПА; M_f – момент на валу движителя; $f_m(\omega_t, H_{hd}), f_m(\omega_t, H_{hd})$ – нелинейные функции. Модель (3) имеет переменные параметры в диапазонах: $J_o^{\min} \leq J_o \leq J_o^{\max}$ и $F_m^{\min} \leq F_m \leq F_m^{\max}$.

Поскольку модель (1) - (3) является нелинейной и многомерной, то ее сложно напрямую применить для синтеза СУ НПА. Поэтому в главе использован метод декомпозиции, в котором модель (1) разбивается на шесть подсистем (по числу степеней свободы НПА), в которых взаимосвязи между всеми этими подсистемами представляются как внешние воздействия. При этом уравнения, описывающие движения НПА по каждой отдельной степени свободы, например, линейной по оси x , имеют следующий вид:

$$m \ddot{v}_x + d_1 \dot{v}_x + d_2 v_x |v_x| + f_x = \tau_{tx}, \quad (4)$$

$$m_{\min} < m < m_{\max}, \quad d_{1\min} < d_1 < d_{1\max}, \quad d_{2\min} < d_2 < d_{2\max},$$

где m – масса НПА с учетом присоединенных масс жидкости; d_1, d_2 – гидродинамические коэффициенты вязкого трения НПА; f_x - внешние воздействия на конкретную степень свободы со стороны остальных степеней.

В СУ НПА используется три контура управления (см. рис. 2): контур управления движителями, контур управления скоростью движения НПА и контур управления его положением, синтез этих контуров выполняется последовательно.

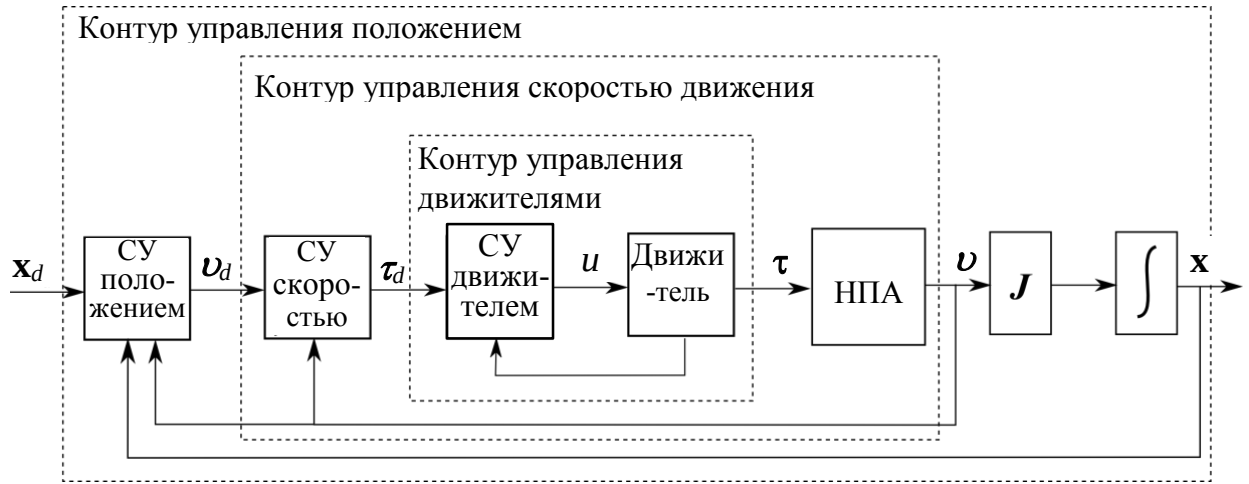


Рис. 2. Структурная схема СУ НПА

В диссертации разработано несколько методов синтеза СУ движителями НПА. Первый метод предполагает синтез самонастраивающейся системы с эталонной моделью, позволяющей придать каждому движителю заданные динамические свойства, описываемые уравнением вида:

$$\dot{\tau}_t = (\tau_d - \tau_t)/T_d, \quad (5)$$

где T_d - желаемая постоянная времени; τ_d - желаемое значение развиваемой силы тяги. Синтез этой системы состоит из двух этапов: на первом - синтезируется нелинейный регулятор, позволяющий придать движителю желаемые динамические свойства (5) в случае, когда его параметры равны некоторым номинальным (постоянным) значениям, а на втором - синтезируется контур сигнальной самонастройки по эталонной модели, описываемой уравнением, аналогичным (5), позволяющий компенсировать отклонения параметров движителя от их номинальных значений. В целом синтезируемый закон управления (см. рис. 2) имеет вид:

$$u = \left(J_{\partial n} \frac{(\tau_d - F_{\tau} f_{\tau}(\omega_t, H_{hd})) / (T_d F_{\tau}) + z}{D(\omega_t, H_{hd})} + F_{mn} f_{\tau}(\omega_t, H_{hd}) + k_{dc} \omega_t \right) k_{amp},$$

где z - сигнал самонастройки; $D(\omega_t, H_{hd})$ - промежуточная функция; k_{dc}, k_{amp} - положительные коэффициенты, определяемые параметрами двигателя; $J_{\partial n}, F_{mn}$ - номинальные значения соответствующих параметров движителя.

Кроме этого в диссертации было предложено несколько методов построения СУ движителями НПА на основе адаптивных нейронных сетей с использованием прямого инверсного управления, регуляторов с прогнозирующей моделью и адаптивных регуляторов с предсказанием по нейро-нечеткой модели. Для снижения вычислительной сложности этих СУ применяются нейронные сети малой

размерности, которые переобучаются на каждом шаге дискретизации СУ, используя обучающие выборки малого объема. СУ, синтезируемые с помощью этих методов, позволяют обеспечить движителю заданные динамические свойства без знания текущих значений его переменных параметров.

При синтезе децентрализованной СУ скоростью движения НПА также используется описание его степеней свободы уравнениями вида (4), а движителей - уравнениями (5). При этом главной задачей является компенсация взаимовлияния перекрестных связей во всех каналах управления НПА, и изменения его параметров. Эта задача решается с помощью системы с переменной структурой (СПС), работающей в скользящем режиме, что позволяет описать динамику НПА по отдельным степеням свободы линейным дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{e} + Ce = 0, e = v_d - v, \quad (6)$$

где v_d, v - желаемое и текущее значение скорости движения НПА по соответствующей степени свободы НПА; C – положительный коэффициент.

Для всех степеней свободы НПА в диссертации предложен следующий закон управления скоростью их движения, построенный на основе СПС

$$\tau_d = k_{u1} |e| g(s) + k_{u2} \tau_t, \quad s = \dot{e} + Ce, \quad (7)$$

где $k k_{u1} = k_3 T_o m$, $k_{u2} = 1/k_d k_{u2}$ – постоянные положительные коэффициенты; $g(s)$ -функция реле с гистерезисом. Этот закон, используя алгоритм настройки параметров СПС по величине скажности μ разрывного сигнала управления (предложен А.А.Дыда):

$$\mu = t_g / (t_s + t_g), \dot{\Delta} = k_s (\mu_{\max} - \mu), C = C_{\min} + \Delta, \quad (8)$$

где t_s, t_g - промежутки времени движения системы по отрезкам спиралей и гипербол в скользящем режиме, не требует идентификации текущих параметров НПА. Однако проведенные исследования показали, что закон (7) позволяет обеспечить настройку величины коэффициента C с помощью алгоритма (8) только при ступенчатых входных сигналах, а при движении НПА по криволинейным пространственным траекториям на все входы всех СПС при управлении скоростью движения НПА поступает непрерывно изменяющийся сигнал. Поэтому в диссертации предложено преобразовывать этот непрерывно изменяющийся сигнал в последовательность ступенчатых сигналов с помощью соотношений, позволяющих выбирать такую минимальную величину шага квантования этого сигнала, при которой во время отработки очередного задающего ступенчатого сигнала изображающая точка

системы успевает полностью пройти и по гиперболе и по спирали для реализации нормальной работы алгоритма адаптации СПС (8).

Синтезируемый контур управления пространственным положением НПА придает всему НПА в целом желаемые динамические свойства, описываемые уравнением:

$$\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_p \mathbf{x} = \mathbf{K}'_p \mathbf{x}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_d, \quad (9)$$

где $\mathbf{x}_d = (x_{d1}, x_{d2}, x_{d3}, x_{d4}, x_{d5}, x_{d6})^T$ – вектор задающих воздействий по положению НПА; $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}'_p \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ – диагональные матрицы коэффициентов. При этом в результате использования закона управления (7), (8) НПА будет описываться матричным дифференциальным уравнением:

$$\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\mathbf{v} = \mathbf{C}\mathbf{v}_d,$$

где $\mathbf{v}_d = (v_{d1}, v_{d2}, v_{d3}, v_{d4}, v_{d5}, v_{d6})^T$ – вектор задающих воздействий по скорости; $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ – диагональная матрица коэффициентов.

Закон управления, который позволяет обеспечить НПА желаемые динамические свойства (9), имеет вид:

$$\mathbf{v}_d = (\mathbf{J}\mathbf{C})^{-1}(\mathbf{K}'_p \mathbf{x}_d - \mathbf{K}_p \mathbf{x} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_d - (\mathbf{C}\mathbf{J} + \dot{\mathbf{J}})\mathbf{v}) + \mathbf{v}, \quad (10)$$

где $\mathbf{K}_p = \mathbf{K}'_p = \mathbf{C}^2/\zeta$; ζ – некоторый положительный параметр, определяющий вид переходных процессов в СУ положением и ориентацией НПА.

На рис. 3 показаны результаты моделирования работы СУ НПА при его движении из исходной в некоторую заданную точку пространства. Кривые 1 соответствуют «наихудшим», а кривые 2 – «наилучшим» параметрам НПА. Для сравнения на рис. 2а показана работа типовой линейной СУ (кривые 3 и 4) с постоянными коэффициентами, соответственно, при «наихудших» и «наилучших» параметрах НПА. Из рис. 3а видно, что линейный регулятор позволяет добиться приемлемого качества управления только при "наилучших" значениях параметров НПА, а при "наихудших" значениях этих параметров наблюдается появление недопустимо большого перегулирования, и более чем в 2.5 раза возрастает время переходного процесса. Однако синтезированная в диссертации СУ НПА позволяет не только полностью исключить перерегулирование, но и при благоприятных параметрах его работы почти в полтора раза увеличить быстродействие (скорость обнуления ошибки).

Кроме того, при управлении положением НПА параметр μ (см. рис. 3б) быстро достигает своего максимального постоянного значения (близкого к единице), а коэффициент C в зависимости от текущих параметров НПА принимает различные значения (см. рис. 3в).

Математическое моделирование работы СУ, включающей закон (10), синтезированной на основе разработанных методов (см. рис. 2), при движении НПА по произвольным сложным, но гладким пространственным траекториям показало, что точность этого движения существенно зависит от задаваемой скорости. И, если движение по выбранным пространственным траекториям с постоянными скоростями 0.5 м/с приводило к динамическим ошибкам НПА, не превышающим 0.06м, то повышение этих скоростей до 1.2 м/с при движении НПА с теми же СУ и по тем же траекториям повышало максимум динамических ошибок управления уже до 0.8 м. Если же на отдельных участках траекторий с большой кривизной один или несколько движителей НПА входили в насыщения, то динамическая точность его движения на этих участках резко падала, а отклонения от предписанных траекторий существенно превышали 1 м.

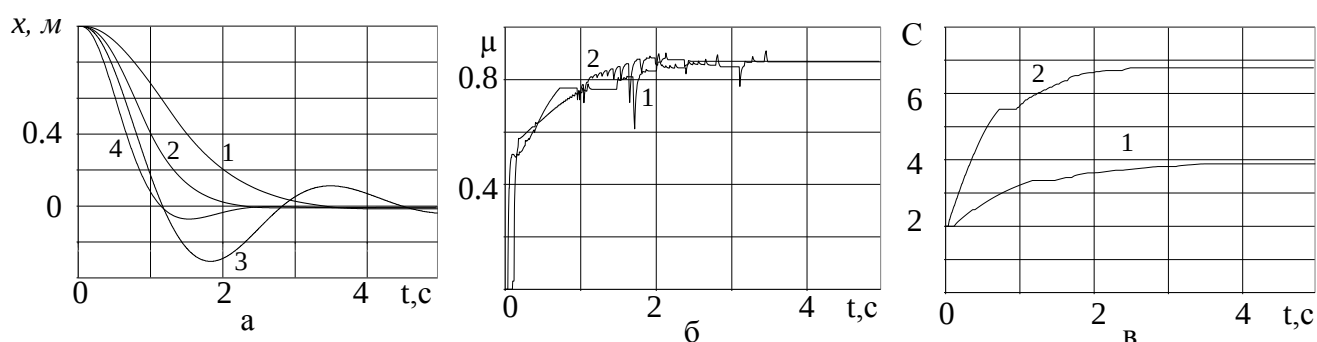


Рис. 3. Результаты моделирования работы СУ пространственным движением НПА при терминальном управлении

Таким образом, результаты моделирования синтезированных адаптивных децентрализованных СУ НПА показали, что в целом они позволяют обеспечить требуемую высокую динамическую точность управления НПА независимо от изменений параметров их взаимодействия с окружающей вязкой средой и от взаимовлияний между всеми каналами управления. Однако, СУ, синтезируемые с помощью предложенных методов, являясь весьма сложными, тем не менее, не позволяют сохранить высокую точность управления НПА при входе их движителей в насыщение. В результате следует использовать новые пути и подходы, позволяющие сохранить высокую динамическую точность управления НПА, применяя по возможности более простые СУ без снижения средней скорости движения НПА по предписанным траекториям. Эти подходы и методы, созданные на их основе, рассмотрены в четвертой главе диссертации.

В третьей главе решена задача разработки обобщенного метода синтеза СУ для НПА, имеющих обтекаемую форму и ограниченное количество степеней свободы, которые предназначены для точного скоростного перемещения по пространственным криволинейным траекториям вдоль протяженных объектов. При

этом рассмотрен и исследован НПА с одним поворотным движителем, вектор тяги которого изменяет пространственную ориентацию. Внешний вид НПА и его движительной установки показаны на рис. 4.

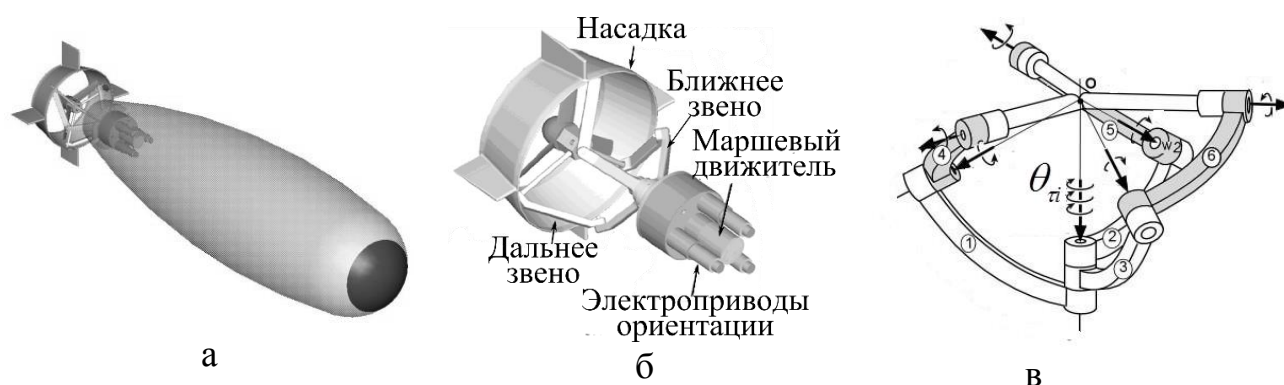


Рис. 4. Внешний вид НПА (а), его движительной установки (б) с изменяющимся вектором тяги и ее кинематическая схема (в)

Отличительной особенностью этой установки является то, что она способна не только ориентировать винт в заданном пространственном положении (угол δ_d в вертикальной, а δ_r в горизонтальной плоскостях), но и с помощью противовращения насадки создавать момент, компенсирующий опрокидывающий момент, действующий на НПА со стороны вращающегося в жидкости винта. Использование этой установки не только снижает массогабаритные характеристики НПА, но и снижает негативные эффекты его взаимодействия с вязкой средой.

При решении этой общей задачи были решены две подзадачи.

1) Создание метода формирования задающих сигналов, подаваемых на электроприводы устройства ориентации движителя НПА, одновременно обеспечивающих и заданную ориентацию силы тяги движителя, и скорость противовращения насадки. Решение этой задачи было получено на основе предложенного геометрического подхода, обеспечивающего получение легко реализуемых выражений для управления углами поворота электроприводов устройства ориентации маршевого движителя.

2) Создание методов формирования программных сигналов движения НПА в пространстве, учитывающих особенности конструкции его движителя.

Метод синтеза СУ, решающий первую подзадачу, обеспечивает качественное управление движением этого НПА с учетом особенностей формирования вектора тяги его винта (маршевого движителя). Структурная схема этой СУ показана на рис. 5. Эта СУ позволяет формировать задающие сигналы на электроприводы движительной установки, одновременно обеспечивающие и заданную ориентацию силы тяги движителя, и скорость противовращения насадки. Эта СУ содержит три основных канала управления:

углами курса ψ , дифферента θ и скоростью его продольного движения v_x , а также контур формирования скорости противовращения насадки ω_{cr} движителя для обнуления угла крена φ НПА. Во всех каналах этой СУ используются типовые линейные регуляторы R_1, R_2, R_3 , синтезированные с учетом требований к точности управления.

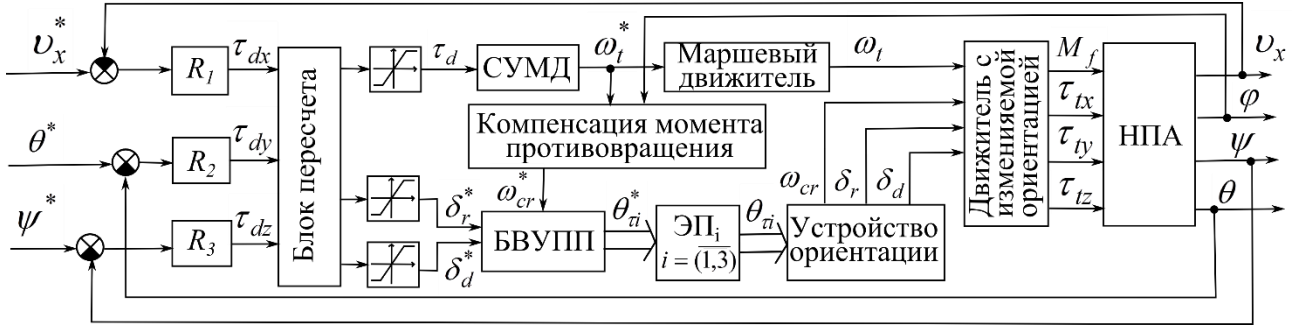


Рис. 5. Структурная схема СУ НПА с одним поворотным движителем

СУ маршевым движителем (СУМД), позволяет рассчитать желаемую скорость его вращения ω_t^* на основе желаемого значения его силы тяги τ_d . Блок вычисления желаемых углов $\theta_{\bar{i}}^*$ ($i=\overline{1,3}$) поворота выходных валов приводов устройства ориентации (БВУПП) рассчитывает в реальном масштабе времени значения этих углов с использованием значений желаемых углов ориентации движителя δ_d^*, δ_r^* и скорости противовращения насадки ω_{cr}^* , полученных с учетом угла φ и проекций $\tau_{dx}, \tau_{dy}, \tau_{dz}$ (сформированных на основе желаемых значений скорости продольного движения v_x^* , а также углов курса ψ^* и дифферента θ^*), которые отрабатываются электроприводами (ЭПи) за счет поворотов их выходных валов на углы $\theta_{\bar{i}}(t)$ ($i=\overline{1,3}$).

При решении второй подзадачи в диссертации были рассмотрены два варианта движения НПА с одним поворотным движителем: выход в заданную точку пространства и движение по произвольной гладкой пространственной траектории. Для первого варианта были получены аналитические выражения

$$x_c = x + k_y(x^* - x), \quad \theta^* = \arctg((z^* - z)/(k_y |x_c - x|)), \quad v_x^* = f_{xv}(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}) + k_{v\theta} |\sin(\theta^*)|,$$

$$\psi^* = \psi + \arccos\left(\frac{(x^* - x)\cos(\theta) - (y^* - y)\sin(\theta)}{\sqrt{(x^* - x)^2 + (y^* - y)^2}}\right), \quad \delta = \text{sign}((x^* - x)\sin\theta + (y^* - y)\cos\theta),$$

позволяющие формировать программные сигналы движения НПА в горизонтальной и вертикальной плоскостях, обеспечивающие выход в заданную произвольную точку пространства независимо от его исходного положения, где $\mathbf{X} = (x, y, z)$, $\mathbf{X}^* = (x^*, y^*, z^*)$ - соответственно, координаты текущего и желаемого положения НПА; x_c - промежуточная величина, лежащая между значениями

координат x и x^* ; $k_y, k_{v\theta}$ - положительные коэффициенты.

При выходе НПА в заданную точку с заданной ориентацией был разработан алгоритм формирования специальных траекторий подхода к объекту (см. рис. 6).

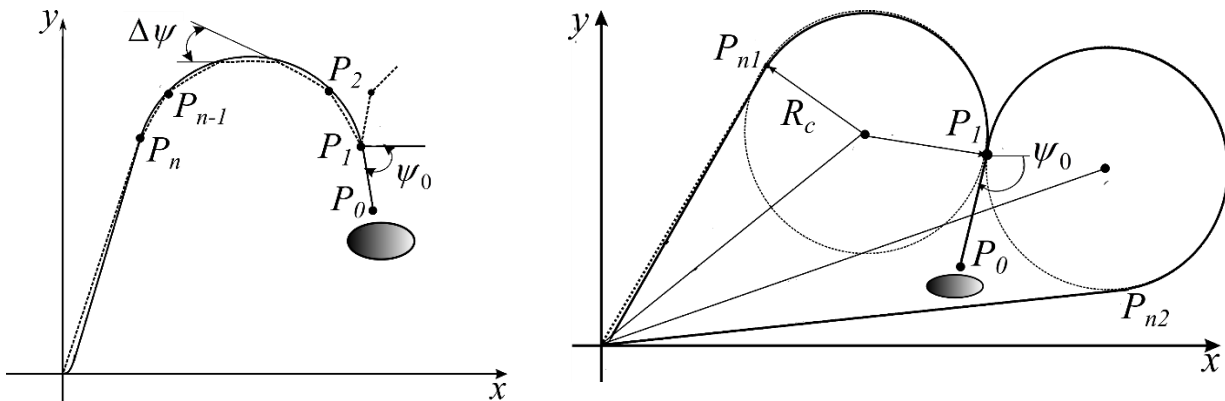


Рис. 6. Различные способы формирования траекторий выхода НПА с одним движителем в заданную точку пространства с заданной ориентацией

Эти траектории могут быть представлена или в виде ломаной линии (рис. 6а), проходящей через последовательность точек $P_n, P_{n-1}, \dots, P_1, P_0$, - позиционное управление, или в виде дуги окружности радиусом R_c с началом в точках P_{n1} или P_{n2} (рис. 6 б) - контурное управление, параметры которых зависят от маневренности НПА. Результатом расчета первого участка движения НПА являются точки P_n, P_{n1} , или P_{n2} , лежащие в одной горизонтальной плоскости с целевой точкой P_0 , к которым НПА подходит с максимально возможной скоростью. Затем он проходит по сформированной траектории к заданной точке P_0 с заданной ориентацией ψ_0 . При этом при позиционном управлении углы между прямолинейными участками ломанной равны $\Delta\psi = \text{const}$, а при контурном – выбирается минимальная длина траектории движения НПА.

Результаты моделирования движения НПА со скоростью 1м/с по одной из пространственных траекторий представлены на рис. 7. На рис.7а показаны желаемая (1) и реальная (2) траектории движения НПА вместе со своими проекциями на вертикальную и горизонтальную плоскости абсолютной системы координат, а на рис. 7б ошибки $\varepsilon_x = x^* - x$, $\varepsilon_y = y^* - y$, $\varepsilon_z = z^* - z$ слежения по линейным координатам (соответственно, кривые 1, 2 и 3), а также процессы изменения углов ψ (4) и θ (5). Из этих результатов видно, что синтезированная СУ при использовании типовых регуляторов в ее каналах управления при движении НПА с высокой скоростью хоть и имеет большие динамические ошибки (до 4 м), но при этом отклонение НПА от траектории не превышает 0.8 м. Что вполне достаточно для выполнения многих операций наблюдения. Но при еще большем увеличении скорости и кривизны траектории точность работы синтезированной СУ будет существенно снижаться,

приводя к неприемлемо большим отклонениям НПА от предписанных траекторий. В этом случае в процессе управления также следует использовать новые подходы и методы, рассмотренные в четвертой главе диссертации.

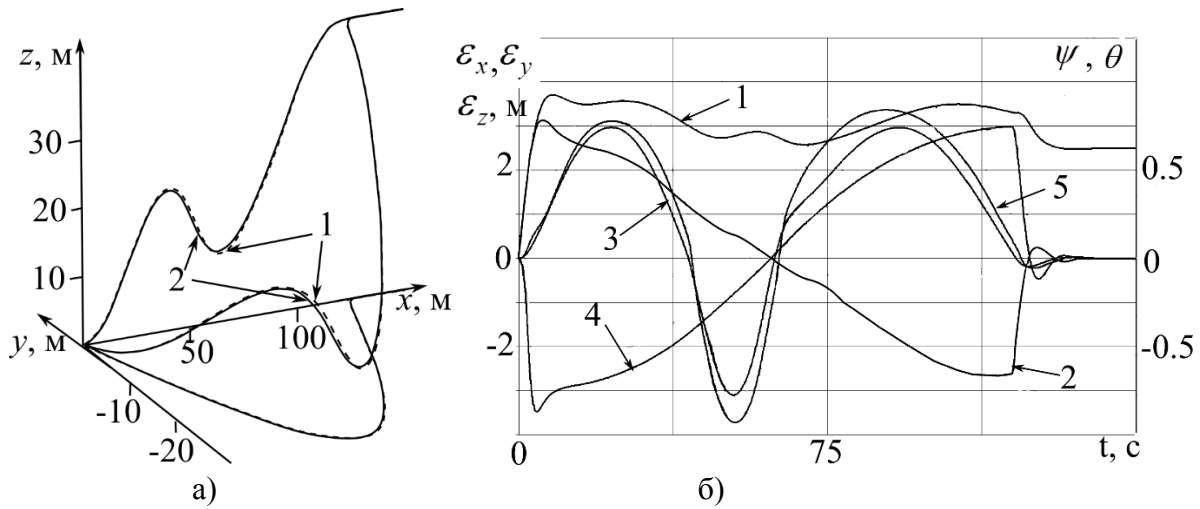


Рис. 7. Результаты моделирования движения НПА с одним движителем по сложной пространственной траектории

В четвертой главе было показано, что за счет уменьшения скорости движения НПА на участках пространственных траекторий с большой кривизной и ее увеличения на прямолинейных участках можно не только сохранить заданную динамическую точность управления НПА, но и значительно уменьшить время прохождения всей траектории, даже используя простые системы управления. Кроме того, автоматически формируя для целей управления псевдо траектории, можно еще больше повысить скорость движения НПА, не снижая заданную динамическую точность.

Желаемая пространственная траектория движения НПА в главе задается с помощью выражения:

$$\dot{\mathbf{X}}^*(t) = f_v(\mathbf{x}^*)v^*, \quad (11)$$

где $f_v(\mathbf{x}^*) \in \mathbf{R}^3$ - вектор-функция; v^* - программная скорость движения НПА по траектории.

При отработке НПА непрерывно подаваемых на его вход сигналов $\mathbf{X}^*(t)$ возникает динамическая ошибка $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)$, которая зависит от кривизны соответствующих участков траектории, от скорости его движения вдоль этой траектории, от используемой СУ, характеризуемой функцией $F_u(\cdot)$, и от вектора $\mathbf{P}$ текущих параметров НПА

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = F_\varepsilon(\mathbf{X}^*(t), \dot{\mathbf{X}}^*(t), F_u(\cdot), \mathbf{P}). \quad (12)$$

Если во время движения НПА по криволинейной траектории $\varepsilon(t) \neq 0$, то появляется вектор $\varepsilon_n(t) \neq 0 \in \mathbf{R}^3$, характеризующий отклонение НПА от этой траектории (см. рис. 8). При этом элементы вектора $\varepsilon_n(t)$ являются функциями векторов $\mathbf{X}(t)$, $\varepsilon(t)$ и формы траектории движения НПА, определяемой функцией $f_v(\cdot)$:

$$\varepsilon_n(t) = F_n(\mathbf{X}(t), f_v(\cdot), \varepsilon(t)). \quad (13)$$

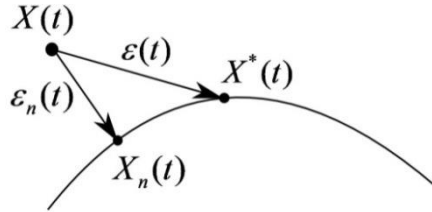


Рис. 8. Схема движения НПА по пространственной траектории

Из выражений (12) и (13) следует, что точность движения НПА по заданным траекториям определяется не только качеством их СУ, но и параметрами программных сигналов движения (11). Поэтому в главе разработаны методы формирования такого вектора $\mathbf{X}^*(t)$, который, учитывая возможные насыщения его движителей, позволил бы отрабатывать все участки любой гладкой пространственной траектории с помощью типовой СУ, установленной на борту НПА, на предельно возможной скорости, неизменно обеспечивая выполнение условия

$$\|\varepsilon_n(t)\| \leq \varepsilon_{\text{доп}}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{\text{доп}}$ - допустимое отклонение НПА от любой траектории его движения.

Так как точность движения НПА по траекториям зависит от скорости этого движения, то, автоматически формируя величину $v^*(t)$ в зависимости от текущей точности их движения по этим траекториям, можно не только гарантировать выполнение условия (14) на всех участках траектории, но и повышать скорость движения НПА на участках траекторий с малой кривизной, уменьшая ее на участках с большой кривизной. Формирование $v^*(t)$ предложено проводить с использованием выражений:

$$v^* = F_v^*(\xi), \xi = \varepsilon_{\text{доп}} - E, E = \|\varepsilon_n(t)\| + k_\varepsilon \|\varepsilon(t)\|, \quad (15)$$

где $F_v^*(\xi)$ - регулятор программной скорости движения НПА; E – оценка точности движения НПА по траектории. Обобщенная структурная схема системы

автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории показана на рис. 9 (где S – сигнал прекращения работы системы).

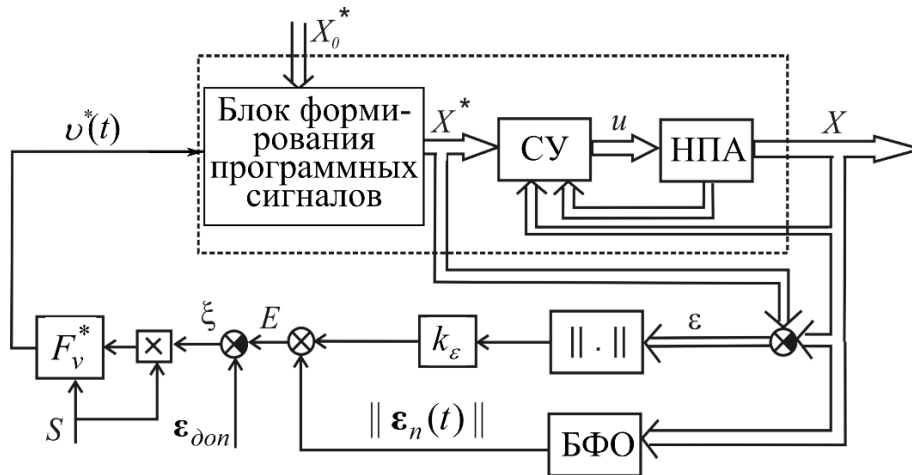


Рис. 9. Обобщенная структурная схема системы автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории

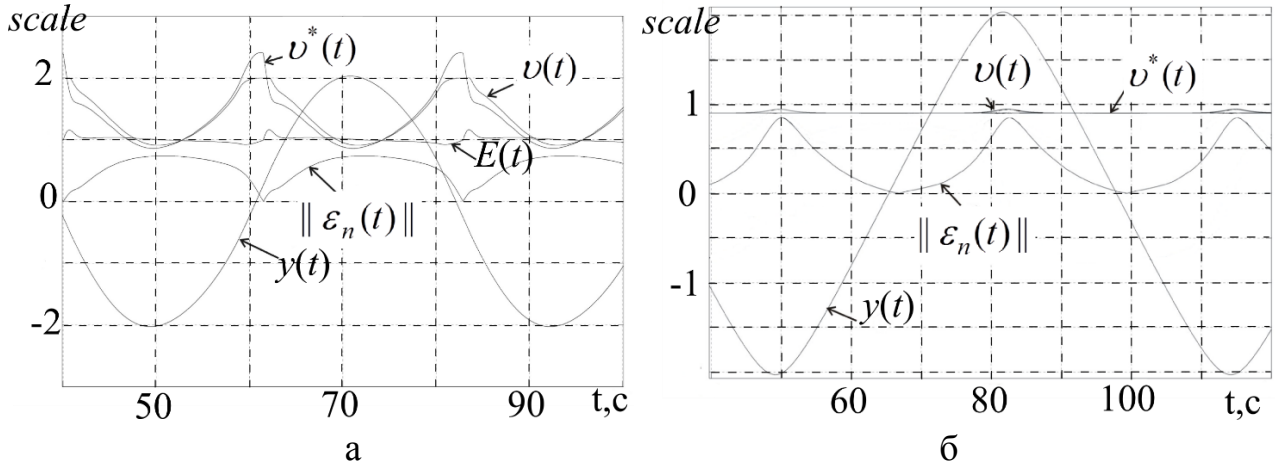
Величина E является комбинацией двух переменных: $\|\epsilon_n(t)\|$, которая рассчитывается в блоке формирования отклонения (БФО), и $\|\epsilon(t)\|$. При этом величина $\|\epsilon_n(t)\|$ является доминирующей при движении НПА по криволинейным участкам траектории, когда отклонение НПА от этой траектории максимально. А величина $\|\epsilon(t)\|$ является доминирующей на участках траекторий с малой кривизной, когда $\|\epsilon_n(t)\|$ мала и требуется ограничить величину v^* для исключения входа движителей НПА в насыщение.

Предложенный метод автоматической настройки v^* целесообразно использовать совместно с высокоточными СУ НПА, так как в этом случае снижение точности движения НПА часто происходит из-за входа в насыщение отдельных движителей. В главе показано, что при синтезе регулятора $F_v^*(\xi)$ использование СУ (10) позволяет описать ОУ (выделен пунктирной линией на рис. 9) линейной математической моделью. Поэтому в качестве регулятора $F_v^*(\xi)$ вполне можно использовать ПИ-регулятор.

Результаты моделирования работы предложенной системы формирования v^* НПА при его движении по траектории $y^*(t) = 10 \sin(\pi x^*(t)/20)$ при $\epsilon_{\text{доп}} = 0.2$ м показаны на рис. 10а. Из этого рисунка видно, что на участках траекторий с малой кривизной, где $\epsilon_n \rightarrow 0$, значение $v^*(t)$ возрастает, а реальная скорость $v(t)$ движения НПА достигает максимума, поскольку его движители входят в насыщение, что приводит к резкому возрастанию $\|\epsilon(t)\|$ и в соответствии с (15) – к увеличению $E(t)$.

Для сравнения на рис. 10б представлены результаты моделирования движения НПА по той же самой траектории, но уже без использования системы

автоматического формирования $v^*(t)$. Из этого рисунка видно, что при движении НПА по указанной траектории с $v^* = \text{const} = 1$ м/с величина $\|\varepsilon_n\|$ также не превышает 0.2 м, но при этом перемещение НПА происходит и с меньшей средней скоростью, и менее точно.



$$v^*(t) = \text{scale} \text{ (м/с)}; v(t) = \text{scale} \text{ (м/с)}; y(t) = \text{scale} \cdot 5 \text{ (м)}; \|\varepsilon_n(t)\| = \text{scale} \cdot 0.2 \text{ (м)}; E(t) = \text{scale} \cdot 0.2 \text{ (м)}$$

Рис.10. Процессы изменения $v^*(t)$, $y(t)$, $\|\varepsilon_n(t)\|$, $E(t)$ при использовании (а) и без использования (б) системы автоматического формирования программной скорости движения НПА

Однако выполненные в главе исследования показали, что высокую точность движения НПА по пространственным траекториям можно сохранить не только за счет снижения $v^*(t)$ на криволинейных участках траекторий, но и за счет корректировки программных сигналов, подаваемых на входы НПА. Традиционно программные сигналы для НПА формируются на основе информации о текущих значениях $\mathbf{X}^*(t)$, формирующих программные желаемые траектории, по которой должен пройти НПА. Но с учетом динамических свойств НПА и текущих параметров их движения, используя простые алгебраические уравнения, вблизи программных траекторий движения НПА можно в реальном масштабе времени непрерывно строить новые траектории для формирования их программных сигналов, с помощью которых удастся сохранить условия (14), и не уменьшая, а даже увеличивая $v(t)$. При этом достаточно использовать простейшие типовые регуляторы, уже имеющиеся на борту любых НПА. В результате расстояние (динамическая ошибка) между программной точкой, перемещающейся по новой программной траектории, и НПА может быть большим, но при этом НПА будет с высокой точностью перемещаться вдоль исходной программной траектории.

Новые программные траектории предлагается формировать в виде:

$$\tilde{\mathbf{X}}^*(t) = \mathbf{X}^*(t) + \Delta \mathbf{X}^*(t), \Delta \mathbf{X}^*(t) = k_{n\varepsilon} \varepsilon_n(t), \quad (16)$$

где $\Delta \mathbf{X}^*(t) \in \mathbf{R}^3$ - вектор дополнительного программного сигнала, смещающего точку $\mathbf{X}^*(t)$ с предписанной траектории движения НПА; $k_{n\varepsilon}$ - положительный коэффициент. Для реализации выражения (16) в главе синтезирована простая система автоматического управления, стремящаяся обнулить вектор $\varepsilon_n(t)$, в которой вектор $\mathbf{X}^*(t)$ является внешним воздействием.

Результаты математического моделирования работы синтезированной системы при использовании в НПА только простейших линейных регуляторов показаны на рис. 11а. На этом рисунке показаны процессы изменения величин $v(t)$, $\|\tilde{\varepsilon}(t)\| = \|\tilde{\mathbf{X}}^*(t) - \mathbf{X}(t)\|$, $\|\varepsilon_n(t)\|$ и $y(t)$ во время движения НПА по исходной программной траектории при использовании нового программного сигнала (16) при $v^* = \text{const} = 1 \text{ м/с}$. Из рис 11а видно, что максимальное значение $\|\varepsilon_n(t)\|$ составляет всего 0.13 м, хотя максимальное значение $\|\tilde{\varepsilon}(t)\|$ достигает 3,9 м. Для сравнения на рис. 11б показаны процессы изменения тех же величин при традиционном использовании только сигнала $\mathbf{X}^*(t)$ в СУ НПА.

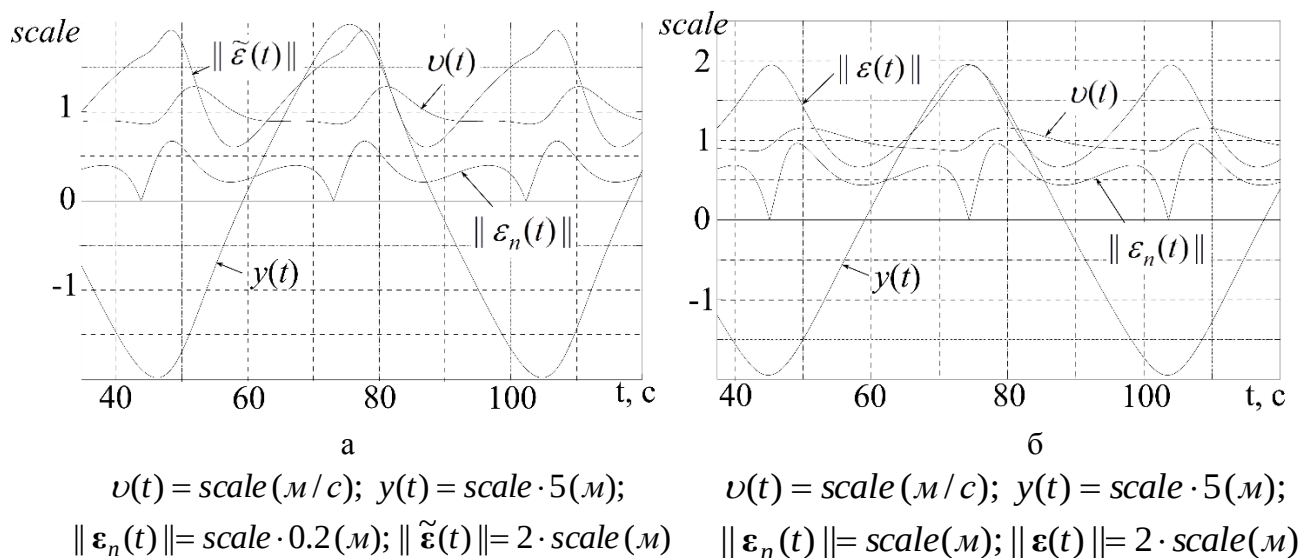


Рис. 11. Изменения переменных $v(t)$, $y(t)$, $\|\varepsilon_n(t)\|$, $\|\tilde{\varepsilon}(t)\|$, $\|\varepsilon(t)\|$ при использовании (а) и без использования (б) в СУ НПА новых программных сигналов (16), когда $v^* = \text{const} = 1 \text{ м/с}$

Из рис 11б видно, что в этом случае максимальное значение $\|\varepsilon_n(t)\|$ достигает 0.95 м. То есть использование нового подхода к формированию программных сигналов более чем в 7 раз увеличивает точность движения НПА по заданной траектории без изменения его СУ.

Однако, формирование новой траектории движения НПА на основе выражений (16) можно проводить одновременно с автоматической подстройкой величины его

программной скорости, используя выражение (15). При этом выражение для построения $E(t)$ можно сформировать в виде: $E(t) = \varepsilon_{don} - k_e \| \tilde{\mathbf{X}}^*(t) - \mathbf{X}(t) \|$.

Структурная схема системы, одновременно формирующей сигналы $v^*(t)$ и $\tilde{\mathbf{X}}^*(t)$, показана на рис. 12, а на рис. 13 показаны результаты моделирования ее работы.

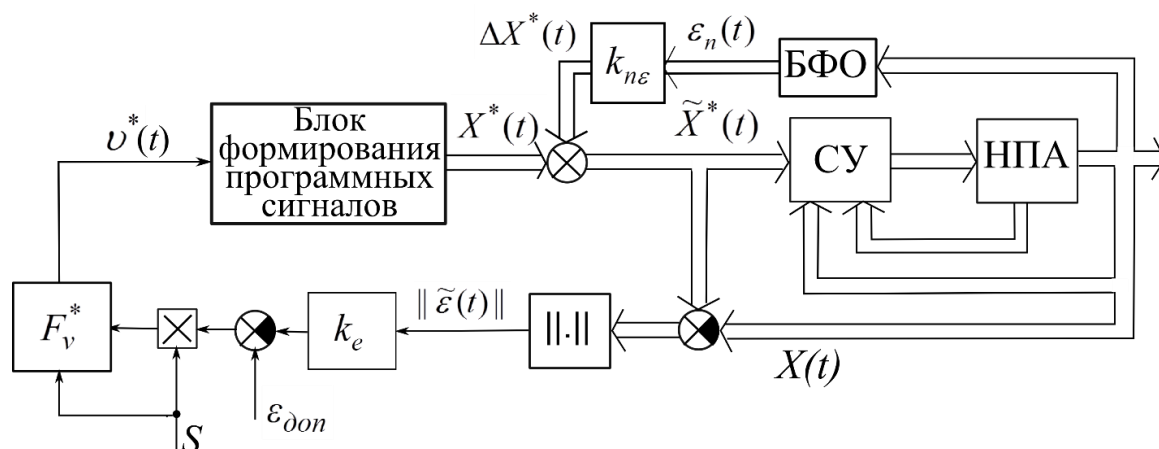
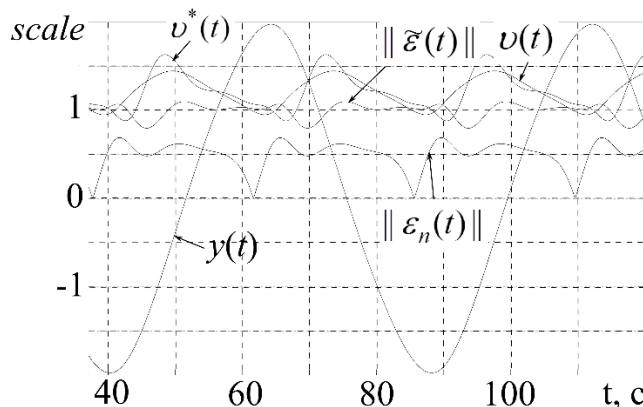


Рис.12. Блок-схема системы, использующей сигналы $v^*(t)$ и $\tilde{\mathbf{X}}^*(t)$



$v^*(t) = scale(m/c)$; $v(t) = scale(m/c)$; $y(t) = scale \cdot 5(m)$; $\| \varepsilon_n(t) \| = scale \cdot 0.2(m)$; $\| \tilde{\varepsilon}(t) \| = scale \cdot 0.2(m)$ Рис.

13. Процесс изменения переменных $v^*(t)$, $y(t)$, $\| \varepsilon_n(t) \|$, $\| \tilde{\varepsilon}(t) \|$ при использовании сигнала $\tilde{\mathbf{X}}^*(t)$ и контура автоматической настройки $v^*(t)$

Из рис. 13 видно, что введение $\tilde{\mathbf{X}}^*(t)$ обеспечивает движение НПА по заданной траектории с ошибкой, не превышающей 0.13 м, и с повышенной скоростью по всем участкам траектории. При этом $v(t)$ изменяется в диапазоне от 0.9 м/с до 1.4 м/с, а время прохождения НПА одного периода траектории равно 46 с, вместо 62 с в системе, без использования контура настройки $v^*(t)$. То есть введение $\tilde{\mathbf{X}}^*(t)$ позволяет не только более чем в 7 раз повысить точность движения НПА по заданной траектории, но и в 1.3 раза увеличить скорость этого движения без какого-либо усложнения СУ НПА.

Для проверки работоспособности и эффективности СУ, синтезированных на основе предложенных методов, были проведены натурные испытания НПА «МАРК»,

в котором были установлены три СУ. Первая, содержала типовую СУ, вторая - синтезированную СУ с контуром формирования $\tilde{X}^*(t)$ (16), а третья - СУ, содержащую и контур формирования $\tilde{X}^*(t)$, и контур настройки $v^*(t)$ (см. рис. 12). На рис.14 серой линией показана желаемая траектория движения НПА с $v^*(t) = 1\text{ м/с} = \text{const}$, сплошной черной – движение НПА, использующего типовую СУ (рис. 14а), и движение НПА с синтезированным на основе выражений (16) дополнительным контуром формирования $\tilde{X}^*(t)$ (рис. 14б). Черным пунктиром показан закон изменения $\tilde{X}^*(t)$.

На рис. 15 показан процесс изменения величины отклонения НПА от желаемой (программной) траектории при его движении с использованием типовой СУ (серая линия) и СУ, содержащей контур формирования $\tilde{X}^*(t)$ (черная линия). Из рис. 14 и 15 видно, что использование в СУ контура формирования $\tilde{X}^*(t)$ позволяет более чем в 4 раза увеличить точность его движения по желаемой траектории. При этом во второй СУ величина максимального отклонения НПА от заданной траектории в 2 раза меньше $\varepsilon_{\text{дон}} = 0.6\text{ м}$, что указывает на возможность повышения скорости его движения.

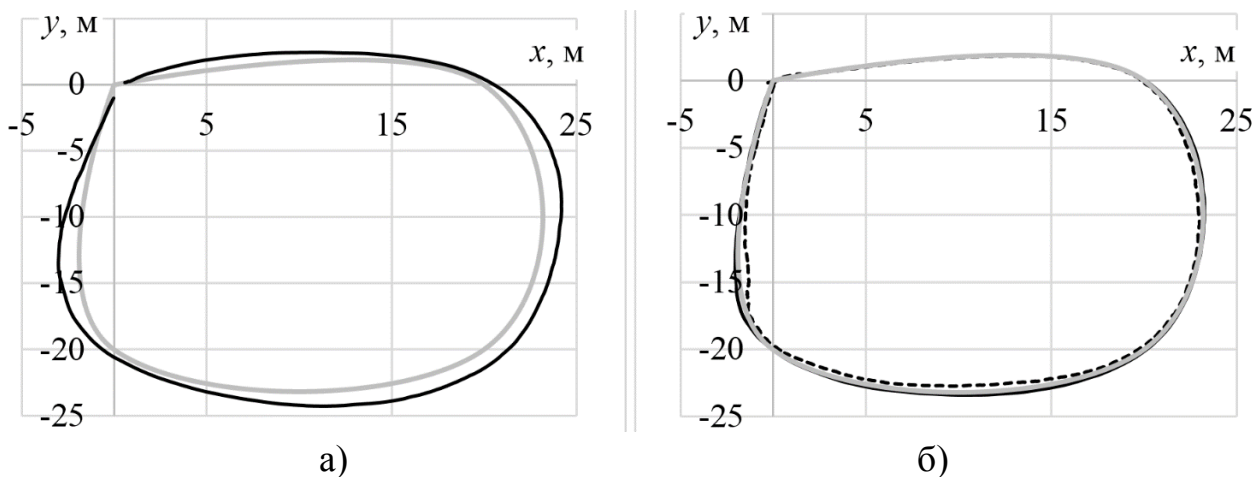


Рис. 14. Траектории движения НПА без использования (а) и с использованием (б) контура формирования $\tilde{X}^*(t)$

Результаты экспериментального исследования третьей СУ НПА при использовании выше введенных обозначений показаны на рис. 16 и 17. При этом на рис. 17 показаны процессы изменения программной скорости движения НПА (черная линия), его реальной скорости (пунктирная линия) и величины его отклонения от программной траектории (серая линия).

Из рис. 17 видно, что программная скорость движения НПА, сохраняя $\varepsilon_{\text{дон}} = 0.6\text{ м}$, на разных участках желаемой траектории меняется от 1.5 м/с до 0.2 м/с, уменьшаясь на участках с большой кривизной, когда увеличивается отклонение НПА от желаемой траектории, и увеличиваясь на участках с малой кривизной.

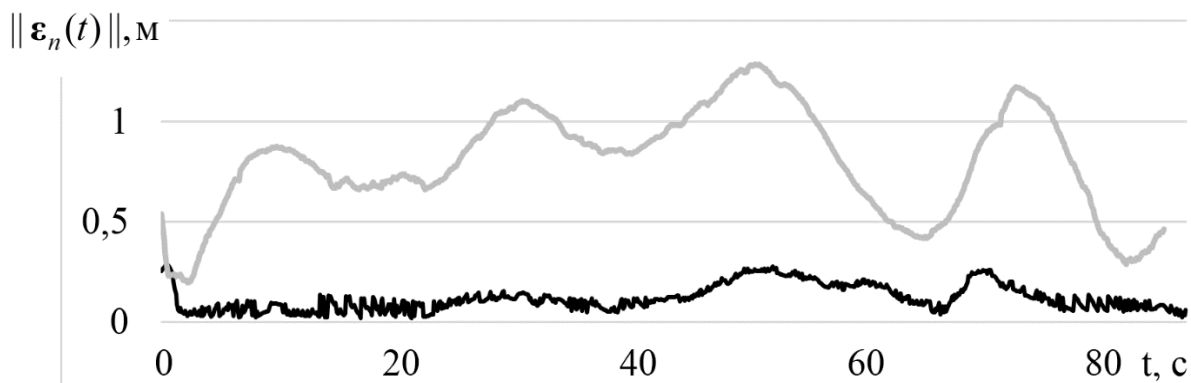


Рис. 15. Процесс изменения величины $\|\varepsilon_n(t)\|$ без использования и с использованием в СУ НПА дополнительного контура формирования $\tilde{X}^*(t)$

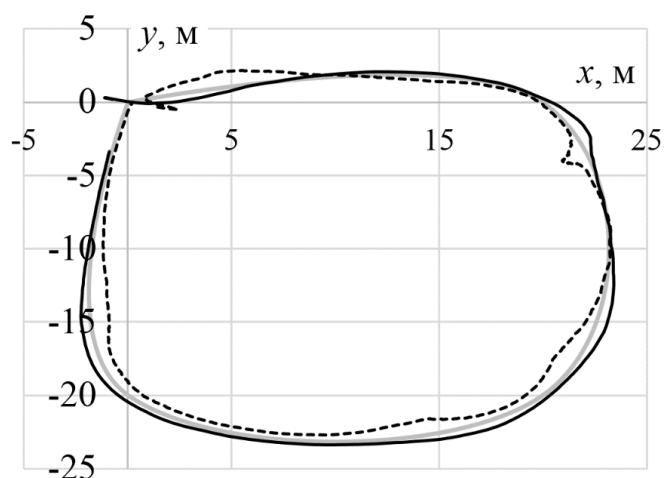


Рис. 16. Траектория движения НПА с контуром формирования $\tilde{X}^*(t)$ и автоматической настройкой программной скорости его движения

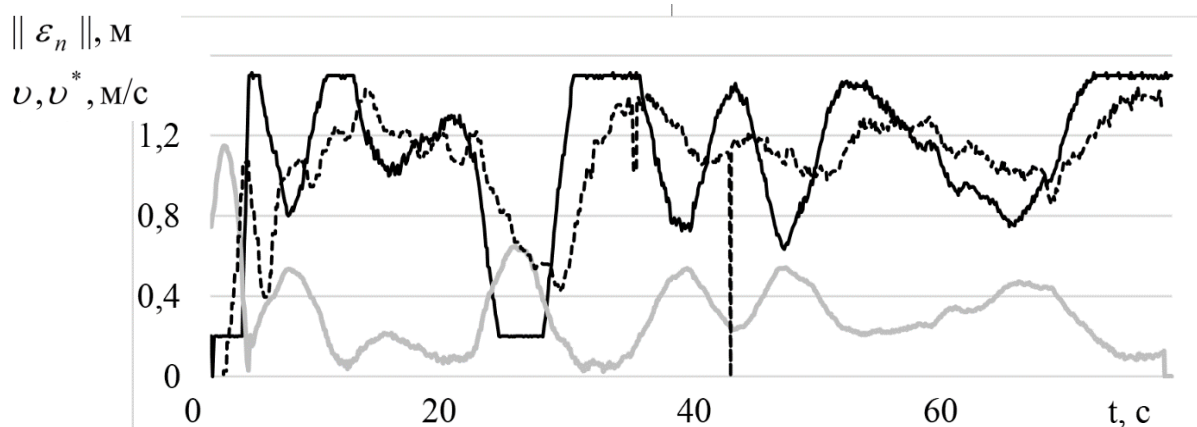


Рис. 17. Процессы изменения программной и реальной скоростей движения НПА, а также его отклонения от заданной траектории

Таким образом, результаты моделирования и экспериментальных исследований подтвердили, что разработанные в главе методы формирования программных сигналов движения НПА, позволяют синтезировать СУ, обеспечивающие и высокую

динамическую точность управления, и предельно высокую скорость движения НПА по произвольным пространственным траекториям. Причем эти СУ имеют простую реализацию, что может обеспечить их широкое применение при создании новых НПА с новыми функциональными свойствами и возможностями.

В пятой главе для реализации СУ, синтезированных на основе методов, разработанных в четвертой главе, предложен и исследован метод комплексной обработки данных, поступающих от бортовых датчиков НПА, позволяющий обеспечить обновление всей необходимой информации с требуемой частотой для успешного функционирования его СУ, а также метод идентификации параметров самого НПА, использующихся при синтезе и настройке этих СУ.

Показано, что одним из основных условий качественной работы синтезированных в диссертации СУ является обновление сигналов всех обратных связей с требуемой частотой. Однако информация, поступающая от различных датчиков НПА, имеет разную частоту обновления, которая часто оказывается много меньше требуемой частоты работы СУ. Кроме того, набор навигационно-пилотажных датчиков НПА часто недостаточен, а данные, поступающие от этих датчиков, сильно зашумлены.

Для устранения этих недостатков в главе на основе нелинейного сигматочечного фильтра Калмана разработан метод комплексирования данных, поступающих от всех бортовых навигационно-пилотажных датчиков. В этом методе используется модель кинематики НПА, описываемая уравнением (2), которая представляется в виде

$$\mathbf{Z}_{k+1} = F_{UKF}(\mathbf{Z}_k) + \boldsymbol{\chi}_k, \quad \mathbf{Y}_k = H(\mathbf{Z}_k) + \boldsymbol{\zeta}_k,$$

где $\mathbf{Z}_k \in \mathbf{R}^{18}$ - вектор состояния фильтра, включающий текущие значения ускорений, скоростей и положения НПА; $\mathbf{Y}_k \in \mathbf{R}^m$ - вектор измерений (m – количество данных, поступающих от датчиков НПА на текущем шаге дискретизации); $F_{UKF}(\mathbf{Z}_k) \in \mathbf{R}^{18}$ - вектор-функция, описывающая переход из состояния $\mathbf{Z}_k$ в $\mathbf{Z}_{k+1}$; $H(\mathbf{Z}_k) \in \mathbf{R}^m$ - вектор-функция измерения; $\boldsymbol{\chi}_k \in \mathbf{R}^n$ и $\boldsymbol{\zeta}_k \in \mathbf{R}^m$ - соответственно, векторы Гауссовских шумов системы и измерений.

Предложенный метод комплексирования позволяет формировать все функции и векторы измерений, используя данные, актуальные на текущем шаге дискретизации системы. Этот метод за счет уменьшения размерности вектора измерений позволяет значительно уменьшить вычислительную сложность и независимо от периода обновления данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков НПА, гарантирует получение информации о векторе состояния НПА с заданным периодом.

С использованием метода комплексной обработки информации в главе предложен метод идентификации параметров НПА, которые используются в процессе синтеза и исследования его СУ. Этот метод включает два этапа (см. рис. 18).

На первом происходит восстановление вектора состояния НПА с использованием данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков НПА. На втором этапе происходит идентификация параметров НПА, математическая модель которого описывается уравнениями (1). В главе показано, что модель динамики НПА (1) можно представить в виде:

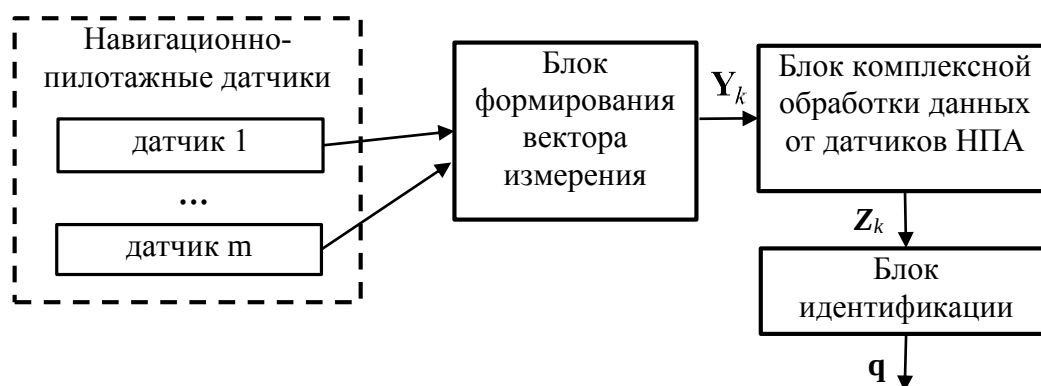


Рис. 18. Блок-схема идентификации параметров НПА

$$S(Z_k) = F(Z_k)q, \quad (17)$$

где $q \in R^{33}$ - вектор параметров НПА, включающий его присоединенные массы и моменты инерции, а также гидродинамические коэффициенты вязкого трения; $F(Z_k) \in R^{33 \times 6}$ - матрица, полученная на основе уравнений (1), элементы которой зависят от элементов вектора Z_k ; $S(Z_k) \in R^6$ - вектор функция, зависящая от вектора Z_k и не зависящая от неизвестных параметров НПА. Выражение (17) на втором этапе идентификации позволяет использовать линейный фильтр Калмана, уменьшая вычислительную сложность предложенного алгоритма в шесть раз по сравнению с известными алгоритмами решения задач подобной размерности.

В шестой главе предложен метод построения универсального моделирующего комплекса для математического и полунатурного моделирования движений НПА, позволяющего осуществить тестирование и настройку СУ НПА без проведения экспериментальных исследований.

Основными задачами моделирующего комплекса, являются визуализация движения НПА, моделирование окружающей подводной обстановки, а также детальное математическое и полунатурное моделирование НПА и программной реализации его СУ.

Отличительной особенностью указанного комплекса является возможность подключения стандартных сред моделирования для обеспечения простого задания и

редактирования математических моделей НПА и его СУ, а также для удобного визуального представления результатов моделирования. В качестве такой среды используется Matlab. Обобщенная схема сопряжения среды Matlab с СУ НПА показана на рис. 19.



Рис. 19. Обобщенная схема сопряжения среды Matlab с СУ НПА

Для совмещения среды Matlab и модели СУ НПА разработан метод автоматической синхронизации их работы. Этот метод основан на автоматическом снижении скорости работы Matlab в зависимости от разницы между машинным временем среды моделирования и реальным временем СУ НПА. Преимуществом предложенного подхода, показавшего высокую универсальность, является удобство его эксплуатации, а также возможность подключения большого числа дополнительных модулей, автоматически синхронизирующих свою работу.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Новый подход и методы синтеза СУ для высокоточного скоростного движения НПА вдоль сложных пространственных траекторий, включающих совместно действующие контуры построения псевдо траекторий и переменных программных сигналов скорости с учетом различной кривизны текущих участков траекторий.

2. Метод синтеза самонастраивающихся СУ двигателями НПА, построенный на основе их более точной модели, которая учитывает все основные эффекты взаимодействия винта с окружающей вязкой средой, что позволяет стабилизировать их параметры и описать их динамику с помощью желаемого дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, а затем добиться существенного улучшения качества управления, как отдельными двигателями, так и НПА в целом.

3. Методы синтеза адаптивных прогнозирующих нейро-нечетких СУ двигателями НПА, которые за счет применения специального подхода, используя небольшие по объему обучающие выборки, позволяют на много порядков сократить время перенастройки нейросетей, выполняя необходимые вычисления в реальном

масштабе времени на бортовых компьютерах НПА и тем самым обеспечивая заданные динамические свойства их двигателям.

4. Метод синтеза адаптивных децентрализованных СПС, работающих в вынужденном режиме и предназначенных для управления скоростями движения НПА, а также метод расчета величин шагов квантования непрерывных задающих сигналов скоростей в этих СПС, которые позволяют обеспечить их автоматическую настройку без непосредственного измерения или идентификации параметров НПА и тем самым существенно увеличить точность работы и быстродействие всей СУ НПА в целом.

5. Метод синтеза СУ для НПА с одним поворотным маршевым двигателем, позволяющей одновременно управлять движением этого НПА по пространственной траектории и обеспечивать компенсацию опрокидывающего момента, действующего на этот НПА со стороны вращающегося двигателя, а также методы формирования программных сигналов, подаваемых на электроприводы устройства ориентации маршевого двигателя НПА и методы формирования траекторий движения этого НПА, позволяющих в условиях его ограниченной маневренности точно подойти к заданной точке пространства с заданной ориентацией.

6. Методы управления движением НПА по пространственным траекториям, основанные на автоматической настройке параметров программных сигналов, задающих движение по этим траекториям, и позволяющие обеспечить предельно высокую скорость движения этих НПА по указанным траекториям при сохранении заданной динамической точности этого движения независимо от типа используемых СУ НПА.

7. Метод комплексной обработки данных, поступающих от бортовых навигационно-пилотажных датчиков НПА, построенный на основе сигма-точечного фильтра Калмана, позволяющий обеспечить обновление сигналов всех обратных связей с частотой работы СУ НПА независимо от различной частоты обновления данных, поступающих от используемых датчиков.

8. Метод точной идентификации необходимых параметров НПА, обладающий малой вычислительной сложностью и обеспечивающий возможность его реализации на типовых бортовых компьютерах НПА.

9. Новый подход к разработке универсального моделирующего комплекса, предназначенного для математического и полунатурного моделирования произвольных движений различных НПА, позволяющий использовать в процессе исследования работы программной реализации СУ НПА типовые внешние программные среды и включающий метод автоматической синхронизации вычислительных процессов между СУ НПА и средой Matlab.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Филаретов В.Ф. Синтез и исследование самонастраивающейся системы управления движителями подводного аппарата / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, **Д.А.Юхимец** // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 2000. – №4. – С. 60-64.
2. Кавалло Е. Особенности конструкции и системы управления автономного подводного аппарата с одним движителем для его точного перемещения в пространстве / В.Ф.Филаретов, Р.Микелини, **Д.А.Юхимец** // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 6. – С. 98-107.
3. Филаретов В.Ф. Создание, управление и диагностирование подводных аппаратов с одним маршевым движителем / В.Ф.Филаретов, А.Н.Жирабок, **Д.А.Юхимец** // Вестник ДВО РАН. – 2005. - № 6. - С. 166-173.
4. Кавалло Е. Особенности создания и управления автономным подводным аппаратом с одним маршевым движителем / Е.Кавалло, Р.Микелини, В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец** // Мехатроника, автоматизация управление. – 2005. – №11. – С. 21-36.
5. Филаретов В.Ф. Высокоскоростной автономный робот с одним маршевым движителем / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец** // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – Т. 4. – № 1-3. – С. 67-72.
6. Палис Ф. Применение нейрофаззи сетей для управления движителями подводных аппаратов / Ф.Палис, В.Ф.Филаретов, Ю.А.Цепковский, **Д.А.Юхимец** // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 3. – С. 25-33.
7. Филаретов В.Ф. Программный комплекс моделирования пространственного движения автономного подводного аппарата / В.Ф.Филаретов, В.А.Бобков, **Д.А.Юхимец**, С.В.Мельман, Ю.С.Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 1. – С. 8-13.
8. Палис Ф. Особенности синтеза прогнозирующих систем с нейрофаззи сетями для управления нелинейными динамическими объектами с переменными параметрами / Ф.Палис, В.Ф.Филаретов, Ю.А.Цепковский, **Д.А.Юхимец** // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 4. – С. 11-18.
9. Филаретов В.Ф. Особенности виртуального моделирования движений подводного аппарата с учетом воздействий со стороны окружающей вязкой среды / В.Ф.Филаретов, В.А.Бобков, **Д.А.Юхимец**, С.В.Мельман, Ю.С.Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 4. – С. 41-46.
10. Гузев М.А. Оценка амплитуды квантования непрерывного задающего сигнала адаптивной системы с переменной структурой / М.А.Гузев, В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец** // Информационно измерительные и управляющие системы. – 2009. – Т.7. – № 6.– С. 9-19.
11. Филаретов В.Ф. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным

- пространственным траекториям / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец** // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 99-107.
12. Филаретов В.Ф. Особенности использования программной среды «MATLAB» для визуального моделирования движений многозвенных манипуляторов/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш.Мурсалимов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 9. – С. 66-71.
13. Филаретов В.Ф. Способ формирования программного управления скоростным режимом движения подводных аппаратов по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец** // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – №4. – С.167-176.
14. Филаретов В.Ф. Разработка двухуровневых систем управления движением необитаемых подводных аппаратов по сложным пространственным траекториям / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, **Д.А.Юхимец** // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2011.–Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника».– С. 17-25.
15. Филаретов В.Ф. Верификатор для проверки миссий автономного подводного аппарата / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш.Мурсалимов // Информационно-управляющие и измерительные системы. – 2011. – Т.9. – № 11.– С. 44-51.
16. Филаретов В.Ф. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, А.Ю.Коноплин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012 – №6. – С. 47-53.
17. Филаретов В.Ф. Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш.Мурсалимов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №8. – С. 64-70.
18. Филаретов В.Ф. Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш. Мурсалимов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №10. – С. 64-70.
19. Filaretov V. Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle/ V.Filaretov, **D.Yukhimets** // International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM). – 2012. – Vol. 3. – No 3. – P. 133-141.
20. Филаретов В.Ф. Синтез адаптивной системы управления пространственным положением подводного робота / В.Ф. Филаретов, **Д.А. Юхимец** // Мехатроника. – 2001. – №1. – С. 54-58.
21. Филаретов В.Ф. Устройства и системы управления подводными роботами / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, **Д.А.Юхимец**. – М.:Наука, 2005. – 270 с.

22. Filaretov V.F. Synthesis of Underwater Robots Adaptive Velocity Control System/ V.F.Filaretov, **D.A. Ukhimets**// Proc. of the 8th IFAC Symp. on Computer Aided Control System Design, Salford, UK. – 2000. – P. 216-219.
23. Filaretov V. F. Adaptive Control System with Variable Structure for Underwater Robot/ V.F.Filaretov, **D.A. Ukhimets**// Proc. of the 12th DAAAM Symp. on Intelligent Automation and Manufacturing, Jena, Germany. – 2001. – P. 141-142.
24. Micheline R. Path Guidance and Attitude Control of a vectored Thruster AUV/ R.Micheline, E.Cavallo, V.Filaretov, **D.Ukymets** // Proc. of 7-th Int. Biennial ASME Conf. on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA), Manchester, UK. – 2004. – P. 1-8.
25. Micheline R. Features of vectored-thruster underwater vehicle control / R.Micheline, E.Cavallo, V.Filaretov, **D.Ukhimets** // Proc. of 14 IFAC Congress, Praha, Czech Republic. –2005. – P. 1- 6.
26. Filaretov V.F. Applying Neural Network to Inverse Kinematics Task of Spherical Parallel Manipulator / V.F.Filaretov, **D.A.Yukhimets** // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation, Harbin, China. – 2007. – Vol. IV. – P. 2865-2870.
27. Filaretov V.F. Some features of vectored thruster autonomous underwater vehicle control/ V.F.Filaretov, **D.A. Yukhimets** // Proc. of the 18th DAAAM Int. Symp. «Intelligent Manufacturing & Automation». Zadar, Croatia. – 2007. – P. 821-822.
28. Filaretov V.F. Predictive Trajectory Planning of Vectored Thruster Underwater Vehicle with the Use of the Neural Network / V.F.Filaretov, **D.A.Yukhimets** // Proc. of the IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Xian, China. – 2008. – P. 1242-1247.
29. Filaretov V.F. Synthesis of the automatic correction system of the desired signal parameters/ V.F.Filaretov, **D.A.Yukhimets** // Proc. of the 19th of Intern. DAAAM Symp. Trnava, Slovakia. – 2008. – P. 489-490.
30. Filaretov V.F. Synthesis of the control system of vectored thruster underwater vehicle spatial motion/ V.F.Filaretov, **D.A.Yukhimets** // Proc. of the 8th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp., Bangkok, Thailand. – 2008. – P. 8-13.
31. Filaretov V. The synthesis of system for automatic formation of underwater vehicle's velocity/ V.F.Filaretov, **D.A.Yukhimets** // Proc. of the 20-th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education", Vienna, Austria. – 2009. – P. 1155-1156.
32. Filaretov V. Synthesis of Automatic System for Correction of Program Signal of the Underwater vehicle's Movement on Spatial Trajectory / V.Filaretov, **D.Yukhimets** // CD-ROM Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2010, Seoul KINTEX, Korea. – 2010. – P.126-131.
33. Filaretov V. Matlab using in software for visual simulation of multilink manipulators dynamics / V.Filaretov, **D.Yukhimets**, E.Mursalimov // Proc. of First Russia and Pacific conf. on Computer Technology and Applications, Vladivostok, Russia. – 2010. – P. 311-316.

34. Filaretov V. Synthesis of the system for automatic formation of underwater vehicle's program velocity / V.Filaretov, **D.Yukhimets** // Proc. of The 8th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2011), Noordwijkerhout, Netherlands. – 2011. – Vol.2. – P. 439-444.

35. Filaretov V. The method of identification of underwater vehicle mathematical model parameters / V.Filaretov, **D.Yukhimets**, E.Mursalimov // The 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Berlin, Germany. – 2013. – P. 885-890.

36. Филаретов В.Ф. Особенности определения величины шага квантования входного сигнала адаптивной системы с переменной структурой/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец** // Сб. докладов IV Всероссийской конференции «Математика, информатика, управление». Иркутск. – 2005. – С. 1-8.

37. Филаретов В.Ф. Особенности формирования траектории автономного подводного аппарата с одним поворотным движителем/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**// Материалы II междун. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток. – 2007. – С. 111-116.

38. Филаретов В.Ф. Предективное формирование траектории подводного аппарата с одним поворотным движителем/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**// Сб.трудов 5-ой научно-технической конф. «Мехатроника, автоматизация, управление». С.-Петербург. – 2008. – С.306-309.

39. Филаретов В.Ф. Синтез системы автоматического формирования скорости движения подводного робота/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**// Материалы международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы». Дивноморское. – 2009. – С. 59- 62.

40. **Юхимец Д.А.** Синтез систем автоматического формирования программных сигналов движения подводных аппаратов / Д.А.Юхимец // Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления». Владивосток: ИАПУ ДВО РАН. – 2011. – С. 540-545.

41. Филаретов В.Ф. Разработка методов и алгоритмов управления движением необитаемых подводных аппаратов по сложным пространственным траекториям при существенных изменениях их параметров/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, А.В.Лебедев// Материалы международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника – 2011». С-Пб. – 2011. – С. 175-183.

42. Филаретов В.Ф. Экспериментальное исследование системы адаптивного формирования программных сигналов движения подводных аппаратов/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш.Мурсалимов, Jen-Hwa Guo, Huang Shengwei // Материалы 6-ой Всероссийской мультikonференции МКПУ. – 2013. – С.215-219.

43. Филаретов В.Ф. Синтез и исследование системы контурного управления движением подводного аппарата / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, А.Ф.Щербатюк,

Э.Ш.Мурсалимов, И.С.Туфанов // Труды всероссийского совещания по проблемам управления, Москва. – 2014. – С.3338-3350.

44. Устройство для управления движителем подводного робота: пат. № 2147985 РФ. / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, **Д.А.Юхимец**; заявитель и правообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 99114266; заявл. 29.06.1999; опубл. 27.04.2000, Бюл. №12.

45. Устройство для управления движителем подводного робота: пат. № 2209718 РФ / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 2001100804/02; заявл. 09.01.2001; опубл. 20.12.2002, Бюл. №22.

46. Адаптивная система с переменной структурой для управления скоростью движения подводного робота: пат. № 2215318 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 2002122450/02; заявл. 19.08.2002; опубл. 27.10.2003, Бюл. № 30.

47. Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории: пат. №2445670 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 2010127999/08; заявл. 06.07.2010; опубл. 20.03.2012, Бюл. № 8.

48. Устройство формирования программных сигналов управления: пат. №2453891 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 2010148962/08; заявл. 30.11.2010; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 24.

49. Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории: пат. №2451970 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ДВФУ. – 2011104761/08; заявл. 09.02.2011; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.

50. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов: пат. № 2523186 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ДВФУ. – 2013126315/08; заявл. 07.06.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. №20.

51. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов: пат. № 2523187 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ДВФУ. – 2013126316/08; заявл. 07.06.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. №20.

52. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов: пат. № 2522855 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, А.А.Кацурин; заявитель и патентообладатель ДВФУ. – 2013126314/08; заявл. 07.06.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. №20.

53. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов: пат. № 2522856 РФ / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**; заявитель и патентообладатель ДВФУ. – 2013126318/08; заявл. 07.06.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. №20.

54. Блок для синхронизации и обмена данными Matlab\Simulink со сторонним программным обеспечением: свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2012614469 / В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш. Мурсалимов; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 2012612550; заявл. 05.04.2012; опубл. 18.05.2012 .

55. Модуль для комплексной обработки данных с датчиков с использованием нелинейного фильтра Калмана: свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2012617265/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш. Мурсалимов; заявитель и патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. – 2012614996; заявл. 19.06.2012; опубл. 13.08.2012.

56. Программа для расчета гладкой траектории движения для мехатронного объекта на основе сплайна Безье: свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2014614570/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш. Мурсалимов; заявитель и патентообл. ИАПУ ДВО РАН. –2014610837; заявл. 07.02.2014; опубл. 29.04.2014.

57. Следящий режим движения мехатронного объекта по заданной траектории с заданной скоростью: свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2014614566/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш.Мурсалимов; заявитель и патентообладатель ДВФУ. -2014610849; заявл. 07.02.2014; опубл. 29.04.2014.

58. Программа для расчета отклонения положения мехатронного объекта от заданной гладкой траектории: свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2014614569/ В.Ф.Филаретов, **Д.А.Юхимец**, Э.Ш.Мурсалимов; заявитель и патентообладатель ДВФУ. -2014610850; заявл. 07.02.2014; опубл. 29.04.2014.

Юхимец Дмитрий Александрович

Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления
скоростным движением подводных аппаратов

Автореферат

Подписано к печати 25.05.2015	Усл.п.л.2.0	Уч.-изд. л. 1.7
Формат 60×84/16	Тираж 100	Заказ

Издано ИАПУ ДВО РАН. г. Владивосток, ул.Радио, 5

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН
г. Владивосток, ул.Радио, 5