

**Лебедев Александр Васильевич**

**МЕТОДЫ СИНТЕЗА РОБАСТНОГО И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ**

Специальность: 05.13.01 – системный анализ, управление  
и обработка информации

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Владивосток

2011

Работа выполнена в лаборатории робототехнических систем Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Филаретов Владимир Федорович  
заслуженный деятель науки РФ  
заслуженный изобретатель РФ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Подураев Юрий Викторович

доктор технических наук, профессор  
Девятисильный Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор  
Карпачев Александр Афанасьевич

Ведущая организация: Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН (г. Москва)

Защита состоится « 04 » июля 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета Д 005.007.01,  
д.т.н.



В.А. Бобков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Создание высококачественной подводной робототехники является одним из приоритетных направлений в области исследования и освоения Мирового океана. Важным элементом в арсенале соответствующих технических средств являются необитаемые подводные аппараты (НПА), позволяющие исключить непосредственное присутствие человека в зоне подводных работ. По мере расширения круга и усложнения задач, решаемых НПА, повышаются и требования к системам управления (СУ) этими объектами. Для выполнения сложных маневров в рабочей зоне СУ должна обеспечить точное движение НПА по заданной пространственной траектории с заданной (возможно, изменяющейся) ориентацией. В других случаях (например, при работе подводного манипулятора и т.д.) требуется точное позиционирование и стабилизация аппарата-носителя в заданной точке пространства с компенсацией всех возможных внешних возмущений.

В указанных режимах (в отличие от задачи терминального управления, когда достаточно лишь гарантировать перемещение НПА в заданную точку или даже в район по произвольной траектории) на качество функционирования СУ существенное влияние оказывают факторы, связанные с нелинейностью, нестационарностью и многосвязностью полной динамической модели подводного аппарата. Прежде всего это априорная неопределенность и значительные изменения массо-инерционных и гидродинамических характеристик НПА, наличие сильного взаимовлияния между степенями подвижности и неконтролируемых внешних воздействий со стороны вязкой окружающей среды. При использовании традиционных линейных регуляторов указанные факторы приводят к значительному снижению качества управления, а зачастую вся система в целом теряет работоспособность.

Значительный вклад в развитие современной подводной робототехники и методов синтеза систем управления НПА внесли отечественные и зарубежные ученые М.Д.Агеев, Е.Н.Пантов, В.С.Ястребов, J.V.Amerongen, T.I.Fossen, J.-J.E.Slotine, T.J.Tarn, D.R.Yoerger и др.

В настоящее время для управления нестационарными динамическими объектами успешно используются адаптивные и робастные СУ, которые обеспечивают высокие показатели качества и инвариантность по отношению к изменяющимся параметрам. Однако при несомненных достоинствах известных подходов их применение при синтезе СУ НПА весьма ограничено и зачастую наталкивается на значительные трудности. Так, методы параметрической адаптации не позволяют эффективно парировать быстрые изменения параметров НПА в широких пределах. Многие СУ синтезируются на базе неадекватных линеаризованных или упрощенных нелинейных моделей НПА, а также имеют заведомо заниженное быстродействие. Кроме того, большинство известных подходов не учитывает влияние на качество функционирования СУ неидеальностей исполнительных элементов и ограничений управляющих сигналов. В целом применение адаптивного и робастного подходов при синтезе

СУ подводными аппаратами весьма затруднено, а сложность синтезируемых систем в большинстве случаев (особенно при использовании многомерной централизованной модели НПА) остается слишком высокой, что является серьезным препятствием на пути их практической реализации.

Как показывают результаты многочисленных исследований, наиболее простые и эффективные законы управления многосвязными нестационарными нелинейными объектами удается сформировать в классе систем с разрывными управляющими сигналами, к которым относятся системы с переменной структурой (СПС) и самонастраивающиеся системы (СНС) с эталонной моделью. Основы построения таких СУ заложены в трудах российских ученых Ю.А.Борцова, С.В.Емельянова, Б.Н.Петрова, В.Ю.Рутковского, В.И.Уткина. Дальнейшему развитию методов синтеза СПС и СНС посвящены работы Ю.Ю.Воронина, В.П.Грехова, Д.Б.Изосимова, В.Ф.Филаретова, К.Р.Goheen, E.R.Jefferys, W.Li, J.-J.E.Slotine, D.R.Yoerger и др.

В этих системах инвариантность показателей качества к изменению параметров объекта управления (ОУ) и внешних воздействий, а также компенсация нежелательного взаимовлияния между каналами управления обеспечивается за счет специфических свойств скользящих режимов или быстрой сигнальной самонастройки по эталонной модели.

В ряде случаев при синтезе СПС и СНС целесообразно построение систем децентрализованного управления с использованием предварительной декомпозиции математических моделей ОУ. Однако такие СУ успешно функционируют только при малых скоростях движения объектов, когда взаимовлияние между каналами управления достаточно мало. В противном случае для сохранения высоких показателей качества следует формировать централизованное управление на базе полной многомерной модели объекта.

В связи с этим является актуальной рассматриваемая в диссертации проблема разработки и теоретического обоснования различных новых методов синтеза адаптивных и робастных систем управления пространственным движением НПА, основанных на указанных принципах. Весьма важен учет при синтезе СУ реальных ограничений мощности и неидеальностей усилительных и исполнительных элементов. Эффективным подходом является объединение принципов робастности и адаптации в рамках единой системы управления.

Сравнительная простота реализации и эффективность создаваемых законов управления позволяет использовать их при проектировании НПА, предназначенных для сложных и точных перемещений в водной среде.

**Целью диссертационной работы** является создание, теоретическое обоснование и развитие новых методов синтеза робастных и адаптивных систем, позволяющих за счет использования разрывных управляющих сигналов обеспечивать требуемые показатели качества управления НПА и их инвариантность в условиях неопределенности или непрерывного быстрого изменения трудно идентифицируемых параметров этих объектов и внешних воздействий, а также наличия неидеальностей и ограничений мощности усилительных и исполнительных элементов.

**Задачи исследования.** Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- создание методов синтеза систем с нелинейной коррекцией и сигнальной настройкой по эталонной модели для централизованного и децентрализованного управления скоростью движения НПА, а также локальных подсистем управления движителями подводного аппарата;

- разработка и развитие методов синтеза многоканальных СПС, в том числе с использованием нелинейных корректирующих устройств, предназначенных для централизованного и децентрализованного управления скоростью, пространственным положением и ориентацией НПА;

- создание методов синтеза систем с разрывным управлением с учетом неидеальностей переключающих элементов и ограничений мощности исполнительных устройств, определение особенностей функционирования указанных систем в этих условиях и модификация законов управления с целью обеспечения их работоспособности в реальных условиях эксплуатации;

- разработка и теоретическое обоснование методов адаптивной подстройки параметров явных и неявных эталонных моделей в системах с разрывным управлением для обеспечения максимального быстродействия;

- разработка метода формирования программных сигналов при управлении движением НПА в пространстве, обеспечивающего автоматическое изменение скоростного режима этого движения при выходе исполнительных элементов на ограничения;

- проектирование на основе созданных методов и исследование в различных режимах функционирования новых регуляторов, обеспечивающих повышенное быстродействие и динамическую точность управления НПА.

**Методы исследования.** Проводимые в диссертации теоретические и практические исследования базируются на методах теории автоматического управления, теории адаптивных систем и систем с переменной структурой, теории движения НПА, теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, численных методах исследования динамических систем.

**Достоверность** полученных результатов обеспечена корректным выполнением математических выкладок и преобразований, строгим доказательством основных теоретических выводов и результатов, а также подтверждена численным моделированием и экспериментальными данными.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке теоретических основ и методов синтеза многоуровневых робастных и адаптивных систем с разрывными управляющими сигналами для управления пространственным движением НПА в условиях быстрого и значительного изменения параметров объекта с учетом взаимовлияния между его степенями подвижности, а также неидеальностей и ограничений мощности усилительных и исполнительных элементов.

Предложен новый метод синтеза нелинейных корректирующих устройств для движителей и для НПА в целом, которые обеспечивают высокие показатели качества СУ при номинальных параметрах объектов управления.

Разработаны методы построения СНС для управления отдельным движителем, а также скоростью движения НПА (в централизованном и децентрализованном вариантах), основанные на применении сигнальной самонастройки по эталонной модели и позволяющие компенсировать отрицательное влияние быстрых изменений параметров ОУ на качество их функционирования.

Разработаны методы синтеза СПС для децентрализованного и централизованного управления скоростью и положением НПА в пространстве, обеспечивающие за счет формирования скользких режимов робастность к изменяющимся параметрам объекта (без их идентификации).

Предложены оригинальные модификации законов управления в многоканальных СНС и СПС, позволяющие компенсировать сильное взаимовлияние между каналами управления НПА и воздействие со стороны вязкой среды. Для указанных систем впервые сформулированы и доказаны условия устойчивости процесса самонастройки, а также возникновения и существования режимов скольжения с учетом особенностей нелинейных многомерных и многосвязных ОУ.

Разработана методика расчета регуляторов с учетом ограничений сигналов управления, обеспечивающая наилучшие показатели качества при изменении параметров ОУ в заданных диапазонах. Получена оценка робастности СПС при наличии неидеальностей переключающих элементов. Установлены и строго обоснованы зависимости между характеристиками разрывных управляющих сигналов и текущим состоянием СНС и СПС.

Предложены методы адаптивной подстройки управляющих устройств в СНС и СПС, основанные на указанных зависимостях. Это позволило расширить диапазон обрабатываемых входных воздействий и уменьшить нагрузку на исполнительные элементы в благоприятных режимах работы СНС, а также существенно повысить быстродействие децентрализованных и централизованных СПС за счет более полного использования запаса мощности движителей (без идентификации текущего состояния объекта).

Разработан новый метод формирования пространственной траектории движения НПА, основанный на дополнительной коррекции программных сигналов и позволяющий автоматически уменьшать скорость этого движения при недостаточном ресурсе мощности в некоторых каналах управления.

**Практическая ценность и реализация результатов диссертации.** На основе предложенных теоретических подходов и методов созданы законы управления и конкретные структуры робастных и адаптивных регуляторов и СУ НПА, которые позволяют увеличить точность выполнения ими заданных технологических операций в вязкой жидкости и значительно повысить производительность в большинстве режимов эксплуатации.

Проведенные исследования включались в основные направления научно-исследовательских работ ИАПУ ДВО РАН. Они выполнялись 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.), а также проектов РФФИ, программ Президиума и Отделения РАН, проектов ДВО РАН. Отдельные результаты диссертации используются в научных исследованиях Института автоматики и процессов управления ДВО РАН и в учебном процессе Дальневосточного федерального университета в курсах “Теория автоматического управления” и “Системы управления роботами”.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: The 7th International Conference on Advanced Robotics (Catalonia, Spain, 1995), The Fourth ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems (Moscow, Russia, 1998), Третья международная конференция: Электромеханика и электротехнологии (Клязьма, 1998), Международная конференция по проблемам управления (Москва, 1999), The European Control Conference (Karlsruhe, Germany, 1999), The International Conference on Automation, Control and Information Technology (Novosibirsk, Russia, 2002, 2005), The International Conference on Intelligent Systems and Control (Tsukuba, Japan, 2002, Honolulu, USA, 2004), The ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (New Orleans, Louisiana, 2002), The International Scientific Forum AIMS for Future of Engineering Science (Paris, France, 2004, Hong-Kong, China, 2005), The Sixth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (Vladivostok, Russia, 2004), Дальневосточная математическая школа-семинар им. акад. Е.В.Золотова (Владивосток, 2005, 2008), IV Всероссийская конференция “Математика, информатика, управление” (Иркутск, 2005), The 6th Asian Control Conference (Bali, Indonesia, 2006), The 16th International Conference on Control Systems and Computer Science (Bucharest, Romania, 2007), VIII Международная научно-техническая конференция “Кибернетика и высокие технологии XXI века” (Воронеж, 2007), IX Международная Четаевская конференция “Аналитическая механика, устойчивость и управление движением” (Иркутск, 2007), The IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (Harbin, China, 2007, Changchun, China, 2009, Xi’an, China, 2010), The Ninth International Conference on Control and Applications (Montreal, Canada, 2007), The IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Zurich, Switzerland, 2007, Xian, China, 2008), II Международная конференция “Технические проблемы освоения Мирового океана” (Владивосток, 2007), V Международная конференция по автоматизированному электроприводу (Санкт-Петербург, 2007), X международный семинар им. Е.С.Пятницкого “Устойчивость и колебания нелинейных систем управления” (Москва, 2008), Международная научно-техническая конференция “Мехатроника, автоматизация, управление” (Дивноморское, 2009), 16 Міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика-2009” (Чернівці, Україна, 2009), The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (Vladivostok, Russia, 2010), Дальневосточная научно-практическая конференция “Проблемы транспорта Дальнего Востока” (Владивосток, 1995, 1997, 2001, 2003, 2005, 2007), Научно-техническая

конференция ДВГТУ (Владивосток, 1994, 1995), Научная конференция ДВГТУ. Вологодские чтения (Владивосток, 1999, 2007, 2008).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликованы 79 научных работ, в том числе 10 статей в журналах из списка ВАК, 2 монографии и 12 патентов на изобретения.

**Личный вклад.** Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах [1-13,26,27,29-32,35-45] автором диссертации разработаны методы синтеза различных типов робастных и адаптивных систем управления, проведено теоретическое обоснование этих методов и численное моделирование синтезированных СУ. В работах [14-25] предложены конкретные структуры управляющих устройств на основе разработанных методов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание работы изложено на 315 страницах машинописного текста, она содержит 67 рисунков. Список литературы включает 295 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы синтеза систем с разрывным управлением для необитаемых подводных аппаратов, сформулированы цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и ее содержание по главам, перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан подробный анализ существующих методов и систем управления сложными нелинейными динамическими объектами в условиях параметрической неопределенности и нестационарности. Рассмотрены методы описания динамики необитаемых подводных аппаратов (НПА) и типы систем управления НПА. На основе проведенного анализа определены основные подходы к решению проблемы синтеза систем управления НПА: разработка самонастраивающихся систем с эталонными моделями (СНС) и систем с переменной структурой (СПС), в том числе и с элементами адаптации. Конкретизирована постановка задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы формирования различных типов математических моделей НПА, предложен новый подход к синтезу его СУ и разработан метод построения желаемых траекторий движения НПА в водной среде.

Динамика пространственного движения необитаемого подводного аппарата как свободного твердого тела в вязкой жидкости с учетом взаимосвязи между проекциями его линейной и угловой скорости на оси абсолютной и связанной систем координат (СК) определяется системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений, которые записываются в матричной форме следующим образом:



$$M(t)\dot{\mathbf{v}} + (C(\mathbf{v}, t) + D(\mathbf{v}, t))\mathbf{v} + \mathbf{f} = \boldsymbol{\tau}_\delta, \quad (1)$$

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

где  $M(t)$  – матрица инерции,  $C(\mathbf{v}, t)$  – матрица кориолисовых и центробежных сил,  $D(\mathbf{v}, t)$  – матрица вязкого трения,  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$  – блочно-диагональная матрица преобразования координат,  $\mathbf{x}$  – вектор положения и ориентации НПА в абсолютной СК,  $\mathbf{v}$  – вектор проекций линейной и угловой скорости НПА на оси связанной СК,  $\mathbf{f}$  – вектор внешних возмущений (в т.ч. гидростатических сил и моментов),  $\boldsymbol{\tau}_\delta$  – вектор сил и моментов движителей.

Здесь и далее размерность всех матриц  $6 \times 6$ , размерность векторов  $6 \times 1$ . Матрицы  $M$ ,  $C$  и  $D$  включают параметры НПА, изменяющиеся во времени в процессе его движения (присоединенные массы и моменты инерции, коэффициенты вязкого трения и т.д.).

Как показывают результаты многочисленных исследований, нелинейная динамика движителей оказывает существенное влияние на качество функционирования СУ НПА. В качестве базовой математической модели отдельного движителя принимается следующая система уравнений:

$$J_\delta \dot{\omega}_\delta + k_m k_w R_\delta^{-1} \omega_\delta + k_\tau \omega_\delta |\omega_\delta| = k_m k_y R_\delta^{-1} u, \quad \boldsymbol{\tau}_\delta = k_\tau \omega_\delta |\omega_\delta|, \quad (3)$$

где  $J_\delta$  – момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенного момента инерции жидкости,  $R_\delta$  – активное сопротивление якорной цепи электродвигателя постоянного тока,  $k_m$ ,  $k_w$  – коэффициенты момента и противо-ЭДС электродвигателя,  $k_y$  – коэффициент усиления усилителя мощности,  $k_\tau$  – коэффициент вязкого трения винта,  $\omega_\delta$  – скорость вращения вала двигателя,  $k_\tau$  – коэффициент тяги,  $\boldsymbol{\tau}_\delta$  – сила тяги движителя,  $u$  – сигнал управления движителем соответствующей степени свободы.

Параметры движителя  $J_\delta$  и  $k_\tau$  могут изменяться в заданных диапазонах. В работе рассматривается и более сложная модель движителя, учитывающая ряд особенностей взаимодействия винта с вязкой жидкостью, в частности, изменение шага винта при реверсе, влияние скорости движения НПА на упор, создаваемый винтом, а также профильные потери винта.

В работе развиваются два подхода к синтезу СУ НПА, основанные на принципах централизованного и децентрализованного управления сложным многомерным объектом. Метод синтеза систем централизованного управления НПА базируется на непосредственном использовании полной модели его динамики (1), (2). При синтезе систем децентрализованного управления производится декомпозиция полной модели (1) с выделением уравнений, описывающих изменение каждой координаты НПА. Согласно этому методу система (1) разбивается на шесть сепаратных подсистем, соответствующих отдельным степеням свободы НПА. В каждой из них полностью сохраняются все взаимовлияния и взаимодействия с остальными пятью подсистемами, которые имеют место в процессе произвольного пространственного движения НПА, а также воздействия со стороны окружающей вязкой среды.

В частности, любая из трех подсистем, соответствующих линейным степеням свободы НПА, описывается уравнением:

$$m\dot{v} + d_1v + d_2v|v| + f_v = \tau_\sigma, \quad (4)$$

где  $m$  – масса НПА с учетом присоединенной массы жидкости по соответствующей степени свободы,  $d_1, d_2$  – коэффициенты вязкого трения НПА (в зависимости от режима движения один из них принимается равным нулю),  $f_v$  – обобщенная функция, включающая все внешние воздействия на данную подсистему и внутренние взаимодействия между подсистемами,  $v$  – проекция вектора скорости НПА на одну из осей связанной СК.

Проведенные исследования показали эффективность применения метода поэтапного синтеза СУ НПА, в соответствии с которым последовательно синтезировались подсистемы (контуры) управления движительным комплексом (ДК), скоростью (режим управления скоростью) и положением (режим управления положением) подводного аппарата, как показано на рис. 1 (здесь УУС и УУП – устройства управления скоростью и положением НПА,  $v_d, x_d$  – вектора задающих сигналов по скорости и положению НПА). Указанный подход позволил упростить процедуру синтеза и применить на каждом этапе различные (наиболее эффективные) законы и способы управления.

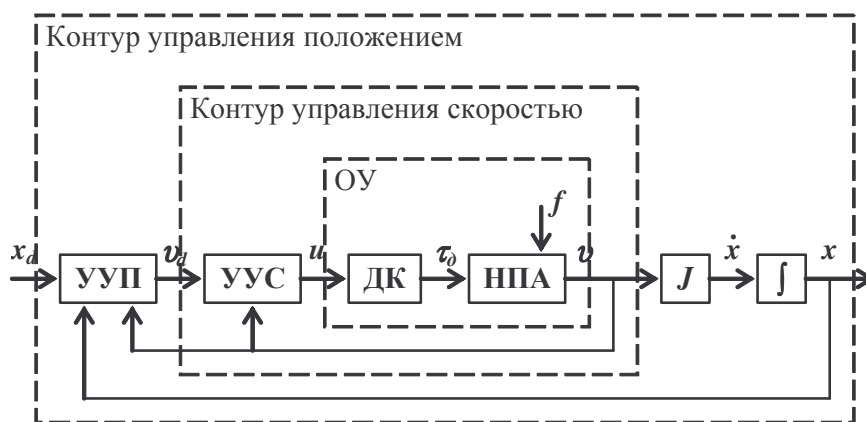


Рис. 1. Подсистемы управления НПА

Дополнительной проблемой при синтезе СУ является формирование таких траекторий движения НПА (т.е. законов изменения вектора задающих сигналов  $x_d$ ) и скоростных режимов движения НПА по этим траекториям, которые могут быть реализованы при ограниченной мощности движителей.

В качестве одного из подходов к решению указанной проблемы предложено задавать желаемую траектория движения НПА в виде некоторой пространственной кривой, которая в абсолютной СК однозначно определяется двумя уравнениями  $y = g_y(x)$  и  $z = g_z(x)$ , где  $x, y, z$  – координаты центра масс НПА,  $g_y(x), g_z(x)$  – желаемые функции переменной  $x$ .

При этом в качестве дополнительных требований к функциям  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ , удовлетворяющим указанным уравнениям, задается желаемый закон изменения модуля  $v$  вектора скорости НПА при движении по траектории, а также ограничения, накладываемые на проекции вектора ускорения  $\ddot{x}(t)$ ,  $\ddot{y}(t)$ ,  $\ddot{z}(t)$  на оси абсолютной СК:

$$v = g_v(t), \quad (5)$$

$$|\ddot{x}(t)| \leq a_{x\max}, \quad |\ddot{y}(t)| \leq a_{y\max}, \quad |\ddot{z}(t)| \leq a_{z\max}, \quad (6)$$

где  $g_v(t)$  – желаемая функция времени,  $a_{x\max}$ ,  $a_{y\max}$ ,  $a_{z\max}$  – максимально возможные значения практически реализуемых величин проекций ускорения.

Показано, что искомая функция  $x(t)$ , обеспечивающая желаемый закон (5) изменения модуля скорости движения НПА, является решением уравнения  $\dot{x}(t) = g_v(t) / \sqrt{\Phi(x)}$ , где  $\Phi(x) = 1 + (g'_y(x))^2 + (g'_z(x))^2$ . Остальные функции  $y(t) = g_y(x(t))$  и  $z(t) = g_z(x(t))$  легко определяются путем подстановки полученного выражения для  $x(t)$  в уравнения траектории.

Если желаемый скоростной режим движения  $g_v(t)$  требует слишком больших ускорений (т.е. неравенства (6) не выполнимы), должно быть обеспечено его автоматическое изменение таким образом, чтобы исключить нарушение неравенств (6), не искажая при этом желаемую траекторию.

Для решения этой задачи разработан способ коррекции сигнала  $g_v(t)$  при движении НПА по сформированной траектории и в результате синтезировано двухконтурное устройство формирования сигналов  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ . В дальнейшем они используются в качестве задающих сигналов для подсистем управления по каждой степени подвижности НПА.

Математическая модель подводного аппарата (1), (2) с учетом уравнений динамики движителей (3) является многомерной, существенно нелинейной, нестационарной, содержит перекрестные связи и неконтролируемые внешние возмущения со стороны вязкой среды. В связи с этим синтез систем управления НПА представляет собой весьма сложную как в теоретическом, так и в практическом плане проблему. Ее решение предлагается искать в классе многомерных робастных и адаптивных систем.

**В третьей главе** синтезированы и исследованы СНС с эталонными моделями для отдельных подсистем и всего подводного аппарата в целом.

Система уравнений (3), описывающая динамику каждого движителя, является весьма сложной, существенно нелинейной и нестационарной. Поэтому задача синтеза адаптивной СУ движительным комплексом решается в два этапа. Вначале разрабатывается специальный нелинейный регулятор, предназначенный для компенсации нелинейностей при некоторых фиксированных (номинальных) значениях  $J_{\partial n}$  и  $k_{\partial n}$  переменных параметров  $J_{\partial}$  и  $k_{\partial}$ . Затем синтезируется дополнительный контур самонастройки по эталонной модели, позволяющий исключить отрицательное влияние на качество процесса управления отклонений этих параметров от номинала.

Желаемое линейное уравнение динамики движителя задается в виде:

$$\dot{\tau}_d = (k_d \tau_d - \tau_d) / T_d, \quad (7)$$

где  $k_d$ ,  $T_d$  – желаемые коэффициент усиления и постоянная времени движителя, соответственно.

Показано, что для придания движителю желаемых динамических свойств (7) необходимо сформировать следующий закон управления  $u_d$ :

$$u_d = \left( \frac{J_{\text{дн}}(k_d \tau_d - k_\tau \omega_d |\omega_d|) / (2T_d k_\tau) + z}{|\omega_d|} + \frac{k_m k_w}{R_d} \omega_d + k_{\text{вн}} \omega_d |\omega_d| \right) \frac{R_d}{k_m k_y}, \quad (8)$$

где  $z$  – дополнительный сигнал самонастройки.

Управление (8) при равенстве нулю сигнала  $z$  гарантирует, что движение нелинейной системы (3) при заданных постоянных значениях  $J_d = J_{\text{дн}}$ ,  $k_\tau = k_{\text{вн}}$  будет происходить в точном соответствии с решением желаемого линейного дифференциального уравнения (7).

Для компенсации отклонения параметров движителя от его заданных номинальных значений ( $J_d \neq J_{\text{дн}}$  и  $k_\tau \neq k_{\text{вн}}$ ) и, соответственно, стабилизации его динамических свойств на заданном уровне, определяемом желаемым дифференциальным уравнением (7), необходимо с помощью сигнала  $z$  поддерживать нулевой ошибку  $e_m = \tau_m - \tau_d$  системы относительно эталонной модели ( $\tau_m$  – сигнал на выходе модели), структура которой определяется в точном соответствии с уравнением желаемого процесса управления (7).

С помощью метода Ляпунова получен закон изменения сигнала самонастройки, обеспечивающий устойчивость положения равновесия  $e_m = 0$ :

$$z = h \text{sign}(e_m), \quad (9)$$

$$h = k_{h\tau} |\dot{\tau}_m| + k_{h\omega} |\omega_d^3|, \quad (10)$$

где  $k_{h\tau} > 0$ ,  $k_{h\omega} > 0$  – постоянные коэффициенты.

Сформированы условия устойчивости процесса самонастройки в виде неравенств для коэффициентов управляющего устройства  $k_{h\tau}$  и  $k_{h\omega}$ .

Применение разработанного закона управления (8) – (10) позволяет описывать движитель уравнением (7) и в дальнейшем использовать эту упрощенную модель при синтезе других подсистем управления НПА.

В соответствии с предложенной процедурой на этапе синтеза подсистемы управления скоростью движения НПА ставится задача добиться инвариантности к изменяющимся параметрам объекта и внешним возмущениям. Для решения этой задачи разработаны различные варианты СУ с нелинейной коррекцией и сигнальной самонастройкой по эталонной модели, причем предполагалось, что инерционность движительного комплекса с учетом

его локальной подсистемы управления (8) – (10) пренебрежимо мала по сравнению с подводным роботом в целом (что вполне согласуется с техническими данными многих НПА).

Первый вариант СНС реализует принцип децентрализованного управления и строится на основе математической модели НПА (4), полученной с применением метода декомпозиции, с учетом квадратичного характера зависимости упора движителя  $\tau_0$  от скорости вращения винта  $\omega_0$ .

Желаемое движение объекта и динамика эталонной модели задаются уравнением линейного апериодического звена с постоянной времени  $T_{жс}$  и коэффициентом усиления  $k_{жс}$ , аналогичным (7). Особенности нелинейного ОУ приводят к необходимости построения специальной нелинейной коррекции для обеспечения его желаемого движения при номинальных параметрах  $m = m_n$ ,  $d_2 = d_{2n}$  и отсутствии внешних возмущений. Отклонения параметров от номинальных значений и влияние внешних возмущений компенсируются за счет дополнительного сигнала самонастройки  $z$  с амплитудой  $h$ , формируемого в соответствии с выражением (9), в котором принимается  $e_m = v_m - v$ . В результате закон управления имеет вид:

$$u = \sqrt{|s|} \operatorname{sign}(s), \quad (11)$$

$$s = (m_n T_{жс}^{-1} (k_{жс} v_{зад} - v) + d_{2n} v |v| + z) k_u^{-1},$$

$$h = k_{vm} |\dot{v}_m| + k_v v^2 + f_{v \max}. \quad (12)$$

где  $k_u = k_\tau (k_d k_y)^2$  – обобщенный коэффициент усиления усилителя и движителя,  $k_{vm}$  и  $k_v$  – коэффициенты блока самонастройки,  $v_{зад}$  – задающее воздействие по скорости НПА,  $s$  – вспомогательная переменная,  $f_{v \max}$  – наибольшее значение внешнего возмущения  $f_v$ .

Применение новых законов (10) и (12) формирования амплитуды  $h$  разрывного сигнала  $z$  позволило автоматически уменьшать ее величину в благоприятных режимах работы СУ и, тем самым, исключить неоправданный перерасход энергии и возможность выхода систем в нелинейную зону насыщения усилителя мощности.

Предложенная система децентрализованного управления сравнительно проста, однако при сильном взаимовлиянии между каналами управления НПА ее эффективность значительно снижается. Учет этих взаимовлияний может потребовать реализации управляющих сигналов недопустимо большой величины. В этом случае более целесообразно синтезировать СНС с применением принципов централизованного управления на базе полной математической модели объекта (1) с учетом его неопределенных и изменяющихся параметров, а также перекрестных связей между всеми каналами управления.

Желаемые динамические свойства объекта (1) определяются линейным дифференциальным уравнением эталонной модели:



$$\dot{\mathbf{v}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{v}_m + \mathbf{B}_m \mathbf{v}_d, \quad (13)$$

где  $\mathbf{v}_m(t)$  – вектор выходных координат модели,  $\mathbf{A}_m$  – отрицательно определенная (для обеспечения устойчивости решения  $\mathbf{v}_m(t)$ ) постоянная матрица,  $\mathbf{B}_m$  – постоянная матрица коэффициентов при задающих сигналах,  $\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_d(t)$  – вектор задающих сигналов по скорости.

В процессе синтеза СУ необходимо так сформировать вектор дополнительных сигналов самонастройки  $\mathbf{z}_v(t)$ , чтобы при любых значениях параметров НПА и возмущений из заданных диапазонов обеспечивалось выполнение предельного соотношения  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_v(t)\| = 0$ , где  $\mathbf{e}_v = \mathbf{v} - \mathbf{v}_m$  – вектор ошибки по скорости НПА относительно модели (13). Тогда по завершении процесса самонастройки поведение нелинейного нестационарного ОУ (1) будет определяться желаемым уравнением (13) с постоянными параметрами.

Доказано, что отрицательную определенность производной  $\dot{V}_v$  функции Ляпунова  $V_v = 0.5 \mathbf{e}_v^T \mathbf{P} \mathbf{e}_v$  (где  $\mathbf{P}$  – симметричная положительно определенная матрица) и, следовательно, асимптотическую устойчивость состояния  $\mathbf{e}_v = 0$ , можно обеспечить с помощью закона самонастройки:

$$\mathbf{z}_v = -h_v \text{sign}(\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_v), \quad (14)$$

$$h_v \geq (1 - a_b)^{-1} \|\mathbf{B}_m^+\| M_s, \quad (15)$$

где  $h_v = \text{const} > 0$ ,  $\text{sign}(\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_v)$  – вектор, элементы которого определяются выражениями  $(\text{sign}(\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_v))_i = \text{sign}(\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e}_v)_i$ ,  $M_s = \sup \|\boldsymbol{\sigma}_v + \boldsymbol{\varphi}_v\|$  – оценка вектора  $\boldsymbol{\sigma}_v + \boldsymbol{\varphi}_v$ ,  $\boldsymbol{\sigma}_v$  – составляющая, характеризующая отклонения параметров ОУ от заданных значений,  $\boldsymbol{\varphi}_v$  – составляющая, характеризующая влияние нелинейностей и внешних возмущений,  $\|\mathbf{B}_m^+\|$  – норма матрицы  $\mathbf{B}_m^+$ ,  $a_b = \text{const} < 1$  – вспомогательный коэффициент.

Обобщенная структурная схема многоканальной СУ с эталонной моделью приведена на рис. 2 (здесь ЛКУ – линейное корректирующее устройство, БСН – блок самонастройки, матрицы условно представлены в виде единых блоков, а каждый вектор – в виде одного сигнала).

Наличие ограничений (15) позволяет применить сигнальную самонастройку только для тех режимов работы НПА, в которых элементы векторов  $\boldsymbol{\sigma}_v$  и  $\boldsymbol{\varphi}_v$  варьируются в сравнительно узком диапазоне. В этом случае разработанный закон самонастройки при условии достаточной мощности используемых исполнительных устройств (усилителей и движителей НПА) позволяет придать системе желаемые динамические свойства эталонной модели (13) и обеспечить высокое качество управления скоростью движения НПА в условиях существенного изменения параметров объекта, наличия сильного взаимовлияния между степенями подвижности и внешних воздействий.

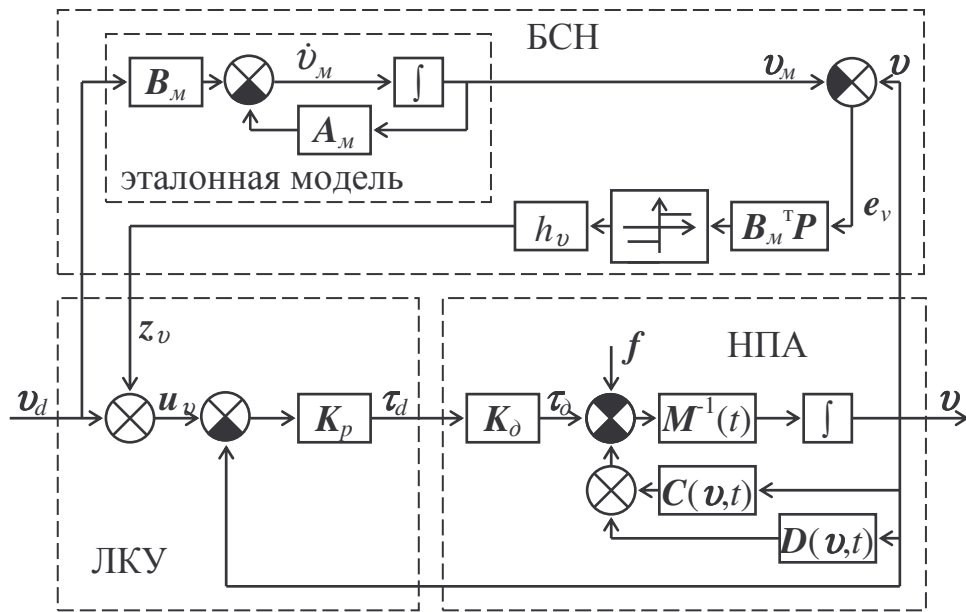


Рис. 2. Структурная схема системы с эталонной моделью для централизованного управления НПА

Для исследования эффективности всех синтезированных на основе предложенных методов СНС и СПС при управлении НПА в диссертации проведено их численное моделирование в среде MATLAB с использованием полной нелинейной и многосвязной модели подводного аппарата при различных задающих сигналах. Здесь и далее в силу ограниченности объема представлены только основные, наиболее характерные результаты моделирования СУ при ступенчатых задающих сигналах, позволяющие тем не менее однозначно судить о качестве разработанных систем.

На рис. 3а показаны переходные процессы, соответствующие изменению ошибок по отдельным составляющим вектора скорости НПА (кривая 1 – ошибка  $e_{v_x} = v_{dx} - v_x$  по одной из проекций линейной скорости  $v$ , кривая 2 – ошибка  $e_{\omega_x} = \omega_{dx} - \omega_x$  по одной из проекций угловой скорости  $\omega$ ), в многоканальной СНС с эталонной моделью при ступенчатых задающих воздействиях ( $v_{dx} = v_{dy} = v_{dz} = 1$  м/с,  $\omega_{dx} = \omega_{dy} = \omega_{dz} = 1$  рад/с) в каждом канале управления и наихудшей комбинации параметров объекта (присоединенных масс и моментов инерции жидкости и коэффициентов вязкого трения) из заданных диапазонов. При этом предполагается, что внутри этих диапазонов параметры могут претерпевать значительные (не менее чем двукратные) изменения. Для сравнения на рис. 3б представлены переходные процессы в системе с традиционным ПИД-регулятором при тех же условиях.

Как показало проведенное исследование, линейный регулятор способен обеспечить заданное качество переходных процессов только при некоторых номинальных параметрах НПА и отсутствии взаимовлияния между каналами управления. При изменении параметров объекта и особенно при сильном взаимовлиянии между подсистемами переходные процессы приобретают колебательный характер, качество управления значительно снижается (рис. 3б).

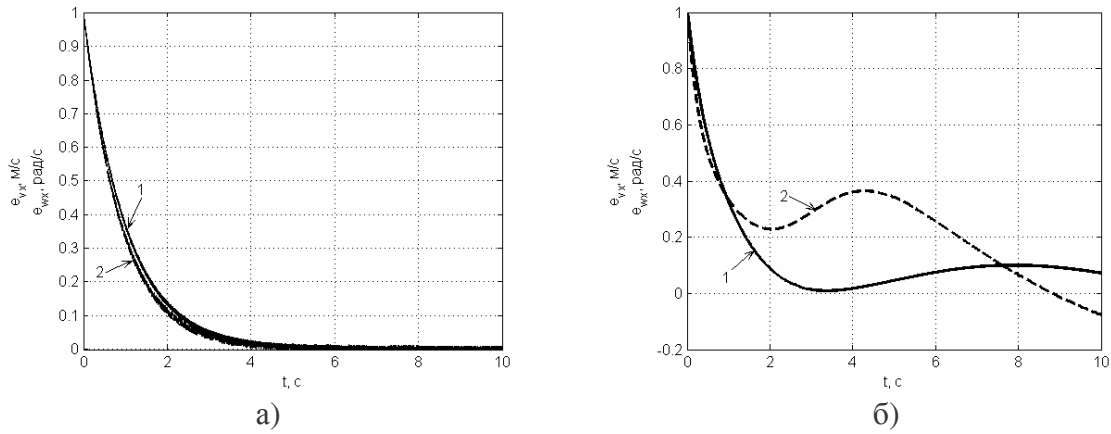


Рис. 3. Переходные процессы изменения ошибок по скорости в СНС при наихудшей комбинации параметров НПА

Результаты моделирования разработанной многоканальной СНС (рис. 3а) свидетельствуют о том, что она позволяет обеспечить требуемое качество переходных процессов (отсутствие перерегулирования и статической ошибки, малое время переходного процесса) при сильном взаимовлиянии и сохраняет его при любых изменениях параметров объекта из заданных диапазонов.

**В четвертой главе** исследована возможность реализации заданных эталонных процессов управления (эталонной динамики) и определения наилучших показателей качества, достижимых в СНС с моделью при наличии ограничений управляющего сигнала.

Рассмотрено управление линейным динамическим объектом, который описывается уравнением первого порядка  $\dot{x} = -ax + bu$  с переменными коэффициентами  $a > 0$  и  $b > 0$  (здесь  $x = x(t)$  – выходная координата ОУ,  $u = u(t)$  – управляющее воздействие). Диапазоны изменения параметров объекта ограничены наименьшими  $a_{\min}$ ,  $b_{\min}$  и наибольшими  $a_{\max}$ ,  $b_{\max}$  значениями коэффициентов  $a$  и  $b$ , а ограничение на управляющее воздействие  $u$  задается неравенством  $|u| \leq u_{\max}$ , где  $u_{\max}$  – максимально возможное значение сигнала  $u$ .

Желаемый процесс управления задан как решение дифференциального уравнения эталонной модели:

$$\dot{x}_m = -a_m x_m + b_m g, \quad (16)$$

где  $g$  – ограниченное входное воздействие ( $|g| \leq g_{\max}$ ,  $g_{\max}$  – максимальное значение сигнала  $g$ ),  $a_m$ ,  $b_m$  – известные постоянные параметры, полностью определяющие желаемое движение ОУ при заданном  $g$ .

В соответствии с предложенным в третьей главе методом сформирован закон управления  $u = g + z$ , где сигнал самонастройки  $z = z(t)$  определяется выражением вида (9), а его амплитуда  $h > 0$  полагается постоянной.

Сформулированы условия устойчивости процесса самонастройки в виде неравенств для параметров ОУ и некоторого коэффициента  $k_{hg} = h/g$ , характеризующего соотношение величин сигнала самонастройки и задающего воздействия. На основании этих условий найдено наименьшее значение  $k_{hg\min}$  (а

значит, минимальная амплитуда  $h_{\min}$  сигнала самонастройки  $z$  и максимальный диапазон обрабатываемых сигналов  $g$ ), которое требуется для компенсации любых изменений параметров ОУ в заданном диапазоне:

$$k_{hg \min} = \frac{a_{\max}/b_{\min} - a_{\min}/b_{\max}}{a_{\max}/b_{\min} + a_{\min}/b_{\max}}. \quad (17)$$

Важно, что это значение не зависит от выбора желаемого процесса управления (величины  $b_m/a_m$ ), а определяется только предельными значениями параметров ОУ.

Показано, что при таком минимальном  $k_{hg \min}$  существует единственный реализуемый желаемый процесс управления, определены его свойства (показатели качества), которые однозначно задаются отношением  $(b_m/a_m)_{cp}$ :

$$(b_m/a_m)_{cp} = 2(a_{\max}/b_{\min} + a_{\min}/b_{\max})^{-1}. \quad (18)$$

Выбор в качестве желаемого любого другого процесса управления приводит к необходимости увеличения  $k_{hg}$  по сравнению с  $k_{hg \min}$ .

Решена задача вычисления такого значения  $k_{hg \text{пред}} < k_{hg \min}$ , при котором условия устойчивости процесса самонастройки выполняются при некоторых  $a = a_{\text{тек}}$ ,  $b = b_{\text{тек}}$ , отличающихся от их граничных значений, и заданном  $b_m/a_m = (b_m/a_m)_{cp}$ . Этот результат указывает на возможность снижения амплитуды  $h$  сигнала самонастройки в благоприятных режимах работы СНС.

На основе полученных теоретических выводов осуществлен синтез закона адаптивной подстройки амплитуды  $h$  разрывного сигнала управления  $z$  в СНС с неидеальностью гистерезисного типа. Целью такой подстройки является автоматическое снижение величины  $h$  до некоторого минимально необходимого уровня, соответствующего значению  $k_{hg \text{пред}}$ , при произвольных (априорно неизвестных) параметрах  $a$  и  $b$  объекта управления из заданного диапазона без измерения этих трудно идентифицируемых параметров.

Отмечено, что при работе СНС в реальном режиме переключений существуют отличные от нуля промежутки времени  $t^+$  и  $t^-$ , в течение которых сигнал самонастройки имеет положительное ( $z > 0$ ) или отрицательное ( $z < 0$ ) значения, соответственно. Для формирования требуемого закона подстройки амплитуды  $h$  вводится в рассмотрение специальный параметр  $\chi$ , являющийся характеристикой управляющего сигнала  $z$ :

$$\chi = t^+ / (t^+ + t^-). \quad (19)$$

Показано, что при уменьшении амплитуды  $h$  от любого произвольного значения до требуемого  $h_{\text{пред}}$  (соответствующего  $k_{hg \text{пред}}$ ) величина параметра  $\chi$  монотонно стремится к 0 или к 1, т.е. близость  $\chi$  к одному из этих значений

однозначно указывает на близость  $h$  к  $h_{nред}$ . Таким образом, параметр  $\chi$  характеризует близость фактически реализованной в системе в текущий момент времени величины  $k_{hg}$  к искомому предельному значению  $k_{hgнред}$ .

На основе выявленной зависимости предложен способ практической реализации искомого закона подстройки амплитуды  $h$ :

$$\begin{aligned} h &= h^* - \Delta h, \\ \Delta \dot{h} &= \chi_0 - |\chi_0 - \chi|, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $h^*$  – фиксированное значение амплитуды, задаваемое на этапе проектирования и соответствующее  $k_{hgmin}$ ,  $\Delta h$  – дополнительный сигнал подстройки амплитуды,  $\chi_0 \approx 1/2$  – заданная константа.

Текущее значение параметра  $\chi$  вычисляется в блоке идентификации на основе информации только о разрывном сигнале  $z$ . Предложенный метод обеспечивает расширение диапазона обрабатываемых входных воздействий, уменьшение потерь мощности в контуре самонастройки и нагрузки на исполнительные элементы в благоприятных режимах работы СУ.

**В пятой главе** разрабатываются управляющие устройства для отдельной подсистемы управления скоростью движения НПА (по одной из координат) и для контура управления скоростью в целом на базе принципов теории систем с переменной структурой. Затем с учетом уже синтезированных СУ формируется нелинейная коррекция в контуре управления положением НПА.

При синтезе децентрализованной СПС математическая модель ОУ в каждом канале управления (с учетом предложенной подсистемы управления движителями) представляет собой совокупность уравнений (4) и (7).

Независимость процессов управления от текущих значений переменных параметров ОУ, компенсация взаимовлияния между подсистемами и внешних возмущений обеспечивается за счет реализации в СПС скользящего режима, условие существования которого выражается неравенством вида  $s\dot{s} < 0$ , где сигнал  $s = \dot{e} + k_s e$  представляет собой линейную комбинацию ошибки  $e = v_d - v$  и ее производной  $\dot{e}$  (здесь  $k_s = \text{const} > 0$  – некоторый коэффициент).

Поведение подсистемы управления скоростью после попадания на линию скольжения  $s = 0$  в процессе движения по этой линии описывается уже не соотношениями (4), (7), а уравнением первого порядка  $\dot{e} + k_s e = 0$ , решение которого зависит только от выбранного значения коэффициента  $k_s$ .

В процессе синтеза СПС решена задача формирования такого управляющего сигнала, который гарантирует выполнение условий возникновения, существования и устойчивости скользящего режима:

$$\tau_d = (k_{u1}|e| + k_{u2}e^2 + k_{u3}\omega^2) \text{sign}(s), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} k_{u1} &> \max |((mk_s + d_1 + 2d_2v_d)(1 + T_\delta k_s + k_\delta k_{u3}) + 2d_2T_\delta \dot{v}_d)k_\delta^{-1}|, \\ k_{u2} &> \max |d_2(1 + 2T_\delta k_s + k_\delta k_{u3})k_\delta^{-1}|, \quad k_{u3} > \max |(T_\delta \dot{F}/F + 1)Fk_\delta^{-1}|, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $k_{u1}, k_{u2}, k_{u3}$  – постоянные коэффициенты,  $F = m\dot{v}_d + d_1v_d \pm d_2v_d^2 + f$ .



Как следует из неравенств (22), выбор коэффициентов должен осуществляться не только с учетом параметров НПА и возмущения  $f$ , но и желаемого закона его движения ( $v_d$  и  $\dot{v}_d$ ). Очевидно, что с целью практической реализации  $k_{u3}$  необходимо заранее согласовать законы изменения  $v_d$  и  $\dot{v}_d$ , чтобы избежать возникновения случая, когда  $\dot{F}/F \rightarrow \infty$ .

Предложенная система с переменной структурой для скалярного (децентрализованного) управления скоростью движения НПА обеспечивает высокое качество только в режимах движения с малыми скоростями, когда взаимовлияние между подсистемами мало. В противном случае возникают сложности с обеспечением условия существования скользящего режима, в результате возможен его срыв и потеря работоспособности системы.

Для обеспечения функционирования СУ в режиме больших скоростей движения НПА предложен вариант построения СПС для векторного (централизованного) управления всеми каналами ОУ, при котором в контуре управления скоростью формируется режим скольжения по пересечению многомерных гиперповерхностей в пространстве фазовых координат.

В этом случае синтез производится на базе полной централизованной модели НПА (1), в которой взаимовлияния между каналами управления рассматриваются не как внешние возмущения для каждой подсистемы, а как внутренние координаты объекта в целом. Это позволяет сформировать более эффективный закон управления в классе СПС.

Условия существования скользящего режима в данном случае представляют собой набор из шести неравенств, одно из которых (например, в канале управления по координате  $x$ ) имеет вид  $s_{ux}\dot{s}_{ux} < 0$ , где  $s_{ux} = \dot{e}_{ux} + k_{ux}e_{ux}$ ,  $e_{ux} = v_{dx} - v_x$ ,  $v_{dx}$  – задающий сигнал для контура скорости данного канала управления,  $k_{ux} > 0$  – постоянный коэффициент. Выполнение этих условий при любых значениях параметров НПА и взаимовлияний между подсистемами обеспечивается за счет формирования разрывных сигналов управления скоростью движения по каждой координате. В частности, закон управления  $u_{ux}$  скоростью движения по координате  $x$  имеет следующий вид:

$$u_{ux} = W_{ux} \text{sign}(s_{ux}), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} W_{ux} = & k_{wx1} |\ddot{v}_{dx}| + k_{wx2} |\dot{v}_{dx}| + k_{wx3} |\dot{v}_{dx} v_x| + k_{wx4} v_{dx}^2 + k_{wx5} |\dot{v}_{dz} \omega_y + \dot{\omega}_{dy} v_z| + \\ & + k_{wx6} |\dot{v}_{dy} \omega_z + \dot{\omega}_{dz} v_y| + k_{wx7} |v_{dz} \omega_{dy}| + k_{wx8} |v_{dy} \omega_{dz}| + k_{wx9} |v_{dx} e_{ux}| + \\ & + k_{wx10} |\omega_{dy} e_{vz}| + k_{wx11} |v_{dz} e_{\omega y}| + k_{wx12} |\omega_{dz} e_{vy}| + k_{wx13} |v_{dy} e_{\omega z}| + k_{wx14} |e_{ux} e_{\omega y}| + \\ & + k_{wx15} |e_{vy} e_{\omega z}| + k_{wx16} e_{ux}^2 + k_{wx17} |e_{ux}|. \end{aligned} \quad (24)$$

где  $W_{ux} \geq 0$  – нелинейная функция,  $k_{wxi}$  ( $i = \overline{1, 17}$ ) – некоторые постоянные коэффициенты, удовлетворяющие полученным в работе специальным неравенствам,  $e_{vy}$ ,  $e_{vz}$ ,  $e_{\omega x}$ ,  $e_{\omega y}$ ,  $e_{\omega z}$ ,  $v_{dy}$ ,  $v_{dz}$ ,  $\omega_{dx}$ ,  $\omega_{dy}$ ,  $\omega_{dz}$  – ошибки и задающие воздействия в других подсистемах.

При использовании любого из синтезированных законов (21) или (23), (24) каждая подсистема управления после возникновения скользящего режима будет описываться дифференциальным уравнением  $\dot{e}_{vx} + k_{vx}e_{vx} = 0$  (или аналогичным), и движение СУ в целом будет происходить в соответствии с желаемым процессом управления, который задается путем выбора коэффициентов  $k_{vx}, k_{vy}, k_{vz}, k_{ax}, k_{ay}, k_{az}$  или  $k_s$  управляющих устройств.

В этом случае динамические свойства внутреннего контура управления скоростью не зависят от параметров НПА, эффектов взаимовлияния между подсистемами и воздействия вязкой среды и определяются следующим матричным дифференциальным уравнением:

$$\dot{v} = \dot{v}_d + K_v(v_d - v), \quad (25)$$

где  $K_v$  – диагональная матрица коэффициентов  $k_{vx}, k_{vy}, k_{vz}, k_{ax}, k_{ay}, k_{az}$ .

В соответствии с предложенной процедурой синтеза далее сформирован нелинейный закон управления положением НПА в пространстве. Для этого с учетом выражений (2) и (25) получено уравнение динамики внешнего контура управления НПА, совершающего произвольное пространственное движение:

$$\ddot{x} = (\dot{J} - JK_v)v + J(K_v v_d + \dot{v}_d). \quad (26)$$

Требуемый закон управления (закон изменения сигнала  $v_d$ ), который независимо от значений элементов матриц  $J$  и  $\dot{J}$  обеспечит движение НПА в соответствии с желаемым уравнением  $\ddot{x} = -K_{p1}\dot{x} - K_{p2}x + K_{p3}x_d$  (где  $K_{p1}, K_{p2}, K_{p3}$  – диагональные матрицы коэффициентов, надлежащий выбор которых позволяет обеспечить заданное качество управления), имеет вид:

$$\dot{v}_d = -K_v v_d + J^{-1}(K_{p3}x_d - K_{p2}x - (\dot{J} + K_{p1}J - JK_v)v). \quad (27)$$

Аналогичный закон управления положением НПА получен и при использовании в каждой подсистеме СНС с эталонной моделью. В результате удалось компенсировать кинематические связи между подсистемами и обеспечить заданное качество процессов изменения всех координат объекта.

Обобщенная структурная схема СУ положением НПА показана на рис. 4.

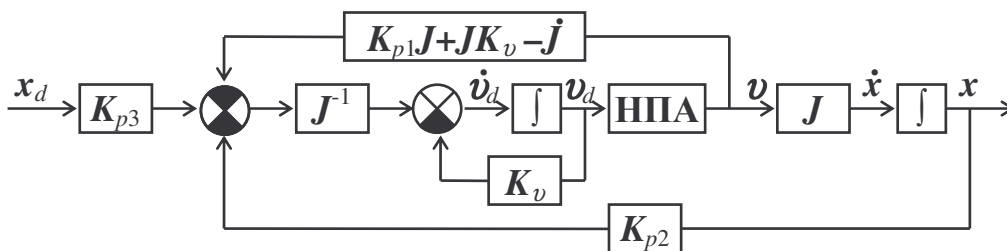


Рис. 4. Обобщенная структурная схема СУ положением НПА

В данной главе диссертации представлены результаты натуральных экспериментов, проведенных с использованием электромеханического стенда, общий вид которого показан на рис. 5. Стенд содержит электродвигатель постоянного тока с цифровым управлением и систему вращающихся масс, обеспечивающих в ходе экспериментов изменение момента инерции исследуемого объекта. Особенности указанной установки позволяют организовать исследование синтезированной в параграфе 5.1 одноканальной СПС, предназначенной для управления одной выходной координатой нестационарного динамического объекта.



Рис. 5. Электромеханический лабораторный стенд

На рис. 6 приведены процессы изменения ошибки  $e_\alpha = \alpha_d - \alpha$  по углу поворота  $\alpha$  вала двигателя при подаче на вход СПС ступенчатого задающего сигнала ( $\alpha_d = 10$  рад) и почти трехкратном изменении момента инерции объекта (рис. 6а – момент инерции  $J_\Sigma = 0.007$  кг/м<sup>2</sup>, рис. 6б – момент инерции  $J_\Sigma = 0.02$  кг/м<sup>2</sup>). На рис. 7 показаны соответствующие фазовые траектории системы (построенные в реальном времени), свидетельствующие о реализации в ней устойчивого режима высокочастотных переключений.

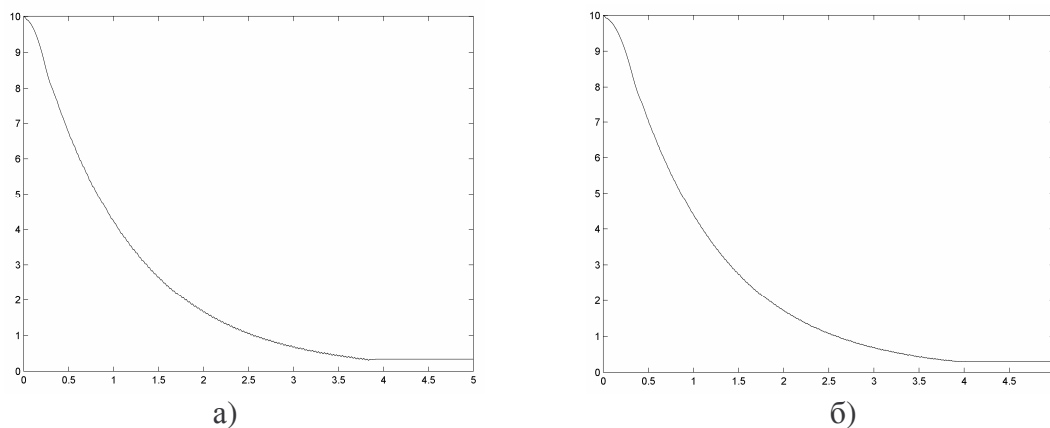


Рис. 6. Переходные процессы изменения ошибки по углу в СПС

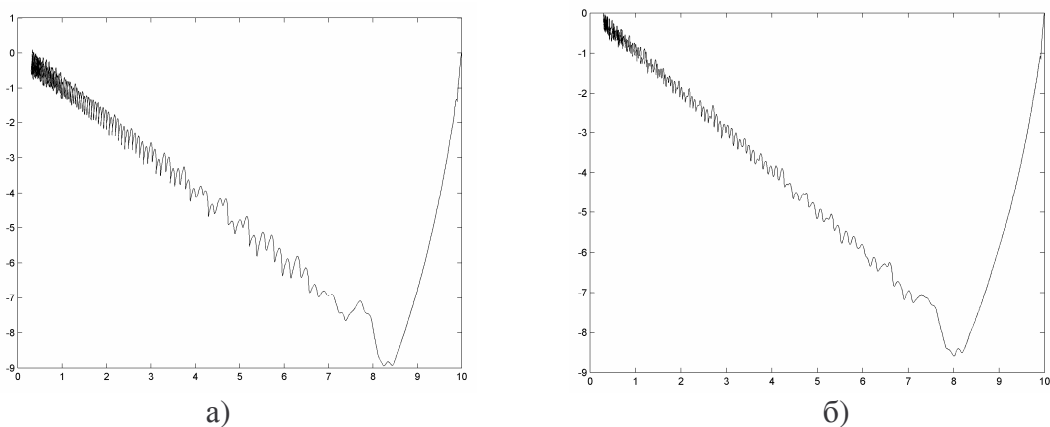


Рис. 7. Фазовые траектории системы с переменной структурой

Вид переходных процессов практически не зависит от параметров ОУ (в заданном диапазоне). Незначительные различия наблюдаются только на начальном этапе движения системы (до ее вхождения в режим переключений). Отклонение реального движения системы от режима идеального скольжения (рис. 7) обусловлено неидеальностью переключающего элемента, однако это не оказывает существенного влияния на качество работы системы в целом.

Таким образом, результаты натурных экспериментов подтверждают эффективность и высокое качество работы синтезированной системы с переменной структурой при изменении параметров объекта в заданном диапазоне. Аналогичные эксперименты проводились и для исследования одноканальной СНС с эталонной моделью, синтезированной в главе 3. Они также подтвердили высокую эффективность указанной системы при управлении нестационарным техническим объектом.

**В шестой главе** разработана методика синтеза СПС для управления положением и ориентацией НПА в пространстве (без разделения СУ на контуры скорости и положения). Такой подход позволяет преодолеть сложности, характерные для рассмотренного выше метода и связанные с формированием скользящего режима в контуре управления скоростью при непрерывно изменяющемся задающем сигнале на его входе (поступающем с выхода контура управления положением). Кроме того, в результате удалось получить универсальный закон управления в классе СПС для произвольного многомерного и многоканального объекта в компактной матричной форме, удобный для дальнейшего использования при синтезе адаптивной СПС.

Математическая модель НПА, учитывающая особенности его динамики (в случае пренебрежимо малой инерционности движителей) и кинематические взаимосвязи между всеми подсистемами, получена путем объединения выражений (1) и (2). При синтезе многоканальной СПС поставлена задача обеспечения устойчивости состояния  $s = 0$ , где  $s = \dot{e} + K_s e$  – вектор вспомогательных сигналов  $s_i$ ,  $e = x_d - x$  – вектор ошибки системы в целом,  $K_s$  – положительно определенная матрица известных постоянных коэффициентов  $k_{sij}$  ( $i, j = \overline{1,6}$ ). Тогда поведение НПА будет определяться не выражениями (1), (2), а системой линейных дифференциальных уравнений с желаемыми постоянными

коэффициентами  $\dot{e} = -K_s e$ . В частности, использование диагональной матрицы  $K_s$  позволяет добиться независимости движения по всем координатам  $e_i$  в соответствии с уравнениями  $\dot{e}_i + k_{sii}e_i = 0$ .

Синтез закона управления производится на основе метода Ляпунова, причем положительно определенная функция Ляпунова выбирается в виде  $V = 0.5s^T P s$ , где  $P$  – диагональная положительно определенная матрица. Для обеспечения устойчивости состояния  $s = 0$  путем выбора сигнала  $u$  достаточно добиться выполнения неравенства  $\dot{V} < 0$  при любых параметрах ОУ в заданных диапазонах и любых значениях сигналов  $e$  и  $s$ . На основе полученного в работе выражения для производной функции  $V$  по времени в силу уравнений системы (1), (2) строго доказано, что для выполнения этого требования достаточно сформировать закон управления в следующем виде:

$$u = \text{sign } s \cdot K_u \cdot \text{sign } e \cdot e, \quad (28)$$

$$k_{u ij} > \max_{a_{ij}, b_{ij}, k_{sij}, M_x} |r_{ij}|, \quad (29)$$

где  $\text{sign } s$  и  $\text{sign } e$  – диагональные матрицы, элементы которых задаются равенствами  $(\text{sign } s)_{ii} = \text{sign } s_i$ ,  $(\text{sign } e)_{jj} = \text{sign } e_j$ ,  $K_u$  – матрица постоянных коэффициентов  $k_{u ij}$ ,  $r_{ij}$  – элементы вспомогательной матрицы  $R$ , зависящие от параметров ОУ и коэффициентов  $k_{sij}$ .

Сформированный закон (28) векторного управления движением НПА обеспечивает существование устойчивого режима скольжения по пересечению многомерных поверхностей в пространстве координат системы и тем самым гарантирует инвариантность к любым изменениям параметров ОУ и внешних воздействий в заданных пределах без их идентификации.

В ряде случаев для компенсации кинематических взаимосвязей при некоторых номинальных параметрах ОУ в СУ пространственным движением НПА целесообразно ввести предварительную нелинейную коррекцию, а затем для уже скорректированной системы синтезировать управляющее устройство с переменной структурой с целью стабилизации ее динамических свойств при отклонении параметров НПА от их номинальных значений. Указанный подход применен при разработке СУ ориентацией НПА в пространстве. В результате получен нелинейный закон управления сферическим движением НПА при его номинальных параметрах. В частности, уравнение для проекции  $M_{\partial z}$  управляющего момента на одну из осей связанной СК имеет вид:

$$\begin{aligned} M_{\partial z} = & k_{pz} (-(u_\varphi - \varphi) \sin \theta \cos \psi + (u_\psi - \psi) \cos \theta) + \\ & + k_{vz} \omega_z + (J_{yn} - J_{xn} - J_{zn}) \omega_x \omega_y + J_{zn} (\omega_y^2 \cos \theta - \\ & - 2\omega_y \omega_z \sin^3 \theta + (\omega_y^2 - \omega_z^2) \sin^2 \theta \cos \theta) \text{tg } \psi, \end{aligned} \quad (30)$$

где  $k_{pz} = k_u J_{zn}$ ,  $k_{vz} = d_{16n} - k_{u1} J_{zn}$  – коэффициенты управляющего устройства, синтезированного при постоянных (номинальных) значениях параметров НПА



$J_x = J_{xn}$ ,  $J_y = J_{yn}$ ,  $J_z = J_{zn}$ ,  $d_{16} = d_{16n}$  внутри заданных диапазонов,  $J_x$ ,  $J_y$ ,  $J_z$  – моменты инерции НПА относительно осей связанной системы координат (с учетом присоединенных моментов инерции жидкости),  $d_{16}$  – один из коэффициентов вязкого трения при вращательном движении,  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – проекции вектора угловой скорости на оси связанной системы координат,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  – эйлеровы углы, определяющие ориентацию НПА относительно абсолютной системы координат,  $u_\psi$ ,  $u_\varphi$  – задающие сигналы для каждого канала управления.

На рис. 8 показаны переходные процессы изменения ошибок по отдельным составляющим вектора положения и ориентации НПА (кривая 1 – ошибка  $e_x$  по линейной координате  $x$ , кривая 2 – ошибка  $e_t$  по угловой координате  $\theta$ ), в многоканальной СПС при ступенчатых задающих сигналах ( $x_d = y_d = z_d = 1$  м,  $\theta_d = \varphi_d = \psi_d = 1$  рад) в каждом канале управления. Причем на рис. 8а представлены процессы изменения ошибок при наилучшей комбинации параметров НПА, а на рис. 8б – при наихудшей комбинации. На рис. 9а и 9б представлены фазовые траектории системы при тех же условиях.

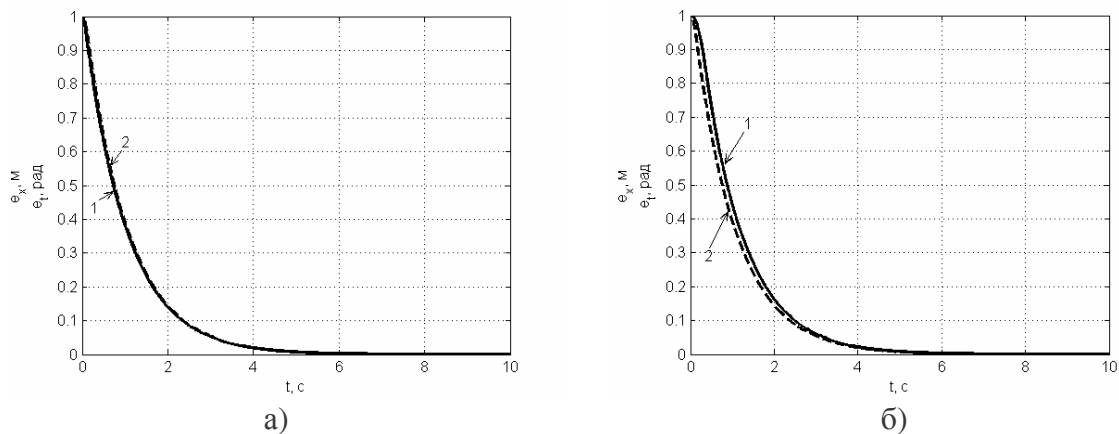


Рис. 8. Переходные процессы изменения ошибок в СПС при различных комбинациях параметров НПА

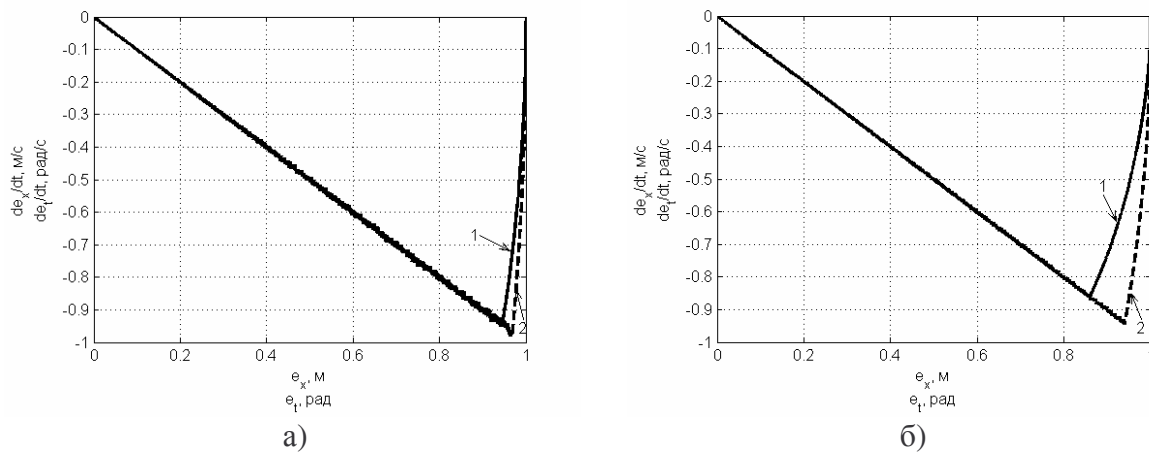


Рис. 9. Фазовые траектории при различных комбинациях параметров НПА

Очевидно, что в обоих случаях синтезированная многоканальная СПС обеспечивает стабильно высокое качество управления положением и ориентацией НПА в условиях нестационарности и наличия взаимовлияний между подсистемами. При этом, как следует из рис. 9, в системе реализуется устойчивый скользящий режим при любых значениях параметров НПА из заданных диапазонов.

**В седьмой главе** проанализированы особенности функционирования СПС с неидеальными усилительными и исполнительными элементами.

Как и при исследовании СНС с эталонной моделью, рассмотрен случай скалярного управления (отдельная подсистема управления НПА в режиме малых скоростей). При этом динамика объекта управления описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка  $\ddot{x} + a_1\dot{x} + a_2x = bu$  с неопределенными (переменными) коэффициентами  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$  и  $b > 0$ .

Проведено исследование СПС, предназначенной для управления указанным объектом, с наиболее распространенной неидеальностью переключающего устройства гистерезисного типа, которая описывается нелинейной функцией  $g(s) = \pm 1$ , где  $s = \dot{e} + k_s e$  ( $e$  – ошибка системы,  $k_s$  – постоянный положительный коэффициент).

С учетом указанной неидеальности закон управления в данном случае сформирован следующим образом:

$$u = k_u |e| g(s), \quad (31)$$

где  $k_u = \text{const} > 0$  – коэффициент управляющего устройства.

Показано, что в соответствии с (31) на фазовой плоскости системы имеются три прямые переключения  $\dot{e} = -k_s e + \Delta s$  (т.е.  $s = \Delta s$ ),  $\dot{e} = -k_s e - \Delta s$  (т.е.  $s = -\Delta s$ ) и  $e = 0$ , разбивающие ее на области с различными законами движения (различными типами фазовых траекторий).

Основным режимом работы СПС является режим переключений, при котором в любой момент времени выполняется неравенство  $|s| \leq \Delta s$  (т.е. изображающая точка не покидает зоны  $|s| \leq \Delta s$ , ограниченной на фазовой плоскости двумя параллельными прямыми  $s = \Delta s$  и  $s = -\Delta s$ , где  $\Delta s$  – малая положительная константа) и для заданного  $\varepsilon > 0$  найдется такое значение  $t_1 > 0$ , что при любом  $t \geq t_1$  выполняется неравенство  $|e(t)| \leq \varepsilon$ .

Сформированы условия существования указанного режима переключений в виде неравенств  $\dot{s} < 0$ , если  $s - \Delta s \geq 0$  и  $\dot{s} > 0$ , если  $s - \Delta s \leq 0$ . Получены ограничения, которым должны удовлетворять коэффициенты  $k_u$  и  $k_s$  управляющего устройства для выполнения этих условий при любых  $a_1$ ,  $a_2$  и  $b$  из заданных диапазонов:

$$k_u > |(a_1 - k_s)k_s - a_2| b^{-1}, \quad k_s < a_1. \quad (32)$$

Сформулированы условия устойчивости режима переключений ( $k_s > 0$ ) и попадания изображающей точки в зону переключений  $|s| \leq \Delta s$ .

Отмечено, что характер движения СПС в режиме переключений определяется не только коэффициентами закона управления (31), но и параметрами ОУ. Поэтому в данном случае проведено дополнительное исследование вопроса о сохранении свойства робастности СПС относительно изменений этих параметров. В результате сформулировано и доказано важное свойство СПС, работающей в режиме переключений: при движении изображающей точки в зоне  $|s| \leq \Delta s$  фазовой плоскости в любой момент времени  $t \geq t_a$  выполняется неравенство  $|e(t) - e^*(t)| \leq \Delta s/k_s$ , где  $e^*(t)$  – ошибка системы в режиме идеального скольжения.

В соответствии с доказанным свойством возможное отклонение текущего значения ошибки  $e(t)$  в процессе реального движения системы в режиме переключений от значения ошибки  $e^*(t)$  не зависят ни от значений параметров объекта управления, ни от конкретного вида фазовых траекторий системы внутри области переключения, а определяются только величинами постоянных коэффициентов  $\Delta s$  и  $k_s$  управляющего устройства, которые выбираются на этапе проектирования системы исходя из требований к качеству управления.

На основе анализа фазового портрета СПС показано, что в некоторой  $\varepsilon$ -окрестности начала координат существует предельный цикл, которому соответствуют установившиеся колебания системы вокруг положения равновесия с некоторой амплитудой  $e_{\max} \leq \Delta s/k_s + \delta$  (где  $\delta > 0$  – малая константа) и конечной частотой  $\omega$ . На основании полученной оценки определен способ снижения амплитуды автоколебаний за счет уменьшения  $\Delta s$  и увеличения  $k_s$  при фиксированных параметрах ОУ.

Установлена однозначная зависимость между величиной коэффициента наклона линии скольжения  $k_s$  (близостью  $k_s$  к некоторому предельному значению  $k_{s\max}$ , для которого еще сохраняется устойчивый скользящий режим) и некоторой характеристикой управляющего сигнала  $u$ , легко доступного для измерения. В дальнейшем указанная зависимость использована для реализации новых законов адаптивной настройки линии скольжения, основанных на информации о структуре управляющего сигнала  $u$  и не требующих измерения трудно идентифицируемых параметров объекта  $a_1$ ,  $a_2$  и  $b$ .

В качестве этой характеристики рассматривается параметр скольжения  $\mu$ , определяемый аналогично  $\chi$  по формуле  $\mu = t^+ / (t^+ + t^-)$ , где  $t^+$  и  $t^-$  – промежутки времени, в течение которых сигнал  $u$  имеет положительное ( $u > 0$ ) или отрицательное ( $u < 0$ ) значения, соответственно.

С целью изучения зависимости  $\mu(k_s)$  получены аналитические выражения для определения интервалов времени  $t^+$  и  $t^-$  как функций изменяющегося параметра  $k_s$ . На основании анализа этих выражений доказано, что при увеличении коэффициента  $k_s$  от некоторого граничного значения  $k_{s\min}$  до предельного значения  $k_{s\max}$  величина интервала времени  $t^+$  монотонно возрастает, а  $t^-$  – монотонно убывает, как показано на рис. 10. Это приводит к монотонному возрастанию параметра скольжения от  $\mu_{\min}$  до  $\mu_{\max}$ , причем граничные значения  $\mu$  определяются с учетом величин  $k_{s\min}$  и  $k_{s\max}$ .

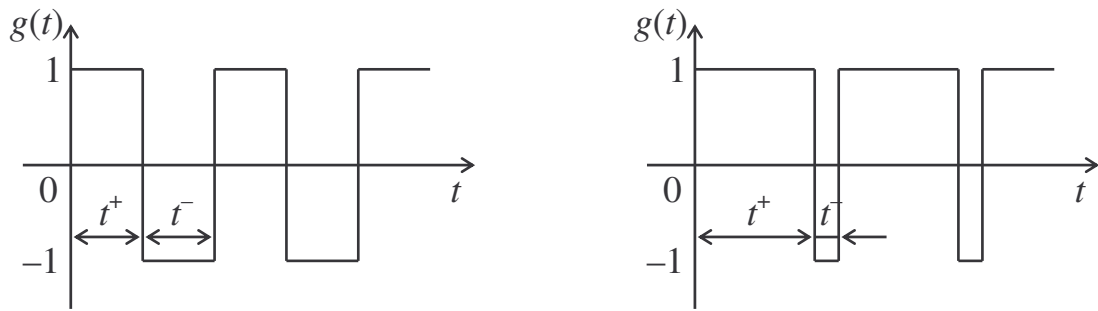


Рис. 10. Структура сигнала  $g(t)$  при малом и большом значениях  $k_s$

С помощью численного моделирования подтверждено, что найденная однозначная зависимость параметра скольжения  $\mu$  от величины  $k_s$  имеет место и в процессе управления нелинейным объектом с возмущениями, т.е. она может быть использована при синтезе законов управления НПА.

С целью оценки работоспособности синтезированных систем в реальных условиях эксплуатации проведено исследование СПС при наличии ограничений  $|u| \leq u_{\max}$ , накладываемых на управляющий сигнал  $u$ .

Для этого с учетом выражения (31) и указанных ограничений получен в окончательном виде закон управления  $u$  в системе с переменной структурой (при идеальном переключающем устройстве  $g(s) = \text{sign}(s)$ ):

$$u = \begin{cases} -k_u x \text{sign}(sx), & \text{если } |x| \leq u_{\max}/k_u, \\ -u_{\max} \text{sign}(s), & \text{если } |x| > u_{\max}/k_u. \end{cases} \quad (33)$$

Фазовый портрет СПС с управлением (33) имеет существенные особенности. На основании его анализа показано, что, в отличие от идеального случая, устойчивый скользящий режим существует не на всей прямой  $s = 0$ , а лишь на некотором ее отрезке  $AA_1$ , координаты концов которого определяются значениями параметров объекта и управляющего устройства  $x_a = -u_{\max}/k_u$ ,  $\dot{x}_a = u_{\max}k_s/k_u$ .

Определено граничное значение начальных условий, превышение которого приводит к возникновению в СПС перерегулирования и колебаний:

$$x_{02k} = -\frac{u_{\max} b \left(1 + \sqrt{1 - k_s^2/bk_u}\right) \left(3 + \sqrt{1 - k_s^2/bk_u}\right)}{2k_s^2}. \quad (34)$$

В соответствии с выражением (34) увеличение  $k_u$  приводит к уменьшению диапазона начальных условий, для которых возможен переходный процесс движения в точку  $(0;0)$  без перерегулирования и колебаний. Одновременно происходит уменьшение отрезка скольжения по  $x$ . Увеличение  $k_s$  (при постоянном  $k_u$ ) также приводит к уменьшению этого диапазона, но не влияет на длину отрезка скольжения по  $x$ .

Получены соотношения для расчета коэффициентов  $k_u$  и  $k_s$ , обеспечивающих асимптотическую устойчивость состояния  $x = 0$ ,  $\dot{x} = 0$  для любого  $x_0$ , не превышающего заданного значения  $x_{0к}$ :

$$k_s \leq k_{sпред} = 2\sqrt{u_{\max} b / (x_{0к})}, \quad (35)$$

$$k_u \geq k_{uпред} = \frac{u_{\max} \left(1 + \sqrt{1 + 2k_s^2 x_{0к} / bu_{\max}}\right)}{2x_{0к} \left(3 - \sqrt{1 + 2k_s^2 x_{0к} / bu_{\max}}\right)}. \quad (36)$$

Вычисление коэффициентов  $k_u$  и  $k_s$  в соответствии с неравенствами (35), (36) позволяет обеспечить максимально возможное быстродействие системы без возникновения перерегулирования и колебаний. С другой стороны, в ряде случаев целесообразнее уменьшать  $k_u$  с целью снижения амплитуды разрывного сигнала управления и уменьшения потерь энергии в скользящем режиме.

**В восьмой главе** разработан метод синтеза СПС с адаптивной настройкой параметров линии (или гиперповерхности) скольжения для управления движением НПА.

Основные принципы формирования закона адаптивной настройки рассмотрены для одноканальной СПС в контуре управления скоростью движения НПА по отдельной координате, предложенной в пятой главе. Как уже отмечалось, эта СУ обеспечивает заданные неизменные показатели качества независимо от текущих значений параметров НПА. Однако в такой СПС для обеспечения условий существования режима скольжения величина  $k_s$  рассчитывается при некоторых наихудших параметрах ОУ  $m$ ,  $d_1$  и  $d_2$ . Очевидно, полученное значение  $k_{s\min} = \text{const}$ , а следовательно, и быстродействие СПС, оказываются заведомо заниженными в тех режимах работы НПА, когда его параметры существенно (зачастую более чем вдвое) отличаются от наихудших.

Для повышения быстродействия уже синтезированной СПС предложен адаптивный закон формирования управляющего сигнала, который позволяет увеличивать коэффициент  $k_s$  (наклон линии скольжения) при благоприятных параметрах НПА, что приводит к уменьшению времени движения по линии переключения. Стандартные подходы к обеспечению выполнения данного условия основаны на определении изменяющихся параметров ОУ, что с учетом особенностей НПА является трудноразрешимой задачей и требует создания весьма сложных и дорогостоящих технических устройств.

Чтобы избежать непосредственной идентификации этих параметров, на базе обоснованных выше теоретических положений разработан способ косвенной оценки текущего состояния СУ с использованием в качестве информационного самого управляющего сигнала, который формируется в переключающем устройстве и легко доступен для измерения. При этом для практической реализации устройства настройки коэффициента линии скольжения использована установленная зависимость между  $k_s$  и  $\mu$ .

В качестве одного из вариантов предложен следующий адаптивный закон изменения коэффициента  $k_s$ :



$$\dot{\tilde{k}}_s < k_\mu (\mu_{\max} - \mu), \quad k_s = k_{s\min} + \tilde{k}_s, \quad (37)$$

где  $\tilde{k}_s$  – дополнительный сигнал настройки,  $k_\mu = \text{const} > 0$  – коэффициент, определяющий быстроту протекания процесса самонастройки,  $\mu_{\max} = 1 - \delta$  – наибольшее значение параметра скольжения,  $\delta$  – малая константа, необходимая для исключения срыва скользящего режима при  $\mu \approx 1$ .

Согласно (37) значение  $k_s$  будет увеличиваться в тех режимах работы НПА, когда его параметры отличаются от “наихудших”, пока  $\mu < \mu_{\max}$  (так как в этом случае  $\mu_{\max} - \mu > 0$  и  $\dot{\tilde{k}}_s > 0$ ). Это, в свою очередь, в соответствии с установленной зависимостью  $\mu(k_s)$  приведет к росту  $\mu$ . При  $\mu = \mu_{\max}$  будем иметь  $\dot{\tilde{k}}_s = 0$ , т.е. процесс самонастройки закончится. При этом запас, необходимый для выполнения условия существования в случае “ухудшения” параметров системы, обеспечивается за счет выбора коэффициента  $\delta$ .

Определение параметра скольжения  $\mu$ , изменяющегося в процессе управления, не представляет особой трудности, так как сигнал  $\tau_d(t)$  легко доступен для измерения. Для идентификации  $\mu$  разработано устройство (блок идентификации) в цифровом и аналоговом исполнении.

Сформулированные принципы положены также в основу синтеза многоканальной адаптивной СПС, предназначенной для централизованного управления пространственным движением НПА (рис. 11).

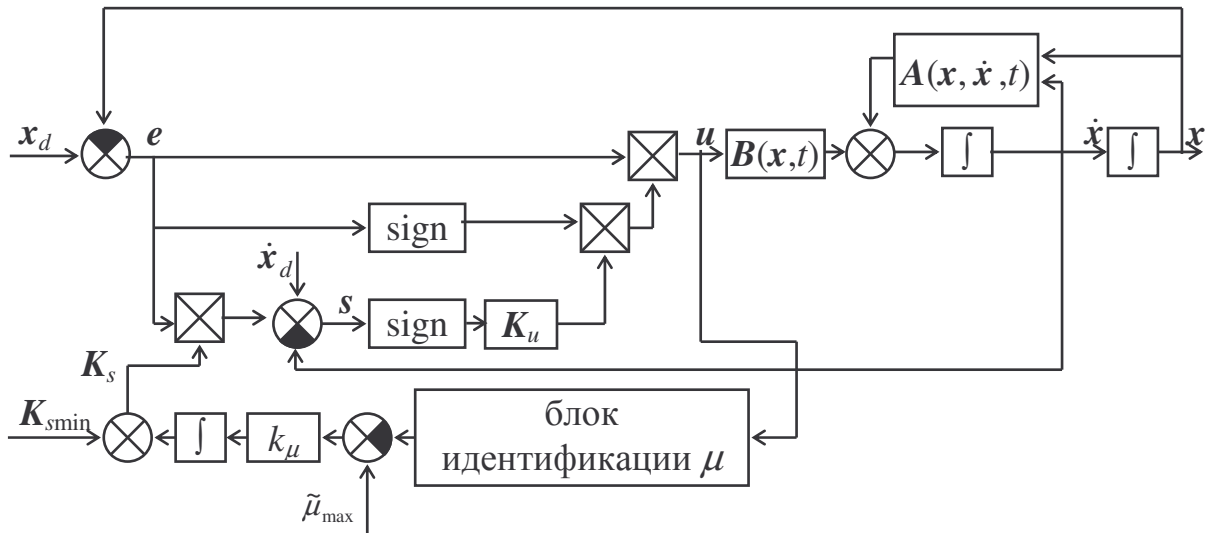


Рис. 11. Структурная схема адаптивной СПС для управления НПА

Показано, что в совокупности увеличение всех элементов  $k_{sii}$  матрицы  $K_s$  (а также любого одного из них) приводит к увеличению значения  $|r_{ij}|$  во всех каналах управления и к перемещению многообразия  $s = 0$  в пространстве координат системы. Для повышения быстродействия СПС следует максимально увеличивать все коэффициенты  $k_{sii}$ , контролируя выполнение неравенств (29) во всех каналах управления. Как показывает проведенный

анализ, в данном случае по аналогии с одноканальной СПС также имеет место однозначная зависимость параметра скольжения  $\mu_i$  от  $k_{sij}$  в каждом канале управления. Поэтому близость  $\mu_i$  к единице (для каждого сигнала  $u_i$ ) принимается в качестве критерия сохранения условий (29) при изменении  $|r_{ij}|$ .

Для реализации предложенного алгоритма настройки следует измерять параметры  $\mu_i$  для каждого сигнала управления  $u_i$  и на основе полученной информации определять значение  $\mu_{\max}$  по формуле  $\mu_{\max} = \max_i \mu_i$ . Тогда увеличение всех значений  $k_{sij}$  производится до тех пор, пока выполняется неравенство  $\mu_{\max} < \tilde{\mu}_{\max}$ , где  $\tilde{\mu}_{\max} = 1 - \delta$  – вспомогательный коэффициент, обеспечивающий запас устойчивости алгоритма адаптации,  $\delta$  – малая константа. Процесс настройки (увеличения) коэффициента  $k_{sij}$  завершается, когда хотя бы одно из значений  $|r_{ij}|$  достигнет величины  $r_{ij \max}$ . Настройка коэффициентов  $k_{sij}$  в зависимости от  $\mu_i$  осуществляется по закону (37).

Процессы управления в синтезированной адаптивной СПС с настройкой поверхностей скольжения представлены на рис. 12а (процессы изменения ошибки  $e_x$  по линейной координате  $x$  в одном из каналов управления). Здесь кривая 1 соответствует переходному процессу в системе при наихудших значениях параметров объекта, когда настройка коэффициентов регулятора не производится ( $k_{si} = 1$ ). Кривая 2 отражает переходный процесс в системе при наилучших значениях параметров объекта, когда за счет адаптивной настройки коэффициенты регулятора удается увеличить до  $k_{si} \approx 2.5$  без срыва скользящего режима. На рис. 12б показаны соответствующие фазовые траектории СПС.

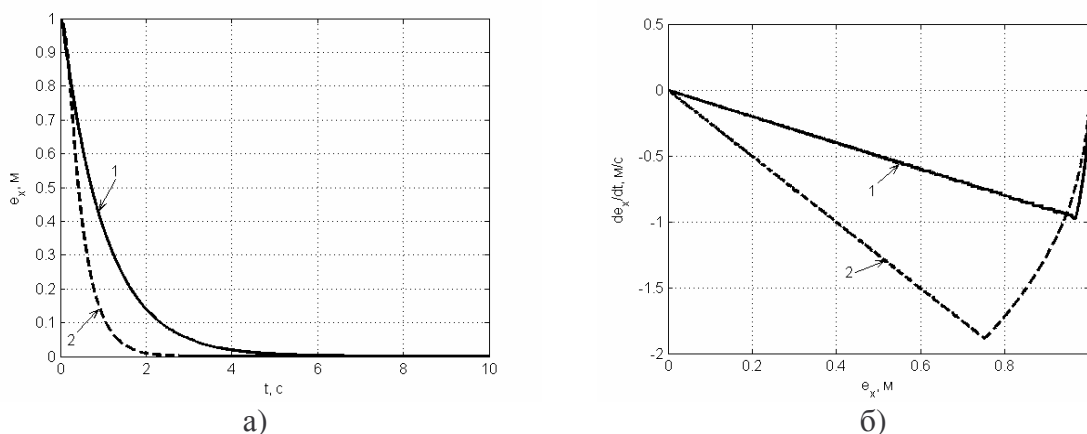


Рис. 12. Переходные процессы и фазовые траектории в адаптивной СПС

Анализ результатов моделирования показывает, что благодаря применению предложенного адаптивного закона настройки положения поверхностей скольжения в каждом канале управления удалось почти в 2.5 раза уменьшить время обнуления ошибки системы в благоприятном режиме работы (при наилучших значениях параметров НПА). В итоге обеспечивается максимально возможное быстродействие и высокая динамическая точность системы без нарушения условий существования скользящего режима.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации на основе единого методологического подхода решена научная проблема создания и теоретического обоснования комплекса новых методов синтеза робастных, самонастраивающихся и адаптивных систем для управления пространственным движением НПА в условиях параметрической неопределенности и нестационарности, наличия воздействий со стороны окружающей вязкой среды, с учетом неидеальности усилительных и исполнительных элементов и ограничений управляющих сигналов.

При решении указанной научной проблемы получены следующие основные теоретические и практические результаты

1. Предложен способ декомпозиции сложной многомерной модели подводного аппарата на подсистемы, соответствующие его отдельным степеням свободы, а также на контуры управления скоростью и положением. Определена последовательность синтеза многоуровневых иерархических СУ на основе полученной децентрализованной модели.

2. Разработан метод синтеза локальных адаптивных систем с нелинейной коррекцией и самонастройкой по эталонной модели для управления двигателями и для децентрализованного управления скоростью НПА, позволяющих компенсировать значительное и быстрое изменение параметров ОУ. Предложен новый подход к формированию сигнала самонастройки, позволяющий варьировать его амплитуду в зависимости от состояния СУ, снижая ее в слабо нагруженных режимах работы.

3. Разработан метод синтеза СНС с эталонной моделью для централизованного управления скоростью движения НПА, позволяющий компенсировать сильное взаимовлияние между его степенями свободы без предварительной коррекции нелинейной динамики.

4. Разработаны методы синтеза двух типов систем с переменной структурой для децентрализованного и централизованного управления скоростью движения НПА по заданной пространственной траектории. На основе этих методов синтезированы новые законы формирования управляющих сигналов в СПС, обеспечивающие учет нелинейностей, независимость показателей качества от изменений параметров объекта и компенсацию неконтролируемых внешних возмущений и динамического взаимовлияния между всеми степенями свободы аппарата при любых скоростях его движения.

5. Предложен метод синтеза многосвязной нелинейной системы управления пространственным положением и ориентацией НПА, учитывающий особенности различных типов СУ скоростью, гарантирующий компенсацию кинематических взаимосвязей между всеми степенями свободы и высокую динамическую точность отслеживания заданных траекторий.

6. Разработан и теоретически обоснован метод синтеза многоканальной СПС для централизованного управления пространственным движением подводного аппарата, не требующий предварительной декомпозиции его полной многомерной математической модели. Сформулированы и доказаны

условия возникновения, существования и устойчивости режима скольжения с учетом нелинейных перекрестных связей по внутренним координатам. Предложены различные модификации законов управления в СПС.

7. Предложена методика исследования и выполнен анализ влияния неидеальностей переключающих устройств и ограничений управляющих сигналов на функционирование СНС с эталонной моделью и СПС. Разработан подход к выбору желаемых процессов управления и определению наилучших показателей качества, достижимых в СНС и СПС в указанных условиях. Сформулировано и доказано свойство робастности СПС при наличии неидеальности гистерезисного типа, и получена оценка точности ее работы по сравнению с идеальным режимом скольжения.

8. Предложен и обоснован метод адаптивной подстройки параметров разрывного управляющего сигнала в СНС, обеспечивающий расширение диапазона обрабатываемых входных воздействий и уменьшение нагрузки на исполнительные элементы без нарушения условий устойчивости и при этом не требующий идентификации изменяющихся параметров НПА. Разработан и теоретически обоснован метод адаптивной настройки коэффициентов управляющих устройств в СПС на основе информации о характеристиках сигналов управления, обеспечивающий максимально возможное быстродействие и высокую динамическую точность СУ без нарушения условий существования скользящего режима.

9. Предложен новый подход к построению и автоматической коррекции пространственных траекторий и скоростных режимов движения НПА по этим траекториям, которые могут быть реализованы при наличии ограничений, накладываемых на управляющие воздействия.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дыда А.А., Лебедев А.В. Нелинейная адаптивная коррекция движителя подводного робота // **Известия ВУЗов. Электромеханика.** – 1996. – №1-2. – С.83-87.

2. Дыда А.А., Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез системы с переменной структурой для управления движением подводного робота // **Известия РАН. Теория и системы управления.** – 2000. – №1. – С.155-162.

3. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Синтез и исследование нелинейной самонастраивающейся системы управления движителями подводного аппарата // **Известия ВУЗов. Электромеханика.** – 2000. – №4. – С.60-64.

4. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Децентрализованное адаптивное управление скоростью движения подводного робота // **Мехатроника.** – 2000. – №6. – С.35-39.

5. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф., Стаценко О.М. Многоканальная самонастраивающаяся система централизованного управления движением подводного робота // **Мехатроника.** – 2001. – №9. – С.41-45.

6. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез самонастраиваемой системы с эталонной моделью для управления скоростью пространственного движения подводного аппарата // **Известия РАН. Теория и системы управления.** – 2002. – №2. – С.170-176.

7. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез многоканальной системы с переменной структурой для управления пространственным движением подводного аппарата // **Мехатроника, автоматизация, управление.** – 2005. – №3. – С.18-26.

8. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Анализ системы второго порядка с переменной структурой и неидеальностью переключающего устройства // **Автоматика.** – 2006. – Т.42. – №2. – С.21-28.

9. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Система с переменной структурой для централизованного управления движением автономного подводного аппарата // **Мехатроника, автоматизация, управление.** – 2009. – №4. – С.73-78.

10. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Система со скользящим режимом для управления многомерным нестационарным линейным объектом // **Информационно-измерительные и управляющие системы.** – 2010. – Т.8. – №8. – С.16-23.

11. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Исследование зависимости параметра скольжения от текущего состояния адаптивной системы с переменной структурой // **Дальневосточный математический журнал.** – 2000. – №1.–С.74-85.

12. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами. – М.: Круглый год, 2001. – 288 с.

13. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.

14. Патент России №2147000. Устройство для программного управления манипулятором / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев. Бюл. №9, 2000.

15. Патент России №2147001. Устройство для управления движителем подводного робота / А.В.Лебедев, В.Ф.Филаретов, А.А.Дыда. Бюл. №9, 2000.

16. Патент России №2147985. Устройство для управления движителем подводного робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, Д.А.Юхимец. Бюл. №12, 2000.

17. Патент России №2187426. Самонастраиваемый электропривод робота / В.Ф.Филаретов, А.Н.Жириков, А.В.Лебедев, А.Е.Шумский. Бюл. №23, 2002.

18. Патент России №2191106. Устройство для управления движителем подводного робота / А.В.Лебедев, В.Ф.Филаретов. Бюл. №29, 2002.

19. Патент России № 2208241. Самонастраиваемый электропривод робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев. Бюл. №19, 2003.

20. Патент России № 2209718. Устройство для управления движителем подводного робота / В.Ф.Филаретов, Д.А.Юхимец, А.В.Лебедев. Бюл. №22, 2003.

21. Патент России № 2230654. Устройство для управления подводным роботом / А.В.Лебедев, В.Ф.Филаретов. Бюл. №17, 2004.



22. Патент России № 2258601. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов, А.Н.Жиравок, А.В.Лебедев. Бюл. №23, 2005.
23. Патент России № 2309444. Самонастраиваемый электропривод робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, А.Н.Жиравок, Д.А.Юхимец. Бюл. №30, 2007.
24. Патент России № 2312007. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, А.Н.Жиравок, Д.А.Юхимец. Бюл. №34, 2007.
25. Патент России № 2335389. Устройство для управления приводом робота / В.Ф.Филаретов, А.Н.Жиравок, А.А.Кацурин, А.В.Лебедев, Д.А.Юхимец. Бюл. №28, 2008.
26. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Разработка и исследование многомерной СПС с нелинейной коррекцией для управления пространственной ориентацией подводного аппарата // Материалы IV Всероссийской конференции “Математика, информатика, управление” (CD-ROM). – Иркутск. – 2005. – С.1-9.
27. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез системы с переменной структурой для управления многомерным нестационарным линейным объектом // Доклады VIII Международной научно-технической конференции “Кибернетика и высокие технологии XXI века”. – Воронеж. – 2007. – С.41-50.
28. Лебедев А.В. Синтез алгоритма и устройства формирования траектории движения динамического объекта с учетом ограничений на управляющие сигналы // Материалы IX Международной Четаевской конференции “Аналитическая механика, устойчивость и управление движением”. – Иркутск. – 2007. – Т.4. – С.137-145.
29. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез робастной системы управления пространственным движением автономного подводного аппарата // Материалы II Международной конференции “Технические проблемы освоения Мирового океана”. – Владивосток. – 2007. – С.117-122.
30. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Разработка методов синтеза систем с разрывным управлением для автономных подводных роботов // Материалы Международной научно-технической конференции “Мехатроника, автоматизация, управление”. – Дивноморское. – 2009. – С.82-84.
31. Filaretov V.F., Dyda A.A., Lebedev A.V. The Sliding Mode Adaptive Control System for Autonomous Underwater Robot // Proc. of The 7th Int. Conf. on Advanced Robotics. Catalonia, Spain, 1995, Vol.8, pp. 263-266.
32. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Dyda A.A. The Underwater Robot Thruster Control System with Non-Linear Correction and Reference Model Self-Adjustment // CD-ROM Proc. of The European Control Conf. Karlsruhe, Germany, 1999, pp. 1-6.
33. Lebedev A.V. The Analysis of Variable Structure System with Control Signal Saturation // Proc. of The IASTED International Conf. Automation, Control and Information Technology. Novosibirsk, Russia, 2002, pp. 494-498.
34. Lebedev A.V., Filaretov V.F. The Synthesis of Adaptive Control System with Reference Model for Autonomous Underwater Vehicle // The CD-ROM Proc. of

The ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. New Orleans, Louisiana, 2002, pp. 1-6.

35. Lebedev A.V. The Features of Reference Model Self-Adjustment Application in Conditions of Control Signal Saturation // Proc. of The IASTED Int. Conf. Intelligent Systems and Control. Tsukuba, Japan, 2002, pp. 18-23.

36. Lebedev A.V., Filaretov V.F. The Synthesis of Multi-Dimensional Variable Structure System for Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of The Sixth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp. Vladivostok, Russia, 2004, pp. 236-240.

37. Lebedev A.V., Filaretov V.F. The Analysis of Variable Structure System with The Non-Ideal Switching Device // Proc. of The Second IASTED International Conf. Automation, Control and Information Technology (Automation, Control and Applications). Novosibirsk, Russia, 2005, pp. 420-424.

38. Lebedev A.V., Filaretov V.F. The Synthesis of Variable Structure System with Nonlinear Correction for the Centralized Control of Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of The 6th Asian Control Conf. Bali, Indonesia, 2006, pp. 923-930.

39. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Sliding Mode Control of Multidimensional Nonstationary Nonlinear Object // Proc. of The Ninth IASTED International Conf. Control and Applications. Montreal, Quebec, Canada, 2007, pp. 261-266.

40. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Variable Structure System for the Control of Multidimensional Nonstationary Linear Object // Proc. of The 16th Int. Conf. on Control Systems and Computer Science. Bucharest, Romania, 2007, pp. 601-605.

41. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Multi-Channel Variable Structure System for the Control of Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of The IEEE International Conf. on Mechatronics and Automation. Harbin, China, 2007, Vol. I, pp. 221-226.

42. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Synthesis of Variable Structure System for the Complex Dynamic Object // CD-ROM Proc. of The IEEE/ASME International Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics. Zurich, Switzerland, 2007, pp. 1-5.

43. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Variable Structure System with the Adaptive Adjustment of Sliding Surfaces // Proc. of The IEEE/ASME International Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics. Xian, China, 2008, pp. 1248-1253.

44. Lebedev A.V., Filaretov V.F. The Synthesis of Multi-Channel Adaptive Variable Structure System for the Control of AUV // Proc. of The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France, 2008, pp. 2834-2839.

45. Lebedev A., Filaretov V., Nesenchuk A. The Analysis of Adaptive System with Reference Model Self-Adjustment and Control Signal Saturation // Proc. of The IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China, 2009, pp. 2841-2845.

46. Lebedev A.V. The Synthesis of Multi-Channel Adaptive Control System for the Autonomous Underwater Robot // Proc. of the First Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications. Vladivostok, Russia, 2010, pp. 324-328.

47. Lebedev A. The Multi-Dimensional Adaptive Control System with Reference Model for the AUV // Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Xian, China, 2010, pp. 1837-1841.

Лебедев Александр Васильевич

Методы синтеза робастного и адаптивного управления необитаемыми  
подводными аппаратами

Автореферат

Подписано к печати 21.03.11  
Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 1,8  
Тираж 100

Уч.-изд. л. 1,5  
Заказ 16

---

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