Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Draum

ЮХИМЕЦ Дмитрий Александрович

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ И ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

> Научный консультант: доктор технических наук,

профессор Филаретов В.Ф.

Владивосток - 2014

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ	. 18
1.1 Анализ особенностей НПА как объектов управления	. 19
1.2 Анализ подходов к синтезу СУ НПА	. 21
1.3 Анализ подходов к реализации и тестированию СУ НПА	. 30
1.4 Постановка задачи исследования	. 36
1.5 Выводы	. 40
2. МЕТОД СИНТЕЗА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	
НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ	. 42
2.1 Описание математической модели НПА	. 42
2.1.1 Математическая модель пространственного движения НПА	. 42
2.1.2 Математическая модель движителей НПА	. 46
2.1.3 Декомпозированная модель пространственного движения НПА	. 48
2.1.4 Порядок синтеза декомпозированной СУ НПА	. 50
2.2. Синтез локальной подсистемы управлением движителями НПА	. 52
2.2.1 Синтез нелинейной системы управления движителем НПА с самонастройкой по эталонной модели	. 52
2.2.2 Синтез СУ движителями НПА на основе нейронных сетей	. 64
2.3 Метод синтеза адаптивной СПС для управления скоростью движения НПА.	. 90
2.3.1 Анализ свободного и вынужденного движений СПС для управления скоростью движения НПА	. 91
2.3.2 Синтез закона управления скоростью движения НПА	101
2.3.3 Расчет параметров адаптивной подсистемы управления скоростью движения НПА по одной степени свободы	107
2.3.4 Определение допустимой величины шага квантования непрерывного входного сигнала контура скорости СУ НПА	115

2.3.5 Исследование работы синтезированной системы управления скоростью движения НПА
2.4 Синтез контура управления пространственным положением и ориентацией НПА
2.5 Исследование синтезированной системы управления пространственным движением НПА
2.6 Выводы
3. МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ С ОДНИМ ПОВОРОТНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ 150
3.1 Описание конструкции НПА с одним поворотным маршевым движителем 150
3.2 Разработка структуры системы управления НПА с одним поворотным движителем
3.3 Разработка алгоритма решения обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя НПА159
3.3 Формирование программных сигналов для различных режимов движения НПА с одним поворотным движителем
3.3.1 Режим движения НПА с одним поворотным движителем к заданной точке
3.3.2 Режим подхода НПА к целевой точке с заданной ориентацией 175
3.3.3 Режим движения НПА по произвольной пространственной траектории 183
3.4 Выводы
4. МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ ДВИЖЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ 189
4.1 Обоснование возможности обеспечения высокоточного управления движением НПА по заданной пространственной траектории на основе изменения программных сигналов его движения
4.2 Метод автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории
4.2.1 Метод синтеза регулятора программной скорости движения НПА 200
4.2.2 Исследование системы формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории
4.3 Метод автоматической коррекции программной траектории движения НПА 209
4.3.1 Особенности коррекции программных сигналов движения НПА

4.3.2 Исследование метода коррекции программной траектории движения НПА 214
4.4 Разработка метода высокоскоростного и высокоточного движения НПА по пространственной траектории
4.4 Способ определения вектора отклонения НПА от программной траектории движения
4.4.1 Определение вектора отклонения НПА от траектории, задаваемой аналитическими выражениями вида (4.2)
4.4.2 Определение вектора отклонения НПА от траектории, формируемой на основе сплайнов третьего порядка
4.5 Экспериментальные исследования разработанных систем высокоточного управления движением НПА
4.5.1 Экспериментальные исследования системы формирования программных сигналов движения с использованием АНПА «НМ-2»
4.5.2 Экспериментальные исследования системы автоматического формирования программных сигналов движения с использованием АНПА «MARK»
4.6 Выводы
5. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ
5.1 Разработка метода комплексирования данных, поступающих от бортовых датчиков НПА
5.1.1 Постановка задачи комплексирования сигналов, поступающих от датчиков НПА
5.1.2 Алгоритм комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков НПА
5.1.3 Результаты математического моделирования работы алгоритма комплексирования данных, получаемых от бортовых датчиков НПА
5.2 Разработка метода идентификации параметров НПА 256
5.2.1 Метод идентификации параметров НПА 259
5.2.2 Результаты математического моделирования алгоритма идентификации параметров НПА
5.3 Выводы

6. РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПОЛУНАТУРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ	
РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ	~
AIIIIAPATOB	J
6.1 Описание программного комплекса для моделирования движения НПА 27	1
6.2 Реализация режима полунатурного моделирования движения НПА 275	5
6.3 Метод автоматической синхронизации универсальной среды моделирования	
Matlab с моделирующим комплексом277	7
6.3.1 Особенности синхронизации вычислительных процессов СУ и процессов	
моделирования динамики НПА в Matlab 278	3
6.3.2 Результаты вычислительного эксперимента	2
6.4 Выводы	5
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	7
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	9

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АНПА автономный необитаемый подводный аппарат
- АСК абсолютная система координат
- АФ адаптивный фильтр
- ВП высокочастотные переключения
- ГАНС гидроакустическая навигационная система
- ДУС датчик угловой скорости
- ЛФК линейный фильтр Калмана
- ННС нейро-нечеткая сеть
- НПА необитаемый подводный аппарат
- НС нейронная сеть
- ОУ объект управления
- РМВ реальный масштаб времени
- СК система координат
- СПС система с переменной структурой
- ССК связанная система координат
- СТФК сигма-точечный фильтр Калмана
- СУ система управления
- ЦОЗП центральная ось зоны переключений

введение

В настоящее время исследование и освоение Мирового океана является одним из приоритетных направлений развития многих стран. Это связано с тем, что в Мировом океане находятся обширные месторождения полезных ископаемых, успешная эксплуатация которых позволит обеспечить дополнительное развитие экономики этих стран. Кроме того, в последние десятилетия большое количество жизненно важных коммуникаций (линий связи и электроснабжения, подводных трубопроводов) проложено по дну Мирового океана, что требует их непрерывного инспектирования и обслуживания. Как показывает практика [3, 78, 85, 217, 251] выполнение указанных работ происходит в экстремальных условиях (большие глубины, высокое давление, низкие температуры и т.д.) и связано с риском для жизни и здоровья людей, которые их выполняют. Кроме того, привлечение людей для большинства видов выполнения подводных работ связано с большими материальными затратами, а в некоторых случаях является принципиально невозможным. Например, устранить аварию на глубоководной нефтедобывающей платформе Deepwater Horizon стало возможно только с использованием необитаемых подводных аппаратов (НПА).

В связи с вышесказанным, дальнейшая интенсификация освоения Мирового океана невозможна без увеличения роли НПА при выполнении различных видов подводных работ. При этом в процессе этого освоения существенно усложняются задачи, решаемые с помощью НПА, и особенную актуальность приобретают задачи, выполняемые в автономном режиме без непосредственного участия оператора.

Существенный вклад в создание и развитие современной подводной робототехники и методов управления НПА внесли многие отечественные и зарубежные ученые М.Д.Агеев, Е.Н.Пантов, В.С.Ястребов, Т.I.Fossen, J.-J.E.Slotine, T.J.Tarn, D.R.Yoerger и др. Следует отметить, что работы по созданию новых типов НПА ведутся во многих российских научных организациях, таких как МГТУ им. Н.Э.Баумана, ИПМ РАН им. М.В.Келдыша, ИО РАН им. П.П.Ширшова, ИПМТ ДВО РАН, а также в ведущих зарубежных университетах.

В настоящее время уже определился основной круг практических задач, для выполнения которых необходимы НПА [1, 251]. Среди этих задач можно выделить следующие основные направления.

1. Научные исследования: картографирование рельефа дна, гидрографические измерения, экологические исследования, оценка запасов биоресурсов. Также НПА используются для выполнения специфических научных задач в области подводной археологии [174], исследования шельфовых зон [241] и пресноводных водоемов [121].

2. Мониторинг подводной окружающей среды: долговременный мониторинг радиационной и химической обстановки, уровня загрязнения, контроль технического состояния и сохранности подводных трубопроводов, кабельных линий и других сооружений. При этом многие задачи, связанные с работой подо льдом возможно выполнять только с помощью НПА.

3. Военные задачи: поисковые и аварийно-спасательные работы, разведка и наблюдение на обширных океанских и морских театрах военных действий, патрулирование на заданном рубеже, поиск, обнаружение и слежение за подводными лодками, боевое охранение, использование в качестве противолодочного оружия, уничтожение целей и объектов, применение в операциях по постановке мин, проведение операций по разминированию и нейтрализации минных заграждений [19], участие в мероприятиях по радиоэлектронной борьбе и гидроакустическому подавлению.

4. Добыча полезных ископаемых: разведка подводных месторождений, создание и обслуживание подводных конструкций (обследование причальных стенок и донных сооружений портовых акваторий и шельфовых буровых установок). Кроме того, в последнее время появились перспективные проекты создания роботизированных комплексов по добыче минеральных полезных ископаемых [218].

5. Другие области: обследование корпусов кораблей [131], прокладка подводных коммуникаций, обследование атомных станций, поиск и обследование затонувших объектов, использование в целях рыбохозяйственной отрасли, использование в развлекательных целях.

Как видно из представленной классификации большинство подводных операций, выполняемых НПА, можно условно разделить на две большие группы. К первой группе относятся операции, требующие выполнения подводным аппаратами точных перемещений близи объектов работ. Указанные операции обычно выполняются с помощью НПА, обладающих высокой маневренностью, но имеющих сложную форму, обусловленную расположением их движителей и наличием дополнительных исполнительных устройств (манипуляторов, пробоотборников и т.д.). К указанным операциям можно отнести операции инспектирования подводных сооружений, обследование затонувших объектов, коралловых рифов и т.д. В качестве примера таких НПА можно привести автономные НПА (АНПА), выполняющие операции, характерные для телеуправляемых аппаратов (манипуляционные и осмотровые операции). В настоящее время уже существуют серийные образцы АНПА (Marlin компании Lockheed Martin), которые предназначены для выполнения осмотровых операций различных подводных сооружений, что предполагает движение по сложным пространственным траекториям, исключая столкновения с окружающими конструкциями.

Ко второй группе подводных операций можно отнести операции, требующие точного перемещения с высокой скоростью (более 1 м/с) по криволинейным гладким и достаточно протяженным пространственным траекториям. Примерами таких операций являются мониторинг водной среды, картографирование, инспекция подводных трубопроводов, кабельных линий и т.д. Указанные операции обычно выполняются НПА, имеющими обтекаемую форму, что позволяет снизить негативные эффекты их взаимодействия с вязкой средой и увеличить время автономной работы, но при этом их движительный комплекс обеспечивает перемещение этих НПА по ограниченному числу степеней свободы, что приводит к снижению их маневренности.

Точность выполнения подводных операций НПА в значительной степени зависит от качества их СУ. При этом наибольшую трудность в процессе синтеза высокоточных СУ НПА представляет недостаточность или полное отсутствие информации о параметрах НПА, а также о характере их взаимодействия с вязкой

окружающей средой [156]. В большинстве случаев в ходе предварительных исследований удается получить лишь приближенные сведения об этих параметрах, которые могут изменяться в широких пределах в процессе движения НПА по пространственным траекториям.

Поэтому для качественного решения задач первого типа целесообразно использовать робастные СУ, которые, имея сложную реализацию, позволяют обеспечить нечувствительность процесса управления к изменению параметров НПА и взаимовлияниям между его степенями свободы, имеющих повышенные величины из-за сложной формы НПА. В то же время для выполнения задач второго типа можно использовать более простые СУ, в том числе содержащие линейные регуляторы.

Помимо точности движения по заданной траектории большое значение имеет скорость этого движения. Чем выше скорость движения НПА, тем меньше времени тратится на выполнение различных подводных операций, что особенно это важно при выполнении поисковых и осмотровых операций. Однако увеличение скорости движения влечет за собой многократное увеличение всех негативных эффектов взаимодействия НПА с вязкой окружающей средой. При этом использование сложных и высококачественных робастных СУ НПА позволяет обеспечить точное движение НПА по пространственным траекториям при условии, что движители НПА будут способны отработать сигналы управления, формируемые этими СУ, величина которых также возрастает с ростом скорости движения. Поэтому повышение скорости движения может привести ко входу в насыщение движителей НПА и, как следствие, к уменьшению точности его движения. Таким образом, при синтезе СУ, обеспечивающих высокоточное движение НПА по пространственным траекториям с высокой скоростью, необходимо учитывать не только особенности динамики НПА, но и формировать такие программные сигналы, которые будут отрабатываться этими СУ с заданной точностью.

Важной проблемой, возникающей в процессе реализации СУ НПА, является необходимость формирования сигналов обратных связей на основе данных, поступающих от бортовых датчиков НПА и обновляющихся с разной частотой, зависящей от типа датчика. При этом частота обновления данных от отдельных

датчиков может быть в несколько раз ниже, чем требуемая частота выработки управляющих сигналов в СУ НПА. Поэтому для обеспечения точной работы СУ НПА необходимо разработать алгоритмы комплексной обработки данных, поступающих от датчиков НПА, которые позволят обеспечить нужную частоту формирования сигналов обратных связей.

Кроме разработки алгоритмов управления и обработки информации большое значение имеет тестирование и настройка созданных СУ НПА. Основным методом тестирования этих СУ НПА является проведение натурных экспериментов, что требует использования дорогостоящего оборудования и специальных помещений, а также значительно затрудняет и затягивает начальный этап тестирования. Для упрощения начального процесса тестирования и настройки СУ НПА целесообразно использовать методы полунатурного моделирования, в которых реальная СУ управляет моделью НПА. Поэтому необходимо разработать эффективные подходы к полунатурному моделированию на основе использования широко применяемых инженерами универсальных сред моделирования, что позволит обеспечить удобство создания математических моделей НПА и анализа полученных данных.

Таким образом, целью работы является решение важной научной проблемы, заключающейся создании и теоретическом обосновании 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 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.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

1) 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.

2) Разработка метода синтеза СУ пространственным движением НПА с одним поворотным движителем, учитывающей особенности кинематики его движительного комплекса и обеспечивающей точное перемещение НПА по гладким пространственным траекториям.

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

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

5) Разработка методов комплексной обработки информации, поступающей с различной (часто низкой) частотой от минимального набора навигационнопилотажных датчиков НПА, для обеспечения качественной работы их СУ.

6) 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.

В диссертационной работе в качестве основного режима работы НПА рассматривается их движение по пространственным траекториям с высокими скоростями. При этом модель, описывающая динамику их движения в указанных режимах, является многомерной, нелинейной, содержит перекрестные связи между их степенями свободы, а также неопределенные коэффициенты и внешние воздействия. Указанные особенности этой модели учитываются при разработке СУ НПА.

Для решения поставленной задачи в диссертации предлагается создать две группы подходов и методов. 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 методов синтеза децентрализованных адаптивных СУ, 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, имеющих обтекаемую форму, ограниченное количество степеней свободы и предназначенных для высокоскоростного и точного движения вдоль протяженных пространственных объектов. 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 синижение точности работы этих регуляторов и возможное насыщение отдельных движителей в процессе быстрых перемещений этих НПА.

Для обеспечения реализации предложенных СУ НПА был разработан метод формирования сигналов обратных связей на основе данных, поступающих с различной частотой от бортовых датчиков НПА. Также был предложен метод идентификации параметров НПА, которые в дальнейшем используются в процессе синтеза и исследования их СУ.

По результатам проведенных исследований и разработок сформулированы следующие основные положения, выносимые на защиту:

- принцип построения двухуровневых СУ высокоточным движением НПА по сложным пространственным траекториям с предельно высокой скоростью;

- метод синтеза нелинейной коррекции и самонастройки по эталонной модели для движителей НПА, основанный на использовании наиболее полной их модели, учитывающей все существенные эффекты взаимодействия винта с вязкой жидкостью;

- методы синтеза систем управления движителями НПА, основанные на использовании нейронных сетей, перенастраиваемых в реальном масштабе времени;

- метод синтеза децентрализованной системы с переменной структурой (СПС) для управления скоростью движения НПА, позволяющий использовать алгоритм настройки ее параметров, не требующий измерения или оценки параметров НПА в процессе его функционирования;

- методы формирования траекторий движения НПА с одним поворотным движителем, учитывающие особенности формирования силы тяги его движительным комплексом;

- метод синтеза системы автоматического формирования программной скорости движения НПА по сложной пространственной траектории;

-метод синтеза системы коррекции программных сигналов движения НПА, позволяющей увеличить точность его движения по пространственной траектории без изменения СУ НПА;

- метод комплексной обработки данных, поступающих от бортовых датчиков НПА, на основе использования сигма-точечного фильтра Калмана;

- метод идентификации параметров НПА на основе неполных данных, поступающих от его навигационно-пилотажных датчиков;

- метод построения моделирующего комплекса для полунатурного моделирования работы бортовой СУ НПА с возможностью использования внешних сред моделирования.

В соответствии с поставленными задачами определена структура диссертации, состоящая из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

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 известных 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 взаимодействия с окружающей вязкой средой в процессе их движения по сложным пространственным траекториям. При этом в процессе синтеза 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. Кроме того, в процессе реализации многих СУ не учитывается различная частота 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 были окончательно сформулированы и обоснованы цель и задачи исследования, результатом которого должны стать новые подходы и методы, позволяющие синтезировать СУ для высокоточного управления высокоскоростным движением НПА различного вида и назначения по произвольным пространственным траекториям в условиях существенной переменности параметров взаимодействия этих НПА с окружающей жидкостью.

Во второй главе диссертации разрабатывается метод синтеза децентрализованной адаптивной СУ НПА, состоящей из трех вложенных контуров: контура управления движителями, контура управления скоростью движения и контура управления положением НПА. В главе последовательно разрабатываются методы синтеза локальных СУ этих контуров, позволяющих придаться каждому контуру желаемые динамические свойства. Также в главе большое внимание уделяется разработке и обоснованию методов повышения быстродействия СУ НПА при изменении его параметров в процессе функционирования.

В третьей главе диссертации разрабатывается метод синтеза СУ для высокоскоростного НПА с одним поворотным движителем. В главе предлагается структура СУ этого НПА, а также разрабатываются алгоритмы управления его исполнительными устройствами. Кроме того, в главе разрабатываются методы

формирования траектории движения НПА с одним поворотным движителем для различных режимов его движения.

В четвертой главе диссертации разрабатываются методы синтеза систем формирования программных сигналов ΗΠА автоматического движения ПО пространственным траекториям, которые позволяют обеспечить его движение с предельно возможной скоростью при одновременном сохранении заданной точности этого движения. Предлагается два основных подхода: метод автоматического формирования программной скорости движения и метод коррекции программной траектории движения НПА. Обосновывается область применения каждого из этих методов, описываются особенности их реализации, а также приводятся результаты экспериментов, моделирования И натурных показывающие эффективность предлагаемых подходов к построению высокоточных СУ высокоскоростным движением НПА.

В пятой главе диссертации разрабатываются методы комплексной обработки информации, поступающей от бортовых датчиков НПА. Предлагается метод, основанный на использовании сигма-точечного фильтра Калмана, который позволяет обеспечить требуемую частоту обновления данных о параметрах движения НПА независимо от частоты обновления данных, поступающих от его датчиков, а также восстановить неизмеряемые бортовыми датчиками НПА компоненты его вектора состояния. На основе указанного метода комплексной обработки данных в главе разрабатывается метод идентификации параметров НПА, который обладает относительно низкой вычислительной сложностью и может быть реализован на его бортовом компьютере.

В шестой главе диссертации предлагается подход к построению моделирующих комплексов для полунатурного моделирования работы программных реализаций созданных СУ НПА. Особенностью указанного подхода является использование для реализации математической модели НПА внешних сред моделирования, что существенно увеличивает удобство реализации процесса полунатурного моделирования работы СУ НПА.

Результаты, полученные в диссертации, позволяют на основе единого теоретического подхода синтезировать СУ НПА, которые обеспечивают предельно быстрое перемещение этих НПА по пространственным траекториям с заданной точностью.

Основные результаты диссертации опубликованы в 69 публикациях, в том числе 1-й монографии, 19 статьях в журналах из списка ВАК для докторских диссертаций, 1 статье в журнале, индексируемом в базе Scopus, 10 патентах и 5 свидетельствах о регистрации программного обеспечения для ЭВМ. Отдельные положения работы докладывались на 15 международных и 15 российских научных конференциях.

Относительная простота реализации и высокая эффективность разработанных в диссертации методов и законов управления НПА позволяет использовать их в составе бортовых СУ различных НПА. При этом использование предложенных в диссертации систем и устройств позволит существенно расширить функциональные возможности НПА, а также существенно увеличить производительность и качество выполнения ими различных подводно-технических операций и работ.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ

Общее представление о проблемах и перспективах развития подводной робототехники дается в работах [1, 3, 78, 85, 113, 116, 156, 217, 234]. Как показывает анализ указанных источников, при выполнении различных видов подводных работ (осмотр причальных стенок, корпусов судов и нефтедобывающих платформ, затонувших объектов и т.д.), НПА должны перемещаться с высокой точностью по различным пространственным траекториям. При этом точность этого движения в существенной степени зависит от качества СУ, используемой в этих НПА. Кроме того, в настоящее время актуальным становится уменьшение времени выполнения подводных работ, что позволяет снизить стоимость использования НПА. Этой цели можно добиться, увеличив скорость движения НПА по пространственным траекториям без снижения точности этого движения, а это, в свою очередь, приводит к необходимости разработки более эффективных СУ.

Также в процессе проектирования СУ НПА необходимо проводить большое количество экспериментальных исследований, что требует значительных материальных и временных затрат. Поэтому одной из актуальных задач является создание специализированных инструментов, позволяющих обеспечить проведение предварительных испытаний СУ НПА в полунатурном режиме, когда в качестве объекта управления (ОУ) для реализованной СУ НПА используется его математическая модель. Указанный подход позволяет существенно снизить временные и материальные затраты на проектирование СУ НПА.

В данной главе проводится анализ существующих решений, используемых для построения СУ пространственным движением НПА, анализируются их преимущества и недостатки, и на основе полученных результатов выбирается наиболее перспективный путь повышения эффективности СУ НПА, а также формулируются цели и задачи исследования.

1.1 Анализ особенностей НПА как объектов управления

Важным этапом разработки СУ для любого динамического объекта является анализ его математической модели и выявление существенных особенностей, которые необходимо учитывать при синтезе этой СУ. От того насколько полно в процессе синтеза СУ учитываются указанные особенности будет в значительной мере зависеть и качество ее работы.

Описанию модели динамики НПА посвящено большое количество работ [3, 46, 78, 114, 116, 156]. В указанных работах математическая модель НПА получена на основе уравнений Ньютона-Эйлера или Эйлера-Лагранжа которые описывают движение свободного тела в пространстве, с учетом влияния гидродинамических и гидростатических сил и моментов, действующих на НПА со стороны вязкой окружающей среды. При этом существует два основных вида записи этой модели: в виде системы дифференциальных уравнений [46] и в матричном виде [156]. Первый вид записи наиболее удобен при декомпозиции полной модели НПА на отдельные подсистемы и создании на основе полученного описания децентрализованных СУ, а второй вид удобен при разработке централизованных многоканальных СУ НПА.

Как показывает анализ указанных моделей, можно выделить следующие основные особенности НПА как объектов управления.

1. Наличие гидродинамических сил и моментов, описываемых нелинейными зависимостями, приближенный вид которых приведен в работах [29, 46, 116, 134, 156, 172]. При этом, как показывают исследования, проведенные в работе [232], в случае, когда НПА имеют сложную форму, что является характерным для НПА, несущих сложное бортовое оборудование, гидродинамические силы и моменты зависят не только от скорости движения НПА, но также и от направления движения, причем сами зависимости имеют сложный нелинейный характер.

2. Наличие присоединенных масс жидкости, которые изменяют инерционные параметры НПА за счет вовлечения определенных объемов жидкости в движение при перемещении этих НПА. Как показано в работах [1, 46, 116, 156] присоединенные массы и моменты инерции жидкости определяются формой НПА. Кроме того, их

величины также зависят от параметров окружающей среды, режима движения НПА, и могут существенно меняться в процессе его функционирования.

3. Наличие перекрестных связей между степенями свободы НПА, обусловленных наличием кориолисовых и центростремительных сил при их движении одновременно по нескольким степеням свободы [114, 116, 156]. Этот эффект проявляется при движении НПА по криволинейным пространственным траекториям, при этом чем больше скорость их движения, тем больше величина этих сил.

4. Наличие внешних воздействий (подводных течений) со стороны окружающей среды. Следует отметить, что во многих случаях измерить указанные внешние возмущения не представляется возможным.

Помимо указанных особенностей на динамику НПА существенное влияние оказывает динамика его движительного комплекса [46, 73, 155, 242, 248]. Как показывают экспериментальные исследования [4, 169, 180, 181], проведенные различными исследователями, уравнения динамики движительного комплекса описываются сложными нелинейными зависимостями, которые включают не только параметры самого движителя, но и режима движения НПА. При этом в большинстве работ, посвященных учету динамики движительного комплекса, движители НПА описываются с помощью упрощенных моделей, не учитывающих ряд важных эффектов, возникающих при взаимодействии винта с вязкой жидкостью. Однако в работах [169, 180, 242] было экспериментально показано, что в случае использования упрощенных моделей движителя при синтезе СУ НПА качество работы реальной системы управления было неудовлетворительно и приводило к появлению автоколебаний при управлении НПА. Поэтому для синтеза СУ НПА необходимо как можно точнее учитывать динамику их движителей.

Кроме динамики движителей, также необходимо учитывать и кинематику движительного комплекса [116], которая в отдельных случаях может вносить дополнительную нелинейность в математическую модель НПА.

Помимо упомянутых выше математических моделей динамики НПА существует еще ряд математических моделей [3, 46, 114, 178], которые описывают

различные частные случаи движения этих НПА. В частности, в [46] приведена математическая модель НПА, функционирующего в режиме стабилизации, когда скорости его перемещения малы. В этом случае перекрестные связи между его степенями свободы не существенны и ими можно пренебречь. В работах [1, 3] математическая модель динамики НПА описывается отдельно для его движения в вертикальной и горизонтальной плоскости, что приводит к ее существенному упрощению, однако, не позволяет использовать ее при исследовании движения НПА по произвольной пространственной траектории. Таким образом, использование упрощенных моделей динамики НПА, приемлемых только для какого-то конкретного вида НПА или режима его движения, не позволяет на их основе синтезировать высокоточную СУ НПА для случая его произвольного пространственного движения.

Также существенную проблему в процессе формировании математической модели динамики НПА представляет расчет его параметров. В работах [156, 158, 159, 179, 187, 205, 224, 250] отмечается, что в настоящее время существует две основные методики определения этих параметров: либо на основе проведения серии натурных экспериментов, либо с использованием аналитических методов их вычисления. При этом существующие способы определения указанных параметров могут дать только приближенные их значения.

Таким образом, НПА являются сложными многомерными нелинейными динамическими объектами, функционирующими в условиях наличия перекрестных связей между их степенями свободы, внешних возмущений, а также переменности и неопределенности их параметров. Причем указанные негативные эффекты резко возрастают при движении НПА одновременно по нескольким степеням свободы, а также при увеличении скорости этого движения, что приводит к необходимости их учета при синтезе высокоточной СУ для высокоскоростного движения НПА.

1.2 Анализ подходов к синтезу СУ НПА

В настоящее время уже создано достаточно большое количество методов проектирования СУ НПА [78, 116, 130, 156, 209]. Анализ указанных работ

показывает, что существующие СУ НПА можно условно разделить на три большие группы.

К первой группе относятся СУ, синтезированные на основе упрощенных математических моделей НПА, либо на основе предположения о постоянстве параметров этих НПА. К таким системам, в первую очередь, относятся классические линейные СУ, примеры которых описаны в работах [25, 170, 187, 193]. Как показывает практика, использование СУ НПА данного типа эффективно только в отдельных режимах работы, в которых слабо проявляются такие особенности НПА как переменность и неопределенность его параметров, наличие перекрестных связей и т.д. К таким режимам можно отнести движение по прямолинейным траекториям с постоянной скоростью и позиционирование в заданной точке. Однако при движении НПА по сложным пространственным траекториям с одновременным изменением нескольких линейных и угловых координат указанные линейные СУ уже не обеспечивают приемлемого качества управления. В частности, в работе [203] приводятся результаты экспериментальных исследований движения НПА при использовании в его СУ ПИД-регуляторов. Эти исследования показывают резкое ΗΠА управления С помощью ПИД-регуляторов снижение качества при одновременном управлении линейной и угловой координатами, что может привести к столкновениям НПА с близко расположенными препятствиями.

Другим типом линейных СУ НПА являются системы с программным изменением коэффициента усиления [137], которые используют разные линейные регуляторы для разных режимов работы, что позволяет учесть нелинейности математической модели НПА. Однако СУ этого типа также имеют существенные недостатки, заключающиеся в следующем: для синтеза регуляторов используются линеаризованные модели НПА; чаще всего в качестве регуляторов используются ПИД-регуляторы, которые не обеспечивают приемлемого качества управления при движении НПА по нескольким степеням свободы; необходимо проводить устойчивости каждой дополнительные исследования системы для точки линеаризации математической модели НПА.

Таким образом, СУ НПА, построенные на основе линейных регуляторов, могут эффективно использоваться только при движении этих НПА по прямолинейным траекториям, когда взаимовлияния между его степенями свободы незначительны и параметры НПА не меняются.

Другим типом СУ НПА являются адаптивные системы, которые позволяют подстроить параметры этих СУ к изменению параметров НПА в процессе их функционирования. Принципы построения таких систем приведены в работах [30, 70, 109, 185, 200], а их использование для управлением различными сложными робототехническими устройствами рассмотрено в работах [28, 39, 42, 59, 72, 112, 182, 189, 214, 223].

Пример использования адаптивной системы для управления движением НПА приведен в работе [124]. В этой работе предлагается метод синтеза адаптивной системы управления движением торпедообразного НПА в горизонтальной плоскости, с учетом неопределенности его гидродинамических коэффициентов. В работе [228] предлагается метод синтеза адаптивного ПД-регулятора для управления движением НПА к заданной точке на основе использования модели плавучести и гравитационных сил, действующих на этот НПА.

Однако несмотря на достаточно высокое качество управления, которое обеспечивают адаптивные системы, основными их недостатками являются высокая сложность при увеличении числа настраиваемых параметров, а также необходимость идентификации ΗΠΑ параметров В процессе ИХ функционирования ДЛЯ осуществления настройки параметров этих СУ. Кроме того, определенные трудности при синтезе таких систем вызывает выбор и обоснование такого алгоритма настройки параметров СУ, который обеспечит устойчивость всей системы в целом. Поэтому применение этих систем для управления НПА представляет определенные сложности.

К третьему типу СУ НПА можно отнести робастные системы управления, которые обеспечивают независимость процесса управления от параметров и свойств самого ОУ. Это свойство позволяет гарантировать требуемое качество управления

НПА при любых изменениях его параметров в заданных диапазонах. При этом среди робастных СУ можно выделить несколько основных видов.

К первому виду робастных СУ можно отнести самонастраивающиеся системы с эталонной моделью, принципы построения которых приведены в работах [8, 26, 60, 71, 233]. Основной особенностью СУ этого типа является наличие в явном виде технического устройства (модели), которое обладает заданными динамическими свойствами. При этом динамику всей системы в целом сводят к желаемой динамике модели. Такие системы находят применение и в подводной робототехнике [12, 28, 36, 122, 215] обеспечивая качественное управление НПА с помощью достаточно простых средств без необходимости идентификации параметров НПА в процессе его работы. В качестве основного недостатка таких систем следует отметить наличие высокочастотных колебаний в контуре самонастройки, что в некоторых случаях может значительно снизить качество управления.

К другому виду робастных СУ можно отнести оптимально-робастные СУ, принципы построения которых описаны в работах [5, 40, 61]. Этот вид СУ часто используется для управления многомерными динамическими объектами С неопределенностями различного типа (структурными и параметрическими), содержащимися в их математических моделях [165 244, 252]. Эти системы в том числе используются для управления отдельными степенями свободы НПА [129, 201, 243]. Преимуществом таких систем является их достаточно высокая робастность к неопределенным параметрам НПА, однако их синтез проводится по линеаризованной модели, что ограничивает их использование для управления пространственным движением НПА.

Также следует отметить использование СУ на основе нейронных сетей (HC), которые в последние десятилетия получили достаточно широкое распространение для управления сложными динамическими объектами с неопределенными параметрами [216, 230]. Основным преимуществом таких СУ является возможность их обучения для работы с заданными ОУ без длительных процедур идентификации их параметров и синтеза СУ. Указанные СУ также нашли свое применение для управления НПА. В частности, в работе [236] предлагается СУ на основе

искусственной НС для управления движением НПА вблизи дна. В работах [219] и [229] синтезируются НС для управления глубиной НПА. В работе [192] на основе НС синтезируется СУ движителем НПА, учитывающая различные эффекты взаимодействия винта движителя с жидкостью.

Несмотря на указанные преимущества использования НС, СУ на их основе имеют ряд существенных недостатков, заключающих в следующем. Качество работы СУ на основе НС существенно зависит от количества нейронов и типа архитектуры сети. При этом для управления объектами, которые описываются сложной многомерной математической моделью, количество нейронов должно быть большим, что требует использования больших вычислительных мощностей для расчета сигнала управления. Кроме того, для управления объектами, параметры которых меняются в процессе их функционирования, в частности НПА, необходимо периодически переобучать НС, использующуюся в СУ, что требует реализации сложных вычислительных процедур. Поэтому основная трудность использования НС для ΗΠΑ необходимости управления заключается В использовать большие вычислительные мощности, которые часто не могут быть обеспечены бортовым компьютером НПА.

В настоящее время одним из наиболее распространенных видов робастных СУ являются СПС, работающие в скользящем режиме. Основы теории синтеза указанных систем изложены в работах [16, 17, 74, 75, 222], а примеры их использования для управления сложными нелинейными, многосвязными объектами в работах [41, 171, 183, 191, 204]. Также указанные системы получили широкое распространение для управления движением НПА [11, 13, 138, 139, 231]. В частности, в работе [240] СПС для управления курсом НПА при предложена его движении ПО пространственной траектории. В работе [253] на основе декомпозиции полной математической модели НПА предлагается СПС с обратной связью по вектору состояния НПА. В работе [37] предлагается многоканальная система с переменной структурой, позволяющая учесть величины перекрестных связей между степенями свободы НПА.

Также в последнее время большое распространение получили СПС, реализованные с использованием методов нечеткой логики [164, 184, 225, 245]. Как отмечают исследователи, использование этих методов позволяет упростить настройку этих систем в процессе эксплуатации, а также избежать появления высокочастотных колебаний.

Несмотря на то, что СУ НПА на основе СПС обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими видами систем управления, они обладают также и недостатком, который заключается в том, что для обеспечения работоспособности СПС во всем диапазоне изменения параметров ОУ эти системы синтезируются с учетом «наихудшего» случая, когда эти параметры обеспечивают наименьшее быстродействие системы. В результате при изменении параметров ОУ в «лучшую» сторону, быстродействие СПС не увеличивается. То есть системы управления данного типа обладают заведомо заниженным быстродействием. При этом стоит отметить, что быстродействие СУ существенно влияет на динамическую точность отработки изменяющихся программных сигналов, которые формируются при движении НПА по пространственным траекториям, и, следовательно, заниженное быстродействие СУ приведет к снижению точности движения НПА по заданной траектории.

Для решения этой проблемы различными исследователями предлагается вводить в СПС самонастройку ее коэффициентов в зависимости от величины текущих параметров ОУ, что позволяет в отдельных случаях увеличить быстродействие этих СПС. Примеры таких систем представлены в работах [10, 14, 58, 118, 126, 135, 221, 246, 247]. Однако в большинстве таких систем самонастройка осуществляется на основе измеренных или вычисленных параметров ОУ. Этот подход можно эффективно реализовать для отдельных типов ОУ, например, многозвенного манипулятора, однако в случае НПА для этого необходимо производить идентификацию его параметров в процессе их функционирования, что из-за высокой вычислительной сложности алгоритмов идентификации часто не позволяет реализовать такие системы с помощью бортового компьютера НПА.

Поэтому для введения в СПС элементов адаптации необходимо использовать алгоритмы, позволяющие настраивать ее параметры на основе косвенных оценок состояния СПС без непосредственного измерения или идентификации параметров ОУ. Основы такого подхода были предложены в работах [11, 17, 136, 138].

Таким образом, на основе проведенного анализа можно наметить следующие подходы к решению проблемы создания высокоточной системы управления высокоскоростным движением НПА по сложным пространственным траекториям.

Первый подход заключается в создании высокоточной СУ для НПА, имеющих сложную форму и обладающих движительным комплексом, обеспечивающим им движения по всем степеням свободы. Пример подобного НПА показан на рис.1.1.



Рис. 1.1 Пример НПА, для выполнения точных операций вблизи объектов работ

Указанная СУ должна обеспечивать точную отработку программных сигналов движения с учетом возможных изменений параметров НПА, наличия существенных взаимовлияний между их степенями свободы и внешних воздействий, и тем самым гарантировать высокую точность движения НПА по пространственным траекториям. При этом указанная СУ должна обладать приемлемой вычислительной сложностью для ее реализации на бортовом компьютере НПА. Однако проводить синтез высококачественных СУ НПА в целом с учетом всех особенностей его динамики из-за большой размерности решаемой задачи оказывается весьма затруднительным. Для облегчения решения указанной задачи в работах [13, 78] предлагается подход, основанный на использовании метода декомпозиции. Этот подход предполагает разбиение всей СУ НПА на ряд отдельных подсистем: подсистему управления движителями НПА, подсистему управления скоростью движения НПА и подсистему управления его пространственным положением. Причем в качестве ОУ для подсистемы управления более высокого уровня используется подсистема управления более низкого уровня.

Согласно указанному подходу для подсистем управления движителями и скоростью движения НПА выбираются робастные СУ, которые позволяют описать динамику соответствующих ОУ с помощью дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами независимо от текущих параметров ОУ, что значительно облегчает синтез СУ более высокого уровня. Анализ показывает, что эффективно этот быть использован подход может весьма при синтезе высококачественных многоуровневых (иерархических) СУ, которые должны обеспечивать высокую динамическую точность перемещения НПА по произвольным пространственным траекториям с любой (в пределах имеющейся мощности движителей) заданной скоростью, причем независимо от изменения их параметров и величин внешних возмущений, действующих на НПА со стороны окружающей вязкой среды.

Однако многоуровневые СУ НПА, синтезированные ранее на основе указанного выше подхода, обладают несколькими недостатками. Во-первых, локальные СУ движителями НПА синтезировались на основе их упрощенной модели [12, 140], которая не учитывает ряд важных эффектов взаимодействия винта с вязкой жидкостью (например, изменение шага винта при его реверсе, влияние скорости движения окружающей среды на величину упора, профильные потери винта и т.д.). Это приводит к тому, что СУ движительным комплексом, синтезированные на основе этой модели, имеют недостаточную динамическую точность, что, в свою очередь, приводит к снижению качества работы всей системы управления НПА в целом.

Во-вторых, проведенные исследования показали, что алгоритм самонастройки СПС [47, 135, 138, 139], не требующий непосредственного измерения параметров ОУ, при использовании в контуре управления скоростью НПА, применим только в том случае, когда СПС для управления скоростью НПА работает в свободном режиме (т.е. когда на ее вход поступает нулевой сигнал). Однако в режиме управления положением и ориентацией НПА (именно этот режим при отслеживании заданной пространственной траектории является рабочим) сигнал на входе контура скорости движения НПА всегда будет произвольно изменяющимся во времени. В этом случае указанный алгоритм самонастройки СПС теряет работоспособность.

При этом высокую точность движения НПА по пространственным траекториям при использовании указанной робастной СУ можно обеспечить только в случае, когда движители НПА могут отработать сигналы управления, формируемые этой СУ. В свою очередь величины этих сигналов зависят от скорости движения НПА по траекториям, а также от кривизны текущего участка траектории движения. Поэтому гарантированного сохранения желаемой точности движения ΗΠΑ по ДЛЯ пространственным траекториям необходимо разработать методы и системы формирования режима (скорости) ΗΠΑ автоматического движения ПО пространственным траекториям, которые позволят предотвратить ВХОД ИХ движителей в насыщения.

В связи с этим синтез СУ НПА необходимо выполнять с учетом указанных выше факторов, что позволит обеспечить высокоточное управление НПА при его движении по траектории при простой реализации этой СУ.

Другим подходом является синтез простых СУ, в том числе и содержащих линейные регуляторы, для НПА имеющих обтекаемую форму и выполняющих высокоскоростное движение по протяженным траекториям. При этом движительный комплекс таких НПА обеспечивает им движение по ограниченному количеству степеней свободы. Примеры таких НПА показаны на рис.1.2.



Рис.1.2 Примеры НПА, предназначенных для движения по протяженным траекториям

Указанные особенности таких НПА обеспечивают им пониженные величины негативных взаимодействий НПА с вязкой средой и взаимовлияний между их степенями свободы. При этом СУ этих НПА должны учитывать особенности конструкции их движительных комплексов и ограничения маневренности НПА, связанные с ограниченным количеством их степеней свободы. Однако использование более простых СУ приводит к значительному снижению точности работы при увеличении скорости движения НПА по пространственным траекториям, даже когда их движители не входят в насыщение. Поэтому для повышения точности движения указанных НПА по криволинейным траекториям необходимо разрабатывать новые методы формирования программных сигналов движения, отработка которых с помощью простых СУ даже с большой ошибкой все равно обеспечит движение этих НПА по пространственным траекториям с заданной точностью.

Таким образом, в отличие от традиционных подходов, в которых считается, что программный сигнал, задающий желаемое движение НПА, является величиной, независящей от самой СУ, необходимо разрабатывать новые подходы к синтезу СУ НПА, в которых для повышения эффективности управления НПА обеспечивается совместная работа традиционных СУ НПА с системами формирования программных сигналов движения этих НПА, что позволит полностью использовать возможности самих НПА при выполнении различных операций.

1.3 Анализ подходов к реализации и тестированию СУ НПА

Важным условием качественной работы СУ является формирование всех обратных связей, которые требуются для реализации этой СУ на бортовом

компьютере НПА. При этом в процессе решения этой задачи можно выделить следующие типовые проблемы.

1. Отсутствие необходимых типов бортовых датчиков, что не позволяет непосредственно организовать все необходимые обратные связи. Данная проблема актуальна для многих малогабаритных и недорогих НПА, навигационная система которых не предусматривает использования дорогих и сложных датчиков.

2. Показания отдельных датчиков не могут напрямую использоваться для формирования обратных связей. Например, данные от относительного лага показывают скорость НПА относительно окружающей среды, что при наличии течений будет приводить к существенным погрешностям.

3. Период обновления данных от различных датчиков может отличаться в десятки раз и быть больше периода дискретизации СУ НПА.

4. Наличие в сигналах, поступающих от бортовых датчиков НПА, существенных помех.

Наличие указанных проблем может приводить к тому, что непосредственное использование данных от бортовых датчиков НПА для формирования обратных связей может быть неэффективным и приводить к снижению качества работы СУ НПА. Для решения указанных проблем в последнее время используются методы комплексирования данных, основы которых описаны в монографиях [166, 207]. При ЭТОМ наибольшей популярностью пользуются методы комплексирования, основанные на использовании фильтров Калмана [133], что позволяет с помощью хорошо изученных алгоритмов эффективно решать проблемы совместной обработки данных от различных типов бортовых датчиков робототехнических систем. В частности, в работе [7] предложен метод построения навигационной системы мобильного робота на основе раздельной фильтрации потоков данных от каждого датчика с последующим их комплексированием с весами, зависящими от точности полученных оценок. Это позволяет оценить вектор состояния робота в случае, когда данные от его бортовых датчиков обновляются с разным периодом. В работе [115] предложен метод комплексирования данных от датчиков колесного робота, на основе сигма-точечного фильтра Калмана, позволяющий компенсировать проскальзывания

его колес при расчете пройденного пути. В работе [206] предлагается метод комплексирования данных от бортовых датчиков НПА на основе расширенного фильтра Калмана. В этой работе в зависимости от доступных данных выбирается соответствующий фильтр Калмана, который производит оценку вектора состояния НПА. Однако в указанной работе не учитывается влияние течений на показания доплеровского лага, а также не производится оценка положения, если не доступны данные с GPS и доплеровского лага, что может приводить к достаточно большим промежуткам времени, когда данные с навигационной системы не обновляются и СУ НПА работает в разомкнутом режиме.

Таким образом, вместе с задачей разработки высокоточной СУ НПА, возникает задача разработки метода комплексирования данных, поступающих от его бортовых датчиков, позволяющего обеспечить формирование всех необходимых сигналов обратных связей в темпе работы этой СУ НПА независимо от периода обновления данных от конкретных датчиков. При этом указанный метод должен обладать как можно меньшей вычислительной сложностью для обеспечения возможности его работы в реальном масштабе времени на бортовом компьютере НПА.

Другой важной задачей при проектировании подводной робототехники различного вида и назначения является выполнение настройки и тестирования разработанных систем и законов управления. При этом в настоящее время большая часть указанных работ выполняется с помощью математического моделирования, что обходиться без использования дорогостоящего оборудования позволяет И специальных бассейнов. а также обеспечивает безопасность проводимых экспериментов. Кроме того, без значительных финансовых затрат удается быстро задавать такую окружающую обстановку и режимы работы этих НПА, которые во время натурных экспериментов исследовать крайне сложно. Однако процесс моделирования движения НПА имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать для получения адекватных результатов.

1. Математическая модель НПА, которая используется в процессе моделирования, должна отражать все существенные эффекты его взаимодействия с

окружающей средой и обеспечивать возможность простой и быстрой ее модификации, а также подстройки всех ее параметров. Кроме того, указанная модель должна также включать в себя и модели бортовых датчиков НПА. При этом для моделирования работы некоторых датчиков (видеокамеры, дальномеры и т.д.) возникает задача моделирования окружающей среды (рельефа), что требует использования средств трехмерной визуализации движения НПА.

2. Большое влияние на работу НПА оказывают особенности программной реализации его СУ (период дискретизации сигналов с датчиков и управляющих воздействий, задержки передачи данных и т.д.). Поэтому для адекватности результатов моделирования НПА важно моделировать не сам алгоритм управления, а работу программной реализации СУ, которая будет использоваться на борту этого НПА. Кроме того, использование в процессе моделирования программной реализации СУ НПА позволит определить необходимые требования к бортовому компьютеру НПА.

В настоящее время уже создано достаточно большое количество программных комплексов, позволяющих моделировать движение мобильных роботов различного назначения. К наиболее распространенной группе относятся универсальные имеющие развитый интерфейс моделирующие комплексы, пользователя И позволяющие моделировать работу сложных робототехнических систем И мобильных роботов. К указанным программным комплексам относится среда RoboLogix [210], позволяющая моделировать работу сложных автоматизированных конвейерных линий с учетом динамики движения манипуляторов, а также особенностей программирования реальных промышленных манипуляторов.

Программный комплекс Webots [239] обеспечивает моделирование динамики и кинематики роботов различного назначения, особенностей работы их сенсоров, а также алгоритмов их управления. Этот комплекс позволяет также визуализировать результаты моделирования в трехмерном пространстве и реализует принцип быстрого прототипирования, то есть алгоритмы, разработанные в этом комплексе, могут быть непосредственно преобразованы в управляющие программы роботов.

Среда RobotSim [212] обеспечивает моделирование движения мобильных роботов с учетом эффектов их взаимодействия с окружающей средой (трение, столкновения с окружающими предметами и т.д.), а также создает трехмерную визуализацию этого движения. Ее особенностью является возможность сопряжения со средой моделирования динамических систем LabWiev и компиляции разработанных в этой среде алгоритмов управления в программу на языке C++.

Наиболее известным программным комплексом для моделирования движения роботов является Microsoft Robotic Studio [211]. Этот программный комплекс позволяет не только моделировать работу мобильных роботов различного вида и назначения, разрабатывать алгоритмы их управления с помощью специального визуального языка программирования Microsoft Visual Programming Language (VPL), но и непосредственно использовать разработанные алгоритмы в СУ мобильными роботами.

Также существуют специализированные программные комплексы для моделирования движения НПА. К числу таких комплексов относится SubSim [120]. Указанный комплекс обладает широкими возможностями по моделированию динамики НПА и окружающей обстановки, однако в нем отсутствует возможность подключения программной реализации СУ НПА, то есть отсутствует режим полунатурного моделирования.

В работе [237] описывается моделирующий комплекс, предназначенный для моделирования движений малогабаритного НПА «MAUV-II», что существенно ограничивает его использование для моделирования НПА других видов.

Как показывает анализ существующих тенденций в разработке программных комплексов для моделирования движения различных робототехнических систем, современный программный комплекс должен обладать следующими характеристиками:

- как можно более точное моделирование динамики исследуемого робота, а также его усилительных и исполнительных механизмов;

- моделирование работы сенсоров;

- формирование реалистичной трехмерной визуализации окружающей обстановки;

- быстрое создание и настройка СУ роботом на основе разработанных в этом комплексе алгоритмов.

Кроме того, явно прослеживается тенденция к интеграции с программным обеспечением сторонних производителей для реализации отдельных специфических функций (моделирование динамики, визуализация и т.д.). Это обеспечивает пользователям привычный и удобный интерфейс для работы, облегчает освоение всего комплекса в целом и расширяет его функциональные возможности.

Однако, несмотря на большие возможности, предоставляемые vжe существующими программными комплексами, существуют задачи, для которых их использование либо невозможно, либо требует значительных модификаций и больших затрат времени и труда разработчиков. В частности, указанные моделирующие комплексы позволяют проверить работоспособность выбранного закона управления мобильным роботом, но не позволяют провести проверку правильности реализации указанных алгоритмов в его реальной СУ при ее работе в различных режимах. Это объясняется тем, что архитектура программного обеспечения, реализующего эту СУ, может быть не совместима с универсальным моделирующим комплексом, а также закрытостью их кода. То есть задачи которые задействуют полунатурного моделирования, аппаратную часть И программное обеспечение конкретного НПА, при использовании уже существующих моделирующих комплексов становятся труднореализуемыми. универсальных Поэтому возникает необходимость создания подхода к синтезу специализированных программных комплексов для полунатурного моделирования работы СУ НПА, имеющих конкретную реализацию программной архитектуры. В этом случае становится возможным избежать повреждений НПА при проверке и настройке новых законов управления, программная реализация которых может содержать ошибки, соответствие вычислительных мощностей бортовых компьютеров оценивать выбранному закону управления, а также учитывать в процессе моделирования реальные задержки, возникающие при формировании сигналов управления.

1.4 Постановка задачи исследования

В связи с вышеизложенным в данной работе ставится цель создания и теоретического обоснования 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 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.

Для достижения указанной цели, в диссертации последовательно решаются задачи, структура которых, показана на рис. 1.3.



Рис.1.3 Структура задач диссертации по синтезу высокоточной СУ высокоскоростным движением НПА

Как видно из представленной схемы, задача, поставленная в диссертации, будет решаться разными методами для двух видов НПА.
Первая группа методов позволяет синтезировать высокоточные СУ для НПА, имеющих движительный комплекс, обеспечивающий им высокую маневренность по всем шести степеням свободы, и предназначенных для выполнения точных операций вблизи объекта работ. Указанные СУ должны обеспечивать высокое качество управления движением НПА независимо от изменения их параметров в процессе движения и влияния перекрестных связей между их степенями свободы. При этом в качестве базового метода решения указанной задачи в диссертации используется метод, предложенный в работах [13, 78], в котором устраняются следующие недостатки, выявленные на этапе анализа.

Во-первых, необходимо разработать метод синтеза и регуляторы для подсистемы управления движителями на основе их более полной математической модели [4]. Это позволит точно застабилизировать динамические характеристики движителей при любых изменениях их параметров в заданных диапазонах, а также (с учетом вводимой коррекции) упростить их математическое описание. В результате значительно облегчатся задачи синтеза внешних контуров многоуровневой СУ НПА и существенно увеличится точность работы НПА в целом.

Во-вторых, на основе анализа работы СПС в контуре управления скоростью движения НПА необходимо выявить, а затем и устранить причины, препятствующие применению алгоритма самонастройки СПС при произвольных законах изменения входного сигнала, поступающего на вход внутреннего контура скорости [13, 138, 139]. Это позволит разработать новый закон управления контуром скорости с учетом реальных характеристик регуляторов и качественно управлять НПА, увеличив быстродействие (точность) СУ в благоприятных условиях (менее нагруженных режимах работы). При этом основной проблемой является создание алгоритма адаптации СУ к изменению параметров НПА имеющего простую реализацию.

В-третьих, следует разработать и исследовать метод синтеза СУ пространственным положением НПА, который учитывал бы особенности всех синтезируемых (на основе различных методов) внутренних контуров.

Первая группа методов синтеза СУ НПА, позволяет обеспечить высокое качество управления при условии, что движители НПА могут отработать

сформированные СУ сигналы управления, не входя в насыщения. При этом величины этих сигналов управления зависят от скорости (режима) движения НПА по пространственным траекториям и их формы, существенно возрастая при увеличении этой скорости (вследствие увеличения негативных эффектов взаимовлияния НПА с вязкой средой) или кривизны траектории (вследствие увеличения взаимовлияний между степенями свободы НПА). Поэтому для того, чтобы гарантировать желаемую точность при увеличении скорости движения НПА по пространственным траекториям, форма которых заранее не известна, дополнительно должен быть разработан метод автоматического формирования режимов движения НПА, позволяющий учесть возможный вход их движителей в насыщение.

Вторая группа методов синтеза СУ НПА предназначена для НПА, обладающих обтекаемой формой и предназначенных для движения по протяженным пространственным траекториям. При этом их движительный комплекс, обеспечивает им движение по ограниченному количеству степеней свободы, что ограничивает маневренность этих НПА. Из-за указанных конструктивных особенностей НПА второго типа имеют уменьшенные величины гидродинамических сопротивлений и взаимовлияний между их степенями свободы, что позволяет использовать более простые системы, в том числе основанные на линейных регуляторах, для управления их движением по пространственным траекториям. Однако для обеспечения высокого качества управления НПА методы синтеза их СУ должны учитывать особенности конструкции их движительных комплексов, а также обеспечивать формирование траекторий движения НПА, учитывающих ограничения их маневренности.

При этом повышение скорости движения НПА по пространственным траекториям приводит к уменьшению точности работы простых СУ вследствие недостаточно точного учета влияний всех негативных эффектов взаимодействия НПА с вязкой средой. Для решения этой проблемы в диссертации будет разрабатываться метод коррекции программных сигналов, задающих движение НПА по пространственной траектории, который позволит обеспечить желаемую точность этого движения даже при использовании простых СУ на базе линейных регуляторов.

На основе разработанных в диссертации методов автоматической настройки программных сигналов и режима движения НПА будет разработан комбинированный метод формирования программных сигналов, позволяющий обеспечить предельно скоростное движение НПА по пространственным траекториям с заданной точностью, даже при использовании простых СУ НПА.

Помимо задач, связанных с разработкой метода синтеза высокоточных СУ для высокоскоростного движения ΗΠΑ по пространственным траекториям, В диссертации решается ряд дополнительных задач, возникающих на этапе реализации этих СУ. К указанным задачам относится задача формирования обратных связей на основе данных, поступающих от бортовых датчиков НПА, которая включает в себя две подзадачи. Первая подзадача состоит в разработке метода комплексной обработки информации от бортовых датчиков, позволяющего обновлять данные о параметрах движения НПА с желаемым периодом дискретизации СУ независимо от периода обновления данных от датчиков НПА. Вторая подзадача состоит в разработке идентификации параметров HΠA. метода имеющего низкую вычислительную сложность, что позволит более точно настроить СУ НПА на этапе ее разработки и тестирования.

Другой задачей, решаемой в диссертации является задача создания подхода к разработке программного комплекса для полунатурного тестирования разработанных алгоритмов, который позволит существенно упростить процесс настройки СУ НПА, а также избавиться от проведения дорогостоящих натурных экспериментов на этапе предварительных испытаний.

Таким образом, успешное решение всех указанных задач позволит создать комплексный подход к синтезу высокоточных СУ высокоскоростным движением НПА по сложным пространственным траекториям, для НПА различных типов и назначения.

1.5 Выводы

Проведенный в данной главе анализ позволил выявить основные тенденции и особенности построения СУ НПА и сформировать структуру задач, решаемых в диссертации.

В частности, были получены следующие результаты.

1. Был проведен анализ математической модели НПА с целью выявления его основных особенностей как объекта управления. Было выявлено, что НПА нелинейным является сложным многомерным динамическим объектом, функционирующем в условиях наличия перекрестных связей между его степенями свободы, внешних возмущений, а также переменности его параметров. При этом указанные негативные особенности резко возрастают при движении НПА по нескольким степеням свободы одновременно, а также при увеличении скорости этого движения. На основе указанного анализа был сделан вывод о необходимости использования наиболее точных математических моделей НПА в процессе синтеза его СУ и в качестве базовой принята модель, описанная в работах [78, 156].

2. Проанализированы различные виды СУ, применяемых в настоящее время для управления движением НПА. В результате анализа было отмечено, что выбор типа СУ НПА в большой степени определяется типом этих НПА и решаемыми ими задачами. Было показано, что для НПА, имеющих сложную форму, движительный комплекс, обеспечивающий им движение по всем степеням свободы, и выполняющих точные операции вблизи препятствий или объекта работ, наиболее целесообразно применять робастные системы управления, которые, имея простую реализацию, обеспечивают высокую точность управления при изменении параметров НПА. При этом в качестве базового подхода было предложено использовать подход, описанный в работах [13, 78]. Также было отмечено, что НПА, имеющие обтекаемую форму, движительный комплекс, обеспечивающий им движение по ограниченному числу степеней свободы, и предназначенные для движения по протяженным траекториям, имеют пониженные величины негативных эффектов их взаимодействия с вязкой средой. Поэтому в этом случае можно использовать более простые линейные

СУ, которые учитывают особенности их движительных комплексов и ограничения их маневренности.

3. Результат анализа существующих подходов к построению СУ НПА показал, что все традиционные подходы рассматривают программный сигнал, поступающий на вход СУ, как сигнал, независящий от параметров ОУ и типа их СУ. В тоже время параметры программного сигнала определяют точность работы этой СУ. Поэтому было определено, что для увеличения производительности НПА необходимо дополнительно управлять и параметрами программного сигнала, что позволит увеличить скорость движения этих НПА по заданным пространственным траекториям без снижения точности этого движения.

Был проведен анализ подходов к реализации и тестированию СУ НПА. 4. Были определены наиболее важные проблемы и способы их решения. В частности, отмечено, что реализация высокоточной СУ НПА невозможна без было формирования обратных связей на основе сигналов от его бортовых датчиков. При этом НПА может иметь недостаточный набор датчиков для организации всех необходимых обратных связей, а также период их обновления может быть в разы больше, чем период дискретизации СУ НПА. В результате анализа было определено, что наиболее перспективный путь решения указанных проблем является разработка метода комплексирования данных от бортовых датчиков НПА, имеющего пониженную вычислительную сложность. Другой проблемой, возникающей при разработке СУ НПА является задача тестирования ее программной реализации, для чего необходимо программные моделирующие использовать комплексы, обеспечивающие режим полунатурного моделирования. Был проведен анализ существующих моделирующих комплексов, выявлены ИХ недостатки И сформулированы требования, позволяющие реализовать эффективный подход к построению указанного комплекса.

5. Были сформулированы задачи исследования, а также определены отдельные подзадачи и порядок их решения.

2. МЕТОД СИНТЕЗА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

В данной главе, в соответствии с определенной выше структурой задач диссертации (см. рис.1.3), разрабатывается метод синтеза децентрализованной адаптивной робастной СУ НПА, которая должна обеспечить высокое качество управления пространственным движением этих НПА независимо от изменений их параметров в процессе выполнения подводных операций вблизи объектов работ. При этом считается, что рассматриваемые в главе НПА обладают движительным комплексом, обеспечивающим им движение по всем степеням свободы.

2.1 Описание математической модели НПА

Как было отмечено ранее для синтеза высокоточной СУ НПА целесообразно использовать модель их пространственного движения, наиболее полно учитывающую особенности взаимодействия этих НПА с окружающей вязкой средой, и включить в эту модель динамику его движителей. В данном разделе описывается вид математической модели НПА, которая далее будет использована при разработке методов синтеза СУ НПА.

2.1.1 Математическая модель пространственного движения НПА

Наиболее полная динамическая модель пространственного движения НПА представляется в виде шести сложных нелинейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами, записанных в системе координат (СК), жестко связанной с корпусом этого аппарата [78, 85, 156]. Эти уравнения учитывают перекрестные связи и взаимовлияния между всеми степенями свободы НПА, а также гидродинамические и гидростатические силы и моменты, действующие на него со стороны окружающей вязкой среды. Указанная модель, записанная в матричном виде имеет вид:

$$\mathbf{M}\boldsymbol{v} + (\mathbf{C}(\mathbf{v}) + \mathbf{D}(\mathbf{v}))\boldsymbol{v} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \tau, \qquad (2.1)$$

где $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - матрица инерции НПА (включающая присоединенные массы и моменты инерции жидкости); $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - матрица кориолисовых и центробежных $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ - матрица гидродинамических сил: сил И моментов; $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [F_{ccx}, F_{ccy}, F_{ccz}, M_{ccx}, M_{ccy}, M_{ccz}] \in \mathbf{R}^6$ - вектор гидростатических сил и моментов; $\mathbf{x} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in \mathbf{R}^6$ - вектор положения и ориентации НПА в абсолютной СК (ACK); ϕ , θ , ψ - углы крена, дифферента HΠA: И курса $\mathbf{\tau} = [\tau_{\partial x}, \tau_{\partial y}, \tau_{\partial z}, M_{\partial x}, M_{\partial y}, M_{\partial z}]^T \in \mathbf{R}^6$ - вектор проекций упоров и моментов движителей НПА на оси связанной с ним СК (ССК); $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in \mathbf{R}^6$ - вектор проекций линейной и угловой скоростей движения НПА на оси ССК.

Матрицу инерции **М** для большинства видов НПА можно составить из двух матриц [116, 156]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\mathrm{A}} + \mathbf{M}_{\mathrm{II}},\tag{2.2}$$

где
$$\mathbf{M}_{A} = \begin{bmatrix} m_{a} & 0 & 0 & 0 & m_{a}Y_{c} & 0\\ 0 & m_{a} & 0 & -m_{a}Y_{c} & 0 & 0\\ 0 & 0 & m_{a} & 0 & 0 & 0\\ 0 & -m_{a}Y_{c} & 0 & J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz}\\ m_{a}Y_{c} & 0 & 0 & -J_{xy} & J_{yy} & -J_{yz}\\ 0 & 0 & 0 & -J_{xz} & -J_{yz} & J_{zz} \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{M}_{\Pi} = -\begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16}\\ \lambda_{12} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & \lambda_{26}\\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & \lambda_{36}\\ \lambda_{14} & \lambda_{24} & \lambda_{34} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & \lambda_{46}\\ \lambda_{15} & \lambda_{25} & \lambda_{35} & \lambda_{45} & \lambda_{55} & \lambda_{56}\\ \lambda_{16} & \lambda_{26} & \lambda_{36} & \lambda_{46} & \lambda_{56} & \lambda_{66} \end{bmatrix},$$

 m_a - масса НПА; λ_{ij} - элементы, соответствующие присоединенным массам и присоединенным моментам инерции жидкости (*i*, *j* = 1,...,6); Y_c - метацентрическая

высота НПА; $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$ - моменты инерции НПА относительно его главных и вспомогательных осей инерции.

Матрица С(v) кориолисовых и центростремительных сил имеет вид [116, 156]:

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{\mathbf{A}}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_{\mathbf{\Pi}}(\mathbf{v}), \qquad (2.3)$$

где

$$\mathbf{C}_{11}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} m_a Y_c \omega_z & m_a \upsilon_z & -m_a \upsilon_y \\ -m_a \upsilon_z & m_a Y_c \omega_z & m_a \upsilon_x \\ -m_a (Y_c \omega_x - \upsilon_y) & -m_a (Y_c \omega_y + \upsilon_x) & 0 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{C}_{21}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -m_a Y_c \omega_z & m_a \upsilon_z & m_a (Y_c \omega_x - \upsilon_y) \\ -m_a \upsilon_z & -m_a Y_c \omega_z & m_a (Y_c \omega_y + \upsilon_x) \\ m_a \upsilon_y & -m_a \upsilon_x & 0 \end{bmatrix},$$

 $\mathbf{C}_{\mathbf{A}}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{C}_{11}(\mathbf{v}) \\ \mathbf{C}_{21}(\mathbf{v}) & \mathbf{C}_{22}(\mathbf{v}) \end{bmatrix},$

$$\mathbf{C}_{22}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & -J_{yz}\omega_y - J_{xz}\omega_x + J_{zz}\omega_z & J_{yz}\omega_z + J_{xy}\omega_x - J_{yy}\omega_y \\ J_{yz}\omega_y + J_{xz}\omega_x - J_{zz}\omega_z & 0 & -J_{xz}\omega_z - J_{xy}\omega_y + J_{xx}\omega_x \\ -J_{yz}\omega_z - J_{xy}\omega_x + J_{yy}\omega_y & J_{xz}\omega_z + J_{xy}\omega_y - J_{xx}\omega_x & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{\Pi}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_3 & -\alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_3 & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_2 & -\alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_3 & -\alpha_2 & 0 & \beta_3 & -\beta_2 \\ -\alpha_3 & 0 & \alpha_1 & -\beta_3 & 0 & \beta_1 \\ \alpha_2 & -\alpha_1 & 0 & \beta_2 & -\beta_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{split} \alpha_{1} &= \lambda_{11}\upsilon_{x} + \lambda_{12}\upsilon_{y} + \lambda_{13}\upsilon_{z} + \lambda_{14}\omega_{x} + \lambda_{15}\omega_{y} + \lambda_{16}\omega_{z}, \\ \alpha_{2} &= \lambda_{12}\upsilon_{x} + \lambda_{22}\upsilon_{y} + \lambda_{23}\upsilon_{z} + \lambda_{24}\omega_{x} + \lambda_{25}\omega_{y} + \lambda_{26}\omega_{z}, \\ \alpha_{3} &= \lambda_{13}\upsilon_{x} + \lambda_{23}\upsilon_{y} + \lambda_{33}\upsilon_{z} + \lambda_{34}\omega_{x} + \lambda_{35}\omega_{y} + \lambda_{36}\omega_{z}, \\ \beta_{1} &= \lambda_{14}\upsilon_{x} + \lambda_{24}\upsilon_{y} + \lambda_{34}\upsilon_{z} + \lambda_{44}\omega_{x} + \lambda_{45}\omega_{y} + \lambda_{46}\omega_{z}, \\ \beta_{2} &= \lambda_{15}\upsilon_{x} + \lambda_{25}\upsilon_{y} + \lambda_{35}\upsilon_{z} + \lambda_{45}\omega_{x} + \lambda_{55}\omega_{y} + \lambda_{56}\omega_{z}, \end{split}$$

$$\beta_3 = \lambda_{16}\upsilon_x + \lambda_{26}\upsilon_y + \lambda_{36}\upsilon_z + \lambda_{46}\omega_x + \lambda_{56}\omega_y + \lambda_{66}\omega_z.$$

Матрица гидродинамических сил и моментов имеет вид [116, 156]:

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D}_{1}(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_{2}(\mathbf{v}) = diag(d_{1x}, d_{1y}, d_{1z}, d'_{1x}, d'_{1y}, d'_{1z}) + + diag(d_{2x}|v_{x}|, d_{2y}|v_{y}|, d_{2z}|v_{z}|, d'_{2x}|\omega_{x}|, d'_{2y}|\omega_{y}|, d'_{2z}|\omega_{z}|),$$
(2.4)

где d_1, d_2, d'_1, d'_2 - коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной и квадратичной зависимостям гидродинамических сил (моментов) от скорости движения НПА по его отдельным степеням свободы.

Вектор действующих на НПА гидростатических сил и моментов имеет вид:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{vmatrix} (W-B)\sin\theta \\ -(W-B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(W-B)\cos\theta\sin\varphi \\ y_B B\cos\theta\cos\varphi + (Y_c W - z_B B)\cos\theta\sin\varphi \\ (Y_c W - z_B B)\sin\theta - x_B B\cos\theta\cos\varphi \\ x_B B\cos\theta\sin\varphi + y_B B\sin\theta \end{vmatrix},$$
(2.5)

где $W = m_a g$ - сила тяжести НПА; g - ускорение свободного падения, $B = \rho g$ -Архимедова сила, приложенная в центре плавучести; ρ - масса вытесняемой НПА жидкости; x_B, y_B, z_B - координаты центра плавучести НПА относительно его центра масс.

Поскольку реальное движение НПА по пространственным траекториям происходит в АСК, то к уравнениям (2.1)-(2.5) должны быть добавлены кинематические соотношения, обеспечивающие переход от связанной к абсолютной СК [85]:

$$\mathbf{\dot{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{\upsilon}\,,\tag{2.6}$$

где

	$\cos\psi\cos\theta$	$\sin\psi\sin\varphi$ –	$\cos\psi\sin\theta\sin\varphi +$	0	0	0
J (x) =		$-\cos\psi\sin\theta\cos\varphi$	$+\sin\psi\cos\varphi$			
	$\sin\theta$	$\cos\theta\cos\varphi$	$-\cos\theta$	0	0	0
	$-\sin\psi\cos\theta$	$\sin\psi\sin\theta\cos\varphi +$	$\cos\psi\cos\varphi -$	0	0	0
		$+\cos\psi\sin\varphi$	$-\sin\psi\sin\theta\sin\varphi$			
	0	0	0	1	$-\operatorname{tg}\theta\cos\varphi$	$tg\theta \sin \varphi$
	0	0	0	0	$\cos \varphi$	$-\frac{\sin \varphi}{\varphi}$
					$\cos heta$	$\cos heta$
	0	0	0	0	$\sin \varphi$	$\cos \varphi$

Таким образом, уравнения (2.1)-(2.6) описывают движение НПА в водной среде как свободного твердого тела по шести степеням свободы, с учетом взаимовлияний между ними. В дальнейшем, если это не нарушает смысл, для простоты будут опускаться индексы, обозначающие проекции векторов скоростей, сил и моментов на соответствующие координатные оси, а также указывающие на положение элементов в матрицах моментов инерции НПА, присоединенных масс и моментов инерции жидкости и матрицах коэффициентов вязкого трения.

2.1.2 Математическая модель движителей НПА

Как показали многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых [169, 180, 242, 248], динамика движительного комплекса оказывает существенное влияние на динамику всего НПА в целом. Поэтому при синтезе высокоточной СУ НПА необходимо включать динамику этого комплекса в общую математическую модель, описывающую движение этих НПА по пространственной траектории.

В качестве базовой (наиболее полной) в диссертации принимается модель движителя, предложенная в работе [4]. Эта модель, в отличие от упрощенных моделей [46], учитывает ряд важных особенностей взаимодействия винта с окружающей вязкой жидкостью, в частности, изменение шага винта при реверсе, влияние скорости движения НПА на силу тяги, создаваемую винтом, а также профильные потери винта, и имеет следующий вид [4]:

$$J_{\partial}\dot{\omega}_{\partial} + \frac{K_m K_w}{R_{\partial}} \omega_{\partial} + M_g = \frac{K_m K_y}{R_{\partial}} u , \qquad (2.7)$$

$$\begin{split} \tau_{\partial} &= F_{\tau} s_{\tau} \big| \omega_{\partial} \big| - C_{f} \frac{S_{\partial} \rho_{\mathcal{M}} \big| v_{\mathcal{M}} \big| v_{\mathcal{M}}}{2 \big(1 + C_{\omega} \omega_{\partial}^{2} \big)}, \quad M_{e} = F_{m} \big(s_{\tau} + H_{z\partial} C_{r} \omega_{\partial} \big) \big| \omega_{\partial} \big| - C_{m} \frac{S_{\partial} \rho_{\mathcal{M}} \big| v_{\mathcal{M}} \big| v_{\mathcal{M}}}{2 \big(1 + C_{\omega} \omega_{\partial}^{2} \big)}, \\ s_{\tau} &= p_{\tau} - sign(\omega_{\partial}) \sqrt{p_{\tau}^{2} - q_{\tau}}, \\ p_{\tau} &= H_{z\partial} \omega_{\partial} - \frac{v_{p}}{2} + \frac{F_{\tau} \omega_{\partial}}{4 \rho_{\mathcal{M}} S_{\partial}}, \quad q_{\tau} = H_{z\partial} \omega_{\partial} \big(H_{z\partial} \omega_{\partial} - v_{p} \big), \\ H_{z\partial} &= H + \delta_{H} sign(\omega_{\partial}), \quad v_{p} = \begin{cases} v_{\mathcal{M}}, \text{если } sign(\omega_{\partial}) = sign(v_{\mathcal{M}}) \\ 0, \text{ если } sign(\omega_{\partial}) \neq sign(v_{\mathcal{M}}) \end{cases}, \end{split}$$

где ω_b – угловая скорость вращения вала движителя НПА; υ_{∞} – скорость перемещения окружающей жидкости относительно НПА вдоль оси винта; H_{zo} – гидродинамический шаг винта; H – геометрический шаг винта; δ_H – гидродинамическая поправка на шаг винта; F_z , F_m – обобщенные коэффициенты силы тяги и момента; C_f , C_m – коэффициенты подъемной силы и момента винта при $\omega_0 = 0$; C_w – коэффициент, характеризующий уменьшение подъемной силы и момента винта при $\omega_0 = 0$; C_r – коэффициент профильных потерь винта; ρ_{∞} – плотность окружающей жидкости; S_0 – площадь диска винта; J_0 – момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; R_0 – активное сопротивление якорной цепи электродвигателя; K_m , K_w – коэффициенты момента и противо-ЭДС электродвигателя постоянного тока; K_y – коэффициент усиления усилителя мощности; u – сигнал управления движителем НПА; s_τ – абсолютное скольжение винта; M_a – момент на валу движителя; p_τ , v_p – вспомогательные переменные.

Кроме того, параметры J_{∂} и F_m движителя из-за влияния присоединенного момента инерции жидкости и вязкого трения в процессе управления НПА могут изменяться, при этом их точные значения заранее не известны. Возможные диапазоны этих изменений можно задать в виде неравенств:

где $J_{\partial min}$, F_{mmin} , $J_{\partial max}$, F_{mmax} – наименьшие и наибольшие значения соответствующих параметров.

В дальнейшем в данной главе будет полагаться, что силы тяги $\tau_{\partial x}$, $\tau_{\partial y}$ и $\tau_{\partial z}$ и моменты $M_{\partial x}$, $M_{\partial y}$ и $M_{\partial z}$ по каждой степени свободы НПА создаются отдельными парами движителей независимо друг от друга. При этом, если используется иная конструктивная схема расположения движителей, то необходимо осуществлять соответствующий геометрический пересчет сил тяги и моментов по соответствующим степеням свободы. Однако это допущение не будет влиять на предлагаемые и исследуемые в диссертации методы синтеза высококачественных СУ.

2.1.3 Декомпозированная модель пространственного движения НПА

Полная модель пространственного движения НПА включает в себя уравнения его динамики (2.1)-(2.5), кинематики (2.6) и динамики его движителей (2.7). Очевидно, что указанная модель слишком сложна для непосредственного использования в процессе синтеза СУ НПА и не позволяет получить легко реализуемые регуляторы. Поэтому для упрощения процедуры этого синтеза целесообразно использовать декомпозированный вариант модели ΗΠΑ. предложенный в работах [13, 33, 78]. Согласно методу, предложенному в указанных работах, система (2.1) - (2.5) разбивается на шесть сепаратных подсистем, которые соответствуют отдельным степеням свободы НПА. При этом в каждой из подсистем полностью сохраняются все взаимовлияния с остальными степенями свободы, а также все воздействия со стороны окружающей вязкой среды.

В результате любая из трех подсистем, соответствующих линейным степеням свободы НПА, может быть описана системой уравнений:

$$\tau_{\partial} = f_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{\mathcal{H}}), \quad m\dot{v} + d_1 v + d_2 v |v| + f_v = \tau_{\partial}, \quad \dot{x} = jv + \varphi_v, \tag{2.9}$$

а любая из трех подсистем, соответствующих его вращательным степеням свободы, - системой уравнений:

$$M_{\partial} = f_m(\omega_{\partial}, v_{\mathcal{H}}), \ J_{UV}\omega + d'_1\omega + d'_2\omega | \omega | + f_\omega = M_{\partial}, \ \theta = j\omega + \varphi_\omega, \tag{2.10}$$

где $f_{t}(\omega_{0}, \upsilon_{\infty})$, $f_{m}(\omega_{0}, \upsilon_{\infty})$ – нелинейные функции, вид которых зависит от компоновки и параметров движительного комплекса НПА; f_{υ} , f_{ω} – обобщенные функции, включающие в себя все внешние воздействия на соответствующие подсистемы и перекрестные связи между этими подсистемами; j – соответствующий диагональный элемент матрицы $\mathbf{J}(\mathbf{x})$; ϕ_{υ} , ϕ_{ω} – перекрестные связи между соответствующими степенями свободы, определяемые кинематическими соотношениями (2.6); m – масса НПА с учетом присоединенной массы жидкости по соответствующей степени свободы; J_{UV} – момент инерции НПА относительно одной из главных осей инерции с учетом соответствующего присоединенного момента инерции жидкости.

Диапазоны возможных изменений параметров НПА в процессе его движения по заданным пространственным траекториям определяются следующими неравенствами:

$$m_{min} \le m \le m_{max}, \quad d_{1min} \le d_1 \le d_{1max}, \quad d_{2min} \le d_2 \le d_{2max},$$
(2.11)
$$J_{UVmin} \le J_{UV} \le J_{UVmax}, \quad d_1'_{min} \le d_1' \le d_1'_{max}, \quad d_2'_{min} \le d_2' \le d_2'_{max},$$

где m_{min} , d_{1min} , d_{2min} , J_{UVmin} , $d_{1'min}$, $d_{2'min}$, m_{max} , d_{1max} , d_{2max} , J_{UVmax} , $d_{1'max}$, $d_{2'max}$ – наименьшие и наибольшие значения соответствующих параметров.

Очевидно, что декомпозированный вариант математической модели НПА, описываемый уравнениями аналогичными (2.9)-(2.10), имеет более удобный вид для синтеза СУ НПА, чем полная модель НПА, описываемая уравнениями (2.1)-(2.7). Используя указанную декомпозированную модель можно осуществлять последовательный синтез регуляторов для каждой степени свободы в отдельности, а не для всей многомерной системы (2.1)-(2.7) сразу. При этом следует отметить, что модель, представленная уравнениями вида (2.9) или (2.10), не является каким-либо упрощением модели, описываемой системами уравнений (2.1) – (2.7). Обе эти модели

идентичны и учитывают все существенные особенности НПА как объекта управления при его произвольном пространственном движении в водной среде.

2.1.4 Порядок синтеза декомпозированной СУ НПА

В качестве базового метода синтеза СУ НПА в диссертации будет использоваться метод предложенный в работах [33, 78]. Согласно этому методу СУ НПА синтезируется как совокупность отдельных подсистем управления каждой степенью свободы НПА. Для синтеза подсистем управления линейными степенями свободы используется математическая модель (2.9), а для синтеза подсистем управления вращательными степенями свободы – математическая модель (2.10). При этом, в связи с достаточной сложностью указанных математических моделей, каждая подсистема управления отдельной степенью свободы НПА в свою очередь разбивается на три локальных подсистемы, синтезируемых последовательно: подсистему управления движителями, подсистему управления скоростью движения НПА и подсистему управления положением.

Таким образом, согласно подходу, предложенному в работах [13, 33, 78] в диссертации используется следующий порядок синтеза СУ НПА.

На первом этапе синтезируется СУ движителями НПА, которая позволяет обеспечить этим движителям желаемые постоянные динамические свойства при любых изменениях их параметров. При этом синтез указанной СУ движителями будет проводиться с использованием более точной математической модели движителей.

На втором этапе синтеза на основе СПС синтезируется подсистема управления скоростью движения НПА, которая обеспечивает независимость процесса управления от изменения параметров и динамических свойств НПА, а также взаимовлияний между его степенями свободы. При этом в процессе синтеза предполагается, что движители НПА уже имеют неизменные динамические свойства, которые обеспечиваются с помощью синтезированных ранее локальных подсистем управления. Кроме того, на этом этапе синтеза будут разрабатываться методы,

позволяющие увеличить быстродействие СУ НПА в благоприятных режимах работы НПА.

На третьем этапе синтезируется подсистема управления положением НПА, которая придаст ему желаемые динамические свойства при его движении по любой пространственной траектории. При этом динамика НПА по каждой его степени свободы, вследствие применения СПС в контуре управления скоростью, будет описываться дифференциальными уравнениями с известными параметрами, которые не содержат взаимовлияний с другими степенями свободы.

Структурная схема подсистемы управления АНПА по одной степени свободы может быть представлена в виде, изображенном на рис. 2.1 [33, 78]. Здесь x_d – задающее воздействие по одной пространственной координате подводного робота; v_d – задающее воздействие по скорости; τ_d – задающее воздействие по силе тяги движителя.



Рис. 2.1 Обобщенная структурная схема подсистемы управления одной степенью свободы НПА

2.2. Синтез локальной подсистемы управлением движителями НПА

В данном разделе будет решаться задача синтеза такой СУ движителями НПА, которая, учитывая все существенные факторы при взаимодействии винта с вязкой средой, сохраняла бы желаемое качество функционирования движителей при любых изменениях их параметров в заданных диапазонах. При этом применение синтезированного закона управления позволило бы описать динамику каждого движителя НПА линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, что существенно упростит дальнейший синтез СУ НПА в целом.

В диссертации будет рассматриваться несколько методов синтеза указанных СУ. Первый метод основан на использовании систем с сигнальной самонастройкой, которые имеют простую реализацию, но при этом их сигнал управления содержит высокочастотные колебания. Другие методы основаны на использовании нейронных сетей, которые позволяют обеспечить высокое качество процесса управления без предварительной информации о параметрах математической модели движителя и при этом формировать непрерывный сигнал управления.

2.2.1 Синтез нелинейной системы управления движителем НПА с самонастройкой по эталонной модели

Для решения поставленной задачи синтез СУ движителями, как и в работах [12, 140], удобно осуществить в два этапа. На первом этапе разрабатывается нелинейная коррекция, которая позволяет придать движителям желаемые динамические свойства когда их параметры в случае, равны некоторым фиксированным (номинальным) значениям $J_{\partial \mu}$ и $F_{m\mu}$ переменных параметров J_{∂} и F_m . На втором этапе в уже скорректированную систему вводится дополнительный контур сигнальной самонастройки эталонной который по модели, позволяет застабилизировать динамические свойства системы на желаемом уровне при любых изменениях параметров движителя в заданных диапазонах.

Синтез нелинейного регулятора для локальной подсистемы управления движителями при их номинальных параметрах. С целью упрощения процедуры

синтеза систему (2.7) преобразуем к более удобному виду. Для этого исключим из нее промежуточные переменные p_{τ} и q_{τ} , подставив их выражения в соотношение для абсолютного скольжения s_{τ} винта, и представим s_{τ} непосредственно в виде функции от ω_0 и υ_p . Кроме того, примем во внимание эффект существенного уменьшения подъемного упора и момента винта в режимах маневрирования НПА, отмеченный в работе [2]. Поэтому исключим соответствующие слагаемые из второго и третьего уравнений системы (2.7), сохранив адекватность математической модели движительного комплекса при пространственном движении НПА.

С учетом сделанных замечаний будем использовать следующую систему уравнений, которую примем за основу при синтезе СУ движителями:

$$J_{\partial}\dot{\omega}_{\partial} + \frac{K_m K_w}{R_{\partial}} \omega_{\partial} + M_g = \frac{K_m K_y}{R_{\partial}} u, \quad \tau_{\partial} = F_{\tau} |\omega_{\partial}| s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_p), \quad (2.12)$$
$$M_g = F_m |\omega_{\partial}| (s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_p) + H_{z\partial} C_r \omega_{\partial}),$$
$$s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_p) = (K_s + H_{z\partial}) \omega_{\partial} - \frac{v_p}{2} - sign(\omega_{\partial}) \sqrt{\left(K_s \omega_{\partial} - \frac{v_p}{2}\right)^2 + 2H_{z\partial} K_s \omega_{\partial}^2},$$

где $K_s = F_{\tau}/(4\rho_{\mathcal{H}}S_{\partial})$ – постоянный коэффициент.

Зададим желаемое описание динамики движителя в виде линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами:

$$\dot{\tau}_{\partial} = \frac{K_d \tau_d - \tau_{\partial}}{T_d}, \qquad (2.13)$$

где *K*_d, *T*_d – желаемые коэффициент усиления и постоянная времени, соответственно.

Как было отмечено ранее, синтез нелинейного корректирующего устройства производится при номинальных постоянных значениях $J_{\partial H}$ и F_{mH} параметров движителя. Поэтому в системе (2.12) примем $J_{\partial} = J_{\partial H}$ и $F_m = F_{mH}$, после чего сведем ее к одному уравнению относительно τ_{∂} . Для этого продифференцируем по времени второе уравнение системы (2.12) и подставим в получившееся соотношение выражения для $\dot{\omega}_{\partial}$ и M_{s} из первого и третьего уравнений этой системы. При этом будем пренебрегать производными переменной υ_{ρ} , так как ее изменение происходит гораздо медленнее по сравнению с изменением ω_{∂} . В результате получаем следующее выражение:

$$\dot{\tau}_{\partial} = F_{\tau} \frac{K_m K_y u - K_m K_w \omega_{\partial} - R_{\partial} F_{mH} |\omega_{\partial}| \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_p) + H_{z\partial} C_r \omega_{\partial} \right)}{R_{\partial} J_{\partial H}} D(\omega_{\partial}, v_p). \quad (2.14)$$

Новая функция $D(\omega_0, \nu_p)$ от переменных ω_0 и ν_p , входящая в равенство (2.14), определяется следующим образом:

$$D(\omega_{\partial}, v_{p}) = s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) sign(\omega_{\partial}) + |\omega_{\partial}| \left(K_{s} + H_{z\partial} - \frac{K_{s} \left(\left(K_{s} + 2H_{z\partial} \right) \omega_{\partial} - \frac{v_{p}}{2} \right) sign(\omega_{\partial}) \right)}{\sqrt{\left(K_{s} \omega_{\partial} - \frac{v_{p}}{2} \right)^{2} + 2H_{z\partial} K_{s} \omega_{\partial}^{2}}} \right).$$

Для придания движителю желаемых динамических свойств достаточно выбрать такой закон изменения управляющего сигнала *u*, при котором будет обеспечено равенство правых частей уравнений (2.13) и (2.14) [76, 84, 85]. Решив систему (2.13), (2.14) относительно *u*, получим следующий закон управления [84]:

$$u = \left(J_{\partial H} \frac{K_d \tau_d - \tau_\partial}{T_d F_\tau D(\omega_\partial, v_p)} + \frac{K_m K_w}{R_\partial} \omega_\partial + F_{mH} | \omega_\partial | \left(s_\tau(\omega_\partial, v_p) + H_{z\partial} C_r \omega_\partial\right) \right) \frac{R_\partial}{K_m K_y}.$$
 (2.15)

Так как силу тяги, создаваемую движителем, измерить достаточно сложно, то при формировании соответствующей обратной связи воспользуемся уравнением для τ_0 из системы (2.12) и преобразуем закон управления (2.15) к окончательному виду:

$$u = \left(J_{\partial H} \frac{K_d \tau_d - F_\tau |\omega_{\partial}| s_\tau(\omega_{\partial}, v_p)}{T_d F_\tau D(\omega_{\partial}, v_p)} + F_{mH} |\omega_{\partial}| \left(s_\tau(\omega_{\partial}, v_p) + H_{z\partial} C_r \omega_{\partial}\right) + \frac{K_m K_w}{R_{\partial}} \omega_{\partial}\right) \frac{R_{\partial}}{K_m K_y}.$$
 (2.16)

Очевидно, закон управления (2.16) гарантирует, что движение нелинейной системы (2.12) при заданных постоянных значениях $J_{\partial H}$ и F_{mH} будет происходить в точном соответствии с решением желаемого линейного дифференциального уравнения (2.13). Практическая реализация нелинейного корректирующего устройства, формирующего соответствующий управляющий сигнал, не представляет большой сложности, так как требует измерения только скоростей ω_0 и υ_p с помощью стандартных технических устройств.

Синтез самонастраивающегося регулятора на основе эталонной модели. Известно, что в процессе движения НПА по произвольной пространственной траектории с разными скоростями параметры J_{∂} и F_m движительного комплекса претерпевают существенные изменения [6]. Однако когда $J_{\partial} \neq J_{\partial H}$ и $F_m \neq F_{mH}$, закон управления (2.16) уже не будет обеспечивать желаемые динамические свойства движителей, что в конечном итоге не только приведет к уменьшению точности их работы, но и точности работы всей СУ НПА в целом.

Для компенсации отклонения параметров движителя от его заданных номинальных значений и, соответственно, стабилизации его динамических свойств, которые будут определяться желаемым дифференциальным уравнением (2.13), будем использовать подход, предложенный в работах [12, 140]. Для этого в синтезированный ранее закон управления (2.16) введем дополнительный сигнал самонастройки z_{τ} . В результате чего этот закон управления (2.16) примет вид:

$$u = \left(J_{\partial H} \frac{\left(K_{d}\tau_{d} - F_{\tau} \middle| \omega_{\partial} \middle| s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p})\right) / (T_{d}F_{\tau}) + z_{\tau}}{D(\omega_{\partial}, v_{p})} + F_{mH} \middle| \omega_{\partial} \middle| \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right) + \frac{K_{m}K_{w}}{R_{\partial}}\omega_{\partial}\right) \frac{R_{\partial}}{K_{m}K_{y}}.$$

$$(2.17)$$

В дальнейшем сигнал самонастройки *z* будем формировать на основе величины рассогласования сигналов τ_{∂} и τ_{M}

$$e_{_{\mathcal{M}}} = \tau_{_{\mathcal{M}}} - \tau_{_{\partial}} , \qquad (2.18)$$

где сигнал т_м представляет собой выходной сигнал эталонной модели вида:

$$\dot{\tau}_{_{\mathcal{M}}} = \frac{K_d \tau_d - \tau_{_{\mathcal{M}}}}{T_d}, \qquad (2.19)$$

которая соответствует желаемому уравнению динамики движителя с постоянными параметрами (2.13).

Для придания каждому движителю НПА, описываемому системой (2.12), желаемых динамических свойств эталонной модели (2.19), достаточно обеспечить устойчивость состояния системы, при котором величина рассогласования $e_{_{M}}$ стремится к нулю при любых значениях переменных параметров J_{∂} и F_m из заданных диапазонов (2.8).

Для определения вида сигнала z_{τ} вначале проведем следующие предварительные преобразования. Так как параметры реального движителя переменны, то в уравнении (2.14), описывающем его динамику, заменим номинальные значения $J_{\partial H}$ и F_{mH} параметров объекта на их фактические величины J_{∂} и F_m и подставим в это уравнение управление (2.17). После соответствующих упрощений получим

$$\boldsymbol{\tau}_{\partial} = \left(\frac{J_{\partial H} \left(K_{d} \boldsymbol{\tau}_{d} - \boldsymbol{\tau}_{\partial}\right)}{F_{\tau} T_{d}} + z_{\tau} + \left(F_{mH} - F_{m}\right) \left|\omega_{\partial}\right| \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial} C_{r} \omega_{\partial}\right) D(\omega_{\partial}, v_{p})\right) \frac{F_{\tau}}{J_{\partial}}.$$
 (2.20)

Затем продифференцируем уравнение (2.18) по времени, выразим из полученного равенства производную $\dot{\tau}_{\partial}$ и подставим ее в соотношение (2.20), которое затем с учетом выражения (2.19) перепишем в следующем виде:

$$\dot{e}_{M} = \left(\frac{\left(J_{\partial} - J_{\partial H}\right)}{F_{\tau}}\dot{t}_{M} + \left(F_{m} - F_{mH}\right)\left|\omega_{\partial}\right|\left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right)D(\omega_{\partial}, v_{p}) - (2.21)\right.$$
$$\left. - z_{\tau} - \frac{J_{\partial H}}{T_{d}F_{\tau}}e_{M}\right)\frac{F_{\tau}}{J_{\partial}}.$$

Закон изменения сигнала самонастройки z_{τ} определим с помощью метода Ляпунова [62, 222]. Для этого выберем положительно определенную функцию $V = \frac{1}{2}e_{M}^{2}$. Как известно, положение равновесия $e_{M} = 0$ будет устойчивым, если выполняется условие $\dot{V} < 0$.

Продифференцировав функцию V по времени, получим выражение для ее производной: $\dot{V} = e_{_M} \dot{e}_{_M}$. Отсюда в силу уравнения (2.21) будем иметь:

$$\dot{V} = e_{M} \left(\frac{\left(J_{\partial} - J_{\partial H}\right)}{F_{\tau}} \dot{\tau}_{M} + \left(F_{m} - F_{mH}\right) |\omega_{\partial}| \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right) D(\omega_{\partial}, v_{p}) - z_{\tau} - \frac{J_{\partial H}}{T_{d}F_{\tau}} e_{M} \right) \frac{F_{\tau}}{J_{\partial}}.$$

$$(2.22)$$

Сформируем сигнал самонастройки в виде [78, 84]:

$$z_{\tau} = h \, sign(e_{M}), \qquad (2.23)$$

$$h > \max \left| \frac{\left(J_{\partial} - J_{\partial H}\right)}{F_{\tau}} \dot{\tau}_{M} + \left(F_{m} - F_{mH}\right) \right| \omega_{\partial} \left| \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right) D(\omega_{\partial}, v_{p}) \right|.$$

Покажем, что в этом случае всегда будет выполняться условие $\dot{V} < 0$.

Действительно, если значение z_{τ} определяется выражением (2.23) (и по модулю равно *h*), то при любых значениях переменных справедливо следующее неравенство:

$$\left|z_{\tau}\right| > \left|\frac{\left(J_{\partial} - J_{\partial H}\right)}{F_{\tau}}t_{M} + \left(F_{m} - F_{mH}\right)\right|\omega_{\partial}\left|\left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right)D(\omega_{\partial}, v_{p})\right|.$$
(2.24)

Поскольку согласно выражения (2.23) знаки сигналов e_{M} и z_{τ} всегда совпадают, то при $e_{M} > 0$ и, следовательно, $z_{\tau} > 0$ с учетом соотношения (2.24) нетрудно получить:

$$-\frac{J_{\partial H}}{T_d F_{\tau}} e_{M} < 0, \qquad (2.25)$$

$$\frac{\left(J_{\partial} - J_{\partial H}\right)}{F_{\tau}} \dot{\tau}_{M} + \left(F_{m} - F_{mH}\right) \left|\omega_{\partial}\right| \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right) D(\omega_{\partial}, v_{p}) - z < 0.$$

Из неравенств (2.25) и выражения (2.22) непосредственно следует, что $\dot{V} < 0$. При $e_{M} < 0$ доказательство проводится аналогично.

Таким образом, синтезированный закон самонастройки (2.17), (2.23) позволяет решить поставленную задачу, т.е. обеспечить желаемые динамические свойства движителя при любых изменениях его параметров в заданных диапазонах. Однако в соответствии с выражениями (2.23) постоянная амплитуда *h* сигнала z_{τ} независимо от режимов работы движительного комплекса всегда будет иметь максимально возможное значение, что может привести к выходу усилителя в зону насыщения. К тому же для вычисления *h* в этом случае требуется точно определять верхний предел вариаций переменных $\dot{\tau}_{M}$, ω_0 , $s_{\tau}(\omega_0, \upsilon_p)$ и $D(\omega_0, \upsilon_p)$.

Для устранения указанных недостатков амплитуду сигнала самонастройки можно сформировать в виде функции текущих значений указанных переменных:

$$h(t) = K_{h1} \left| \dot{\tau}_{\mathcal{M}} \right| + K_{h2} \left| \omega_{\partial} \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_p) + H_{\partial} C_r \omega_{\partial} \right) D(\omega_{\partial}, v_p) \right|,$$
(2.26)

где K_{h1} и K_{h2} – постоянные коэффициенты.

Очевидно, что для выполнения неравенства (2.24) (и, следовательно, условия устойчивости процесса самонастройки) коэффициенты K_{h1} и K_{h2} должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$K_{h1} > \max \left| \frac{J_{\partial} - J_{\partial H}}{F_{\tau}} \right|, K_{h2} > \max \left| F_m - F_{mH} \right|.$$

Учитывая выражение (2.26), уравнение (2.23) перепишем в удобном для последующего использования виде:

$$z_{\tau} = K_{h1} |\dot{\tau}_{M}| sign(e_{M}) + K_{h2} |\omega_{\partial} (s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}) D(\omega_{\partial}, v_{p})| sign(e_{M}).$$
(2.27)

Подставив соотношение (2.27) в выражение (2.17), после ряда преобразований получим закон управления движителями НПА в окончательной форме [84]:

$$u = \left(J_{\partial H} \frac{\left(K_{d}\tau_{d} - F_{\tau} | \omega_{\partial} | s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p})\right) / (T_{d}F_{\tau}) + K_{h1} | \dot{\tau}_{M} | sign(e_{M})}{D(\omega_{\partial}, v_{p})} + J_{\partial H}K_{h2} | \omega_{\partial} \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right) | sign(e_{M}) + \frac{K_{m}K_{w}}{R_{\partial}}\omega_{\partial} + F_{mH} | \omega_{\partial} | \left(s_{\tau}(\omega_{\partial}, v_{p}) + H_{z\partial}C_{r}\omega_{\partial}\right) \right) \frac{R_{\partial}}{K_{m}K_{y}}.$$

$$(2.28)$$

Очевидно, что при формировании закона управления (2.28) требуется непрерывно измерять величины ω_0 и υ_{∞} . Это возможно, например, с помощью датчика скорости вращения вала движителя и относительного лага НПА. При этом реализация синтезированного закона управления движительным комплексом (2.28) не представляет большой технической проблемы. Окончательная схема этого устройства представлена на рис. 2.2 [48, 49].

На рис. 2.2 введены следующие новые обозначения: ЗС – задатчик входного сигнала, ДС1 – датчик скорости вращения винта, ДС2 – датчик измерения υ_{∞} , Дв – электродвигатель, В – винт движителя.

Исследование работы самонастраивающейся системы управления овижителем НПА. При моделировании и исследовании работы синтезированных самонастраивающихся СУ использовались параметры движителя, приведенные в работе [4]: $F_{\tau} = 4 \text{ H} \cdot \text{c}^2/\text{m}$, H = 0.12 m, $\delta_H = 0.002 \text{ m}$, $C_r = 0.12$, $S_{\partial} = 0.01 \text{m}^2$, $C_f = 0.002$, $C_m = 0.001$, $C_{\omega} = 0.01$, $K_w = 0.5 \text{ H} \cdot \text{m}/\text{B}$, $K_m = 0.5 \text{ H} \cdot \text{m}/\text{A}$, $R_{\partial} = 2 \text{ Om}$, $K_y = 20$, $F_{mH} = 0.075 \text{ H} \cdot \text{c}^2$, $F_{mmin} = 0.065 \text{ H} \cdot \text{c}^2$, $F_{mmax} = 0.085 \text{ H} \cdot \text{c}^2$, $J_{\partial H} = 0.015 \text{ kr} \cdot \text{m}^2$, $J_{\partial min} = 0.01 \text{ kr} \cdot \text{m}^2$, $J_{\partial max} = 0.02 \text{ kr} \cdot \text{m}^2$, а также коэффициенты блока самонастройки, рассчитанные по полученным ранее неравенствам: $K_{hl} = 0.01$; $K_{h2} = 0.01$.



Рис. 2.2 Структурная схема системы управления движителем НПА

На рис. 2.3 показаны результаты исследования работы синтезированной самонастраивающейся СУ движителями при подаче на ее вход ступенчатого сигнала с последующим его реверсированием, а на рис. 2.4 и 2.5 представлены результаты исследования влияния качества этих систем на работу всей СУ НПА в целом.

На рис. 2.3 цифрой 1 обозначена кривая, соответствующая желаемому переходному процессу в движителе (см. уравнение (2.13)). С этой же кривой практически совпадает кривая 2, соответствующая переходному процессу в системе

при использовании управления движителем вида (2.16) при его номинальных параметрах. Здесь же цифрами 3 и 4, соответственно, обозначены кривые переходных процессов в движителе с управлением (2.16) при максимальных ($F_m = F_{mmax}$ и $J_d = J_{dmax}$) и минимальных ($F_m = F_{mmin}$ и $J_d = J_{dmin}$) значениях его параметров, а цифрой 5 обозначен переходной процесс в СУ движителем, синтезированной на основе его более упрощенной модели (см. работу [12]) при номинальных значениях параметров.



Рис. 2.3 Переходные процессы в СУ движителем

Из рис. 2.3 видно, что закон управления (2.16) обеспечивает желаемые динамические свойства движителя, определяемые уравнением (2.13), только тогда, когда значения его параметров соответствуют некоторым номинальным значениям. При отклонении параметров движителя от номинальных значений, возникает ошибка, которая, как будет показано ниже, значительно ухудшает качество работы всей СУ НПА в целом. Следует также отметить, что СУ движителями, синтезированная на основе их упрощенной модели, не обеспечивает точного управления даже при номинальных значениях его параметров из-за того, что эта модель не учитывает ряд существенных факторов взаимодействия винта с вязкой окружающей средой.

При использовании закона управления (2.28) переходные процессы в системе во всем диапазоне изменения параметров J_{∂} и F_m с точностью до 1% всегда будут совпадать с кривой 1 (см. рис. 2.3). Таким образом, как показывают результаты моделирования, закон управления (2.28) позволяет описать динамику движителя НПА с помощью желаемого дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (2.13).

На рис. 2.4 показана зависимость ошибки слежения по положению НПА при гармоническом входном сигнале вида $x = 10\sin(0.16t)$ от качества используемой СУ движителями. На этом рисунке цифрой 1 обозначена кривая, соответствующая ошибке слежения НПА в случае, когда применяется СУ движителями вида (2.28), цифрой 2 – кривая, соответствующая случаю использования СУ движителями вида (2.16) (в обоих случаях параметры движителя были равны $F_m = F_{mmax}$ и $J_{\partial} = J_{\partial max}$), а цифрой 3 – кривая, соответствующая случаю применения СУ движителями, синтезированной на основе его упрощенной модели [12].



Рис. 2.4 Ошибка слежения НПА при использовании различных СУ движителями

Из рис. 2.4 видно, что качество работы всей СУ НПА в целом в значительной степени зависит от качества СУ движительным комплексом. То есть при снижении точности работы СУ движителями на 20% (см. рис. 2.4) ошибка слежения НПА при его перемещении по сложной траектории в широком диапазоне изменения скоростей может увеличиться почти в два раза.

На рис. 2.5 показан процесс изменения ошибки по положению НПА при его перемещении в заданную точку пространства, т.е. при подаче на вход СУ НПА ступенчатого сигнала. На этом рисунке черная кривая соответствует изменению ошибки по положению НПА при использовании СУ движителями вида (2.28), а серая кривая – изменению этой ошибки при использовании закона управления (2.16) (значения параметров движителя равны их максимальным значениям, т.е. $F_m = F_{mmax}$ и $J_{\partial} = J_{\partial max}$).



Рис.2.5 Влияние различных СУ движителями на характер изменения ошибки при позиционном управлении НПА

Из этого рисунка видно, что и в случае позиционного управления НПА применение закона управления движителями вида (2.28) позволяет более чем в 2.5 раза уменьшить время переходных процессов по сравнению с системой, не использующей самонастройку по эталонной модели.

Таким образом, результаты исследования синтезированных СУ движителями подтвердили их высокую работоспособность и эффективность при различных режимах движения НПА. Кроме того, исследования влияния качества СУ движителями на работу всей системы управления НПА в целом показали целесообразность применения более сложной, но в то же время и более точной самонастраивающейся СУ движителями.

2.2.2 Синтез СУ движителями НПА на основе нейронных сетей

Как уже было отмечено ранее, одним из недостатков СУ движителями (2.28) является наличие разрывного сигнала управления, что в может приводить к появлению колебаний при управлении движением НПА. Поэтому в диссертации дополнительно разрабатываются методы синтеза СУ движителями НПА, на основе HC, которые не требуют точного знания математических моделей ОУ, могут работать в условиях параметрической неопределенности этих объектов, малочувствительны к изменениям параметров ОУ (проявляют свойства робастности), устойчивы к помехам, легко реализуются с использованием типовых контроллеров и позволяют использовать параллельные вычисления.

СУ, основанные на использовании НС, делятся на две большие группы [40]: на основе НС с предварительной настройкой параметров и на основе НС, которые настраиваются в реальном масштабе времени (РМВ) в процессе функционирования системы. Первые предназначены для работы с объектами, параметры которых в процессе эксплуатации не изменяются, а вторые - для управления объектами с существенно и непредсказуемо изменяющимися параметрами. При этом, как правило, перенастройка параметров в указанных НС в РМВ требует большого объема вычислений следовательно, использования высокопроизводительных И. управляющих ЭВМ. Поэтому основной задачей, которая будет решаться в диссертации является разработка методов создания СУ движителей НПА на основе адаптивных НС, которые имеют приемлемую вычислительную сложность и могут быть реализованы на бортовом компьютере НПА.

СУ движителями НПА на основе адаптивной НС с прямым инверсным управлением. Для реализации СУ движителями НПА в диссертации была выбрана гибридная нейро-нечеткая сеть (ННС), которая имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными НС: малая чувствительность к изменениям параметров ОУ, устойчивость к шумам в сигналах обратных связей, простая реализация на типовых контроллерах и возможность использования параллельных вычислений.

В традиционных системах с НС, которые используются для управления объектами с постоянными параметрами, обучение и настройка сети проводится только один раз перед началом работы системы и больше в процессе ее функционирования параметры сети не изменяются. Для обучения НС формируется обучающая выборка [40, 226], представляющая собой массивы данных, которые содержат последовательность сигналов, поданных на входы ОУ и снятых с его выходов. При этом последовательность входных сигналов обычно представляет собой набор случайных величин из всего возможного диапазона изменения входных сигналов. Количество и частота подачи сигналов на вход ОУ при формировании обучающей выборки зависят от архитектуры НС и свойств этого ОУ. На основе сформированной обучающей выборки производится такая настройка НС, чтобы она стала обратной (инверсной) моделью ОУ. После введения этой модели в прямую цепь управления реализуется известный принцип прямого инверсного управления [108, 190], позволяющий придать всей системе в целом заданные динамические свойства. Однако указанный подход можно применять только тогда, когда ОУ имеет постоянные параметры. В противном случае НС, заранее обученная на основе конкретных значений параметров ОУ, уже не сможет обеспечить ему приемлемое качество управления при значительных вариациях этих параметров.

Следует отметить, что, если диапазон изменения входных сигналов системы достаточно велик, то для обеспечения качественной настройки сети формируемая обучающая выборка должна накапливать большой объем информации и, следовательно, иметь большую размерность. При этом время настройки HC на основе этой объемной выборки, резко повышается. Если же при указанных условиях уменьшить объем формируемой выборки за счет увеличения интервала между

очередными порциями поступающей в эту выборку информации, то в отдельных режимах работы системы HC, настроенная на основе уменьшенной по объему выборки, может уже и не обеспечивать заданную точность управления. Поэтому для быстрой и точной настройки HC желательно, чтобы в разрабатываемой системе эта HC настраивалась на основе выборки, сформированной на достаточно малом диапазоне изменения входных сигналов и с малым шагом дискретизации. При отклонении входных сигналов от выбранного диапазона сеть должна быть перенастроена заново.

При использовании HC для управления объектами, параметры которых изменяются в широких пределах и не поддаются измерениям, необходимо также периодически в PMB переобучать и перенастраивать сеть во время работы системы.

На рис. 2.6 представлена структурная схема предлагаемой в диссертации системы управления, построенной с использованием НС, работающей в РМВ и использующей принцип прямого инверсного управления [45].



Рис. 2.6 Структурная схема адаптивной системы прямого инверсного управления с НС

На этой схеме введены следующие обозначения: r^* , r – задающий и выходной сигналы системы, соответственно (для движителя НПА r^* соответствует τ_d , а $r - \tau_d$); u – сигнал управления ОУ; \tilde{u} – выходной сигнал настраиваемой НС; ε_{NN} – сигнал ошибки настройки; Δ - блоки задержки, позволяющие идентифицировать динамические свойства ОУ (для объектов *n*-го порядка необходимо вводить *n* пар этих блоков); Рг – типовой регулятор; БП – блок переключения.

На начальном этапе работы рассматриваемой системы параметры ОУ неизвестны, НС является ненастроенной и не может обеспечивать качественного управления этим ОУ до тех пор, пока она не обучится полностью хотя бы один раз. Однако для формирования обучающей выборки необходимые данные следует снимать с уже работающего ОУ. Поэтому для получения этой выборки на начальном этапе настройки НС в систему вводится типовой регулятор Рг, обеспечивающий хотя бы приемлемое качество функционирования ОУ.

После формирования первой обучающей выборки (особенности формирования этих выборок будут обсуждаться ниже) происходит обучение HC, которая в результате становится инверсной моделью OУ и устанавливается в прямую цепь управления вместо типового регулятора Pr. Эта замена осуществляется с помощью БП. Для обеспечения непрерывного процесса настройки HC и управления OУ в системе (см. рис.2.6) используется две HC. Первая из них непрерывно обучается, а вторая (с предыдущей настройкой) обеспечивает процесс управления. После очередного переобучения HC ее параметры копируются во вторую (управляющую) HC и процесс повторяется. Это позволяет не прерывать управление объектом на время переобучения сети.

Как уже отмечалось ранее, для обучения НС прежде необходимо сформировать обучающую выборку, которая должна содержать данные, соответствующие всему возможному диапазону значений *и*. В отличие от стационарных систем с предварительным обучением, для системы, разрабатываемой в диссертации, только одну полную обучающую выборку получить нельзя, так как параметры ОУ непрерывно изменяются в широком диапазоне, и эта выборка содержала бы информацию о динамических свойствах различных ОУ.

В данном случае для небольшого диапазона входных сигналов в течение ограниченного промежутка времени (когда непрерывно и плавно изменяющиеся параметры ОУ успевают претерпеть незначительные изменения) требуется формировать небольшие по объему выборки и каждый раз быстро перенастраивать сеть на основе этих новых выборок. При этом в процессе работы такой системы (до

очередной замены HC) возникают ситуации, когда на ее вход будут поступать сигналы, значения которых выходят за пределы диапазонов значений входных сигналов, на которых происходило обучение используемой в данный момент HC. В этом случае указанная сеть без применения специальных мер при ее настройке уже не обеспечит качественного управления ОУ и может вообще произойти потеря работоспособности всей системы в целом. В результате при построении этих систем возникает задача формирования таких обучающих выборок, которые позволили бы устранить указанные проблемы.

Для решения этой задачи предлагается использовать подход, согласно которому вся обучающая выборка формируется на основе не одного, а двух массивов данных [45]. Первый массив $H^{NN} \in \mathbb{R}^{m \times l}$ состоит из данных, полученных на основе измерений в процессе работы системы, а второй массив $P^{NN} \in \mathbb{R}^{p \times l}$ содержит данные, полученные на основе массива H^{NN} и прогнозирующие поведение управляемого ОУ на небольшом промежутке времени в будущем. Здесь l – число, равное количеству входов ОУ (для движителя НПА l=1).

Строки массива H^{NN} формируются следующим образом. На каждом очередном (достаточно малом) временном шаге дискретизации T_0 (при очередном измерении состояния системы) все данные, хранившиеся в этом массиве H^{NN} , смещаются на одну строку вниз. Нижняя строка, содержащая наиболее старую информацию, удаляется, а в первую строку заносятся очередные l чисел, которые соответствуют значениям сигналов, подаваемых на входы системы и снимаемых с ее выходов. Для обеспечения работы системы в РМВ на ЭВМ, имеющей не высокую вычислительную мощность, очередное переобучение НС должно производиться не после каждого шага дискретизации T_0 , а через p шагов (величина p зависит от динамических свойств ОУ и мощности используемой ЭВМ). При этом массив H_k^{NN} (k - натуральное число), используемый для предыдущего обучения сети, заменяется на массив H_{k+1}^{NN} , при котором будет происходить ее очередное обучение. Причем в зависимости от величин m и p некоторое количество данных (строк) в массивах H_k^{NN} и H_{k+1}^{NN} может совпадать.

Как уже отмечалось ранее, для правильной настройки HC перед ее очередным переобучением каждый массив H_k^{NN} (k = 1, 2, 3, ...) необходимо дополнить массивом P_k^{NN} , который должен содержать данные, прогнозирующие поведение системы на pшагов дискретизации вперед. При этом элементы столбцов массив P_k^{NN} формируются на основе элементов соответствующих столбцов массивов H_k^{NN} , а число строк массива P_k^{NN} должно быть таким, чтобы до окончания очередной настройки HC (на основе массивов H_k^{NN} и P_k^{NN}) входные и выходные сигналы ОУ еще находились в пределах спрогнозированных значений, учитываемых элементами массива P_k^{NN} .

На рис. 2.7 показаны временные последовательности формирования элементов первых столбцов массивов H_k^{NN} и P_k^{NN} (k = 1, 2, 3,...) в системе, изображенной на рис. 2.6 [45]. Все остальные столбцы этих массивов формируются аналогичным образом. Причем формирование элементов указанного столбца массива H_k^{NN} (на рис. 2.7 он обозначен $H_{k,1}^{NN}$) происходит с использованием сплошной линии, а аналогичного столбца массива P_k^{NN} (на рис. 2.7 обозначен $P_{k,1}^{NN}$) - пунктирной.

С учетом предложенного подхода и временной последовательности (см. рис. 2.7) формирования выборки (массивов H_k^{NN} и P_k^{NN}) предлагается использовать следующий алгоритм построения и работы СУ на основе НС (см. рис. 2.6), настраиваемой в РМВ.

В момент начала работы системы (см. $t_0 = 0$ на рис. 2.7) при включенном регуляторе Рг на ее вход подается сигнал r^* и через каждый временной шаг T_0 начинается процесс построчного заполнения массива H_k^{NN} . Процесс заполнения этого массива завершается в момент времени $t_1 = m \cdot T_0$, и он запоминается в памяти ЭВМ. Сразу же после этого начинается временная экстраполяция данных, последовательно расположенных в каждом столбце массива H_k^{NN} , например, с использованием метода наименьших квадратов.



Рис. 2.7 Временные последовательности формирования элементов первых столбцов массивов \boldsymbol{H}_{k}^{NN} и \boldsymbol{P}_{k}^{NN}

Этот процесс завершается в момент времени $t_1^3 = t_1 + t_3$ после последовательного расположения экстраполированных данных в соответствующих *p* строках и *l* столбцах массива P_1^{NN} (t_3 – время экстраполяции и заполнения массива P_1^{NN}). После формирования выборки, т.е. массивов P_1^{NN} и H_1^{NN} , начинается первая настройка HC, которая завершается в момент времени $t_1^{H} = t_1^3 + t_n$ (t_n – время настройки HC), когда начинает выполняться неравенство $\varepsilon_{NN} < \varepsilon_{NNdon}$ (см. рис. 2.6), где ε_{NNdon} - некоторая заранее заданная малая величина. После этого настроенная инверсная HC включается в прямую цепь системы (см. рис. 2.6), а регулятор Рг с помощью БП отключатся до конца работы этой системы.

Следует отметить, что за время $T_0 \cdot k_h \ge t_1^{\text{H}} - t_1 (k_h - минимальное натуральное число, удовлетворяющее приведенному неравенству) через каждый шаг <math>T_0$ в системе происходит обновление массива H^{NN} (заполнение его k_h верхних строк новыми данными с потерей k_h нижних строк). В момент времени $t_2 = t_1 + T_0 k_h \ge t_1^{\text{H}}$, где $t_2 - t_1^{\text{H}} < T_0$ (см. рис. 2.7), происходит запоминание нового массива H_2^{NN} , а затем сразу же начинается процесс экстраполяции и заполнения массива P_2^{NN} . В момент времени $t_2^{9} = t_2 + t_3$ заполнение этого массива заканчивается и начинается новая настройка HC

(она заканчивается в момент времени $t_2^{n} = t_2^{3} + t_n$) и ее последующая установка в прямую цепь рассматриваемой системы. В момент времени $t_3 = t_2 + T_0 \cdot k_h \ge t_2^{n}$ происходит запоминание обновленного массива H_3^{NN} и весь процесс циклически повторяется при работе системы.

Поскольку, как показали результаты исследований, суммарное время экстраполяции и настройки очередной HC ($t_2 + t_\mu$) для различных временных участков работы системы практически одинаково, то величина k_h в процессе работы системы остается постоянной. Более того, она должна быть равна половине количества строк в массиве \boldsymbol{P}_{k}^{NN} . То есть экстраполяция каждого столбца очередного массива \boldsymbol{H}_{k}^{NN} для формирования соответствующих столбцов массива P_k^{NN} должна осуществляться на $p = 2k_h$ шагов дискретизации вперед (на время $t = t_{k+2} - t_k = 2k_h \cdot T_0$). Действительно, если в момент времени t_k в прямую цепь управления установлена очередная HC (см. рис. 2.6), настроенная с использованием массивов H_{k-1}^{NN} и P_{k-1}^{NN} , и на основе очередного массива \boldsymbol{H}_{k}^{NN} началась экстраполяция с целью формирования массива \boldsymbol{P}_{k}^{NN} , то эта экстраполяция должна быть осуществлена до времени *t*_{k+2}. Это объясняется тем, что в момент времени t_{k+1} в системе будет сформирована и установлена новая HC, настроенная с использованием массива \boldsymbol{P}_{k}^{NN} , которая должна обеспечивать качественную работу этой системы до времени tk+2, когда в ее прямую цепь будет установлена новая HC, настроенная уже с использованием массивов H_{k+1}^{NN} и P_{k+1}^{NN} . То есть настраиваться и работать каждая НС должна в течение времени, на которое сформирован прогноз поведения ОУ.

Таким образом, как следует из предлагаемого алгоритма и рис. 2.7, через каждые k_h указанных шагов дискретизации в момент времени t_k в прямую цепь системы устанавливается вновь настроенная HC, которая остается неизменной в течение очередных k_h шагов дискретизации, и формируется массив H_k^{NN} . Затем за время $t_9 = t_k^3 - t_k$ производится экстраполяция элементов соответствующих столбцов этого массива на очередные $p = 2k_h$ шагов вперед и на основе этой экстраполяции формируется массив P_k^{NN} , состоящий из p строк. Эти два массива объединяются в

один, который и образует обучающую выборку. С использованием полученной выборки в течение времени $t_{\mu} = t_k^{\mu} - t_k^{\beta}$ производится переобучение действующей HC, т.е. обновление ее параметров. Далее вновь настроенная HC в момент времени t_{k+1} заменяет прежнюю сеть и процесс переобучения и смены HC повторяется.

Как будет показано далее, несмотря на определенную ошибку прогнозирования реального поведения ОУ с переменными параметрами, рассмотренный подход позволяет обеспечить качественную настройку НС и работу всей системы в целом вне диапазона реально сформированных обучающих данных массива H^{NN} , так как при относительно краткосрочных прогнозах только на *р* шагов вперед при малых значениях T_0 ошибка прогнозирования, как правило, достаточно мала.

Для исследования эффективности разработанной СУ было проведено математическое моделирование. В процессе исследований шаг моделирования выбирался равным 10⁻⁴ с. Поскольку ОУ имеет только один вход (сигнал *u*) и один выход (ω_0), то массивы H_k^{NN} и P_k^{NN} содержат всего по два столбца. При этом количество строк *m* массива H_k^{NN} было принято равным 32. Как показали исследования, этого оказалось вполне достаточно для обеспечения высокой точности работы рассматриваемой системы и малого времени обучения ее HC.

При моделировании параметры движителя НПА принимались такими же, как в разделе 2.2.1, при этом считалось, что параметры F_m и J_∂ изменялись по следующим законам: $F_m = F_{m\mu} + k_1 \omega^2$, $J_\partial = J_{\partial\mu} + k_2 \omega^2$, где $k_1 = 10^{-5}$ H·c⁴, $k_2 = 3 \cdot 10^{-5}$ с²·кг·м² - постоянные коэффициенты.

Перед исследованием работы всей системы управления движителем НПА вначале рассмотрим работу инверсной модели, построенной на основе НС и работающей в РМВ.

На рис. 2.8 представлены результаты исследования работы HC, настраиваемой по описанному выше алгоритму. При этом единица сигналов u и \tilde{u} по оси ординат соответствует 24 В. Цифрой 1 на этом рисунке обозначен выходной сигнал \tilde{u} HC (инверсной по отношению к ОУ), на вход которой подается сигнал τ_{∂} (см. рис. 2.6), а цифрой 2 – участок изменения сигнала $u = \sin 6t$ (см. рис. 2.6). Из этого рисунка видно,
что к моменту замены параметров HC на очередные вновь настраиваемые (см. t = 0.4с, t = 0.4с, t = 0.4с, t = 0.5с) за счет изменения параметров OУ и погрешностей прогнозирования происходит определенное накопление ошибок, которые уменьшаются (см. t = 0.5с) или практически обнуляются (см. t = 0.4с и t = 0.4с) при замене прежней HC на новую. При этом в зависимости от точности совпадения элементов матрицы прогнозов P_k^{NN} с реальными значениями $u \, u \, r$ величина накапливаемой ошибки может быть различна. В частности, из рис. 2.8 видно, что к моменту обновления HC при t = 0.4с в результате удачно составленной матрицы P_k^{NN} величина ошибки близка к нулю. Причем настройка HC по предложенному алгоритму и их замена обеспечиваются в РМВ (при $T_0 = 0.001$ время обновления HC $t_{k+1} - t_k = 0.05$ с).



Рис. 2.8 Процесс работы НС в режиме обратной модели

Таким образом, выполненный анализ показывает, что предложенный алгоритм настройки является вполне работоспособным И обеспечивает достаточно параметров НС настройку качественную для рассматриваемого сложного нелинейного ОУ с непрерывно изменяющимися параметрами даже при наличии ошибок прогнозирования.

Результаты исследования работы системы управления движителем НПА (см. выражения (2.7), (2.8)), построенной на основе НС, представлены на рис. 2.9. Кривая

1 на этом рисунке обозначает закон изменения входного сигнала $\tau_d = 100 \sin 6t$, а кривая 2 – изменение выходного сигнала τ_d . Из этого рисунка видно, что после начала работы и до $t \approx 0.1$ с в системе (см. рис. 2.6) (согласно предложенному алгоритму) вместо НС используется типовой регулятор Рг, обеспечивающий приемлемое качество управления на начальном участке ее движения. В момент $t \approx 0.1$ с в прямую цепь включается и вступает в работу настроенная ННС (при $T_0 = 10^{-4}$). В дальнейшем эта сеть обеспечивает вполне приемлемое отслеживание движителем НПА программной тяги.



Рис. 2.9 Процесс отработки движителем НПА гармонического входного сигнала

Однако НС, являясь инверсной моделью ОУ с ограниченной полосой пропускания, обладает свойствами дифференцирующих звеньев, на выходах которых обычно формируются высокочастотные составляющие. Указанные составляющие заметно ухудшают качество работы всей системы в целом за счет понижения точности настройки НС. Ухудшение качества настройки НС объясняется тем, что указанные высокочастотные составляющие начинают поступать и в обучающую выборку (их содержат элементы массивов H_k^{NN} и P_k^{NN}), сбивая используемый алгоритм настройки.

Для снижения уровня этих составляющих в указанной выборке и, соответственно, их влияния на результаты работы всей системы в целом можно ввести сглаживание (нормирование) всех элементов массивов H_k^{NN} и P_k^{NN} за счет их усреднения. Это усреднение можно обеспечить за счет деления каждого элемента соответствующего столбца массива H_k^{NN} или P_k^{NN} на среднее арифметическое значение всех элементов указанного столбца.

На рис.2.10 показан процесс работы системы с переобучаемой НС (см. рис.2.6) при сглаживании элементов обучающей выборки описанным способом.



Рис. 2.10 Процесс работы системы с ННС при сглаживании элементов обучающей выборки

Кривая 1 на этом рисунке, как и прежде, соответствует закону изменения входного сигнала $\tau_d = 100 \sin 6t$, а кривая 2 – изменению выходного сигнала τ_d . Сравнение рис. 2.9 и рис. 2.10 позволяет убедиться в значительном (почти в 2.5 раза) снижении высокочастотных колебаний выходного сигнала системы и, соответственно, повышении качества ее работы.

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что применение HC (настраиваемых в PMB) позволяет качественно управлять сложными нелинейными динамическими объектами с существенно изменяющимися

параметрами. Однако использование принципа прямого инверсного управления имеет серьезный недостаток, заключающийся в появлении высокочастотных помех в выходном сигнале ОУ. Поэтому в диссертации были разработаны другие подходы к построению СУ с использованием адаптивных НС, позволяющие устранить указанный недостаток.

Синтез адаптивных прогнозирующих СУ движителем НПА на основе НС. Для устранения описанных выше недостатков применения прямого инверсного управления в диссертации разработаны иные схемы включения ННС, основанные на использовании особенностей управления с предсказанием [128, 213]. При этом в качестве базовых в диссертации используется два известных способа построения СУ этого типа.

Первый способ основан на использовании адаптивного дискретного фильтра (АФ) в качестве модели ОУ, позволяющего предсказывать поведение этого ОУ на некотором промежутке времени и настраивать с учетом указанного прогноза параметры ННС, которая является регулятором и устанавливается в прямую цепь СУ [40, 128]. Управление, реализуемое этими системами, обычно называется прямым адаптивным управлением с предсказанием. Во втором способе ННС является моделью ОУ, позволяющей прогнозировать его поведение на большем отрезке времени [194], а более адаптивный регулятор состояния рассчитывается и настраивается с помощью этой модели ННС.

Эти два способа в диссертации берутся за основу при создании новых методов синтеза высококачественных СУ движителями НПА.

СУ движителем НПА на основе прямого адаптивного управления с предсказанием. Известные СУ, построенные на основе метода прямого адаптивного управления с предсказанием, имеют вид, представленный на рис.2.11 [44].

На этом рисунке введены следующие новые обозначения: Опт – блок оптимизации, настраивающий параметры ННС; r - выходной сигнал ОУ; \hat{r} - выходной сигнал АФ; $J_{af} = r - \hat{r}$ - символ невязки; r^* - задающий сигнал.



Рис. 2.11 Структурная схема системы адаптивного управления на основе ННС

При традиционном подходе [40] настройка ННС осуществляется только на основе текущего значения J_{af} . В результате при достаточно быстрых изменениях параметров ОУ возникает значительное запаздывание с установкой требуемых значений параметров ННС, поскольку определение этих параметров и их последующая установка в сеть осуществляется только после появления ненулевых значений J_{af} . То есть достаточно большие значения J_{af} при традиционном подходе являются необходимыми для подстройки параметров ННС, а это в свою очередь приводит к большим запаздываниям в указанной подстройке и, как следствие, к ухудшению точности работы всей системы в целом. Для значительного повышения точности при использовании схемы, изображенной на рис. 2.11, необходимо обеспечивать более оперативную подстройку параметров ННС–регулятора до появления больших значений J_{af} . Указанная задача будет решаться за счет упреждающей подстройки сети на основе прогноза поведения ОУ.

Прогноз поведения ОУ можно получить различными средствами, однако наиболее удобно для этих целей использовать легко настраиваемые простые линейные АФ, поскольку подстройку их коэффициентов в процессе управления ОУ с быстро изменяющимися параметрами требуется производить в реальном масштабе времени. Для получения указанного прогноза целесообразно использовать алгоритм, заключающийся в представлении АФ виде матриц состояния и в последующем решении матричного уравнения методом наименьших квадратов [167]. На основе полученного прогноза поведения ОУ, необходимо так настроить параметры ННС (см

рис.2.11), чтобы формируемый с ее помощью сигнал управления *и* обеспечивал минимум критерия качества:

$$J_{nf} = \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{k+Hp} (r_i - \hat{r}_i)^2 Q_i + \frac{1}{2} \sum_{j=k-1}^{Hc} \Delta u_j^2 R_j , \qquad (2.29)$$

где *k* -текущий временной такт; H_p – горизонт прогноза (количество временных тактов, на которое происходит прогнозирование поведения ОУ); H_c – горизонт управления (количество временных тактов, на которых будут использованы рассчитанные сигналы управления); $\Delta u_j = u_j - u_{j-1}$; $Q_i \in \mathbb{R}^{1 \times H_p}$, $R_i \in \mathbb{R}^{1 \times H_c}$ – векторы соответствующих весовых коэффициентов.

Особенности формирования и свойства этого функционала подробно изложены в работах [128, 161, 213]. Однако в этих работах на основе функционала (2.29) описывается аналитическое решение задачи управления только линейным ОУ с постоянными параметрами. Использовать изложенный в этих работах метод для качественного управления нелинейными ОУ с переменными параметрами не удается.

Для реализации предлагаемого в данной работе подхода цифровой АФ можно представить следующим выражением [167]:

$$\hat{r}(k+1) = \sum_{i=1}^{M} \theta_{1i}(k) \cdot x_i(k) + \sum_{j=1}^{L} \theta_{2j}(k) \cdot u_j(k), \qquad (2.30)$$

где $x_i(k)$ – мгновенные значения внутренних состояний фильтра; $u_j(k)$ – мгновенные значения входных сигналов АФ; $\theta_{1i}(k)$ - коэффициенты усиления обратных связей АФ; $\theta_{2j}(k)$ - коэффициенты усиления прямого канала АФ; M, L – размерности вектора состояний АФ и вектора регрессии входного сигнала, соответственно.

Порядок АФ зависит от сложности ОУ и особенностей изменения его параметров. Однако поскольку при работе системы предполагается делать только

краткосрочные прогнозы поведения ОУ и при этом непрерывно подстраивать параметры АФ в реальном масштабе времени, то, порядок АФ можно значительно уменьшить, а это в свою очередь существенно сокращает вычислительную сложность предлагаемого алгоритма управления. Необходимый порядок АФ может быть окончательно выбран экспериментально в процессе моделирования системы.

Работа системы, изображенной на рис. 2.11, состоит из двух этапов [44]: начального и рабочего. На начальном этапе, состоящем из нескольких тактов коэффициенты настройки, устанавливаются такие исходные HHC, чтобы реализуемый с помощью этой сети регулятор уже на этом этапе обеспечивал устойчивое движение системы, а также чтобы его коэффициент усиления при всех возможных входных сигналах не вводил сигнал и в зону насыщения усилителя мощности. Поскольку этот этап работы системы является кратковременным, то более жестких требований к качеству регулятора на указанном этапе не предъявляется. Количество тактов первоначальной настройки AФ и HHC равно f = M + L (см. выражение (2.30)). Этого количества достаточно для формирования массивов данных, используемых на рабочем этапе функционирования СУ. Более подробно об этом будет сказано далее.

После появления ненулевого значения *и* начинает вычисляться величина невязки *J*_{af}. Затем начинается процесс настройки коэффициентов АФ с использованием метода градиентного спуска по выражению [40, 63]:

$$w_{k+1} = w_k - \eta \frac{\partial J_{af}}{\partial w_k} , \qquad (2.31)$$

где $w_k \in \mathbf{R}^{M+L}$ текущее значение вектора соответствующих настраиваемых параметров АФ; η - коэффициент скорости обучения, $J_{af} = (\hat{r}_k - r_k)^2$.

Настройка параметров АФ по выражению (2.31) происходит до минимизации функционала J_{af} . Затем начинается процесс настройки параметров ННС, в течение которого задающий сигнал принимается постоянным, выход сети отключается от входа ОУ, а на этот вход подается сигнал управления, сформированный сетью на

предыдущем временном такте. При этом выход ННС остается подключенным к АФ, который в текущий момент является моделью ОУ. Настройка параметров ННС также осуществляется с использованием метода градиентного спуска по выражению (2.31), однако функционал качества при этом имеет вид (2.29). В этом случае одновременно с минимизацией разности $r_i - \hat{r}_i$ удается ввести ограничение на амплитуду выходного сигнала ННС, что предотвращает вхождение управляющего сигнала в насыщение.

После завершения процесса настройки коэффициентов ННС ее выход подключается ко входам ОУ и АФ. Затем процесс настройки параметров АФ и ННС повторяется на следующем такте начального этапа работы СУ, если число уже выполненных тактов меньше f. Причем на каждом временном такте этого этапа работы запоминается вектор внутренних состояний АФ $X_j^{AF} = [x_l, ..., x_M]$, вектор сигналов $U_j = [u_l, ..., u_L]$, поступающих на его вход, и сигнал r_j с выхода ОУ. В результате за f временных тактов в системе формируется два массива: матрица A, каждая строка которой имеет вид $A_j^{AF} = [X_j^{AF}, U_j] \in \mathbb{R}^{l \times f}$, $j = \overline{l, f}$, и вектор $\mathbb{R}^{CO} = [r_j, r_{f-1}, ..., r_l]^T$. При этом на каждом временном такте начального этапа работы СУ все строки матрицы A^{AF} и элементы вектора \mathbb{R}^{CO} смещаются на одну позицию вниз, а на первую позицию записываются текущие значения соответствующих переменных.

Поскольку по одному текущему значению J_{af} невозможно сразу настроить АФ так, чтобы можно было получать достаточно точный прогноз поведения ОУ более чем на один временной такт вперед, то после выполнения всех f тактов начального этапа работы системы будет получена первая квадратная матрица A^{AF} , и при переходе к рабочему этапу будет использован наиболее эффективный метод настройки АФ, о котором более подробно будет сказано ниже. Указанный переход необходим для увеличения точности настройки фильтра и, соответственно, точности прогноза, требующего одновременного использования нескольких значений вектора состояния АФ и сигналов, снятых с входа и выхода ОУ за f предыдущих временных тактов начального этапа. То есть на этом начальном этапе работы системы в основном

происходит накопление данных (формирование матрицы A^{AF} и вектора R^{CO}), необходимых для точной настройки $A\Phi$ уже на основном рабочем этапе.

Для пояснения функционирования системы на рабочем этапе введем в рассмотрение обобщенный вектор параметров АФ $\theta^{AF} = [\theta_1^{AF}, \theta_2^{AF}]^T \in \mathbb{R}^{1 \times f}$, где θ_1^{AF} $\in R^{I \times M}$ и $\theta_2^{AF} \in \mathbf{R}^{I \times L}$ – векторы, сформированные с учетом выражения (2.30). С учетом этого вектора выражение (2.30) может быть представлено в виде $\hat{r}_j = \mathbf{A}_j^{AF}(k) \cdot \boldsymbol{\theta}^{AF}$, то есть как произведение *j*-й строки матрицы A^{AF} на вектор θ^{AF} . За *f* тактов в системе будет сформирован вектор выходных сигналов АФ $\boldsymbol{R}^{AF} \in R^{I \times f}$, который может быть рассчитан по формуле $\mathbf{A}^{AF} \cdot \boldsymbol{\theta}^{AF} = \mathbf{R}^{AF}$. Однако, при известных значениях матрицы A^{AF} и вектора R^{CO} с учетом этой формулы можно получить вектор $\theta^{AF*} = (A^{AF})^{-1} R^{CO}$ $\in \mathbf{R}^{1 \times f}$ таких параметров АФ, при которых вектор выходных значений этого фильтра будет точно совпадать с вектором R^{CO} . Очевидно, что в этом случае АФ будет являться моделью ОУ, которая в рабочем режиме, начинающимся через f тактов после начала работы системы, будет обеспечивать настройку ННС и, тем самым, высокую динамическую точность управления ОУ. Подчеркнем, что точное управление ОУ возможно только на рабочем этапе функционирования СУ за счет точного прогноза состояния ОУ на f тактов вперед [167], и точной настройки параметров ННС на основе выражения (2.29), которые в свою очередь обеспечиваются точно настроенным АФ. На начальном этапе работы системы прогноз поведения ОУ делается только на один такт вперед, т.к. параметры АФ еще не получили точной настройки.

Предложенный подход обладает рядом существенных достоинств, поскольку синтезированная СУ за счет использования адаптивного ННС-регулятора обладает робастностью к изменениям параметров ОУ и внешним воздействиям. Применение АФ для прогноза поведения ОУ позволяет увеличить скорость адаптации регулятора, а используемый критерий (2.29) не допускает появления пиковых управляющих сигналов, фильтруемых усилителем мощности и не доходящих до ОУ. Все это позволяет достигать высокой динамической точности управления. Однако достижение этой точности все же требует использования АФ, а это в свою очередь

ведет к резкому росту вычислительной сложности используемого алгоритма. Этот недостаток может быть устранен за счет применения другой схемы управления, рассматриваемой далее.

СУ движителем НПА на основе адаптивного регулятора состояния с предсказанием по ННС. Структурная схема предлагаемой системы управления показана на рис. 2.12 [44].



Рис. 2.12 Структурная схема системы управления с ННС в качестве модели ОУ

Математическое описание и внутренняя структура ННС, используемой в этой схеме, остаются прежними. Однако в новой схеме ННС используется уже не в качестве регулятора, а для построения точной модели сложного нелинейного ОУ с переменными параметрами с целью более точного предсказания его поведения в будущем. При этом параметры СУ непрерывно рассчитываются и подстраиваются с помощью АФ на основе полученного с помощью ННС прогноза поведения и динамических свойств ОУ на следующих этапах его работы. Сигнал \hat{r}_i в отличие от выходного сигнала r_i свободен от реально существующих помех и поэтому позволяет АФ своевременно, правильно и точно настраивають параметры регулятора.

В схеме на рис. 2.12 введены следующие новые обозначения: $K_{dr} \in \mathbb{R}^{1 \times M}$ - вектор коэффициентов усиления синтезируемого регулятора; Δ - блок элементов запаздывания ННС; X^{AF} – вектор состояний АФ; J_{af} , J_{nfm} - символы соответствующих невязок; \hat{r}_{c} - выходной сигнал ННС.

В отличие от ННС, рассмотренной на рис. 2.11 и имеющей только два входа, на вход ННС, представленной на рис.2.12, подается *N*+*1* сигналов. Из них *N* сигналов являются сигналами регрессии выхода ННС. В результате на основе этой сети удается формировать точную модель произвольного нелинейного динамического ОУ *N*-го порядка.

Перед началом работы системы (см. рис.2.12) вектор K_{dr} равняется нулю, параметры НФС выбираются по стандартным правилам [63, 161], а все параметры АФ могут быть выбраны случайным образом, но желательно из диапазона от 0 до 1, чтобы в начальный период работы системы исключить возможность формирования (по рассмотренному ниже алгоритму) обратных связей регулятора с большими коэффициентами усиления.

В начальный период работы системы происходит накопление данных для настройки ННС как модели ОУ. При этом формируется два вектора данных U, $R^{CO} \in R^{1 \times f_m}$, в которых сохраняется информация о сигнале, поступающем на вход ОУ и формируемом на его выходе, соответственно, на протяжении f_m временных шагов. Величина f_m зависит от особенностей ОУ и точности, с которой предполагается строить модель ОУ. Однако при большом значении f_m возрастает вычислительная сложность обучения ННС. До окончательного заполнения векторов U и R^{CO} настройка параметров ННС и АФ не происходит. В результате, как и в ранее рассмотренной системе, в начальный период работы не обеспечивается высокое качества управления, поэтому на исходном (кратковременном) участке движения системы желательно не предусматривать выполнения ответственных операций.

После накопления необходимого количества данных начинается основной режим работы системы. Этот режим состоит из двух этапов: этапа настройки ННС и этапа прогнозирования. При этом настройка параметров ННС происходит в конце

такта f_m с использованием метода градиентного спуска (2.31) на основе уже сформированных к началу этого такта векторов U и R^{CO} . В процессе указанной настройки обеспечивается минимизация квадратичного критерия качества вида:

$$J_{nfm} = \sum_{i=1}^{f_m} (r_i - \hat{r}_{ci})^2 . \qquad (2.32)$$

После настройки ННС, начиная с f_m +1-го такта работы системы, на каждом последующем новом такте основного режима ее работы с помощью этой сети происходит прогнозирование поведения ОУ на несколько временных тактов H_T в будущее (как правило, не больше чем на 10 тактов). При этом в течение каждого очередного временного такта работы системы выполняется H_T шагов прогнозирования на H_T тактов работы СУ вперед. Этот прогноз, как и в предыдущем методе, позволяет оценить поведение ОУ в будущем и сформировать качественное (высокоточное) управление.

Процесс прогнозирования, протекающий на каждом такте основного режима работы системы, происходит следующим образом. На первом шаге этого процесса, начиная с такта $k=f_m+1$, на соответствующие входы ННС подаются очередной сигнал управления u_k и N значений $\hat{r}_{c\,k-1}, \hat{r}_{c\,k-2}, ..., \hat{r}_{c\,k-N}$, которые соответствуют значениям выхода ННС на предыдущих N тактах работы системы и уже имеются в памяти управляющего процессора. На основе этих N+1 величин на выходе ННС формируется значение $\hat{r}_{c\,k+1}$, которое является прогнозом поведения ОУ на один временной такт в будущее. После этого на втором шаге процесса прогнозирования на вход ННС подается следующий набор N+1 значений: $u_k \hat{r}_{c\,k}, \hat{r}_{c\,k-1}, ..., \hat{r}_{c\,k-N+1}$, а на ее выходе формируется величина прогноза $\hat{r}_{c\,k+2}$ на второй временной такт в будущее. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет рассчитан прогноз поведения ОУ на H_T тактов в будущее. При этом все H_T прогнозируемых значений сохраняются в массиве $P_P = [\hat{r}_{c\,k+1}, \hat{r}_{c\,k+2}, ..., \hat{r}_{c\,k+H_T}]$. Имея массив P_P , можно существенно расширить векторы, использующиеся для обучения AФ, что увеличивает точность синтезируемого регулятора за счет большего количества данных.

Настройка АФ производится на основе критерия

$$J_{af} = \sum_{i=k-f_m}^{k+H_T} (\hat{r}_{c\,i} - \hat{r}_i)^2$$
(2.33)

с помощью метода градиентного спуска (2.31). При этом используется объединенный вектор выходов ННС и полученного прогноза: $\hat{\boldsymbol{R}}_{c} = [\hat{r}_{ck-f_{m}}, ..., \hat{r}_{ck}, \hat{r}_{ck+1}, \hat{r}_{ck+2}, ..., \hat{r}_{ck+H_{T}}] \in \boldsymbol{R}^{1 \times (f_{m}+H_{T})}.$

В процессе настройки параметров АФ на его вход последовательно подаются элементы вектора $\boldsymbol{U}_f = [u_{k-f_m}, ..., u_{k-1}, u_k, \underbrace{u_k, ..., u_k}_{H_T}] \in \boldsymbol{R}^{1 \times (f_m + H_T)}$. Использование

прогнозных значений вектора \hat{R}_c в критерии качества (2.33) позволяет значительно повысить точность настройки АФ, и следовательно, обеспечить высокую динамическою точность управления нелинейным ОУ при существенных изменениях его параметров.

После настройки $A\Phi$ становится достаточно точной, но линеаризованной моделью ОУ. После представления $A\Phi$ в канонической форме легко определить сразу все коэффициенты усиления обратных связей СУ (см. вектор K_{dr} на рис.2.12) по вектору состояния $A\Phi$. В матричной форме это каноническое представление имеет вид [161]:

$$\begin{cases} z \boldsymbol{X}^{AF} = \boldsymbol{A}_{f} \boldsymbol{X}^{AF} + \boldsymbol{B}_{f} \boldsymbol{U} \\ \hat{\boldsymbol{R}} = \boldsymbol{C}_{f} \boldsymbol{X}^{AF} \end{cases}, \qquad (2.34)$$

где
$$\boldsymbol{A}_{f} = \begin{bmatrix} -\theta_{11} & -\theta_{12} & \dots & -\theta_{1M} \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \in \boldsymbol{R}^{M \times M}, \ \boldsymbol{B}_{f} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \in \boldsymbol{R}^{M},$$

$$\boldsymbol{C}_f = \left[\theta_{21}, ..., \theta_{2L}, 0, ..., 0\right] \in \boldsymbol{R}^M.$$

С учетом того, что в схеме на рис.2.12 закон управления *и* формируется согласно выражению: $u(k) = r^*(k) - \sum_{i=1}^M K_{dri} x_i(k)$, система (2.34) с учетом этого закона

может быть переписана в виде:

$$z\boldsymbol{X}^{AF} = (\boldsymbol{A}_f - \boldsymbol{B}_f \boldsymbol{K}_{dr})\boldsymbol{X}^{AF} + \boldsymbol{B}_f \boldsymbol{r}, \qquad (2.35)$$

где $K_{dr} = [K_{dr1}, K_{dr2}, ..., K_{drM}]$ - вектор искомых коэффициентов усиления обратных связей; *z* – оператор сдвига. При этом характеристический полином системы (2.35) может быть представлен выражением:

$$\det | \boldsymbol{z} \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}_f + \boldsymbol{B}_f \boldsymbol{K}_{dr} |, \qquad (2.36)$$

где *I* – единичная матрица.

Задачей синтеза регулятора по методу пространства состояний [161] является выбор таких значений коэффициентов усиления обратных связей K_{dri} ($i = \overline{l, M}$), которые обеспечивают системе (2.35) желаемые динамические свойства, задаваемые полиномом вида:

$$z^{M} + a_{1}z^{M-1} + \dots + a_{M-1}z + a_{M}.$$
(2.37)

Указанную цель можно достичь, если значения K_{dri} выбрать таким образом, чтобы коэффициенты полиномов (2.36) и (2.37) при соответствующих степенях z оказались равными. С учетом канонической формы (2.34) описания АФ коэффициенты усиления обратных связи по состоянию АФ определяются по формуле [161]: $K_{dri} = a_i - \theta_{li}$.

Следует отметить, что во время основного режима работы системы, как и в ранее рассмотренной СУ, расчет параметров регулятора осуществляется на каждом

временном такте. При этом предложенный в данном разделе подход при наличии достаточных вычислительных ресурсов применим и для более сложных ОУ с различными законами изменения их параметров и величин внешних воздействий.

Результаты моделирования СУ движителем НПА на основе использования прогнозирующих ННС. Для исследования эффективности предложенных СУ было проведено математическое моделирование. При этом параметры движителя НПА были такие же, как в подразделе 2.2.1.

Вначале рассмотрим СУ, показанную на рис.2.11. Горизонты управления и прогнозирования для этой СУ принимались равными $H_c = 1$, $H_p = 5$. Параметры АФ: L = M = 6. На начальном этапе работы СУ при обучении АФ в выражении (2.31) принимаем $\eta = 0.1$, а при обучении ННС $\eta = 0.7$. На рабочем этапе функционирования системы $\eta = 0.5$. Весовые коэффициенты критерия (2.29) принимаются следующими: R = 0.25, Q = 1.0. Результаты моделирования работы СУ (см. рис.2.11) представлены на рис. 2.13.



Рис.2.13 Результаты моделирования работы системы с прямым адаптивным управлением на основе ННС и предсказанием

На этом рисунке цифрой 1 отмечен задающий сигнал $r^* = \tau_d = 100 \sin(6t)$, а цифрой 2 - сила тяги τ_d , реально развиваемая движителем. В основных режимах

работы СУ ошибка управления $e(t) = \tau_d - \tau_o$ (см. рис. 2.13) не превышает 1.7% от желаемой тяги движителя, а при реверсе кратковременно достигает 15% от τ_o^* . Последнее объясняется тем, что при реверсе параметры движителя изменяются значительно и скачкообразно, что не позволяет СУ быстро отреагировать на эти изменения. Однако система достаточно быстро (менее, чем за 0.1 с) подстраивается даже под такие резкие изменения.

На рис.2.14 показаны результаты моделирования системы, изображенной на рис.2.12, при $r^* = \tau_d = \sin(6t)$, L = 3, M = 3, $H_T = 10$, R = 0.6, Q = 0.75, $\eta = 0.13$ (в процессе настройки параметров АФ) и $\eta = 0.38$ (в процессе обучения ННС).



Рис.2.14 Результаты моделирования системы с адаптивным регулятором состояния и предсказанием на основе ННС модели

Для расчета элементов вектора K_{dr} характеристический полином (2.27) выбирался в виде бинома Ньютона 3 – го порядка вида: М = $(0.1 - z)^3$. Отличие в параметрах *L*, *M*, *H_T*, η , *R* и *Q* рассматриваемых двух СУ объясняется только особенностями их построения и настройки. Цифрами 1 и 2 на рис. 2.14 обозначены те же величины, что и на рис.2.13.

Из рис.2.14 видно, что вторая СУ обеспечивает более высокую динамическую точность управления даже при реверсе движителя. При этом в основных режимах работы СУ величина *e*(t) не превышает 0.5% от программного сигнала, а

максимальная ошибка при реверсе движителя не превышает 5%. Существенное уменьшение ошибок работы рассматриваемой СУ объясняется более точным прогнозом поведения ОУ на достаточно большую перспективу в будущем. При реверсе движителя, когда параметры ОУ резко изменяются, в системе также наблюдаются колебания, однако они являются малыми и достаточно быстро заканчиваются после настройки этой системы на новые значения параметров.

Для сравнения на рис. 2.15. приведен результат управления рассматриваемым движителем с помощью ПИД-регулятора, рассчитанного методом корневого годографа [138] при номинальных параметрах ОУ. Этот синтезированный регулятор описывается выражением



 $W_{\Pi M \chi}(p) = \frac{0.01p^2 + 17p + 0.21}{p}.$

Рис. 2.15 Результат работы СУ движителем НПА на основе ПИД регулятора

Цифрами 1 и 2 на рис. 2.15 также обозначены задающий сигнал $r^* = \tau_d = 100 \sin(6t)$ и реально получаемая тяга τ_d движителя, соответственно. Из этого рисунка видно, что в рабочем режиме ошибка управления в системе с ПИД - регулятором достигает почти 7%, а при реверсе движителя - 25%. Это уже не позволяет обеспечивать качественного управления НПА. То есть из результатов моделирования видно, что обе синтезированные в данной работе СУ за счет

правильного предсказания параметров и динамических свойств ОУ, а также быстрой подстройки параметров регулятора позволяют обеспечить гораздо более высокую точность управления сложным нелинейным динамическим объектом с переменными параметрами, чем СУ, построенная на основе традиционного ПИД-регулятора.

Таким образом, в диссертации были разработаны методы синтеза СУ движителями НПА, позволяющие обеспечить этим движителям желаемые динамические свойства при любых изменениях их параметров в процессе движения НПА и тем самым упростить дальнейший синтез СУ НПА.

2.3 Метод синтеза адаптивной СПС для управления скоростью движения НПА

Согласно принятому в разделе 2.1.4 порядку синтеза СУ пространственным движением НПА после синтеза контура управления движителями синтезируется система управления скоростью движения НПА.

Как уже было определено в главе 1, систему управления скоростью движения НПА целесообразно искать в классе СПС. Подобная система управления позволяет обеспечить независимость процесса управления от динамических свойств самого ОУ. Кроме того, как показано в работах [13, 33, 78], ее применение позволит развязать каналы управления различными степенями свободы НПА.

Ранее уже отмечалось, что основным недостатком СУ на основе СПС является то, что они рассчитываются исходя из таких значений параметров ОУ, при которых указанная СПС имеет минимальное быстродействие. Для устранения этого недостатка, необходимо непрерывно подстраивать параметры СПС при изменении параметров ОУ. Применение данного подхода к СПС, используемым для управления НПА, осложняется тем, что идентификация их параметров в процессе работы сильно затруднена. Однако в работах [11, 138] предлагается использовать алгоритм настройки параметров СПС, основанный на косвенной оценке близости этих параметров к значениям, обеспечивающих максимальное быстродействие этой СПС, что делает его особенно привлекательным для управления таким объектом как НПА.

Проведенные исследования [85] показали, что применение данного алгоритма в СУ скоростью движения НПА сталкивается с проблемой, заключающейся в том, что

указанный известный алгоритм работоспособен только при свободном движении системы, т.е. в том случае, когда задающий сигнал на входе СУ скоростью движения НПА равен нулю, и не работоспособен в остальных случаях.

В данном разделе проводится анализ поведения СПС управления скоростью НПА при свободном и вынужденном движении, определяются причины неработоспособности алгоритма самонастройки СПС и возможные пути их устранения. Синтезируется адаптивный закон управления контуром скорости, позволяющий реализовать указанный выше алгоритм управления, определяются зависимости и значения коэффициентов полученного закона управления.

2.3.1 Анализ свободного и вынужденного движений СПС для управления скоростью движения НПА

Аналитически условие существования скользящего режима для систем второго порядка записывается с помощью следующего неравенства [17, 74, 75, 222]:

$$s\,\dot{s}<0,\tag{2.38}$$

где

$$s = \dot{e} + C_{\upsilon}e, \quad e = \upsilon_d - \upsilon, \tag{2.39}$$

 C_v – коэффициент наклона линии переключения (скольжения) к оси абсцисс (на фазовой плоскости это ось *e*); *e* - ошибка управления НПА по скорости.

Неравенство (2.38) указывает на то, что фазовые траектории СУ всегда должны быть направлены к линии скольжения при любой текущей структуре этой системы и любых значениях ее параметров. Выполнение этого условия для системы второго порядка обеспечивается с помощью специального релейного закона управления, который в момент пересечения изображающей точкой этой линии скольжения на фазовой плоскости меняет структуру всей системы. В процессе переключения две структуры периодически заменяют друг друга, заставляя изображающую точку всегда оставаться на линии скольжения. При этом одна из этих структур имеет фазовые траектории – гиперболы, а вторая – спирали.

Движение изображающей точки всегда будет происходить по идеальной линии скольжения и с учетом равенств (2.39) будет описываться линейным дифференциальным уравнением [17, 74, 222]:

$$s = \dot{e} + C_{\nu}e = 0.$$
 (2.40)

Поскольку уравнение (2.40) имеет постоянные параметры, то, следовательно, и движение изображающей точки системы по линии скольжения (после ее попадания на эту линию) также уже не будут зависеть от переменных параметров ОУ. При этом ошибка рассматриваемой системы, являясь решением уравнения (2.40), будет уменьшаться по экспоненте:

$$e = e_0 exp(-C_v t), \qquad (2.41)$$

где e_0 – начальное значение ошибки при вхождении СПС в скользящий режим.

Очевидно, что чем больше величина коэффициента *C*_v, тем быстрее уменьшается ошибка системы и, соответственно, выше ее динамическая точность.

Как отмечено в работах [16, 17, 75], для рассматриваемой комбинации переключаемых структур системы устойчивый режим скольжения (когда выполняется условие (2.38)) существует только в том случае, когда наклон линии скольжения к оси *e* (он определяется величиной коэффициента C_v) в любой момент времени меньше наклона к этой оси вырожденной траектории. Эта траектория, являющаяся асимптотой с коэффициентом наклона $K_g = |\lambda_n|$ (λ_n – отрицательный корень характеристического уравнения исходной системы второго порядка с переменными параметрами), принадлежит той части фазового портрета, которая соответствует неустойчивой структуре исходной системы с фазовыми траекториями – гиперболами.

Одним из основных недостатков традиционных СПС, работающих в скользящем режиме, является заведомо заниженное быстродействие, а следовательно, и точность их работы. Это объясняется тем, что в традиционных СПС

наклон линии скольжения к оси е постоянен, поэтому значение постоянного коэффициента C_{v} выбирается меньше изменяющейся величины K_{g} при любых текущих значениях параметров ОУ (из известного диапазона их изменения), чтобы величина наклона указанной линии скольжения была всегда заведомо меньше наклона вырожденной траектории к оси е. Очевидно, что в указанной ситуации величина С_v должна иметь максимально возможное при сохранении скользящего режима значение, но для наиболее нагруженного режима работы системы, когда ее параметры имеют предельные значения, а вырожденная траектория – минимальный наклон. Если эти параметры начинают отличаться от предельных, то при сохранении режима скольжения возможно повышение быстродействия системы за счет увеличения коэффициента C_{ν} , так как значение K_g начинает увеличиваться. Но в традиционных системах величина С_v сохраняет свое минимальное для всех возможных параметров СПС (работающей в режиме скольжения) значение, а это согласно выражению (2.41) приводит к замедленному обнулению ошибки и, соответственно, к снижению итоговой динамической точности работы традиционной СПС.

Ранее уже отмечались проблемы, не позволяющие увеличивать значения C_v в более благоприятных режимах работы НПА. Одна из них связана с невозможностью достаточно точной идентификации текущих значений параметров НПА в процессе его движения.

В указанной ситуации для повышения быстродействия СПС целесообразно использовать подход, предложенный в работах [58, 135, 138]. В этих работах непрерывную подстройку параметров СПС предлагается осуществлять на основе косвенной оценки текущего положения линии переключения относительно вырожденной траектории с помощью так называемого параметра скольжения μ . Величина этого параметра указывает на близость непрерывно движущейся в режиме переключений изображающей точки к вырожденной траектории. При этом использование этого подхода предполагает, что переключение структур в СПС осуществляется на основе релейного устройства, имеющего гистерезис. В этом случае вместо идеального скольжения по линии, изображающая точка будет

перемещаться к началу координат фазовой плоскости в режиме ограниченных по амплитуде высокочастотных переключений, все время оставаясь в некоторой ограниченной зоне переключений, находящейся в окрестности линии скольжения. Причем ширина этой зоны определяется величиной гистерезиса переключающего релейного устройства.

Нелинейная статическая характеристика g(s) подобного релейного устройства, приведенная на рис. 2.16, имеет следующий вид:



Рис. 2.16 Характеристика релейного устройства g(s)

$$g(s) = \begin{cases} 1, e c \pi u \ s > s_{\Delta} \ u \ s > 0 \ u \pi u \ s > -s_{\Delta} \ u \ s < 0 \\ -1, e c \pi u \ s < s_{\Delta} \ u \ s > 0 \ u \pi u \ s < -s_{\Delta} \ u \ s < 0 \end{cases}$$
(2.42)

где $s_{\Delta} > 0$ – малая константа, определяющая величину зоны гистерезиса.

Фазовый портрет системы с релейным устройством управления (2.42) и зоной переключения, ограниченной прямыми линиями $s = s_{\Delta}$ и $s = -s_{\Delta}$, представлен на рис. 2.17 [85]. Линия s = 0 является средней (центральной) осью зоны реально существующего высокочастотного переключения. При этом в работах [35, 186] показана близость идеального режима скольжения по линии s = 0 и режима высокочастотных переключений внутри ограниченной зоны.

Величина параметра μ при движении изображающей точки в зоне переключений определяется относительной длительностью включения той или иной структуры системы и определяется по формуле [47, 135, 136, 138]:



Рис. 2.17 Фазовый портрет СПС при ее свободном движении

$$\mu = \frac{t_g}{t_g + t_s},\tag{2.43}$$

где t_g , t_s - интервалы времени движения изображающей точки, соответственно, по отрезкам гипербол или спиралей при различных знаках функции g(s), определяемых неравенствами (2.42).

В работах [31, 58, 78, 135] показано, что чем ближе в режиме свободного движения системы идеальная линии скольжения располагается к вырожденной траектории (оставаясь ниже нее), т. е. чем ближе величина $C_v \kappa K_g$ (при сохранении неравенства $C_v < K_g$), тем ближе значение $\mu \kappa 1$. Это объясняется тем, что вырожденные траектории являются асимптотами гипербол и, если переключения СПС происходят вблизи этих траекторий, то время движения по гиперболе в ограниченной зоне этих устойчивых переключений при соответствующей структуре

системы начинает значительно превышать время движения по спирали после переключения на другую структуру.

Эта особенность рассматриваемых СПС при использовании показателя μ и может служить индикатором настройки линии скольжения s = 0 на такую позицию относительно вырожденной траектории, описываемой уравнением $\dot{e} = -K_g e$, при которой величина C_v , стремится к K_g , оставаясь при этом меньше этого коэффициента при любых текущих параметрах системы, и достигает своего максимально возможного значения, при котором режим скольжения (переключения) гарантированно сохраняется. Именно на этой особенности показателя μ и формируется алгоритм самонастройки коэффициента наклона линии скольжения, предложенный в работах [33, 78, 136]:

$$\dot{\Delta}_1 = K_{\mu}(\mu_{\max} - \mu), \qquad (2.44)$$
$$C_{\nu} = C_{\nu\min} + \Delta_1,$$

где K_{μ} – коэффициент самонастройки; μ_{max} – максимально возможное значение параметра скольжения; C_{vmin} – наименьшее значение коэффициента C_{v} (оно рассчитывается для такого набора параметров НПА, при которых вырожденная траектория имеет минимальный наклон); $\Delta_{1} > 0$ – переменная величина, обеспечивающая увеличение C_{v} при благоприятных комбинациях изменяющихся параметров ОУ.

Следует отметить, что для гарантированного сохранения скользящего режима в СПС максимальное значение μ_{max} параметра μ , указывающее на то, насколько близко к вырожденной траектории может подойти центральная ось зоны переключения (ЦОЗП) в процессе самонастройки, должно быть несколько меньше единицы. Действительно, из-за наличия гистерезиса в релейном элементе (2.42) необходимо иметь некоторый запас для того, чтобы изображающая точка пересекала вырожденную траекторию при $0 < s \leq s_{\Delta}$ только в малой окрестности начала координат фазовой плоскости (см. рис.2.17).

Как будет показано ниже, алгоритм самонастройки (2.44) эффективен только при условии равенства нулю задающего сигнала υ_d на входе СПС, т.е. в случае ее свободного движения. Очевидно, что этот режим не является рабочим для всех следящих систем и, в частности, СУ скоростью движения НПА. Если же задающий сигнал меняется произвольным образом, то однозначная зависимость между величиной μ и положением линии s = 0 относительно вырожденной траектории вообще пропадает.

В результате возникает задача анализа процесса изменения μ при вынужденном движении системы, выявления причин нарушения работоспособности алгоритма адаптации (2.44) и поиска путей решения возникшей проблемы за счет использования нового закона управления скоростью движения НПА.

Указанный анализ проведем на примере СПС с наиболее простым, но достаточно эффективным законом формирования сигнала управления τ_d [85]:

$$\tau_d = K_u | e | g(s). \tag{2.45}$$

где $K_u = \text{const} > 0$.

В качестве уравнения динамики движения НПА по одной степени свободы используем второе уравнение системы (2.9). Причем для упрощения анализа и выяснения сути процессов, происходящих при вынужденном движении системы, вначале рассмотрим такой случай, когда между гидродинамической силой и скоростью υ существует линейная зависимость (т.е. в выражении (2.9) $d_2 = 0$), а также отсутствуют внешние возмущения ($f_{\upsilon} = 0$). Примем также во внимание, что при использовании синтезированной ранее СУ движительным комплексом поведение каждого движителя описывается желаемым линейным уравнением (2.13).

С учетом сделанных замечаний математическую модель ОУ для контура управления скоростью движения НПА сформируем в следующем виде:

$$m\dot{\upsilon} + d_1\upsilon = \tau_{\partial}, \qquad (2.46)$$
$$T_d\dot{\tau}_{\partial} + \tau_{\partial} = K_d\tau_d.$$

Систему (2.46) удобно переписать в виде одного дифференциального уравнения второго порядка

$$T_{d}m\ddot{v} + (T_{d}d_{1} + m)\dot{v} + d_{1}v = K_{d}\tau_{d}.$$
(2.47)

Перепишем уравнение (2.47) относительно ошибки *е* (см. (2.40)) и подставим в него закон управления (2.45). При этом для определенности будем полагать, что начальное значение *е* < 0. После несложных преобразований будем иметь:

$$\ddot{e} + \frac{T_d d_1 + m}{T_d m} \dot{e} + \frac{d_1 - K_d K_u g(s)}{T_d m} e = \ddot{v}_d + \frac{T_d d_1 + m}{T_d m} \dot{v}_d + \frac{d_1}{T_d m} v_d.$$
(2.48)

Очевидно, что при свободном движении СПС, когда $\upsilon_d = 0$, уравнение (2.48) принимает вид:

$$\ddot{e} + \frac{T_d d_1 + m}{T_d m} \dot{e} + \frac{d_1 - K_d K_u g(s)}{T_d m} e = 0.$$
(2.49)

Поскольку при вынужденном движении системы ее динамика описывается неоднородным дифференциальным уравнением (2.48), в котором присутствуют слагаемые, не зависящие от ошибки системы и определяющиеся только задающим сигналом v_d и его производными, то это не позволяет получить аналитическую зависимость параметра μ от коэффициента C_v . Поэтому анализ изменения параметра μ при вынужденном движении системы будем производить, основываясь на физическом смысле процессов, происходящих при работе СУ в режиме высокочастотных переключений. При этом отметим, что особые точки системы, описываемой уравнением (2.48), не совпадают с началом координат фазовой плоскости. Причем для спиралей и гипербол (при различных знаках g(s) и $K_u > d_t/K_d$) они будут смещены в разные стороны относительно этого начала координат.

Фазовый портрет для вынужденного движения рассматриваемой СПС представлен на рис. 2.18.



Рис. 2.18 Фазовый портрет СПС (2.45) при ее вынужденном движении

При указанном расположении фазовых траекторий линия s = 0 и вырожденная траектория никогда не совпадут. Следовательно, при вынужденном движении СПС даже при $C_v = K_g$ существование скользящего режима на участке AB (см. рис. 2.18) все равно возможно. При этом значение параметра $\mu \neq 1$, так как при любых обстоятельствах какое-то время система все равно будет двигаться по спирали.

Другими словами, при вынужденном движении СПС с использованием закона управления (2.45) параметр μ уже не может быть индикатором настройки угла наклона ЦОЗП s = 0 к оси абсцисс для обеспечения максимальной скорости обнуления ошибки системы при неизменном существовании устойчивого режима высокочастотных переключений. Те же самые выводы имеют место и в том случае, когда между гидродинамической силой и скоростью υ существует нелинейная зависимость (т.е. в выражении (2.9) $d_2 = 0$), а также тогда, когда учитываются все внешние возмущения (т. е. в системе (2.9) $f_{\upsilon} \neq 0$).

Теперь проанализируем физические процессы, происходящие при вынужденном движении системы, и определим, как в этом случае будет меняться величина параметра скольжения. Одной из особенностей НПА как ОУ является наличие переменных гидродинамических сил, что вынуждает постоянно прикладывать соответствующую силу тяги для поддержания заданной скорости его движения. Поэтому, когда задающий сигнал на входе СПС управления скоростью не равен нулю, то для достижения заданной скорости движения НПА на вход СУ движителями (см. рис. 2.1) с выхода контура скорости должен поступать сигнал, соответствующий по величине требуемой силе тяги и имеющий знак, совпадающий со знаком заданной скорости движения НПА.

Это означает, что в разрывном сигнале управления (2.45) должна присутствовать дополнительная составляющая, необходимая для поддержания заданной скорости движения аппарата. Следовательно, при вынужденном движении НПА параметр скольжения, вычисляемый по формуле (2.43), по сравнению с его свободным движением изменится благодаря наличию данной составляющей. Определим и оценим эти изменения.

Так как составляющая сигнала управления, обеспечивающая достижение заданной скорости движения НПА, имеет знак, соответствующий знаку задающего сигнала, то при ее добавлении в разрывный сигнал (2.45) увеличится интервал времени, в течение которого управляющий сигнал будет иметь одинаковый знак с добавочным, а следовательно, и с задающим сигналом. И наоборот, интервал времени, в течение которого сигнал управления имеет знак, отличный от знака задающего сигнала, уменьшится. Так как движение изображающей точки системы происходит по гиперболе, когда сигнал управления имеет знак, противоположный знаку заданного значения скорости, и по спирали, когда их знаки совпадают, то, следовательно, промежуток времени движения изображающей точки по спирали увеличится, а по гиперболе – уменьшится. Поэтому при вынужденном движении системы величина параметра *µ* всегда будет меньше, чем при свободном.

Кроме того, в процессе отработки сигнала v_d (см. рис.2.1) амплитуда сигнала τ_d (см. выражение (2.45)) будет уменьшаться, так как после возникновения режима переключений уменьшается величина ошибки *е*. В то же время величина указанной выше составляющей управления, обеспечивающей поддержание требуемого

значения скорости движения НПА, зависит только от задающего сигнала скорости и не зависит от текущей ошибки его отработки. Следовательно, при уменьшении этой ошибки, которое всегда наблюдается в режиме переключения, интервал времени движения системы по гиперболе будет уменьшаться, а по спирали – увеличиваться. Поэтому параметр μ по мере движения изображающей точки к началу координат фазовой плоскости всегда будет стремиться к нулю независимо от текущего положения линии *s* = 0 относительно текущего положения вырожденной траектории. Это делает невозможным использование в традиционных СПС для управления скоростью движения НПА самонастройки наклона линии *s* = 0 по параметру μ (см. выражения (2.43), (2.44)).

В связи с отмеченным возникает задача синтеза такого закона управления скоростью движения НПА, который позволил бы скомпенсировать составляющую разрывного сигнала управления, определяемую задающим сигналом и его производными, и тем самым восстановить однозначную зависимость между величиной параметра μ и реальным положением линии s = 0 относительно вырожденной траектории. Это обеспечит возможность формирования алгоритма самонастройки коэффициента C_v этой линии и, соответственно, повышение скорости обнуления ошибки рассматриваемого контура управления.

2.3.2 Синтез закона управления скоростью движения НПА

Как показал проведенный анализ, причиной, мешающей использованию алгоритма самонастройки коэффициента наклона ЦОЗП s = 0 по параметру μ при вынужденном движении системы, является наличие в дифференциальном уравнении, описывающем динамику этой системы, слагаемых, зависящих от задающего сигнала. Поэтому необходимо разработать такой закон управления, который позволил бы осуществлять корректную самонастройку положения ЦОЗП на фазовой плоскости и при наличии этих слагаемых.

Для выяснения особенностей процессов, протекающих в СПС в рассматриваемых режимах работы, и поиска указанного закона управления вначале рассмотрим одну линейную степень свободы НПА и случай, когда между

гидродинамической силой и скоростью υ существует линейная зависимость (т.е. в выражении (2.9) $d_2 = 0$), а внешние возмущения отсутствуют ($f_{\upsilon} = 0$). Далее после выявления общего принципа работы системы и определения особенностей предлагаемого закона управления будет рассмотрен случай более полного описания динамики системы.

Для решения поставленной задачи на данном этапе работы воспользуемся уравнением (2.48) и перепишем его, заменив множитель $K_u g(s)e$, определяемый типовым законом управления (2.45), на переменную τ_d , обозначающую пока еще неизвестный новый закон изменения структуры. В результате получим:

$$\ddot{e} - \ddot{v}_d + \frac{T_d d_1 + m}{T_d m} (\dot{e} - \dot{v}_d) + \frac{d_1}{T_d m} (e - v_d) + \frac{K_d}{T_d m} \tau_d = 0.$$
(2.50)

После этого введем в рассмотрение желаемое дифференциальное уравнение, в котором отсутствуют слагаемые, зависящие только от задающего сигнала. При этом для упрощения решаемой задачи порядок этого уравнения следует выбрать совпадающим с порядком уравнения (2.50). Исходя из отмеченного, желаемое дифференциальное уравнение контура скорости представим в следующем виде [85]:

$$\ddot{e} + K_1 \dot{e} + K_2 e + K_3 |e|g(s) = 0, \qquad (2.51)$$

где *K*₁, *K*₂, *K*₃ – некоторые положительные коэффициенты.

Подчеркнем, что последнее слагаемое в левой части уравнения (2.51) обеспечивает существование режима переключения структуры, т.е. в зависимости от знака функции g(s) движение изображающей точки на фазовой плоскости происходит либо по отрезкам спиралей, либо по отрезкам гипербол. Поэтому величина коэффициента K_3 должна быть такой, чтобы при изменении знака функции g(s) корни характеристического уравнения, соответствующего дифференциальному уравнению (2.51), менялись с вещественных на комплексные (и наоборот) при любых возможных значениях параметров системы m и d_1 .

Для нахождения закона управления, который будет приводить систему (2.50) к желаемому виду (2.51), выразим из этих уравнений вторые производные \ddot{e} , приравняем их правые части и разрешим получившееся выражение относительно выходного сигнала τ_d . В результате будем иметь:

$$\tau_{d} = (T_{d}m\ddot{v}_{d} + (T_{d}d_{1} + m)\dot{v}_{d} + d_{1}v_{d} + (K_{1}T_{d}m - T_{d}d_{1} - m)\dot{e} + (K_{2}T_{d}m - d_{1})e + K_{3}T_{d}m|e|g(s))\frac{1}{K_{d}}.$$
(2.52)

Закон управления (2.52), обеспечивая исключение из дифференциального уравнения (2.50) слагаемых, зависящих от задающего сигнала, гарантирует неизменную работоспособность алгоритма самонастройки коэффициента наклона ЦОЗП с помощью параметра μ . Однако этот закон сложен для реализации, поскольку требует знания постоянно изменяющихся параметров НПА в процессе его движения. Но, как было отмечено ранее, идентификация этих параметров либо невозможна, либо трудно осуществима. Это делает реализацию закона управления (2.52) скольконибудь простыми средствами невозможной.

В то же время нетрудно заметить, что этот закон существенно упростится, если коэффициенты *K*₁ и *K*₂ в уравнении (2.52) определить следующим образом:

$$K_1 = \frac{d_1}{m}, \ K_2 = 0.$$
 (2.53)

В этом случае желаемое дифференциальное уравнение (2.51) по-прежнему будет удовлетворять всем сформулированным выше требованиям, а новый закон управления контуром скорости НПА с учетом условий (2.53) примет вид:

$$\tau_d = (T_d m \ddot{v}_d + (T_d d_1 + m) \dot{v}_d + d_1 v_d - m \dot{e} - d_1 e + K_3 T_d m |e|g(s)) \frac{1}{K_d}.$$
 (2.54)

С целью дальнейшего упрощения соотношения (2.54) первое уравнение системы (2.46) перепишем относительно ошибки:

$$m\dot{v}_d - m\dot{e} - d_1 e + d_1 v_d = \tau_{\partial}$$

и отметим, что левая часть полученного соотношения полностью входит в закон управления (2.54). Это позволяет переписать его в следующем виде:

$$\tau_{d} = K_{u1} | e | g(s) + K_{u2} \tau_{\partial} + (m \ddot{v}_{d} + d_{1} \dot{v}_{d}) \frac{T_{d}}{K_{d}}, \qquad (2.55)$$

где $K_{u1} = \frac{K_3 T_d m}{K_d}$, $K_{u2} = \frac{1}{K_d}$ – постоянные положительные коэффициенты.

Анализ закона управления (2.55) показывает, что, несмотря на его относительную простоту, он все равно требует идентификации параметров НПА в процессе его движения. Кроме того, весьма затруднительно в реальном масштабе времени постоянно и достаточно точно вычислить две производные входного сигнала.

В то же время легко заметить, что, когда $\dot{v}_d = \ddot{v}_d = 0$, закон управления (2.55) преобразуется к виду [91, 145, 146, 148]:

$$\tau_d = K_{u1} | e | g(s) + K_{u2} \tau_{\partial}.$$
(2.56)

При этом при определении K_{u1} нет необходимости, как это указывалось ранее (см. выражение (2.55)), вычислять его как функцию переменного параметра *m*. Значение K_{u1} позволяет только определить величину K_3 при текущем значении *m*. Ограничения, накладываемые на величину коэффициента K_{u1} для обеспечения условий существования устойчивого режимы переключений, будут получены далее. Сигнал, пропорциональный величине силы тяги τ_0 , для упрощения реализации синтезированного закона управления (2.56) целесообразно формировать на основе

информации о текущих значениях ω_0 и υ_p с использованием второго уравнения системы (2.7) так, как это делалось при реализации СУ движителями.

Очевидно, что закон управления (2.56) достаточно прост и позволяет осуществлять самонастройку положения ЦОЗП без измерения текущих параметров НПА, но только в том случае, когда на вход рассматриваемого контура подается ступенчатый задающий сигнал скорости. Однако и для произвольного непрерывного задающего сигнала скорости закон управления (2.56) может быть использован, если этот сигнал произвольной формы представить в виде последовательности ступенчатых сигналов. При этом соседние значения постоянных сигналов должны различаться на определенную величину шага квантования h_q . Величина этого шага должна быть такой, чтобы, с одной стороны, можно было бы применить закон (2.56), а с другой – обеспечить достаточно высокую точность аппроксимации непрерывного входного сигнала управления контуром скорости. Далее будет показано, что предложенный подход с помощью достаточно простых средств позволит обеспечить работоспособность алгоритма самонастройки положения ЦОЗП по параметру μ .

Следует отметить, что указанный подход имеет недостатки. Во-первых, представление непрерывного задающего сигнала в виде последовательности ступенчатых сигналов всегда происходит с некоторой погрешностью и искажает этот входной сигнал, что может привести к заметному увеличению ошибки управления, зависящей от величины шага квантования. Во-вторых, для реализации данного закона управления потребуется дополнительное устройство, преобразующее непрерывный входной сигнал контура управления скоростью движения НПА в последовательность ступенчатых сигналов. Однако указанные недостатки весьма незначительны по сравнению с выигрышем, который получается за счет применения самонастройки ЦОЗП, положения позволяющей значительно увеличить быстродействие (динамическую точность работы) всей системы. Поэтому предложенный метод управления контуром скорости движения НПА использовать целесообразно.

Еще одной особенностью синтезированного закона управления (2.56) является возникновение в СУ местной положительной обратной связи, предназначенной для компенсации отрицательной обратной связи по упору τ_0 движителя. Конечно, в

случае неточной компенсации (перекомпенсации) это может привести к потере устойчивости обеих переключаемых структур СПС. Поэтому на практике значение K_{u2} следует выбирать согласно неравенству $K_{u2} < 1/K_d$ так, чтобы заведомо обеспечить некоторую малую недокомпенсацию. Тем не менее, поскольку $K_{u2} \approx 1/K_d$, то условия существования устойчивого режима переключений и работоспособности предлагаемого закона самонастройки ЦОЗП всегда будут иметь место. Нарушения этих условий возможны только в некоторой малой окрестности начала координат фазовой плоскости, когда малая по ширине полоса зоны переключений захватит области фазовой плоскости с иным законом расположения фазовых траекторий (см. рис. 2.17).

Структурная схема самонастраивающегося регулятора скорости с законом управлением (2.56), разработанным по описанному выше алгоритму, представлена на рис. 2.19 [50]. Здесь пунктирной линией выделен блок самонастройки положения ЦОЗП, реализующий алгоритм (2.44). Следует отметить, что при реализации этой схемы в контур управления скоростью движения НПА помимо сигналов $\upsilon u \upsilon_d$ должен подаваться и сигнал $\dot{\upsilon}$.

В результате применения разработанного адаптивного регулятора скорости (см. рис. 2.19) динамика системы при ее работе в режиме высокочастотных переключений в задаваемой малой зоне будет описываться линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$\dot{\upsilon} + C\upsilon = C\upsilon_d. \tag{2.57}$$

Это уравнение на следующем этапе проектирования обобщенной СУ НПА можно использовать в качестве описания ОУ для синтезируемой подсистемы управления пространственным положением и пространственной ориентацией НПА.

Таким образом, синтезированный закон управления (2.56) для контура управления скоростью движения НПА (в предположении, что между гидродинамической силой и скоростью υ существует линейная зависимость, а внешние возмущения f_{υ} отсутствуют) не только устраняет причины, приводящие к

неработоспособности традиционного алгоритма самонастройки положения ЦОЗП по параметру μ , но и обеспечивает независимость динамических свойств и показателей качества рассматриваемого внутреннего контура скорости от переменных параметров НПА.



Рис. 2.19 Структурная схема адаптивного регулятора скорости движения НПА

Этот алгоритм, как будет показано ниже, существенно повышает быстродействие и динамическую точность управления в благоприятных режимах работы аппарата. Однако полученные результаты должны быть распространены и на более общий случай описания динамики пространственного движения НПА с любой скоростью, когда зависимость между гидродинамической силой и скоростью υ , являясь нелинейной, имеет более сложное математическое описание и когда присутствуют полные внешние возмущения f_{υ} на НПА со стороны окружающей вязкой среды.

2.3.3 Расчет параметров адаптивной подсистемы управления скоростью движения НПА по одной степени свободы

Синтезированная подсистема управления скоростью движения НПА представляет собой СПС, работающую в режиме высокочастотных переключений, поэтому коэффициент усиления *K*_{*u*1}, входящий в закон управления (2.56), необходимо

выбирать таким образом, чтобы гарантировать существование этого режима переключений при любых значениях изменяющихся параметров НПА.

Найдем ограничения, накладываемые на этот коэффициент в общем случае, когда движение НПА по одной (любой) степени свободы описывается нелинейным уравнением (2.9), содержащим переменные параметры и внешнее возмущающее воздействие $f_v \neq 0$. Аналогичные результаты могут быть получены и при рассмотрении уравнений (2.10) для описания вращательных степеней свободы НПА.

Как и ранее, будем полагать, что динамика движителей НПА с учетом систем синтезированных разделе 2.2. управления, В задается линейными уравнениями первого порядка дифференциальными (2.13) c постоянными коэффициентами. Учитывая, что в соответствии с предложенным подходом непрерывно изменяющийся задающий сигнал Ud заменяется последовательностью ступенчатых сигналов и при формировании сигнала τ_d не используется производная этого сигнала υ_d (см. рис. 2.19), уравнение (2.9) перепишем относительно ошибки e(см. (2.39)). В результате будем иметь:

$$-m\dot{e} + d_1(\upsilon_d - e) + d_2(\upsilon_d - e)|\upsilon_d - e| + f_{\upsilon} = \tau_{\dot{\partial}}.$$
(2.58)

Проведем ряд преобразований, аналогичных выполненным в предыдущем разделе. В частности, сведем систему, состоящую из уравнения (2.58) и второго уравнения системы (2.46), к одному дифференциальному уравнению второго порядка. После раскрытия в полученном уравнении модуля с учетом выражения для управляющего сигнала (2.56), а также того, что $K_{u2} = \frac{1}{K_d}$, в окончательном виде

будем иметь:

$$\ddot{e} = \pm \frac{2d_2}{m} e\dot{e} - \frac{d_1 \pm 2d_2 v_d}{m} \dot{e} + \frac{\dot{f}_v}{m} - \frac{K_d K_{u1}}{T_d m} |e|g(s).$$
(2.59)

Подчеркнем, что вид уравнения (2.59) с учетом введенного закона управления (2.56) позволяет сохранить свойства параметра μ как индикатора близости
настраиваемой зоны переключения от вырожденной траектории. Это объясняется тем, что уравнение (2.59) не содержит слагаемых, которые зависят от задающего сигнала или его производных.

Отметим, что в соотношении (2.59) знак "+" соответствует случаю, когда $\upsilon_d - e > 0$, а знак "-" – случаю, когда $\upsilon_d - e < 0$.

Из первого уравнения (2.39) несложно получить

$$\dot{s} = \ddot{e} + C_{\nu}\dot{e} + \dot{C}_{\nu}e \,. \tag{2.60}$$

Учитывая, что величина C_{v} настраивается по закону (2.44), в котором $C_{vmin} = \text{const}$, уравнение (2.60) можно переписать в виде:

$$\dot{s} = \ddot{e} + C_{\nu}\dot{e} + K_{\mu}(\mu_{\max} - \mu)e.$$
 (2.61)

Подставив ё из выражения (2.59) в (2.61), получим уравнение для *s*:

$$\dot{s} = \pm \frac{2d_2}{m}e\dot{e} + (C_{\nu} - \frac{d_1 \pm 2d_2v_d}{m})\dot{e} + \frac{\dot{f}_{\nu}}{m} + K_{\mu}\Delta\mu e - \frac{K_dK_{u1}}{T_dm} |e|g(s), \qquad (2.62)$$

где $\Delta \mu = \mu_{\text{max}} - \mu$ – отклонение параметра μ от его максимально возможного значения.

Поскольку s_{Δ} мало, то при движении изображающей точки внутри зоны переключений (см. рис. 2.17) можно считать, что движение этой точки происходит вблизи линии s = 0. Тогда с учетом первого уравнения (2.39) можно полагать, что в рассматриваемом случае имеет место равенство

$$\dot{e} = -C_{\nu}e. \qquad (2.63)$$

Преобразуем выражение (2.62) с учетом равенства (2.63). В результате будем иметь:

$$\dot{s} = \pm \frac{2d_2C_{\nu}}{m}e^2 + (C_{\nu} - \frac{d_1 \pm 2d_2v_d}{m})C_{\nu}e + \frac{\dot{f}_{\nu}}{m} + K_{\mu}\Delta\mu e - \frac{K_dK_{u1}}{T_dm}\Big|e\Big|g(s). \quad (2.64)$$

Согласно выражению (2.38), определяющему условие существования скользящего режима, для его выполнения достаточно, чтобы знаки *s* и *s* были противоположными. Как видно из уравнения (2.64), последнее слагаемое, при выходе изображающей точки из зоны переключений, всегда имеет знак, противоположный знаку *s*. Поэтому, если по модулю это слагаемое превышает сумму всех остальных слагаемых, то и знак *s* будет таким же, как и у последнего слагаемого, т.е. противоположным знаку *s*. Следовательно, для гарантированного выполнения условия (2.38) достаточно потребовать выполнения неравенства:

$$\frac{K_d K_{u1}}{T_d m} |e| > \left| \pm \frac{2d_2 C_{\upsilon}}{m} e^2 + (C_{\upsilon} - \frac{d_1 \pm 2d_2 \upsilon_d}{m}) C_{\upsilon} e + \frac{\dot{f}_{\upsilon}}{m} + K_{\mu} \varDelta \mu e \right|.$$
(2.65)

Из неравенства (2.65) несложно получить окончательное выражение для выбора коэффициента *K*_{*u*1} регулятора (2.56) [85, 141, 145]:

$$K_{u1} > \max \left| \pm 2d_2C_{\nu}e + \left(C_{\nu}m - \left(d_1 \pm 2d_2v_d\right)\right)C_{\nu} + \frac{\dot{f}_{\nu}}{e} + mK_{\mu}\Delta\mu \left| \frac{T_d}{K_d} \right| \right|$$
(2.66)

Несмотря на то, что в неравенство (2.66) входит переменное значение ошибки e, величину K_{u1} в режиме устойчивых переключений системы всегда можно определить, и она всегда будет ограничена, поскольку в реальности величина этой ошибки в устойчивой системе также всегда ограничена и сверху, и снизу. Максимальное значение ошибки системы e зависит от максимальной величины задающего сигнала, которая в свою очередь определяется максимально допустимой (проектной) скоростью движения НПА по соответствующей степени свободы. Поэтому максимальное значение ошибки e не может превышать по модулю двукратного значения этого задающего сигнала. А минимальное значение ошибки

системы, работающей в режиме устойчивых переключений, как несложно убедиться, определяется выражением $|e| = |s_{\Delta} / (C_{\nu} - K_g)|$, когда линия $s = s_{\Delta}$ пересекает вырожденную траекторию (см. рис. 2.17) и процесс переключений срывается и преобразуется в замкнутый цикл. После указанного пересечения условие существования устойчивого режима переключений нарушается и закон управления (2.56) перестает действовать. В рассматриваемом контуре управления образуется периодический предельный цикл с малой величиной *e*, не превышающей $|s_{\Delta} / (C_{\nu} - K_g)|$. Однако, как показывают результаты исследований, при непрерывном изменении входного сигнала, т.е. в режиме вынужденного движения НПА, величина *e* всегда больше $|s_{\Delta} / (C_{\nu} - K_g)|$.

Теперь необходимо определить ограничения на параметры закона управления (2.56), которые обеспечат также и условие попадания изображающей точки в зону устойчивых переключений при любом значении входного сигнала (из допустимого диапазона его изменения). Как показано в работе [17], для этого достаточно исследовать фазовый портрет системы (2.57) в случае, когда $v_d = 0$ и $f_v = 0$, и доказать, что при g(s) < 0 и e < 0 (а также при g(s) > 0 и e > 0), фазовые траектории будут спиралями.

Вначале найдем положения равновесия системы (2.57). Для этого, подставив в выражение (2.57) значения $\upsilon_d = 0$ и $f_{\upsilon} = 0$, получим уравнение:

$$\ddot{e} = \pm \frac{2d_2}{m} e \dot{e} - \frac{d_1}{m} \dot{e} - \frac{K_d K_{u1}}{T_d m} |e| g(s).$$
(2.67)

Полагая, что $\ddot{e} = \dot{e} = 0$, выражение (2.67), преобразуем к виду:

$$\frac{K_d K_{u1}}{T_d m} |e|g(s) = 0.$$
 (2.68)

Очевидно, что уравнение (2.68) имеет единственный корень e = 0. Следовательно, существует единственное положение равновесия нелинейной системы (2.68), которому соответствует одна особая точка O(0;0) фазовой плоскости. Далее определим тип этой особой точки. Так как уравнение (2.67) является нелинейным, то определить характер фазовых траекторий на всей фазовой плоскости аналитически не представляется возможным. Поэтому для упрощения проводимого анализа вначале рассмотрим характер фазовых траекторий только в некоторой малой окрестности особой точки. Исходя из этого анализа, выберем параметры закона управления (2.56). И, наконец, далее с помощью математического моделирования убедимся, что управление вида (2.56) с выбранными параметрами обеспечивает неизменное попадание изображающей точки системы в зону устойчивых переключений на всей фазовой плоскости из произвольного начального положения с учетом известных (реальных) параметров НПА при использовании синтезированных систем управления.

Для определения характера фазовых траекторий в окрестности особой точки O(0;0) произведем линеаризацию уравнения (2.67). При этом правую часть этого уравнения разложим в ряд Тейлора в окрестности этой точки и ограничимся только линейными членами разложения. Причем для определенности примем, что g(s) = -1 и e < 0. В результате получим выражение:

$$\ddot{e} = -\left(\frac{2d_2}{m}\dot{e}\Big|_{\dot{e}=\dot{e}_0}\right)e - \frac{d_1}{m}\dot{e} - \left(\frac{2d_2}{m}e\Big|_{e=e_0}\right)\dot{e} - \frac{K_d K_{u1}}{T_d m}e.$$
(2.69)

С учетом того, что $\dot{e}_0 = e_0 = 0$, уравнение (2.69) примет следующий вид:

$$\ddot{e} + \frac{d_1}{m}\dot{e} + \frac{K_d K_{u1}}{T_d m}e = 0.$$
(2.70)

Дифференциальному уравнению (2.70) соответствует характеристическое уравнение:

$$\lambda^{2} + \frac{d_{1}}{m}\lambda + \frac{K_{d}K_{u1}}{T_{d}m} = 0.$$
 (2.71)

Для того чтобы фазовые траектории, соответствующие уравнению (2.70) были спиралями, необходимо, чтобы корни характеристического уравнения (2.71) были комплексными. Это имеет место в том случае, когда дискриминант *D* этого уравнения отрицателен:

$$D = \frac{T_d d_1^2 - 4mK_d K_{u1}}{T_d m^2} < 0.$$
(2.72)

Для выполнения неравенства (2.72) коэффициент K_{u1} должен удовлетворять неравенству [85, 141, 145]:

$$K_{u1} > \max\left(\frac{d_1^2 T_d}{4K_d m}\right). \tag{2.73}$$

Результаты исследований показали, что неравенство (2.73) обеспечивает попадание изображающей точки системы, описываемой уравнением (2.64), в зону устойчивых переключений, ограниченную прямыми $s = \Delta s$ и $s = -\Delta s$, при всех допустимых параметрах НПА и режимов его движения. Причем это попадание имеет место не только в малой окрестности начала координат, но и на всей фазовой плоскости.

Неравенства (2.66) и (2.73) имеют место только для трех поступательных степеней свободы НПА. Однако, используя указанный выше подход, аналогичные неравенства несложно получить и для всех трех его вращательных степеней свободы.

Несложно показать, что для различных схем расположения на корпусе НПА пары движителей, описываемых уравнениями вида (2.13) и создающих вращающие моменты относительно соответствующих степеней свободы, можно записать:

$$\dot{M}_{\partial} = \frac{K_d M_d - M_{\partial}}{T_d} \,. \tag{2.74}$$

По виду уравнение (2.74) аналогично уравнению (2.13). В этом случае вместо закона управления (2.56) следует использовать закон вида:

$$M_{d} = K_{u1} | e | g(s) + K_{u2} M_{\partial}.$$
(2.75)

Для получения дифференциального уравнения, описывающего движение НПА по любой вращательной степени свободы, к уравнению (2.75) добавим второе уравнение системы (2.10) и сведем их к одному дифференциальному уравнению второго порядка с учетом закона (2.75). В результате, принимая во внимание, что (как и ранее) $K_{u2} = \frac{1}{K_d}$, вместо уравнения (2.59) будем иметь уравнение вида:

$$\ddot{e} = \pm \frac{2d'_2}{J}e\dot{e} - \frac{d'_1 \pm 2d'_2\omega_d}{J}\dot{e} + \frac{\dot{f}_{\omega}}{J} - \frac{K_d K_{u1}}{T_d J} |e|g(s), \qquad (2.76)$$

где ω_d – желаемое значение угловой скорости; $e = \omega_d - \omega$.

Произведя преобразования, аналогичные указанным выше, с учетом уравнения (2.76) вместо неравенств (2.66) и (2.73) получим неравенства, позволяющие выбирать величины коэффициентов K_{u1} для законов управления вращательными степенями свободы (2.75):

$$K_{u1} > \max \left| \pm 2d'_{2}C_{\nu}e + \left(C_{\nu}J - \left(d'_{1} \pm 2d'_{2}\omega_{d}\right)\right)C_{\nu} + \frac{\dot{f}_{\omega}}{e} + JK_{\mu}\Delta\mu \left|\frac{T_{d}}{K_{d}}\right|, \quad (2.77)$$

$$K_{u1} > \max\left(\frac{d_1'^2 T_d}{4K_d J}\right).$$
 (2.78)

Таким образом, полученные в данном разделе неравенства (2.66) и (2.73), (2.77) и (2.78) позволяют окончательно выбрать параметры регуляторов вида (2.56) и (2.76) для всех поступательных или вращательных степеней свободы НПА, соответственно. Причем выбор значений коэффициентов K_{u1} , как наибольших из двух соответствующих величин, рассчитанных с помощью неравенств (2.66) и (2.73) или (2.77) и (2.78), гарантирует как попадание изображающих точек системы в зоны переключений при любых начальных отклонениях от положения равновесия каждой степени свободы, так и сохранение режимов устойчивых высокочастотных

переключений после попадания в эти зоны, и самонастройку ЦОЗП при изменении параметров НПА во время их движения.

2.3.4 Определение допустимой величины шага квантования непрерывного входного сигнала контура скорости СУ НПА

Как уже было определено ранее, закон управления (2.56) позволяет обеспечить работоспособность закона (2.44) самонастройки коэффициента C_v наклона ЦОЗВП только при преобразовании непрерывного задающего сигнала скорости v_d в последовательность ступенчатых сигналов, отличающихся на величину h_q . Это требование позволяет в дальнейшем рассматривать кусочно-постоянную аппроксимацию v_d^s вместо непрерывного программного сигнала v_d :

$$\upsilon_d^s(t) = \sum_{i=1}^n h_q \theta_h(t - t_i) \sigma_i, \, \sigma_i = sign(\upsilon_d(t_i) - \upsilon_d^s(t_i)), \quad (2.79)$$

где h_q – величина шага квантования; t_i - момент времени, когда происходит очередное ступенчатое изменение сигнала v_d^s ; $\theta_h(t-t_i)$ – ступенчатый сигнал (функция Хевисайда), равный 0 при $t \le t_i$ и 1 при $t > t_i$; n – число переключений квантованного входного сигнала за время работы системы. При этом задающий гладкий сигнал скорости v_d накладываются следующее ограничение:

$$|\dot{\nu}_d| \le \dot{\nu}_{d\max} \,. \tag{2.80}$$

Графически процесс преобразования сигнала v_d в сигнал v_d^s показан на рис. 2.20.



Рис.2.20 Преобразование непрерывного задающего сигнала v_d в ступенчатый v_d^s

Ошибка системы e_s относительно нового задающего сигнала v_d^s и ее производная имеют вид:

$$e_s = v_d^s - v, \dot{e}_s = \dot{v}_d^s - \dot{v}.$$
 (2.81)

Очевидно, что во втором уравнении (2.81) сигнал \dot{v}_d^s содержит дельта-функцию. Однако эта дельта-функция не является характеристикой оригинального входного сигнала v_d в силу введенного ранее ограничения (2.80). Поэтому наличие этой дельтафункции в \dot{v}_d^s можно рассматривать как помеху и не учитывать ее при формировании сигнала управления системой (см. рис. 2.19). То есть можно положить, что при кусочно-постоянном сигнале v_d^s вида (2.79) сигнал $\dot{v}_d^s = 0$. В результате с учетом входного сигнала v_d^s выражение (2.56) можно переписать в виде:

$$u = K_{u1} | e_s | g(s) + \frac{1}{K_d} \tau_{\partial} , \qquad (2.82)$$

где $s = -\dot{v} + C_v e_s$, а поведение системы (2.50) с учетом выражений (2.79) и (2.82) в целом может быть описано уравнением:

$$bm\ddot{e}_{s} + bd_{1}\dot{e}_{s} + K_{u1} | e_{s} | g(s) = 0 , \qquad (2.83)$$

где $\dot{e}_s = -\dot{\upsilon}$, $\ddot{e}_s = -\ddot{\upsilon}$, $b = T_d / K_d$. При этом фазовый портрет, изображенный на рис. 2.17, может иметь некоторые незначительные изменения только на малых участках в момент квантования непрерывного входного сигнала.

Промежуток времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ (см. рис. 2.20 и выражение (2.79)) следует выбирать таким, чтобы время постоянства задающего сигнала было не меньше времени движения изображающей точки по отрезкам гипербол и спиралей в зоне высокочастотных переключений (ВП), поскольку обеспечение работоспособности алгоритма (2.44) связано с вычислением величины μ (см. выражение (2.43)). Очевидно, что это зависит от величины амплитуды h_q , которая остается неизвестной.

Таким образом, возникает задача оценки минимально допустимой величины h_q . Естественное ограничение состоит в том, чтобы ее выбор обеспечивал высокую динамическую точность управления системой, которая связана с минимизацией ошибки $e = v_d^s - v$, и достижением устойчивой работы алгоритма (2.44) самонастройки коэффициента C_v для ЦОЗП в процессе произвольного движения ОУ.

При этом будем полагать, что ввиду малости ширины зоны переключений исследуемую систему при ее движении вблизи ЦОЗП можно рассматривать как линейную. То есть движение изображающей точки вблизи этой зоны будет происходить по линиям, близким к отрезкам спирали или гиперболы.

Особенность работы системы с переменной структурой при ступенчатом изменении входных сигналов. Вначале рассмотрим особенности работы СПС вида (2.83) при подаче на ее вход сигнала (2.79).

Поскольку НПА является инерционным объектом, то в момент скачкообразного изменения *с*игнала v_d^s на величину h_q на такую же величину изменится и ошибка системы $e_s = v_d^s - v$. Учитывая, что ширина зоны ВП по оси \dot{e}_s равна $2s_{\Delta}$, а коэффициент C_v определяет наклон границы области гистерезиса на

фазовой плоскости, то выражение для скачка h_q , который может вывести систему за границы этой области (рис. 2.17), можно представить в виде:

$$h_q = 2k_h s_\Delta / C_u$$

где $k_h > 0$ - некоторый коэффициент. Если $k_h > 1$, то в момент подачи очередного скачка h_q изображающая точка гарантировано выйдет из зоны ВП по оси e_s , несмотря на ее текущее расположение. Действительно, в этот момент величина *s* будет равна:

$$s = \dot{e}_s + C_{\nu}e_s = \dot{e}_s^0 + C_{\nu}(e_s^0 \pm 2k_h s_{\Delta} / C_{\nu}) = \dot{e}_s^0 + C_{\nu}e_s^0 \pm 2k_h s_{\Delta} = s_0 \pm 2k_h s_{\Delta}, \quad (2.84)$$

где $e_s^0, \dot{e}_s^0, s_0^-$ ошибка, производная ошибки, а также значение переменной *s* в момент подачи сигнала h_q , соответственно. Знак «±» показывает, что скачок h_q может иметь различное направление. Предполагается, что система до скачкообразного изменения v_d^s работала в режиме переключений, т.е. выполнялось условие $|s| \le s_{\Delta}$. Однако из выражения (2.84) следует, что в момент изменения сигнала v_d^s на величину h_q (при $k_h > 1$) будет выполняться неравенство $|s| > s_{\Delta}$, то есть система выйдет из режима ВП. Если $k_h < 1$, то изображающая точка может и остаться в зоне ВП. Ее выход из этой зоны будет зависеть от текущего значения переменной s_0 и величины k_h .

Теперь более детально рассмотрим требования, которым должна удовлетворять величина h_q . Как было указано выше для обеспечения работоспособности алгоритма самонастройки ЦОЗП (2.44) необходимо, чтобы время работы системы в режиме ВП было не меньше времени, необходимого для перемещения изображающей точки хотя бы по одной полной паре отрезков спирали и гиперболы в зоне этих ВП. В противном случае не удастся произвести вычисление значения μ , необходимого для обеспечения работоспособности для обеспечения работоспособности указанного алгоритма. Естественным требованием также является формулирование условий, при которых сигнал v_d^s отличается от

исходного непрерывного сигнала v_d на малую величину. Для этого необходимо обеспечить, выполнение соотношения

$$|\upsilon_d(t) - \upsilon_d^s(t)| = h_q / 2,$$

определяющего момент времени t_i , когда наступает изменение сигнала v_d^s на величину h_q .

Как уже отмечалось ранее, работа системы при отработке очередного ступенчатого сигнала состоит из подхода изображающей точки к зоне ВП и режима движения в этой зоне. Подход этой точки к указанной зоне происходит по отрезку спирали в течение промежутка времени t_a , а изменение ошибки системы за это время вычисляется по формуле: $\Delta e_{sa}^i = e_{sa}^i(t_a) - e_{s0}^i$, где $e_{sa}^i(t_a)$ - значение ошибки системы в момент ее входа в зону ВП; e_{s0}^i - ошибка системы в начале отработки нового уровня задающего сигнала.

После входа изображающей точки в зону ВП, ввиду малости ее ширины и высокой частоты переключений, движение этой точки в указанной зоне приближенно можно описать выражением [17]:

$$e_{s}(t) = e_{sa}^{i}(t_{a})e^{-C_{v}t}$$
(2.85)

Таким образом, с учетом выражения (2.85) модуль полного изменения ошибки системы за время ⊿*t* при отработке очередного ступенчатого сигнала будет равен:

$$|\Delta e_{s}^{i}| = |\Delta e_{sa}^{i}| + |e_{sa}^{i}(t_{a})(1 - e^{-C_{\nu}t_{s}})|, \qquad (2.86)$$

где t_s - время работы системы в режиме ВП, причем $\Delta t = t_a + t_s$.

Предположим, что за время Δt , через которое сигнал v_d^s изменяется на величину h_q , произошло несколько пар ВП. Будем рассматривать случай, когда

очередной скачек входного сигнала h_q , смещает изображающую точку на фазовой плоскости влево (рис. 2.21). Смещение изображающей точки вправо интереса не представляет, т.к. в этом случае ошибка системы затухает быстрее, чем в режиме ВП.

Очевидно, что при выполнении неравенства $|\Delta e_s^i| > h_q$, значение ошибки e_{s0}^{i+1} , с которой после очередного скачка входного сигнала начинается новый этап движения изображающей точки, будет по модулю меньше значения e_{s0}^i . Таким образом, для рассматриваемого случая ошибка системы по модулю начнет уменьшаться (рис. 2.21а). В случае, когда $|\Delta e_s^i| < h_q$, будет выполняться неравенство $|e_{s0}^{i+1}| > |e_{s0}^i|$, то есть ошибка системы по модулю в этом случае будет увеличиваться (рис. 2.21б).

Из рисунка видно, что при выполнении равенства $/\Delta e_s^i = h_q$ ошибка остается постоянной. На фазовой плоскости это соответствует движению по циклу, отмеченному жирной линией. В этом случае удается связать значение h_q с величинами проекций на ось e_s отрезков фазовых траекторий, составляющих цикл. В общем случае h_q равен сумме проекций фазовых траекторий на ось e_s [9]:

$$h_{q} = |\Delta e_{sa}| + \sum_{i=1}^{N} (|\Delta e_{si}| + |\Delta e_{gi}|), \qquad (2.87)$$

где Δe_{si} , Δe_{gi} - соответственно, проекции отрезков фазовых траекторий спиралей и гипербол внутри зоны переключения; N – количество отрезков спиралей и гипербол внутри зоны ВП. Из (2.87) следует, что минимальная величина h_q , для которой изображающая точка системы успеет пройти хотя бы по одной паре отрезков спирали и гиперболы в зоне ВП до очередного скачкообразного изменения величины v_d^s , определяется соотношением [9, 88]:

$$h_{a} \ge |\Delta e_{sa}| + |\Delta e_{s1}| + |\Delta e_{g1}|.$$
(2.88)



Рис. 2.21 Движение изображающей точки при подаче скачка h_q

Таким образом, задача оценки величины h_q сводится к задаче оценки величин проекций отрезков фазовых траекторий предельного цикла, входящих в неравенство (2.88).

Расчет величины квантования непрерывного входного сигнала. Для упрощения предстоящих расчетов целесообразно заменить реальные отрезки фазовых траекторий, составляющие рассматриваемый предельный цикл, отрезками прямых, наклон которых равен наклону касательных к соответствующим отрезкам этих траекторий в точке их пересечения с прямой s = 0 (см. рис. 2.22). При этом реальный замкнутый предельный цикл удобно заменить его линейной аппроксимацией, которая представляет собой треугольник ABD, боковые стороны которого параллельны касательным к соответствующим фазовым траекториям реального предельного цикла, а основание AD, параллельное оси e_s , имеет длину, [88]. Указанная линейная равную величины h_a аппроксимация оценке рассматриваемого предельного цикла на рис. 2.22 показана пунктирной линией. Особенностью треугольника ABD является то, что его правая боковая сторона, имеющая наклон, равный наклону касательной к гиперболе, вписана в границы зоны ВП и является аппроксимацией отрезка гиперболы, лежащего внутри зоны ВП. Причем проекции боковых сторон этого треугольника на ось \dot{e}_s равны между собой.

Следует отметить, что прямая s = 0 является изоклиной к фазовым траекториям предельного цикла [31], поэтому наклон касательной в точке пересечения этой прямой с соответствующей фазовой траекторией будет постоянным. Следовательно, оценка проекций фазовых траекторий на ось e_s не будет зависеть от места расположения предельного цикла на рассматриваемой фазовой плоскости. Поэтому далее вместо выражения (2.88) в случае использования взамен реальных величин проекций отрезков соответствующих фазовых траекторий их линейными оценочными значениями будет использоваться выражение вида [9]:

$$h_{q} = \Delta e_{sm} + \Delta e_{gm} \ge |\Delta e_{sa}| + |\Delta e_{s1}| + |\Delta e_{g1}|, \qquad (2.89)$$

где Δe_{sm} , Δe_{gm} - соответственно, проекции на ось e_s линейных отрезков AB и BD (см. рис 2.22).



Рис. 2.22 Предельный цикл и его линейная аппроксимация

Для определения величин Δe_{sm} , Δe_{gm} вначале необходимо найти коэффициенты наклона указанных касательных к соответствующим реальным фазовым траекториям движения изображающей точки системы. Для этого уравнение системы (2.83), учитывая равенство нулю производных входного сигнала, перепишем в следующем виде:

$$\frac{d\dot{e}_{s}}{dt} = -\frac{d_{1}}{m}\frac{de_{s}}{dt} - \frac{K_{u1}}{mb}g(s) |e_{s}|.$$
(2.90)

Поделив уравнение (2.90) на *de_s* / *dt* (исключив время), получим:

$$\frac{d\dot{e}_{s}}{de_{s}} = -\frac{d_{1}}{m} - \frac{K_{u1}}{mb} g(s) \frac{|e_{s}|}{\dot{e}_{s}}.$$
(2.91)

Для фазовых траекторий системы, являющихся спиралями, выражение (2.91) после раскрытия модуля $|e_s|$ с учетом знака функции g(s) будет иметь вид:

$$\frac{d\dot{e}_s}{de_s} = -\frac{d_1}{m} - \frac{K_{u1}}{mb} \frac{e_s}{\dot{e}_s},$$
(2.92)

а для фазовых траекторий, являющихся гиперболами, - вид:

$$\frac{d\dot{e}_s}{de_s} = -\frac{d_1}{m} + \frac{K_{u1}}{mb} \frac{e_s}{\dot{e}_s}.$$
(2.93)

Так как поиск касательных к соответствующим фазовым траекториям системы будет осуществляться в точках, находящихся на прямой $\dot{e}_s = -C_v e_s$, то после подстановки $e_s/\dot{e}_s = -1/C_v$ в выражения (2.92) и (2.93) можно найти искомые коэффициенты наклона касательных к указанным отрезкам спиралей k_s и гипербол k_g в виде:

$$k_{s} = \frac{d\dot{e}_{s}}{de_{s}} = \frac{K_{u1} - d_{1}bC_{\upsilon}}{mbC_{\upsilon}}, \quad k_{g} = \frac{d\dot{e}_{s}}{de_{s}} = -\frac{K_{u1} + d_{1}bC_{\upsilon}}{mbC_{\upsilon}}.$$
 (2.94)

Вначале получим оценку Δe_{gm} проекции отрезка BD на ось e_s с коэффициентом наклона к этой оси, равным k_g . Уравнение прямой с коэффициентом наклона k_g , проходящей через точку D с координатами $(e_{sg0}, -C_v e_{sg0} - s_{\Delta})$, находящуюся на прямой $\dot{e}_s = -C_v e_s - s_{\Delta}$ (см. рис.2.22), имеет вид:

$$\dot{e}_{s} = k_{g}(e_{s} - e_{sg0}) - C_{\nu}e_{sg0} - s_{\Delta}.$$
(2.95)

Найдем координату e_{sg} по оси e_s точки В пересечения прямой (2.95) с прямой $\dot{e}_s = -C_v e_s + s_\Delta$, приравняв правые части уравнений, описывающих эти прямые:

$$k_g(e_s - e_{sg0}) - C_{\nu}e_{sg0} - s_{\Delta} = -C_{\nu}e_s + s_{\Delta}.$$
(2.96)

Решая уравнение (2.96) относительно e_s , получим:

$$e_{sg} = 2s_{\Delta} / (k_g + C_{\upsilon}) + e_{sg0}.$$
(2.97)

С учетом выражения (2.97), а также того, что $\left|k_{g}\right| > C_{\upsilon}$ и $k_{g} < 0$, получим

$$\Delta e_{gm} = /e_{sg0} - e_{sg} / = -2s_{\Delta} / (k_g + C_{\nu}).$$
(2.98)

Поскольку проекции отрезка спирали $\Delta \dot{e}_{sm}$ и отрезка гиперболы $\Delta \dot{e}_{gm}$ замкнутого цикла (проекции отрезков AB и BD) на ось \dot{e}_s (см. рис. 2.22) равны, то с учетом выражений (2.95) и (2.98) можно записать:

$$\Delta \dot{e}_{sm} = \Delta \dot{e}_{gm} = -k_g \Delta e_{gm} = k_s \Delta e_{sm} = \frac{2s_\Delta}{k_g + C_{\upsilon}} k_g$$

ИЛИ

$$\Delta e_{sm} = 2s_{\Delta} \frac{k_g}{(k_g + C_{\upsilon})k_s}.$$
(2.99)

В результате с учетом выражений (2.89), (2.98) и (2.99) величину h_q можно определить в виде:

$$h_q = 2s_{\Delta} \frac{k_g - k_s}{(k_g + C_{\nu})k_s}.$$
 (2.100)

Очевидно, что величина h_q , рассчитанная с помощью выражений (2.94) и (2.100), будет зависеть от текущих значений параметров НПА. Поэтому при определении h_q необходимо выбирать такие значения *m* и d_1 из заданных диапазонов, при которых h_q будет иметь максимальное значение. Это обеспечит работоспособность алгоритма самонастройки при любых изменениях параметров НПА. Для выявления требуемых значений *m* и d_1 необходимо определить знаки частных производных $\frac{\partial h_q}{\partial m}$ и $\frac{\partial h_q}{\partial d_1}$, которые имеют вид [9]:

$$\frac{\partial h_q}{\partial m} = \frac{\partial h_q}{\partial k_s} \frac{\partial k_s}{\partial m} + \frac{\partial h_q}{\partial k_s} \frac{\partial k_g}{\partial m}, \qquad (2.101)$$

$$\frac{\partial h_q}{\partial d_1} = \frac{\partial h_q}{\partial k_s} \frac{\partial k_s}{\partial d_1} + \frac{\partial h_q}{\partial k_g} \frac{\partial k_g}{\partial d_1}.$$
(2.102)

Для облегчения этой задачи вначале определим промежуточные сомножители в выражениях (2.101) и (2.102) с учетом выражений (2.94) и (2.100):

$$\frac{\partial h_q}{\partial k_s} = -2s_\Delta \frac{k_g}{\left(k_g + C_\nu\right)k_s^2},\tag{2.103}$$

$$\frac{\partial h_q}{\partial k_g} = 2s_\Delta \frac{k_s + C_\upsilon}{(k_g + C_\upsilon)^2 k_s},$$
(2.104)

$$\frac{\partial k_s}{\partial m} = -\frac{K_{u1} - d_1 b C_{\upsilon}}{b C_{\upsilon} m^2},\tag{2.105}$$

$$\frac{\partial k_s}{\partial d_1} = \frac{\partial k_g}{\partial d_1} = -\frac{1}{m},$$
(2.106)

$$\frac{\partial k_g}{\partial m} = \frac{K_{u1} + d_1 b C_{\upsilon}}{b C_{\upsilon} m^2}.$$
(2.107)

Перед анализом знака каждого из выражений (2.103) - (2.107) отметим, что вычисление h_q по формуле (2.100) возможно только тогда, когда $k_s > 0$. Только при выполнении этого неравенства удается построить замкнутый предельный цикл, который изображен на рис.2.22. Поскольку в реальных СПС всегда справедливы неравенства $C_v > 0$, $d_1 > 0$ и b > 0, то согласно выражению (2.94) неизменную справедливость неравенства $k_s > 0$ можно обеспечить выбором такого значения коэффициента $K_{u1} > 0$ закона управления (2.56), который будет удовлетворять неравенству $K_{u1} > \max(d_1 b C_v)$. При этом выбор такого значения не противоречит условиям выбора коэффициента $K_{u1} > 0$, гарантирующих устойчивость скользящего режима в СПС (см. выражения (2.77), (2.78)).

Поскольку для существования режима скольжения (режима ВП) [17] должно выполняться неравенство $k_g + C_v < 0$, то с учетом неравенств $k_g < 0$ и $s_\Delta > 0$ выражение (2.103) всегда будет отрицательным. С учетом приведенных выше неравенств всегда отрицательным будет также выражение (2.105), а выражения (2.104) и (2.107) – положительными.

Таким образом, с учетом знаков выражений (2.103) - (2.105), и (2.107) выражение (2.101) всегда будет положительно, следовательно, при расчете величины h_q с помощью выражения (2.100) необходимо выбирать максимальное значение параметра *m* из заданного диапазона.

Поскольку знак выражения (2.106) всегда является отрицательным, а знаки выражений (2.103) и (2.104) различны, то знак выражения (2.102) будет зависеть от конкретных значений параметров НПА. Следовательно, вопрос об используемом при расчете величины h_q значении параметра d_1 должен решаться индивидуально для каждого конкретного НПА.

Однако величина h_q зависит не только от параметров НПА, но и от величины коэффициента C_v . Поэтому требуется также определить при каком значении этого коэффициента следует производить расчет величины h_q . Для этого необходимо проанализировать следующее выражение:

$$\frac{\partial h_q}{\partial C_{\nu}} = \frac{\partial h_q}{\partial k_s} \frac{\partial k_s}{\partial C_{\nu}} + \frac{\partial h_q}{\partial k_g} \frac{\partial k_g}{\partial C_{\nu}}.$$
(2.108)

С учетом выражения (2.94) можно записать:

$$\frac{\partial k_s}{\partial C_{\nu}} = -\frac{\partial k_g}{\partial C_{\nu}} = -\frac{K_{u1}}{mbC_{\nu}^2} < 0.$$
(2.109)

С учетом знаков выражений (2.103), (2.104) и (2.109) выражение (2.108) всегда будет положительным, следовательно при расчете величины h_q необходимо использовать максимально возможное значение коэффициента C_v с учетом заданных диапазонов изменения параметров НПА.

Таким образом, исходя из проведенного анализа, расчет величины h_q с помощью выражений (2.94) и (2.100) необходимо осуществлять при следующих значениях параметров НПА:

$$m = m_{\max}, \ d_1 = \begin{cases} d_{1\min}, & ecnu \quad \partial h_q / \partial d_1 < 0\\ d_{1\max}, & ecnu \quad \partial h_q / \partial d_1 > 0 \end{cases}, \quad C_v = C_{v\max}.$$
(2.110)

2.3.5 Исследование работы синтезированной системы управления скоростью движения НПА

Для подтверждения работоспособности и эффективности предложенных методов и алгоритмов синтеза подсистем управления скоростью движения НПА (по отдельным степеням его свободы) в данном разделе будут представлены результаты исследований одного из контуров управления этой скоростью при подаче на его вход ступенчатого входного воздействия. На остальные пять каналов управления сигналы не подаются. Но при этом в процессе моделирования исследуется полная шестистепенная модель НПА вида (2.1), содержащая три уравнения для

вращательных и три – для поступательных степеней свободы. Эта же модель впоследствии будет применяться для исследования и пространственного движения НПА по произвольным траекториям, но уже при наличии следящих по положению контуров для управления всеми шестью каналами.

При моделировании использовались следующие значения параметров НПА и его систем управления: $m_a = 1300$ кг; $J_{xx} = 900$ кг·м²; $J_{yy} = 700$ кг·м²; $J_{zz} = 850$ кг·м²; $Y_c = 0.05$ м; $\lambda_{ijmin} = 150$ кг (i, j = 1, 2, 3); $\lambda_{ijmax} = 1200$ кг (i, j = 1, 2, 3); $\lambda_{ijmin} = 70$ кг·м² (i, j = 4, 5, 6); $\lambda_{ijmax} = 900$ кг·м² (i, j = 4, 5, 6); $d_{1imin} = 100$ кг·с ⁻¹; $d_{1imax} = 200$ кг·с ⁻¹; $d_{2imin} = 300$ кг·м ⁻²; $d_{2imax} = 500$ кг·м ⁻²; $K_d = 50$; $T_d = 0.1$ с; $C_{vmin} = 3$; $K_{u1} = 100$; $K_{u2} = 0.02$; $\mu_{max} = 0.9$; $K_{\mu} = 12$; $h_q = 0.05$ м/с; $s_A = 0.005$.

На рис. 2.23 показана ошибка по скорости движения НПА по одной (линейной) степени свободы при подаче на вход контура управления скоростью ступенчатого задающего сигнала $\upsilon_d = 1$ м/с. На этом рисунке кривые 1 и 2 соответствуют случаю применения самонастраивающейся системы управления (2.56) с изменяющемся параметром C_{υ} , а кривые 3 и 4 – использованию традиционной СПС с постоянным параметром C_{υ} . При этом кривые 1 и 3 соответствуют случаю, когда параметры НПА имеют "наилучшие" значения (т.е. $\lambda_{ij} = \lambda_{ijmin}$, $d_{2i} = d_{2imax}$), а кривые 2 и 4 – когда параметры НПА имеют "наихудшие" значения (т.е. $\lambda_{ij} = \lambda_{ijmax}$, $d_{2i} = d_{2imin}$).



Рис. 2.23 Ошибка по скорости движения НПА при отработке ступенчатого сигнала

Как видно из этого рисунка, в случае использования СПС с постоянным значением C_v (кривые 3 и 4) независимо от параметров ОУ быстродействие системы (время переходного процесса) остается практически постоянным (даже в тех случаях, когда параметры этого ОУ допускают увеличение быстродействия). В случае применения самонастраивающихся СПС удается почти в полтора раза увеличить быстродействие системы в благоприятных режимах работы (см. кривую 1).

На рис. 2.24 показано, как изменяется параметр скольжения *µ* при "наилучших" (кривая 1) и "наихудших" (кривая 2) параметрах НПА.



Рис. 2.24 Процесс изменения параметра скольжения µ при самонастройке контура скорости

Видно, что в обоих случаях он достигает одного и того же заранее заданного значения, несмотря на то, что система входит в скользящий режим в разное время (изза различных законов начального движения, определяемых параметрами ОУ). Однако коэффициент C_v для систем с различными параметрами будет естественно различным (см. рис. 2.25).

На рис. 2.25 кривая 1 соответствует системе с "наилучшими", а кривая 2 – с "наихудшими" параметрами. Из этого рисунка видно, что благодаря применению самонастройки при "наилучших" значениях параметров НПА (в наименее напряженных режимах его работы) система управления имеет большую величину C_{ν} , а следовательно, и большую скорость протекания скользящего режима, что позволяет

существенно увеличить быстродействие контура скорости движения НПА и, соответственно, его точность в благоприятных режимах работы.



Рис. 2.25 Процесс изменения коэффициента С_v при самонастройке контура скорости

Таким образом, результаты исследований подтверждают, что применение закона управления (2.56) позволяет обеспечить однозначную зависимость между величиной параметра скольжения μ и близостью ЦОЗП к вырожденной траектории. Это позволяет применить самонастройку в контуре скорости движения НПА и тем самым значительно увеличить его быстродействие при отработке ступенчатых задающих сигналов.

В следящем режиме управления скоростью самонастройка контура скорости не имеет большого значения, так как при любом значении коэффициента C_{υ} ошибка слежения будет стремиться к нулю. Однако, как это будет показано далее, в случае управления пространственным положением НПА величина этого коэффициента будет оказывать существенное влияние на быстродействие и точность работы всей СУ НПА в целом.

2.4 Синтез контура управления пространственным положением и ориентацией НПА

Согласно определенному ранее порядку синтеза СУ НПА, на данном этапе необходимо разработать СУ его пространственным положением и ориентацией,

131

которая позволит придать этому аппарату желаемые динамические свойства при его движении по произвольным пространственным траекториям. В качестве ОУ в этом случае будет рассматриваться уже разработанный на предыдущих этапах синтеза контур управления скоростью движения НПА, который благодаря использованию СПС описывается дифференциальным уравнением первого порядка с желаемыми постоянными коэффициентами.

На основе выражения (2.57) запишем уравнение динамики СУ скоростью движения НПА в матричной форме при условии применения закона управления вида (2.56) в каждом канале управления скоростью движения этого аппарата по каждой степени свободы:

$$\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{v}\mathbf{v} = \mathbf{C}_{v}\mathbf{v}_{d}, \qquad (2.111)$$

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

Для того чтобы получить полную математическую модель контура управления положением, к уравнению (2.111) следует добавить матричное уравнение (2.6), описывающее взаимосвязь между проекциями скорости движения НПА на оси связанной и абсолютной систем координат. Систему (2.6) и (2.111) сведем к одному матричному уравнению. Для этого, продифференцировав вначале по времени уравнение (2.6) и выразив из полученного уравнения производную v, запишем:

$$\dot{\boldsymbol{\upsilon}} = \mathbf{J}^{-1} \ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{J}} \boldsymbol{\upsilon}. \tag{2.112}$$

Отметим, что матрица \mathbf{J}^{-1} является невырожденной, так как det $\mathbf{J} \neq 0$.

Подставив соотношение (2.112) в (2.111), получим выражение, описывающее динамику полного контура управления положением и ориентацией НПА при его движении по произвольной пространственной траектории:

$$\ddot{\mathbf{x}} - (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{J}\mathbf{C}_{v})\mathbf{v} = \mathbf{J}\mathbf{C}_{v}\mathbf{v}_{d}.$$
(2.113)

Запишем матричное дифференциальное уравнение, определяющее желаемые динамические свойства СУ пространственным движением НПА независимо от текущих значений элементов матрицы **J** и вектора скорости **v**:

$$\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{\upsilon} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_{\Pi} \mathbf{x} = \mathbf{K}_{\Pi}' \mathbf{x}_{\mathrm{d}} + \mathbf{C}_{\upsilon} \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{d}}, \qquad (2.114)$$

где $\mathbf{x}_{d} = (x_{d1}, x_{d2}, x_{d3}, x_{d4}, x_{d5}, x_{d6})^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^{6}$ – вектор задающих воздействий по положению НПА; \mathbf{K}_{n} , $\mathbf{K}'_{n} \in \mathbf{R}^{6\times 6}$ – диагональные матрицы коэффициентов, значения которых выбираются в соответствии с заданными показателями качества СУ.

Из уравнений (2.113) и (2.114) выразим старшие производные:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\mathbf{C}_{p}\mathbf{v}_{d} + (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{J}\mathbf{C}_{p})\mathbf{v}, \qquad (2.115)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\mathbf{C}_{\upsilon}\mathbf{\upsilon}_{d} + (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{J}\mathbf{C}_{\upsilon})\mathbf{\upsilon}, \qquad (2.115)$$
$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{K}_{\Pi}'\mathbf{x}_{d} - \mathbf{K}_{\Pi}\mathbf{x} + \mathbf{C}_{\upsilon}\dot{\mathbf{x}}_{d} - \mathbf{C}_{\upsilon}\dot{\mathbf{x}}, \qquad (2.116)$$

Для того чтобы динамика контура управления положением и ориентацией НПА всегда описывалась с помощью уравнения (2.114), необходимо так сформировать задающий сигнал контура управления скоростью его движения, чтобы обеспечить равенство правых частей выражений (2.115) и (2.116). Решив систему (2.115), (2.116) относительно v_d, получим требуемый закон управления в следующем виде [85, 141, 145]:

$$\mathbf{v}_{d} = (\mathbf{J}\mathbf{C}_{\upsilon})^{-1}(\mathbf{K}_{\Pi}'\mathbf{x}_{d} - \mathbf{K}_{\Pi}\mathbf{x} + \mathbf{C}_{\upsilon}\dot{\mathbf{x}}_{d} - \mathbf{C}_{\upsilon}\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}\boldsymbol{\upsilon}) + \boldsymbol{\upsilon}.$$
(2.117)

Затем подставим в уравнение (2.117) выражение для х из уравнения (2.6) и в результате будем иметь:

$$\mathbf{v}_{d} = (\mathbf{J}\mathbf{C}_{\upsilon})^{-1}(\mathbf{K}_{\Pi}'\mathbf{x}_{d} - \mathbf{K}_{\Pi}\mathbf{x} + \mathbf{C}_{\upsilon}\dot{\mathbf{x}}_{d} - (\mathbf{C}_{\upsilon}\mathbf{J} + \dot{\mathbf{J}})\mathbf{\upsilon}) + \mathbf{\upsilon}.$$
 (2.118)

Рассмотрим случай, когда во всех внутренних контурах скорости всех степеней свободы НПА самонастройка ЦОЗП не производится, а величина наклона этих ЦОЗП во всех указанных контурах выбирается постоянной, одинаковой и такой, что при значениях параметров ΗΠΑ (в всех возможных том числе И самых «неблагоприятных») во всех этих контурах возникает и протекает устойчивый режим скольжения. Тогда матрица С_v может не только являться диагональной, но и иметь одинаковые по величине диагональные элементы С_{vi}. Правда, как уже отмечалось ранее, в этом случае значения С_{vi} будут минимальными, а значит, внутренние контуры управления скоростями движения НПА будут иметь минимальное быстродействие, а сам НПА в целом – сниженную динамическую точность контурного управления. Однако для данного случая выражение (2.118), а следовательно, и закон управления пространственным положением НПА можно упростить.

Действительно, если все элементы диагональной матрицы C_{υ} равны, то произведение $C_{\upsilon}J$ обладает свойством коммутативности, т.е. справедливо равенство $C_{\upsilon}J = JC_{\upsilon}$. С учетом этого свойства выражение (2.118) может быть приведено к виду [32, 85, 141]:

.

$$\mathbf{v}_{d} = (\mathbf{J}\mathbf{C}_{\upsilon})^{-1}(\mathbf{K}_{\Pi}'\mathbf{x}_{d} - \mathbf{K}_{\Pi}\mathbf{x} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}_{d} - \dot{\mathbf{J}}\mathbf{\upsilon}).$$
(2.119)

Очевидно, что для реализации закона управления (2.119) необходимо постоянно вычислять элементы матриц ($C_{\nu}J$)⁻¹ и **j**. Это представляет собой существенную проблему, так как элементы матрицы **J** являются сложными тригонометрическими выражениями (функциями), значения которых непрерывно изменяются в зависимости от текущих значений угловых координат НПА. Чтобы избежать указанных трудоемких вычислений, можно заранее вывести аналитические зависимости для вычисления элементов этих матриц, а затем уже использовать их при реализации обобщенного регулятора положения и ориентации НПА, выполняя минимально необходимое количество указанных вычислений.

Если внутренние контуры скоростей всех степеней свободы НПА являются самонастраивающимися, т.е. все ЦОЗП непрерывно изменяют свой наклон, то необходимо использовать только наиболее общий и более сложный вид закона управления (2.118).

При решении задачи синтеза многомерного регулятора положения НПА возникает также проблема выбора элементов K_{ni} и K_{ni} и K_n и K_n и K_n . Очевидно, что именно эти элементы впоследствии будут определять динамические свойства и показатели качества рассматриваемого обобщенного контура положения, а следовательно, и всего НПА при его движении по произвольным пространственным траекториям.

Как видно из уравнения (2.114), которое описывает динамику НПА в случае использования закона управления (2.118), эта динамика зависит от элементов $C_{\nu i}$ матрицы C_{ν} , которые определяют текущие наклоны ЦОЗП (см. раздел 2.3) в подсистемах управления скоростями соответствующих степеней свободы НПА. В процессе движения НПА происходит непрерывная самонастройка коэффициентов $C_{\nu i}$, приводящая к их изменению в зависимости от его текущих значений параметров. Это может привести к тому, что в случае выбора постоянных значений элементов матриц K_{ni} , K_{ni} показатели качества СУ, описываемой уравнением (2.114), будут меняться вплоть до возникновения во внешнем контуре положения недопустимых колебаний.

Действительно, характер переходных процессов в системе, описываемой матричным дифференциальным уравнением (2.114), определяется законами движения в каждой степени свободы НПА. Особенности этих движений можно исследовать, если систему (2.114) с учетом диагонального вида матрицы C_v разбить на шесть подсистем (по числу степеней свободы НПА) и проанализировать характеристические уравнения тех шести дифференциальных уравнений, которые получаются после указанного разбиения.

Дискриминант \tilde{D} для каждого из шести полученных характеристических уравнений (здесь и далее индекс *i*, обозначающий принадлежность к определенной степени свободы НПА, для простоты будет опущен) будет иметь вид:

135

$$\tilde{D} = C_{\nu}^{2} - 4K_{\Pi}. \qquad (2.120)$$

Очевидно, что при выполнении неравенства $K_{\Pi} \leq C_{\upsilon}^{2}/4$ будет иметь место неравенство $\tilde{D} \geq 0$, т.е. соответствующее характеристическое уравнение будет иметь вещественные отрицательные корни, и следовательно, движение НПА по рассматриваемой степени свободы будет происходить без перерегулирования. В противном случае, когда $\tilde{D} < 0$, рассматриваемые корни являются комплексно сопряженными, и движение НПА будет иметь колебательный характер.

Как следует из выражения (2.120), при постоянном значении коэффициента регулятора положения K_n соответствующей степени свободы и изменении параметра C_v (в процессе самонастройки ЦОЗП рассматриваемого контура скорости) величина дискриминанта \tilde{D} будет меняться. Но при этом может измениться и его знак. Поэтому с целью стабилизации динамических свойств НПА параметры K_{ni} и K_{ni} необходимо также настраивать в зависимости от текущих значений коэффициентов C_{vi} , обеспечивая тем самым дискриминанту \tilde{D} неизменную знакоположительность на всем возможном диапазоне изменения этих коэффициентов.

Используя равенство (2.120), сформируем требуемый закон настройки коэффициентов соответствующих контуров положения и ориентации НПА в виде [85, 141]:

$$K_{\rm m} = K_{\rm m}' = C_{\nu}^{2} / \zeta \,, \tag{2.121}$$

где ζ – некоторый положительный параметр, определяющий вид переходных процессов в СУ положением и ориентацией НПА при его движении по заданным пространственным траекториям. Очевидно, что, если $\zeta \ge 4$, то движение НПА по соответствующей степени свободы будет происходить без перерегулирования, но переходной процесс при этом будет несколько замедленным. При выполнении неравенства $\zeta < 4$ переходной процесс будет более быстрым, но соответствующее движение НПА будет происходить с перерегулированием.

Таким образом, выбор коэффициентов K_{ni} и K_{ni} сводится к выбору параметров ζ_i , которые в итоге и будут определять динамические свойства НПА в целом при его перемещении по любой пространственной траектории.

Структурная схема регулятора положения вида (2.119) представлена на рис. 2.26. Регулятор вида (2.118) будет иметь более сложную схему реализации. Очевидно, что при реализации этих схем с помощью бортового компьютера необходимо выполнять достаточно большое количество операций умножения и вычисления тригонометрических функций. Для этого указанный компьютер должен обладать соответствующим быстродействием.



Рис. 2.26 Структурная схема регулятора положения НПА

Таким образом, полученный закон управления положением и ориентацией НПА позволяет придать ему желаемые динамические свойства при движении по произвольным пространственным траекториям. Кроме того, предложенный алгоритм (2.121) коррекции параметров синтезированного регулятора позволит обеспечить одинаковый вид переходных процессов НПА при наличии самонастройки в контурах управления скоростями его движения по соответствующим степеням свободы.

2.5 Исследование синтезированной системы управления пространственным движением НПА

В данном разделе будут приведены результаты математического моделирования синтезированной системы управления пространственным движением

137

НПА. Указанное исследование проводилось с использованием полной математической модели НПА (2.1)-(2.5) с добавлением кинематических соотношений (2.6). Параметры НПА и коэффициенты соответствующих подсистем управления скоростями его движения взяты такими же, как и в разделе 2.3, а параметры системы управления положением $\zeta_i = 4$ (i = $\overline{1, 6}$).

Вначале исследуем работу СУ одной степенью свободы НПА при подаче на ее вход некоторого задающего сигнала, полагая, что на СУ других степеней свободы сигналы не подаются. Эта система, как уже указывалось ранее, содержит следующие контуры (подсистемы, см. рис. 2.1): контур (подсистему) управления движительным комплексом, формируемый по закону (2.28); контур (подсистему) управления скоростью движения НПА по рассматриваемой степени свободы, построенный на основе СПС с управлением вида (2.56) и контур (подсистему) управления пространственным положением (ориентацией) НПА, формирующий выходной сигнал вида (2.118). Результаты исследования этой СУ при подаче на ее вход ступенчатого входного воздействия показаны на рис. 2.27.



Рис. 2.27 Ошибка по положению одной степени свободы НПА при отработке ступенчатого входного сигнала

Кривые 1 и 2 на этом рисунке изображают переходные процессы в рассматриваемой системе при "наилучших" и "наихудших" значениях параметров НПА, соответственно. Для сравнения на этом же рисунке приведены переходные процессы в системе с типовым линейным ПИ-регулятором (кривые 3 и 4), рассчитанным на модульный оптимум при "наилучших" значениях параметров НПА. Этот регулятор используется вместо синтезированной подсистемы управления положением и подсистемы управления скоростью движения НПА, работающей в режиме высокочастотных переключений. При этом в обеих системах используются самонастраивающиеся регуляторы вида (2.28) для управления движителями. Причем кривая 3 соответствует "наилучшим", а кривая 4 "наихудшим" значениям параметров НПА, соответственно.

Из рис. 2.27 видно, что синтезированный линейный ПИ-регулятор с постоянными коэффициентами позволяет добиться приемлемого качества управления только при "наилучших" значениях параметров НПА. При "наихудших" значениях этих параметров наблюдается существенное ухудшение качества переходных процессов (появляется недопустимо большое перегулирование и более чем в 2.5 раза возрастает время переходного процесса). Применение же синтезированной в данной работе СУ НПА позволяет не только полностью исключить перерегулирование, но и в благоприятных режимах его работы почти в полтора раза увеличивать быстродействие системы (скорость обнуления ошибки).

На рис. 2.28 показан процесс изменения параметра скольжения μ , а на рис. 2.29 – процесс изменения наклона ЦОЗП при отработке этой системой указанного ступенчатого воздействия, подаваемого на один из каналов управления. На этих рисунках цифрой 1 обозначены процессы, происходящие в СУ при "наилучших", а цифрой 2 – при "наихудших" значениях параметров НПА из заданного диапазона их изменения. Из приведенных рисунков видно, что процесс самонастройки параметров контура скорости при управлении положением НПА происходит аналогично процессам самонастройки при управлении скоростью движения НПА (см. рис. 2.24 и 2.25). При этом параметр μ достаточно быстро достигает своего максимального заранее заданного постоянного значения (близкого к единице), а коэффициент

139

наклона ЦОЗП в зависимости от текущих параметров НПА принимает различные значения.



Рис. 2.28 Процесс изменения параметра скольжения при самонастройке регулятора скорости в режиме управления положением НПА



Рис. 2.29 Процесс изменения во времени коэффициента наклона ЦОЗП при самонастройке подсистемы скорости движения НПА

Однако в отличие от режима управления скоростью движения НПА (см. рис. 2.24 и 2.25) здесь процесс изменения параметра μ при самонастройке регулятора

скорости происходит не плавно до некоторого максимально возможного значения, определяемого текущими параметрами аппарата, а имеет резкие спады и пики. Это явление объясняется процессом перехода системы из одного цикла устойчивых переключений в другой при скачкообразном изменении задающего сигнала скорости (см. подраздел 2.3.4). Во время этого перехода и происходят резкие изменения параметра μ , когда изображающая точка начинает двигаться по таким отрезкам спиралей или гипербол, время движения по которым намного превышает время движения по соответствующим отрезкам спиралей и гипербол внутри зоны высокочастотных переключений вблизи ЦОЗП. Причем чем меньше абсолютная величина ошибки по скорости, тем больше времени занимает такой переход. Однако, как видно из рис.2.28 и 2.29, указанные резкие изменения величин μ практически не сказываются на непрерывности изменения коэффициента C_{ν} при его стремлении к максимально возможному значению, поскольку в моменты, когда в системе отсутствует режим устойчивых переключений, самонастройка контура скорости прекращается.

В работе также проводилось исследование пространственного движения НПА при наличии полной многоканальной СУ, построенной с использованием подсистем вида (2.28), (2.56), (2.118). При этом в контуре скорости движения НПА положение ЦОЗП по всем каналам управления выбирались постоянным, но обеспечивающими устойчивый режим высокочастотных переключений.

В частности, на рис. 2.30 представлены законы изменения во времени всех координат НПА, а также законы его движения в вертикальной и горизонтальной плоскостях при позиционном управлении. В этом режиме движения предполагалось, что НПА должен переместиться в пространстве из точки с координатами (0, 0, 0) в точку с координатами (10, 10, 10). При этом перед началом движения все его координаты состояния имели нулевые значения, а в процессе движения на соответствующие вращательные степени свободы НПА в каждый момент времени подавались задающие сигналы, ориентирующие его продольную ось на конечную точку движения, обеспечивая минимальное гидродинамическое сопротивление.

141



ж) проекция траектории движения НПА на горизонтальную плоскость



Отметим, что в процессе движения НПА на всех используемых движителях вводились ограничения по тяге, равные 200 н.

Характерно, что в начале движения (примерно за 5 с) НПА разворачивается в 2.30г.д), (см. рис. обеспечивая нужном направлении минимальное гидродинамическое сопротивление при движении. В дальнейшем требуемая ориентация продольной оси НПА сохраняется. После подхода НПА к заданной точке угол ψ сохраняет свое значение, а угол θ с учетом остойчивости НПА постепенно принимает исходное нулевое значение. Из рисунков (см. рис. 2.30 е, ж) также видно, что траектория движения НПА к заданной точке пространства близка к линейной. Наблюдаются лишь незначительные отклонения от линейной траектории на начальном участке движения. Из приведенных рисунков (см. рис. 2.30 а, б, в) видно, что НПА приходит в заданную точку пространства без перерегулирования менее чем за 25 секунд.

Эта же система управления исследовалась и в режиме движения НПА по заданной пространственной криволинейной траектории с одновременным изменением его линейных и угловых координат [85, 141]. При этом полагалось, что НПА должен отслеживать профиль дна, показанный на рис. 2.31 (кривая 1), на расстоянии 1.5м от дна по вертикали (кривая 2).

Кроме того, к движению в вертикальной плоскости (см. рис. 2.31) добавлялось дополнительное криволинейное перемещение в горизонтальной плоскости (см. рис. 2.32).



Рис. 2.31 Желаемая траектория перемещения НПА в вертикальной плоскости

143



Рис.2.32 Траектория движения НПА в горизонтальной плоскости

Из рис. 2.31 видно, что траектория движения НПА в вертикальной плоскости разбивалась на четыре характерных участка. Скорость движения по этим участкам определялась желаемой скоростью изменения координаты *x*. Желаемые законы изменения координат *x*, *y*, *z* по времени представлены в табл. 2.1, где буквой t обозначается текущее время, а величины t_a , t_{ab} , t_c вычисляются по следующим формулам: $t_a = 20/v_{xa}$, $t_{ab} = 20/v_{xab}$, $t_c = 50/v_{xbc}$.

Участок	Закон изменения		
траектории	по координате х	по координате z	по координате у
OA	υ _{xa} t	$10-10\cos(\frac{\pi\upsilon_{xa}}{20}t)$	$20\sin(\frac{\pi}{t_a+t_{ab}+t_c}t)$
AB	$20 + \upsilon_{xab} (t - t_a)$	$15+5\cos(\frac{\pi\upsilon_{ab}}{10}(t-t_a))$	$20\sin(\frac{\pi}{t_a+t_{ab}+t_c}t)$
BC	$30 + v_{xbc} \left(t - t_a - t_{ab} \right)$	$25 - 15\cos(\frac{\pi v_{xbc}}{40}(t - t_a - t_{ab}))$	$20\sin(\frac{\pi}{t_a+t_{ab}+t_c}t)$
CD	$70 + \upsilon_{\rm xc} \left(t - t_{\rm a} - t_{\rm ab} - t_{\rm c} \right)$	40	0

Таблица 2.1. Временные зависимости задающих (входных) сигналов по координатам x, y и z

Исследование данного режима движения НПА проводилось при двух комбинациях значений скорости υ_x :
- 1) $\upsilon_{xc} = 0.4 \text{ m/c}$, $\upsilon_{xa} = 0.2 \text{ m/c}$, $\upsilon_{xab} = 0.15 \text{ m/c}$, $\upsilon_{xbc} = 0.2 \text{ m/c}$;
- 2) $\upsilon_{xb} = 0.7 \text{ m/c}$, $\upsilon_{xab} = 0.55 \text{ m/c}$, $\upsilon_{xbc} = 0.8 \text{ m/c}$, $\upsilon_{xc} = 1 \text{ m/c}$.

При движении НПА по указанной пространственной траектории, как и ранее, с целью уменьшения гидродинамического сопротивления его продольная ось ориентировалась по направлению движения НПА, то есть параллельно касательной к огибаемой поверхности. На рис. 2.33 представлены результаты моделирования движения НПА по пространственной траектории, (см. рис. 2.31 и 2.32) с малыми скоростями (первая комбинация скоростей). На этом (и последующих) рисунках сплошная линия соответствует моделируемому движению аппарата с разработанной самонастраивающейся робастной СУ, а программные значения соответствующих координат показаны пунктирно-точечными кривыми.



в) процесс изменения координаты у

Рис. 2.33 Процесс изменения координат и траектория движения НПА при отработке сложной пространственной траектории с малыми скоростями

Результаты моделирования показали, что при малой скорости движения (до 0.5 м/с), когда эффекты взаимовлияния между степенями свободы незначительны и движители не выходят на свои ограничения, синтезированная СУ позволяет НПА

точно пройти по заданной траектории (отклонения от заданной траектории не превышали 0.06 м).

При движении по этой же траектории, но уже с несколько большими скоростями (до 1.5 м/с), начинают проявляться весьма заметные эффекты взаимовлияния между различными степенями свободы НПА, и синтезированная многоконтурная СУ с учетом ограничений сил тяги используемых движителей уже с трудом обеспечивает относительно высокое качество управления.

Процессы изменения соответствующих координат во времени и траектории движения НПА при отработке пространственной траектории (см. рис. 2.31 и 2.32) на повышенных скоростях (см. вторую комбинацию значений скорости v_x) с использованием синтезированной робастной СУ представлены на рис. 2.34. На графиках е и ж этого рисунка нижняя сплошная линия соответствует профилю огибаемой поверхности в соответствующей плоскости.

Как видно из этого рисунка, ошибки при отслеживании заданной траектории по вертикали достигают 1.2 м, а по горизонтали - 1.1 м. Если же НПА совершает движения с этой же скоростью, но только в вертикальной плоскости, отслеживая траекторию, изображенную на рис. 2.31, то динамическая ошибка по вертикали не превышает 0.4 м. Можно отметить, что наибольшее отклонение НПА от заданной наблюдается на участке с большой кривизной, где эффекты траектории взаимовлияний между степенями свободы максимальны и движители НПА входят в насыщение. При этом на остальных участках траектории отклонение НПА от нее не превышает 0.4м. Поэтому для обеспечения высокой точности движения НПА вдоль всей заданной пространственной траектории необходимо формировать скорость движения НПА в зависимости от формы ее текущего участка.

Если же в процессе моделирования вместо синтезированных высококачественных СУ использовались типовые ПИД-регуляторы, настроенные, например, на модульный оптимум, то при сложном пространственном движении НПА на малых скоростях (до 0.5 м /с) с их помощью еще удавалось достигнуть хорошей динамической точности слежения (динамические ошибки не превышали 0.1 м). Однако, при увеличении скорости движения НПА по рассматриваемой траектории

до 1м/с динамические ошибки управления начинали значительно превышать допустимые пределы, достигая нескольких метров [95, 96].



ж) траектория движения НПА в горизонтальной плоскости

Рис. 2.34 Процессы изменения координат и особенности движения НПА при отработке сложной пространственной траектории на повышенных скоростях

Таким образом, результаты проведенного моделирования показали, что синтезированная многоконтурная СУ пространственным движением НПА позволяет обеспечить высокую точность этого движения как в режиме позиционного управления, так и в режиме движения по сложным пространственным траекториям в широком диапазоне скоростей.

2.6 Выводы

В данной главе на основе метода декомпозиции был разработан метод синтеза СУ, для управления высокоманёвренными НПА, предназначенными для выполнения сложных операций вблизи объектов работ. Эта СУ НПА состоит из трех вложенных подсистем: подсистемы управления движителями, скорости и положения НПА, и обеспечивает этому НПА желаемые динамические свойства при его движении по заданной пространственной траектории в условиях неопределенности и переменности его параметров и наличия существенных взаимовлияний между его степенями свободы. В частности, в главе были получены следующие результаты.

1. Был разработан метод синтеза самонастраивающейся СУ движителем НПА на основе использования его математической модели, наиболее полно учитывающей эффекты взаимодействия винта с вязкой жидкостью. Использование указанной СУ позволяет обеспечить заданные динамические свойства каждого движителя НПА независимо от изменения его параметров, что существенно повышает точность работы как движительного комплекса НПА, так и всей СУ НПА в целом.

2. На основе использования адаптивных нейронных сетей были разработаны методы синтеза систем управления движителями НПА, позволяющих обеспечить заданные динамические свойства этим движителям без априорных знаний об их параметрах. Особенностью указанных систем управления является формирование обучающих выборок малого размера, что позволяет использовать нейронные сети с небольшим количеством нейронов и тем самым существенно сократить количество вычислений при переобучении этих сетей в процессе работы.

3. Был проведен анализ работы СПС для управления скоростью движения НПА и выявлены особенности их работы, которые не позволяют применить алгоритм

адаптивной настройки их коэффициентов на основе косвенной оценки режима скольжения. Было выяснено, что основной причиной возникновения указанного эффекта является присутствие слагаемых, зависящих от величины задающего сигнала скорости и его производных, в дифференциальном уравнении, описывающем движение СПС. В результате был разработан новый метод синтеза СПС на основе квантования программного сигнала скорости движения, который позволяет компенсировать выявленные негативные эффекты, и тем самым обеспечить работу алгоритма настройки их параметров. В результате удается обеспечить увеличение быстродействия СПС в благоприятных режимах работы, что, в свою очередь, позволяет увеличить точность и быстродействие работы всей СУ НПА в целом.

4. Был проведен анализ работы СПС управления скоростью НПА в режиме отработки последовательности ступенчатых входных сигналов и на основе этого анализа был разработан метод выбора минимальной величины шага квантования непрерывного входного сигнала скорости, который обеспечивает работу алгоритма самонастройки параметров СПС и высокую точность работы контура управления скоростью движения НПА.

5. Был разработан метод синтеза контура управления положением и ориентацией НПА, учитывающий особенности ранее разработанных подсистем управления и обеспечивающего заданные динамические свойства НПА в целом при его движении по сложным пространственным траекториям.

6. Было проведено математическое моделирование разработанной СУ, которое показало, что разработанная СУ позволяет обеспечить высокую точность движения НПА по заданным пространственным траекториям. Однако это высокая точность движения обеспечивается только тогда, когда сигналы управления, формируемые этой СУ, не приводят ко входу движителей НПА в насыщения, что определяется формой текущего участка траектории движения НПА и скоростью этого движения. Поэтому для обеспечения неизменно высокой точности движения НПА по произвольным пространственным траекториям при использовании разработанной СУ необходимо изменять скорость этого движения в зависимости от формы текущего участка траектории.

3. МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ С ОДНИМ ПОВОРОТНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

В соответствии со структурой задач диссертации (см. рис. 1.3), в данной главе рассматриваются особенности 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 в качестве такого НПА в главе рассматривается НПА с одним поворотным движителем, вектор тяги которого изменяет пространственную ориентацию.

3.1 Описание конструкции НПА с одним поворотным маршевым движителем

Большинство современных НПА в зависимости от назначения и характера выполняемых работ имеют несколько степеней свободы, движение по которым обеспечивается с помощью нескольких однотипных движителей (обычно от 4 до 8) [1, 78]. Указанный подход к проектированию НПА приводит к значительному увеличению массогабаритных характеристик и гидродинамического сопротивления этих НПА. Одним из возможных подходов к совершенствованию характеристик НПА является разработка подводных аппаратов, имеющих только один маршевый двигатель, пространственная ориентация вектора упора которого может изменяться относительно продольной оси НПА, что обеспечивает их перемещение по заданным пространственным траекториям. При использовании указанного подхода отпадает необходимость использования рулей, которые приводят К значительному увеличению гидродинамического сопротивления при быстром движении НПА или к снижению управляемости при его маневрировании с малыми скоростями.

Один из способов реализации НПА с одним движителем, который описан в работе [125], является использование сферического параллельного манипулятора в качестве устройства ориентации вектора тяги указанного движителя. Выбор устройства с параллельной кинематикой для построения механизма ориентации движителя обусловлен рядом преимуществ, которые имеют подобные механизмы:

- расположение всех приводов на основании механизма, что приводит к уменьшению его инерционных характеристик;

- высокое отношение (нагрузочная способность)/(масса механизма);

- большие силы и моменты, создаваемые механизмом на конечном звене;

- высокая точность позиционирования последнего поворотного звена.

Помимо перечисленных преимуществ данные механизмы имеют и существенные недостатки, заключающиеся в том, что синтез их СУ представляет собой достаточно сложную задачу, так как кинематика параллельных механизмов описывается сложными уравнениями, и решение прямой задачи кинематики требует нетривиальных подходов. Кроме того, такие механизмы имеют ограниченное рабочее пространство по сравнению со своими размерами. Однако несмотря на указанные недостатки преимущества механизма с параллельной кинематикой позволяют создать достаточно простое и точное устройство, позволяющее обеспечить желаемую пространственную ориентацию вектора тяги маршевого движителя НПА.

Далее рассмотрим конструкцию НПА с одним поворотным движителем на основе сферического параллельного манипулятора. Механизм ориентации движителя этого НПА состоит из двух платформ (подвижной и неподвижной), соединенных тремя одинаковыми кинематическими цепями [162, 163]. Каждая цепь состоит из двух звеньев, соединенных между собой, а также с подвижной и неподвижной платформами посредством вращательных шарниров (см. рис. 3.1а). Причем оси всех этих шарниров пересекаются в одной точке - центре механизма. Этот механизм имеет восемь угловых параметров: α_{1i} ($i = \overline{1, 3}$) - углы между векторами \mathbf{u}_i и \mathbf{w}_i i - го ближайшего звена цепи; α_{2i} ($i = \overline{1, 3}$) - углы между векторами \mathbf{w}_i и \mathbf{v}_i (i + 3) - го удаленного звена цепи; β_1 – угол, который образуют векторы \mathbf{v}_i с нормалью к подвижной платформе.

В работе [125] показано, что механизм, показанный на рис. 3.1а, может быть приведен к виду 3.1б. Это модифицированное устройство имеет девять вращательных сочленений с углами поворота $\theta_{\vec{n}}$ ($i = \overline{1, 9}$). Первые три из них имеют одну и ту же ось

вращения, совпадающую с векторами \mathbf{u}_i , и жестко соединены с выходными валами трех электроприводов, которыми они и приводятся во вращение. Векторы \mathbf{w}_i ($i = \overline{1, 3}$) с учетом углов α_{1i} и α_{2i} позволяют дать полное описание этого механизма. Векторы \mathbf{v}_i ($i = \overline{1, 3}$) направлены вдоль вращающихся сочленений подвижной платформы, на которой в подшипнике крепится ось поворотного движителя НПА. Очевидно, что для рассматриваемого модифицированного механизма векторы \mathbf{u}_i всегда параллельны и $\beta_1 = 0$, а также всегда выполняется равенство $\beta_2 = \pi / 2$.



Рис. 3.1 Сферический параллельный механизм: a) исходная архитектура; б) модифицированная архитектура

На рис. 3.2 изображена движительная установка, построенная на основе рассматриваемого сферического механизма (см. рис. 3.1б), а на рис. 3.3 внешний вид НПА, имеющего поворотный движитель на основе этой движительной установки [125].

На подвижной платформе, которая представлена в виде трех стержней, лежащих в одной плоскости, в подшипнике установлен винт и насадка со стабилизаторами, которая увеличивает тягу этого винта. Приводной вал винта соединен с этим винтом посредством универсального двухстепенного шарнира.



Рис. 3.2 Обобщенная модель сферического устройства пространственной ориентации оси движителя и противовращения насадки



Рис. 3.3 Внешний вид НПА с одним поворотным движителем

Очевидно, что с помощью указанного сферического механизма винт и насадка одновременно могут изменять свою ориентацию в коническом рабочем пространстве, величина которого зависит от величины углов α₁ и α₂. При этом ось вращения винта

всегда совпадает с осью вращения насадки. Причем вращение насадки вокруг нормали к подвижной платформе за счет одновременного изменения углов θ_{π} (i = $\overline{1, 3}$) ограничений не имеет. Поскольку указанный сферический механизм может одновременно обеспечивать и ориентацию подвижной платформы (оси движителя), и вращение насадки, то становится возможным компенсировать опрокидывающий момент, действующий на НПА со стороны вращающегося винта. Для этого необходимо обеспечить вращение этой насадки с некоторой скоростью в сторону, противоположную направлению вращения винта.

Реализация высокоточной СУ пространственным движением НПА с одним поворотным движителем на основе сферического параллельного манипулятора требует решения следующих задач:

1) разработка структуры СУ указанного НПА, позволяющей обеспечить его движение в различных режимах (движение к заданной точке пространства, движение по пространственной траектории) с учетом особенностей кинематики устройства ориентации;

2) разработка метода формирования программных сигналов управления приводами устройства ориентации движителя НПА, позволяющих одновременно обеспечить желаемую ориентацию указанного движителя и автоматическую компенсацию опрокидывающего момента;

3) разработка методов формирования программных сигналов движения НПА с одним поворотным движителем, которые обеспечивают реализацию различных режимов движения указанного НПА с учетом ограничений, накладываемых на ориентацию его вектора тяги.

Все указанные задачи будут последовательно рассмотрены в данной главе.

3.2 Разработка структуры системы управления НПА с одним поворотным движителем

В отличие от традиционных НПА, имеющих несколько движителей, которые могут независимо создавать упоры и моменты по различным степеням свободы, поворотный движитель рассматриваемого НПА может создавать управляющие упоры

и моменты только по трем степеням свободы: упор τ_{dx} по оси *x* ССК, и моменты M_{dy} и M_{dz} относительно осей *y* и *z*, соответственно, ССК. При этом указанные управляющие воздействия не могут создаваться независимо по каждой отдельной степени свободы.

На рис. 3.4 показана схема формирования поворотным движителем НПА управляющих упоров и моментов.



Рис. 3.4 Схема формирования сил и моментов, обеспечивающих движение НПА

Как видно из этого рисунка проекции вектора тяги τ_{∂} , создаваемого винтом поворотного движителя НПА, на оси связанной с НПА СК вычисляются с помощью выражений [125]:

$$\tau_{\partial x} = \tau_{\partial} \cos(\delta_d) \cos(\delta_r), \quad \tau_{\partial y} = \tau_{\partial} \cos(\delta_d) \sin(\delta_r), \quad \tau_{\partial z} = \tau_{\partial} \sin(\delta_d), \quad (3.1)$$

где δ_r , δ_d – углы отклонения оси движителя от продольной оси НПА в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно.

Моменты, создаваемые вектором тяги τ_0 относительно центра масс НПА, вычисляются по формулам [125]:

$$M_{\partial y} = \tau_{\partial z} \times (\overline{PG}), \quad M_{\partial z} = \tau_{\partial y} \times (\overline{PG}), \quad (3.2)$$

где \overline{PG} - вектор, направленный от точки приложения вектора тяги τ_{∂} к центру масс НПА.

Из выражений (3.1) и (3.2) видно, что для формирования упоров $\tau_{\partial y}$ и $\tau_{\partial z}$ необходимо наличие ненулевого вектора тяги τ_{∂} движителя НПА, при этом моменты $M_{\partial y}$ и $M_{\partial z}$ формируются пропорционально этим упорам. Поэтому указанные особенности должны быть учтены при разработке структуры системы управления указанным НПА.

Структурная схема СУ НПА с одним поворотным движителем, которая позволяет учесть отмеченные особенности его конструкции, показана на рис. 3.5 [20, 21, 81].



Рис. 3.5 Структурная схема системы управления НПА с одним поворотным движителем

Система управления, показанная на рис. 3.5, имеет три канала управления: каналы управления по углам курса ψ и дифферента θ , а также канал управления продольным движением НПА. На входы этих каналов управления подаются программные значения углов курса ψ^* , дифферента θ^* и желаемой скорости продольного движения υ_x^* , соответственно. Для формирования управляющих воздействий в каждом канале управления используется соответствующий регулятор:

$$\tau_{dx} = R_{T1}(\nu_x^*, \nu_x), M_{dy} = R_{T2}(\theta^*, \theta), M_{dz} = R_{T3}(\psi^*, \psi).$$
(3.3)

При этом величина желаемого значения скорости движения v_x^* может формироваться с помощью дополнительного регулятора положения на основе текущего положения НПА и целевой точки.

Указанные регуляторы могут быть построены на основе адаптивных и самонастраивающихся систем, например, описанных в работах [37, 78]. Однако так как рассматриваемый НПА имеет обтекаемую форму (см. рис. 3.4) и ограниченное количество степеней свободы, то взаимовлияния между его степенями свободы незначительны, что позволяет применить в каждом канале управления типовые линейные регуляторы.

Так как поворотный движитель НПА (см. рис. 3.3) формирует силу тяги и моменты с помощью поворота оси винта движителя на углы δ_r и δ_d , то в соответствующем блоке СУ (см. рис. 3.5) происходит пересчет управляющих сигналов, сформированных регуляторами в программные значения переменных τ_d , δ_r^* и δ_d^* . Указанный пересчет происходит с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{d} &= (\tau_{dx}^{2} + (M_{dy}/PG)^{2} + (M_{dz}/PG)^{2})^{1/2}, \\ \tau_{d} &= \begin{cases} \hat{\tau}_{dx} sign(\tau_{dx}), ec\pi u \hat{\tau}_{d} < \tau_{d}^{\max} & , \\ \tau_{d}^{\max} sign(\tau_{dx}), ec\pi u \hat{\tau}_{d} \ge \tau_{d}^{\max} \end{cases}, \\ \delta_{r}^{*} &= \begin{cases} \arctan(\frac{M_{dy}/PG}{\tau_{d}}), ec\pi u | \delta_{r}^{*} | < \delta_{r}^{\max} \\ \delta_{r}^{\max} sign(M_{dy}), ec\pi u | \delta_{r}^{*} | \ge \delta_{r}^{\max} \end{cases}, \\ \delta_{d}^{*} &= \begin{cases} \arcsin(\frac{M_{dz}/PG}{\tau_{d}}), ec\pi u | \delta_{d}^{*} | \le \delta_{d}^{\max} \\ \delta_{d}^{\max} sign(M_{dz}), ec\pi u | \delta_{d}^{*} | \le \delta_{d}^{\max} \end{cases}, \end{aligned}$$

$$(3.4)$$

где τ_d^{\max} , δ_r^{\max} , δ_d^{\max} - максимально возможные значения соответствующих переменных. При этом сигналы δ_r^* и δ_d^* сглаживаются с помощью фильтров для исключения скачкообразного изменения указанных сигналов на большую величину.

Это позволяет уменьшить силовые и моментные воздействия на механизм ориентации и продлить срок его службы.

Система управления маршевым движителем (блок СУМД на рис. 3.5) обеспечивает расчет сигнала управления u двигателем винта движителя, на основе сформированного значения τ_d . При этом в качестве алгоритма управления движителем может быть использован закон управления (2.28), либо законы управления движителем на основе адаптивных нейронных сетей, разработанные в главе 2.

Расчет программных сигналов поворота $\theta_{\vec{n}}^*$, (i = 1...3) электроприводов устройства ориентации движителя НПА проводится на основе рассчитанных ранее программных значений δ_r^* и δ_d^* углов ориентации оси винта движителя, а также необходимой скорости ω_{cr} вращения насадки движителя, для компенсации опрокидывающего момента.

Указанная скорость ω_{cr} рассчитывается на основе текущего значения угла крена φ НПА и скорости вращения винта движителя ω_{d} :

$$\omega_{cr} = f_{cr}(\omega_{\partial}, \varphi) . \tag{3.5}$$

Далее, на основе программных значений δ_r^* , δ_d^* углов ориентации подвижной платформы движителя НПА и скорости вращения ω_{cr} насадки движителя, в блоке вычисления углов поворота приводов (блок БВУПП на рис. 3.5) рассчитываются программные значения углов поворота электроприводов устройства ориентации θ_{ii}^* , (*i* = 1...3). Указанный расчет производится путем решения обратной задачи кинематики механизма ориентации движителя НПА. При этом важно, чтобы алгоритм решения указанной задачи имел низкую вычислительную сложность и мог бы выполняться в реальном масштабе времени на бортовом компьютере НПА.

Программные значения углов поворота электроприводов устройства ориентации НПА отрабатываются электроприводами (ЭПі) ($i = \overline{1, 3}$). При этом для

обеспечения высокой точности управления ориентацией движителя и скоростью вращения насадки можно использовать системы управления приводами, описанные в работе [77].

Таким образом, предложенная структура СУ НПА с одним поворотным движителем на основе использования законов управления вида (3.3)-(3.5), позволяет обеспечить формирование необходимой силы тяги и моментов для управления движением НПА и одновременно автоматически компенсировать опрокидывающий момент, действующий со стороны винта движителя на этот НПА. При этом для обеспечения высококачественного функционирования этой СУ необходимо разработать алгоритм решения обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя, а также алгоритмы формирования программных сигналов движения, поступающих на вход отдельных каналов СУ и учитывающих особенности различных режимов движения этого НПА.

3.3 Разработка алгоритма решения обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя НПА

В настоящее время разработано много методов аналитического решения прямой и обратной задач кинематики для многозвенных манипуляторов с разомкнутой кинематической схемой [18, 157]. Однако для параллельных манипуляторов получить аналитическое решение обратной задачи кинематики часто получается только в случае достаточно простой и симметричной кинематической схемы, а решение прямой задачи кинематики можно получить только с применением численных алгоритмов.

В частности, в работах [125, 162, 163] было получено аналитическое решение обратной задачи кинематики сферического параллельного манипулятора. Однако указанное аналитическое решение позволяет получить значения углов поворота приводов ориентации $\theta_{\tau i}$ ($i = \overline{1,3}$) в диапазонах $-\pi/2 \le \theta_{\tau i} \le \pi/2$, в то время как в процессе работы указанного устройства значения этих углов, вследствие непрерывного вращения насадки движителя, могут изменяться в любых пределах. Это приводит к тому, что требуется дополнительно вводить сложные логические

условия, которые в зависимости от текущего положения механизма ориентации и направления его вращения правильно бы формировали значения желаемых углов $\theta_{\tau i}$ $(i = \overline{1,3})$. Кроме того, решения, предложенные в работах [125, 162, 163], содержат большое количество операций вычисления тригонометрических функций, что требует больших вычислительных ресурсов при выполнении указанных расчетов в реальном масштабе времени.

Для получения алгоритма решения обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя НПА, который свободен от указанных недостатков, применим геометрический Ha 3.6 подход. рис. показана кинематическая схема рассматриваемого устройства ориентации, дальнейшем будем которую В использовать для решения обратной задачи кинематики.



Рис. 3.6 Кинематическая схема устройства ориентации для решения обратной задачи кинематики

Для однозначного определения значений углов поворота $\theta_{\tau i}$ (*i* = 1,3) электроприводов устройства ориентации необходимо определить положения нижних

рычагов этого устройства (см. рис. 3.1б), которые задаются координатами векторов \mathbf{w}_i ($i = \overline{1,3}$). При этом будем считать, что сфера, в которую вписан рассматриваемый механизм, имеет единичный радиус, а центр механизма совпадает с центром неподвижной системы координат *хуz*.

Вначале рассмотрим случай, когда углы ориентации подвижной платформы устройства имеют нулевые значения $\delta_r = \delta_d = \delta_{cr} = 0$, где δ_{cr} - угол поворота насадки движителя, величина которого рассчитывается на основе желаемой скорости вращения ω_{cr} насадки. Это положение назовем исходным положением (оно обозначено верхней пунктирной окружностью на рис. 3.6), а вектора v_i ($i = \overline{1,3}$), соответствующие этому положению, обозначим v_{i0} ($i = \overline{1,3}$). При этом будем считать, что указанному положению соответствуют следующие координаты векторов v_{i0} :

$$\mathbf{v}_{10} = (1, 0, 0), \, \mathbf{v}_{20} = (\cos(2\pi/3), \sin(2\pi/3), 0), \, \mathbf{v}_{30} = (\cos(4\pi/3), \sin(4\pi/3), 0).$$

При повороте подвижной платформы на углы δ_r , δ_d , δ_{cr} координаты вектора v_i можно вычислить по формуле [157]:

$$\mathbf{v}_{i} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{d} & 0 & \sin \delta_{d} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \delta_{d} & 0 & \cos \delta_{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_{r} & -\sin \delta_{r} \\ 0 & \sin \delta_{r} & \cos \delta_{r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_{cr} & -\sin \delta_{cr} & 0 \\ \sin \delta_{cr} & \cos \delta_{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{v}_{i0}, i = \overline{1,3}. (3.6)$$

Так как механизм ориентации вписан в сферу, то все вектора \mathbf{w}_i $(i = \overline{1,3})$ имеют одинаковую длину и образуют с осью вращения электроприводов ориентации (вектора \mathbf{u}_i $(i = \overline{1,3})$) угол α_1 (см. рис. 3.16). Из этого следует, что концы этих векторов будут лежать на окружности радиусом $R_1 = \sin \alpha_1$ и центром $O'(0,0, -\cos \alpha_1)$, которая расположена в плоскости x'O'y' параллельной плоскости xOy (см. рис. 3.6). Концы векторов \mathbf{v}_i и \mathbf{w}_i $(i = \overline{1,3})$ будут соединены между собой отрезком, длина которого равна $R_2 = 2\sin(\alpha_2/2)$ (см треугольник OC_iB_i на рис. 3.6). Длина проекции этого отрезка A_iB_i на плоскость x'O'y' вычисляется по формуле:

$$R_{3i} = \sqrt{R_2^2 - (\cos \alpha_1 + v_{iz})^2}, \ (i = \overline{1,3})$$
(3.7)

где v_{iz} – координата *z* вектора v_i , рассчитанного по формуле (3.6).

Точка A_i отрезка A_iB_i имеет координаты (v_{ix} , v_{iy} , -cos α_1), а координаты точки B_i совпадают с координатами вектора **w**_i. Следовательно, чтобы найти координаты вектора **w**_i, а значит и положение нижних рычагов устройства ориентации, необходимо определить координаты точек пересечения окружности радиусом R_1 с центром в точке O' (на которой лежит конец указанного вектора) с окружностью радиусом R_{3i} и центром в точке A_i. Указанные точки пересечения можно найти, решив следующую систему уравнений относительно переменных w_{ix} , w_{iy} [92, 147]:

$$w_{ix}^{2} + w_{iy}^{2} = R_{1}^{2},$$

$$(w_{ix} - v_{ix})^{2} + (w_{iy} - v_{iy})^{2} = R_{3i}^{2},$$
(3.8)

где w_{ix} , w_{iy} – соответствующие компоненты вектора \mathbf{w}_i , при этом $w_{1z} = w_{2z} = w_{3z} = -\cos \alpha_1$.

Решение системы (3.8) для программных значений углов δ_r^* , δ_d^* и δ_{cr}^* позволяет получить программные значения \mathbf{w}_i^* , ($i = \overline{1,3}$) положения нижних рычагов устройства ориентации. При этом в результате решения системы (3.8) получается два возможных решения, которые соответствуют двум возможным вариантам расположения нижних рычагов устройства ориентации относительно шарниров подвижной платформы. Так как программные значения углов ориентации подвижной платформы не могут меняться резко, то выбирать нужно решение, которое будет ближе к текущему положению рычагов указанного устройства.

После определения значений \mathbf{w}_{i}^{*} , $(i = \overline{1,3})$, которые задают желаемое положение нижних рычагов устройства ориентации, необходимо рассчитать программные значения углов θ_{i}^{*} $(i = \overline{1,3})$ поворота электроприводов этого устройства. При этом необходимо получить выражения, которые не содержат дополнительных логических условий.

Для этого сначала получим значения элементов векторов \mathbf{w}_i ($i = \overline{1,3}$), которые определяют текущее положение нижних рычагов устройства ориентации. Так как компоненты w_{iz} векторов \mathbf{w}_i ($i = \overline{1,3}$) одинаковы для всех этих векторов и не зависят от текущих значений углов θ_{ii} ($i = \overline{1,3}$) поворота приводов, то далее они не будут учитываться, и под символом \mathbf{w}_i будет пониматься проекция соответствующего вектора на плоскость x'O'y'.

Вычисление значений текущих значений элементов векторов \mathbf{w}_i (*i* = $\overline{1,3}$) выполняется по следующим формулам:

$$w_{ix} = R_1 \cos \theta_{ii}, w_{iy} = R_1 \sin \theta_{ii}, (i = 1,3).$$
 (3.9)

Далее рассчитываются величины углов $\Delta \theta_{\tau i}$ (*i* = $\overline{1,3}$) между желаемым \mathbf{w}_{i}^{*} (*i* = $\overline{1,3}$) и текущим \mathbf{w}_{i} (*i* = $\overline{1,3}$) положением нижних рычагов устройства. Модули этих углов рассчитываются с помощью следующего выражения:

$$| \Delta \theta_{ii} |= \arccos\left((w_{ix}w_{ix}^* + w_{iy}w_{iy}^*) / (| \boldsymbol{w}_i || \boldsymbol{w}_i^* |)\right), (i = \overline{1,3}).$$
(3.10)

Как видно из выражения (3.9), $|\mathbf{w}_i| = R_1$ ($i = \overline{1,3}$). При этом модуль вектора \mathbf{w}_i^* ($i = \overline{1,3}$) будет рассчитываться с помощью выражения:

$$|\mathbf{w}_{i}^{*}| = \sqrt{w_{ix}^{*2} + w_{iy}^{*2}}, (i = \overline{1,3}).$$
 (3.11)

Это объясняется тем, что вычисления векторов \mathbf{w}_i^* ($i = \overline{1,3}$) могут выполняться с некоторыми малыми погрешностями, которые зависят от погрешностей округления. Поэтому модули этих векторов также будут отличаться от R_1 , на некоторую малую величину, которую нельзя знать заранее. Это может привести к тому, что значение аргумента функции arcos в выражении (3.10) может быть больше 1, что не позволит выполнить указанный расчет.

Выражение (3.10) из-за четности функции агссоя позволяет определить только модуль угла $\Delta \theta_{\bar{\tau}i}$ ($i = \overline{1,3}$), но не его знак. Чтобы определить знак этого угла используем следующий подход. Повернем СК x'O'y' на угол $\theta_{\bar{\tau}i}$ ($i = \overline{1,3}$) так, чтобы в новой повернутой СК $x'_rO'y'_r$ вектор \mathbf{w}_i ($i = \overline{1,3}$) располагался вдоль оси $O'x'_r$ (см. рис. 3.7).



Рис. 3.7 Определение знака $\Delta \theta_{\pi}$

В этом случае в СК $x'_r O' y'_r$ знак угла $\Delta \theta_{\vec{n}}$ $(i = \overline{1,3})$ будет определяться положением вектора \mathbf{w}_i^* $(i = \overline{1,3})$ относительно оси $O' x'_r$. Если вектор \mathbf{w}_i^* $(i = \overline{1,3})$ будет расположен в верхней полуплоскости СК $x'_r O' y'_r$, то $\Delta \theta_{\vec{n}} > 0$ $(i = \overline{1,3})$, а если в нижней, то $\Delta \theta_{\vec{n}} < 0$ $(i = \overline{1,3})$. Положение указанного вектора в системе координат $x'_r O' y'_r$ относительно оси $O' x'_r$ будет определяться выражением:

$$w_{iyr}^{*} = \sin \theta_{ii} w_{ix}^{*} + \cos \theta_{ii} w_{iy}^{*}, \ (i = 1,3)$$
(3.12)

где w_{ivr}^* - соответствующий компонент вектора \mathbf{w}_i^* в системе координат $x_r'O'y_r'$.

После определения знака углов $\Delta \theta_i$ (*i* = 1,3) величины желаемых углов поворота θ_{ii}^* (*i* = 1,3) приводов ориентации вычисляются с помощью выражения:

$$\theta_{\vec{n}}^* = \theta_{\vec{n}} + |\Delta \theta_{\vec{n}}| \operatorname{sign}(w_{iyr}^*), \ (i = 1, 3).$$
(3.13)

Структурная схема блока, выполняющего эту операцию, приведена на рис. 3.8.



Рис. 3.8 Структурная схема блока вычисления желаемых углов поворота приводов ориентации параллельного сферического манипулятора

Для проверки работоспособности разработанных алгоритмов были проведены исследования на макете устройства ориентации движителя НПА (см. рис. 3.9), которые показали, что при использовании этих алгоритмов удается обеспечить точность позиционирования подвижной платформы устройства ориентации с точностью 0.125° [92, 147], что более чем достаточно для высокоточного управления движением НПА.



Рис. 3.9 Внешний вид макета устройства ориентации движителя НПА

Таким образом, вычисления программных значений углов поворота электроприводов ориентации с помощью выражений (3.7)-(3.13) позволяет обойтись без использования дополнительных логических выражений, а также обеспечить одновременно желаемую ориентацию вектора тяги движителя НПА и вращение насадки движителя для компенсации опрокидывающего момента.

3.3 Формирование программных сигналов для различных режимов движения НПА с одним поворотным движителем

Как уже было отмечено ранее, второй задачей, которая возникает при разработке СУ НПА с одним поворотным движителем является разработка методов формирования его программных сигналов движения, учитывающих ограничения, накладываемые на его маневренность.

Далее рассмотрим следующие режимы движения указанного НПА [20, 82, 86]:

- 1) режим подхода к заданной точке пространства;
- 2) режим подхода к заданной точке пространства с заданной ориентацией;
- 3) режим движения по заданной пространственной траектории.

3.3.1 Режим движения НПА с одним поворотным движителем к заданной точке

В этом разделе рассмотрим режим выхода НПА с одним движителем в заданную точку пространства $X^* = (x^*, y^*, z^*)$ без учета ориентации, которая будет у НПА при достижении этой заданной точки.

Как уже отмечалось ранее, основной особенностью управления НПА с одним движителем является невозможность создания момента, изменяющего его пространственную ориентацию, без появления продольной И поперечной составляющих силы тяги движителя, под действием которых он будет совершать дополнительные поступательные движения. Это означает, что такой НПА не может развернуться на месте, и для придания ему нужной ориентации в пространстве он всегда должен двигаться и проходить по некоторой траектории. Кроме того, поскольку НПА обладает ненулевой остойчивостью, т.е. имеет ненулевую метацентрическую высоту, то при движении в вертикальной плоскости величина угла дифферента НПА зависит от текущей величины момента *М*_{ду} движителя этого НПА, что в отдельных случаях может не позволить ему выйти к заданной целевой точке. Это объясняется тем, что при приближении к указанной точке величина силы тяги au_{d} движителя будет уменьшаться и, следовательно, будет уменьшаться момент $M_{\partial v}$ (см. выражение (3.1)-(3.2)), что приведет к уменьшению угла дифферента НПА.

Поэтому необходимо разработать такой метод формирования программных сигналов движения ψ^*, θ^*, v_x^* , который обеспечивал бы подход НПА с одним поворотным движителем к заданной целевой точке из любого начального положения.

При решении указанной задачи особое внимание необходимо уделить повышению маневренности НПА в вертикальной плоскости, так как именно при движении в этой плоскости возможна ситуация, когда НПА не сможет достичь целевой точки. Для этого на начальном этапе движения необходимо увеличить желаемый угол дифферента и скорость движения НПА, для того чтобы обеспечить достижение заданной глубины раньше, чем НПА достигнет указанной точки и сила тяги, развиваемая движителем будет слишком мала для поддержания необходимого значения угла дифферента.

Пусть НПА с одним поворотным движителем должен совершить маневр в вертикальной плоскости $\tilde{x}O_y$ для выхода в целевую точку *B* (см. рис. 3.10). Ось *y* этой плоскости совпадает с осью z абсолютной системы координат, а координаты по оси \tilde{x} вычисляются по формуле:

$$|\widetilde{x}| = \sqrt{x^2 + y^2}, \qquad (3.14)$$

где *x*, *y* – координаты НПА в абсолютной декартовой системе координат. Таким образом, координаты НПА и целевой точки в вертикальной плоскости $\tilde{x}Oz$ будут иметь значения $A(\tilde{x}_a, z_a)$, $B(\tilde{x}_b, z_b)$ соответственно.



Рис. 3.10 Формирование программных сигналов движения НПА в режиме его движения к заданной целевой точке

Обозначим в вертикальной плоскости движения НПА точку C, имеющую координаты (\tilde{x}_c, z_b), причем [87, 89, 144]:

$$\widetilde{x}_c = \widetilde{x}_a + k_v (\widetilde{x}_b - \widetilde{x}_a), \qquad (3.15)$$

где $0 < k_y < 1$ некоторый постоянный коэффициент. При этом в процессе движения НПА будем считать целевой точкой не точку *B*, а точку *C*.

В этом случае желаемое значение угла дифферента, с учетом выражения (3.15) будет вычисляться по формуле [87, 144]:

$$\theta^* = \operatorname{arctg}((z_b - z_a)/(k_y \mid \tilde{x}_c - \tilde{x}_a \mid)).$$
(3.16)

где θ^* - желаемое значение угла дифферента НПА. В знаменателе выражения (3.16) стоит модуль, так как знак угла θ^* должен определяться только положением целевой точки относительно НПА по вертикали.

Как видно из формулы (3.16), программное значение угла θ * дифферента НПА будет больше, чем в случае, когда движение этого НПА будет задаваться по направлению к целевой точке *B*. То есть на начальном этапе движения НПА будет быстрее выходить на заданную глубину. При этом при приближении в целевой точке программное значение угла дифферента стремиться к 0. Это говорит о том, что подход к этой точке НПА будет выполнять практически в горизонтальной плоскости и, следовательно, в этом случае ограничения на угол дифферента при небольших скоростях снимается.

Для обеспечения движения НПА с повышенным углом дифферента необходимо увеличить скорость этого движения. Для этого к значению желаемой скорости, рассчитываемой исходя из текущих координат НПА и целевой точки, прибавляется добавочное значение, зависящее от желаемого значения угла дифферента. Это добавочное значение рассчитывается по следующей формуле [89, 144]:

$$v_x^* = f_{xv}(X^*, X) + k_{v\theta} |\sin(\theta^*)|, \qquad (3.17)$$

где $f_{xv}(X^*, X)$ - закон формирования значения желаемой скорости движения НПА в зависимости от текущих координат НПА и целевой точки; $k_{v\theta} > 0$ - положительный коэффициент. Из выражения (3.17) видно, что желаемая скорость движения НПА будет существенно увеличиваться только тогда, когда желаемое значение угла дифферента имеет достаточно большую величину, то есть на начальных этапах движения. При подходе к целевой точке *В* добавочное значение скорости, зависящее от угла дифферента, близко к нулю и не будет оказывать существенного влияния на движение НПА.

Формирование желаемых значений скорости и угла дифферента с помощью выражений (3.16), (3.17) обеспечивает повышенную маневренность в вертикальной плоскости НПА с одним поворотным движителем, при этом предложенный алгоритм позволяет также автоматически выполнить подход к целевой точке, расположенной вертикально над (под) этим НПА. Указанный режим движения используется на начальном этапе работы НПА, когда происходит заглубление до рабочей глубины. В этом случае НПА по спирали начинает двигаться к целевой точке с повышенной скоростью. Очевидно, что при движении по спирали угол курса ψ будет меняться в широких пределах, так как в процессе этого движения НПА может совершить несколько полных поворотов вокруг вертикальной оси. В этом случае в процессе формирования желаемого значения угла курса ψ^* необходимо использовать специальные логические условия, что усложняет реализацию закона управления. Для того чтобы обойтись без использования этих условий можно применить алгоритм, основанный на подходе, описанном в разделе 3.3 (см. выражения (3.10)-(3.12)), который для случая НПА будет иметь следующий вид [89, 144]:

$$\Delta \psi^* = \arccos\left(\frac{(x_b - x_a)\cos(\psi) - (y_b - y_a)\sin(\psi)}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}\right)\delta,$$

$$\delta = sign((x_b - x_a)\sin(\psi) + (y_b - y_a)\cos(\psi)).$$
(3.18)

Следует отметить, что в качестве программного сигнала по каналу курса можно использовать величину $\Delta \psi^*$, которая является рассогласованием между желаемым и текущим значением угла курса. Кроме того, использование именно этой величины в качестве программного сигнала позволит обойтись без согласования показаний датчика курса и рассчитанных значений программных сигналов, так как в формуле

(3.18) используются не абсолютные значения этих величин, а их тригонометрические функции.

Выражения (3.16)-(3.18) позволяют рассчитать программные сигналы движения, подаваемые на вход СУ НПА (см. рис. 3.5), для режима движения к целевой точке. Однако в процессе движения НПА целевая точка может оказаться в таком положении относительно этого НПА, что подход к ней, в силу его ограниченной маневренности, становится невозможен, и НПА начинает совершать круговые движения в горизонтальной плоскости вокруг этой целевой точки. Поэтому в процессе движения необходимо определять возможность возникновения указанных ситуаций [87].

Далее будем рассматривать движение НПА в полусвязанной системе координат x'y'z'. Предположим НПА совершает поворот к целевой точке *B*, расположенной в горизонтальной плоскости (см. рис. 3.11). Очевидно, что радиус разворота R_c будет минимальным тогда, когда движитель будет отклонен на максимально возможный угол $\delta_{d \max}$ в горизонтальной плоскости.



Рис. 3.11 Определение условия возникновения круговых движений НПА

Под действием силы $\tau_{\partial x}$ НПА движется вдоль траектории со скоростью υ_x , а под действием момента $M_{\partial z \max}$ он поворачивается в горизонтальной плоскости с угловой скоростью $\omega_{z \max}$. Несложно получить, что радиус поворота НПА будет определяться следующим соотношением:

$$R_c = \upsilon_x / \omega_{z \max} \,. \tag{3.19}$$

Найдем координаты центра окружности, вдоль которой будет происходить поворот НПА. Центр этой окружности (точка $C(x'_c, y'_c)$ на рис. 3.10) будет находиться в направлении перпендикулярном направлению движения НПА на расстоянии равном R_c . В результате можно записать:

$$x'_{c} = -R_{c}\sin(\theta)sign(\delta_{d}), \quad y'_{c} = R_{c}\cos(\theta)sign(\delta_{d}).$$
(3.20)

Очевидно, что возможность НПА подойти к целевой точке определяется взаимным расположением НПА (точка *A* на рис. 3.10), центра окружности поворота (точка *C* на рис.3.10) и целевой точки (точка *B* на рис. 3.10). Если целевая точка располагается снаружи этой окружности, то НПА сможет к ней подойти, в противном случае он будет совершать движения вокруг целевой точки. Для определения указанных ситуаций можно ввести переменную, значение которой показывает где находится целевая точка относительно окружности поворота. Указанную переменную можно рассчитать по следующей формуле:

$$\xi_m = (x'_b - x'_c)^2 + (y'_b - y'_c)^2 - R_c^2, \qquad (3.21)$$

где x'_b , y'_b - координаты целевой точки *B* в полусвязанной СК. Если $\xi_m < 0$, то целевая точка находится внутри окружности поворота и подход к ней невозможен, если $\xi_m > 0$, то целевая точка находится снаружи окружности поворота и НПА сможет к ней подойти. В случае невозможности подойти к целевой точке НПА нужно либо

остановить (если отклонение имеет приемлемую величину), либо совершить дополнительные маневры для точного выхода в целевую точку.

С помощью выражений (3.19), (3.20) и (3.21) можно определить возможность возникновения круговых движений при подходе НПА к целевой точке и использовать эту информацию для планирования его движения. Однако при предварительном планировании траектории НПА с одним движителем скорость его движения по отдельным участкам траектории может быть заранее неизвестна, поэтому необходимо использовать выражение, оценивающее максимальный радиус поворота этого НПА, который можно использовать в указанных задачах планирования.

Зависимость скорости движения НПА по отдельной степени свободы от силы или момента, приложенного к НПА по этой степени свободы, в установившемся режиме можно описать следующими выражениями:

$$\tau_{\partial x} = d_{2x} \upsilon_x | \upsilon_x |, \quad M_{\partial z} = d_{2z} \omega_z | \omega_z |. \tag{3.22}$$

С учетом выражений (3.1), (3.2) и (3.22) выражение (3.19) можно легко привести к следующему виду [89]:

$$R_{c} = \sqrt{\frac{\cos(\delta_{d \max})}{PG\sin(\delta_{d \max})}} \max\left(\frac{d_{2z}}{d_{2x}}\right).$$
(3.23)

Так как величины гидродинамических сопротивлений могут изменяться в процессе движения НПА, то в выражении (3.23) используется оценка максимального значения их отношения.

Следует отметить, что определять возможность возникновения круговых движений необходимо только при движении в горизонтальной плоскости, так как при движении в вертикальной плоскости возможно возникновение режима движения по спирали к целевой точке, то есть в проекции на горизонтальную плоскость НПА также совершает круговые движения. Поэтому в случае, когда расстояние от НПА до целевой точки по вертикали больше некоторого заданного малого значения следует отключать алгоритм определения возникновения круговых движений.

Для проверки работоспособности разработанных методов формирования программных сигналов движения НПА с одним поворотным движителем было проведено математическое моделирование. При моделировании задавались следующие значения параметров НПА: $m_a = 80$ кг; $J_{xx}= 2$ кг·м², $J_{yy} = 10$ кг·м², $J_{zz} = 10$ кг·м², $d_{2x} = 25$ кг·м⁻¹, $d_{2y} = 125$ кг·м⁻¹, $d_{2z} = 125$ кг·м⁻¹, $d_{1x} = 15$ кг·с⁻¹, $d_{1y} = 75$ кг·с⁻¹, $d_{1z} = 75$ кг·с⁻¹, $d'_{2x} = 2$ Н·м·с², $d'_{2y} = 10$ Н·м·с², $d'_{2z} = 10$ Н·м·с², $d'_{1x} = 1.2$ Н·м·с, $d'_{1y} = 1.2$ Н·м·с, $d'_{1z} = 6$ Н·м·с, $\lambda_i = 20$ кг (i = 1, 2, 3), $\lambda_i = 0.5$ кг·м² (i = 4, 5, 6), $Y_c = 0.02$ м, $k_v = 50$, $\delta_{dmax} = 25^\circ$, $\delta_{rmax} = 25^\circ$, $\tau_{\partial max} = 100$ Н.

В качестве регуляторов для каждого канала НПА использовались ПИДрегуляторы с передаточными функциями вида $W_1(s) = K_1 \frac{T_1 s^2 + T_2 s + 1}{s (T's + 1)}$, параметры

которых для каждого канала управления НПА принимали следующие значения:

- 1) канал управления скоростью: $K_1 = 25$, $T_1 = 0.6 \text{ c}^{-1}$, $T_2 = 0.8 \text{ c}^{-1}$;
- 2) канал управления углом курса: $K_1 = 20, T_1 = 0.75 \text{ c}^{-1}, T_2 = 0.5 \text{ c}^{-1}$,
- 3) канал управления углом дифферента: $K_1 = 20, T_1 = 1 \text{ c}^{-1}, T_2 = 0.75 \text{ c}^{-1},$

Для всех каналов управления справедливо $T' = 0.07 \text{ c}^{-1}$.

Коэффициенты, входящие в выражения для формирования программных сигналов движения НПА (см. выражения (3.16), (3.17)) имели следующие значения: $k_y = 0.7$, $k_{p\theta} = 0.5$.

Результаты математического моделирования движения НПА с одним движителем к целевой точке при использовании алгоритмов формирования программных сигналов движения НПА (3.16)-(3.18) показаны на рис. 3.12. На этом рисунке представлены траектории движения НПА с одним движителем из начальной точки с координатами (50,8,20) при движении в целевую точку со следующими координатами: (70, 18,30) – сплошная кривая; (53, 18, 20) – точечная кривая; (59, 18, 26) – пунктирная кривая.



Рис. 3.12 Траектории движения НПА с одним движителем к целевой точке в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Как видно из представленных рисунков, формирование желаемых значений углов курса и дифферента, а также скорости движения НПА с помощью выражений (3.16), (3.17), (3.18) позволяет обеспечить выход НПА к целевой точке, независимо от ее расположения в вертикальной плоскости относительно этого НПА. При этом видно, что в случае, когда НПА не может напрямую подойти к целевой точке, ввиду ограничений на угол дифферента, то он в автоматическом режиме начинает совершать движение по спирали (см. рис. 3.12б).

Таким образом, результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм формирования программных сигналов движения для подхода НПА к заданной целевой точке позволяет существенно увеличить маневренность НПА в вертикальной плоскости, а также учитывает ограничения маневренности этого НПА.

3.3.2 Режим подхода НПА к целевой точке с заданной ориентацией

Поскольку НПА обладает ненулевой остойчивостью, то его устойчивую ориентацию при выходе в целевую точку P_0 пространства (например, при подходе к некоторому объекту) можно осуществлять только в горизонтальной плоскости по желаемому углу подхода ψ_0 . Причем этот угол может принимать положительные и отрицательные значения, не превышающие по модулю 180 градусов, а сама целевая

точка P_0 может находиться в любом месте пространства по отношению к исходным положениям НПА. Для выхода НПА в эту целевую точку с заданной ориентацией (в горизонтальной плоскости) траектория его движения должна состоять из двух участков. На первом участке осуществляется быстрый выход НПА из исходной точки пространства A в некоторую точку P_n , которая располагается в одной горизонтальной плоскости с целевой точкой. Для этого режима используются алгоритмы формирования программных сигналов движения, разработанные в предыдущем разделе. При этом стоит отметить, что положение точки P_n должно выбираться с учетом ограничений, накладываемых на маневренность НПА (см. выражения (3.21) и (3.23)) так, чтобы этот НПА смог подойти к целевой точке. На втором участке обеспечивается разворот НПА в горизонтальной плоскости и его подход с нулевой скоростью к целевой точке P_0 с заданной ориентацией.

Следует отметить, что требуемый разворот НПА в горизонтальной плоскости может быть осуществлен по различным законам. В частности, можно использовать позиционное управление НПА, обозначив траекторию его разворота к объекту несколькими промежуточными точками P_i ($i = \overline{n, 0}$) (см. рис. 3.13), а можно организовать и траекторное управление по дуге некоторой окружности P_nP_1 (см. рис. 3.14) [20, 86, 196]. При этом в процессе движения НПА к объекту *O*, независимо от используемого закона управления, всегда возникает задача поиска исходной точки P_n его подхода к горизонтальной плоскости, положение которой определяется и скоростью движения НПА, и требуемой ориентацией его на объект *O*.

На рис. 3.13 и 3.14 показано движение НПА в проекции на горизонтальную плоскость x_0y_0 , которая совпадает с плоскостью разворота НПА к объекту O. Точка A_c на этих рисунках обозначает проекцию точки A исходного пространственного положения НПА на плоскость x_0y_0 , а кривая A_cP_n – проекцию на указанную горизонтальную плоскость траектории движения НПА к этой плоскости.

Вначале рассмотрим позиционное управление НПА при его движении к объекту *O* в горизонтальной плоскости x_0y_0 из точки P_n в точку P_0 (см. рис. 3.13). В этом случае промежуточные точки его траектории P_i ($i = \overline{n-1,1}$) будут являться вершинами ломаной линии, у которой углы ψ_{Δ} между соседними участками и длины R_L этих участков выбираются постоянными. При этом конечный участок P_1P_0 (участок торможения) будет направлен на объект O под заданным углом ориентации НПА к этому объекту в плоскости x_0y_0 .



Рис. 3.13 Траектория подхода НПА к объекту в горизонтальной плоскости с заданной ориентацией с использованием позиционного управления



Рис. 3.14 Траектория подхода НПА к объекту в горизонтальной плоскости с заданной ориентацией с использованием контурного управления

Очевидно, что величины ψ_{Δ} и R_L зависят от маневренности НПА и скорости его движения по траектории. Они поддаются предварительному расчету с последующим уточнением в процессе моделирования. Полагается, что НПА движется к объекту с постоянной скоростью, согласованной с величинами ψ_{Δ} и R_L , которая не должна быть максимальной. При своем движении НПА должен последовательно перемещаться от точки P_i вершины ломаной к точке P_{i-1} , разворачиваясь после прохода очередной точки в сторону следующей ближайшей. На последнем участке траектории P_1P_0 он получает заданную ориентацию на объект O и останавливается в точке P_0 .

Так как все участки ломаной на рис. 3.13 имеют одинаковые длины и отклонены друг от друга на одинаковый угол, то координаты промежуточных точек P_i траектории движения НПА к объекту O в горизонтальной плоскости x_0y_0 и соответствующие желаемые углы ψ_i курса НПА в конкретных точках P_i ломаной могут быть рассчитаны, начиная с конечной точки траектории P_0 НПА с заданными координатами $x_0 = x_d$, $y_0 = y_d$, $z_0 = z_d$ с помощью выражений [82, 86, 196]:

$$\psi_{1} = \theta_{0}, x_{i} = x_{i-1} - R_{L} \cos \psi_{i}, y_{i} = y_{i-1} + R_{L} \sin \psi_{i},$$

$$\psi_{i+1} = \psi_{i} + \psi_{\Delta}, i = \overline{1, n}.$$
 (3.24)

Очевидно, что при расчете траекторий движения НПА в горизонтальной плоскости (в зависимости от направления разворота НПА к объекту) величина ψ_{Δ} может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Вычисления x_i , y_i и ψ_i заканчиваются при таком значении n, при котором выполняются условия:

$$|\psi_{A} - \psi_{n}| \leq |\psi_{\Delta}|, e c \pi u \psi_{A} \psi_{n} > 0,$$

$$||\psi_{A} - \psi_{n}| - 2\pi |\leq |\psi_{\Delta}|, e c \pi u \psi_{A} \psi_{n} < 0.$$
 (3.25)

Причем при расположении объекта в передней полусфере НПА $\psi_A = -\arctan((y_n - y_A)/(x_n - x_A))$, при расположении этого объекта во втором квадранте рассматриваемой горизонтальной плоскости разворота $\psi_A = -\arctan((y_n - y_A)/(x_n - x_A)) - \pi$, а при его расположении в третьем квадранте этой плоскости $\psi_A = -\arctan((y_n - y_A)/(x_n - x_A)) + \pi$. Здесь $x_A = 0$, $y_A = 0$ – координаты исходного положения НПА. Очевидно, что при использовании рассмотренного выше алгоритма вычисления координат точки P_n по формулам (3.24) при различных знаках ψ_A появляется два различных варианта расположения этой точки на рассматриваемой горизонтальной плоскости. Поэтому НПА может приближаться к точке P_1 с двух противоположных сторон. Причем величины n для двух возможных вариантов траекторий разворота НПА к объекту в горизонтальной плоскости могут быть различными. При окончательном формировании траектории движения НПА к целевой точке P_0 должна выбираться та из двух рассчитанных точек P_{ni} , которая удовлетворяет условию min $(R_L \cdot n + \sqrt{(x_n - x_A)^2 + (y_n - y_A)^2 + (z_n - z_A)^2})$.

Таким образом, алгоритм выхода НПА в заданную точку горизонтальной плоскости, в которой находится объект, с заданной ориентацией на этот объект содержит следующие этапы [20, 197].

1. С помощью выражений (3.24) рассчитываются промежуточные точки P_i ($i = \overline{0,n}$) двух траекторий, по которым может происходить движение НПА к объекту в горизонтальной плоскости с заданной ориентацией на этот объект.

2. С использованием выражения (3.25) находится единственная точка *P_n* на рассматриваемой горизонтальной плоскости.

3. Выполняется движение НПА к выбранной точке *P_n* с использованием алгоритмов формирования программных сигналов (3.16)-(3.18). При этом следует учитывать, что к указанной точке НПА должен подойти с такой скоростью, которая задается для его движения в горизонтальной плоскости.

4. После прохода точки P_n НПА с заданной скоростью движется от этой точки к точке P_1 , последовательно проходя все ранее построенные промежуточные вершины ломаной линии. При этом желаемое значение угла курса НПА вычисляется с помощью выражения (3.18).

5. После прохода НПА точки P_1 начинается его подход и остановка непосредственно в точке P_0 . При этом НПА будет иметь заданную ориентацию по отношению к объекту в горизонтальной плоскости.

Следуя рассмотренному алгоритму, можно построить траекторию разворота НПА в горизонтальной плоскости с заданной ориентацией на объект с использованием не только ломаной линии, но и окружности, применяя вместо позиционного контурное управление. При этом последний участок траектории в режиме подхода к заданной точке с заданной ориентацией можно формировать из двух частей: дуги окружности, по которой происходит разворот, и прямолинейного участка, ориентированного на объект под заданным углом курса (на этом участке будет происходить окончательное торможение НПА). Радиус окружности и скорость движения НПА по ней выбираются исходя из динамических свойств самого НПА с таким условием, чтобы он двигался по окружности как можно меньшего радиуса с как можно большей скоростью. Причем очевидно, что в зависимости от направления разворота НПА таких дуг окружности может быть также две (см. рис. 3.14).

Положения этих дуг окружностей выбираются таким образом, чтобы последний прямолинейный участок траектории движения НПА к объекту являлся касательной к ним в точке P_1 . Касательной к этим дугам должны быть и проекции на рассматриваемую горизонтальную плоскость конечных участков траекторий возможного движения НПА к точкам P_{n1} и P_{n2} указанных дуг.

Если длина участка P_1P_0 (см. рис. 3.14) равна R_b , то координаты точки P_1 можно определить с помощью выражений $x_{P1} = x_{P0} - R_b \sin(\psi_0)$, $y_{P1} = y_{P0} + R_b \sin(\psi_0)$.

Для определения положения точек P_{n1} и P_{n2} на двух указанных окружностях вначале необходимо определить координаты их центров. Полагая, что они имеют радиус $\tilde{R}_c > R_c$, определенный с учетом динамических свойств НПА (см. выражение (3.23)) и скорости его движения во время разворота к объекту, координаты этих двух центров можно определить с помощью выражений (см. рис. 3.14):

$$\begin{aligned} x_{c1} &= x_{P1} - \widetilde{R}_c \sin(\psi_0), \quad x_{c2} = x_{P1} + \widetilde{R}_c \sin(\psi_0), \\ y_{c1} &= y_{P1} - \widetilde{R}_c \cos(\psi_0), \quad y_{c2} = y_{P1} + \widetilde{R}_c \cos(\psi_0), \end{aligned}$$
(3.26)

где x_{ci} , y_{ci} (*i* =1, 2) – координаты центров соответствующих окружностей.
Углы γ_i (*i* =1, 2) между проекциями на горизонтальную плоскость прямых, проведенных из центров окружностей в точку A_e , и проекциями на эту плоскость прямых, соединяющих точки P_{ni} дуг двух окружностей и начальную точку A_e , вычисляются по формуле:

$$\gamma_i = \arcsin\left(\frac{\tilde{R}_c}{\sqrt{(x_{ci} - x_{Az})^2 + (y_{ci} - y_{Az})^2}}\right).$$
 (3.27)

С помощью выражений (3.26) и (3.27) уже нетрудно получить соотношения для расчета координат точек *P*_{ni}:

$$x_{Pni} = \sqrt{(x_{ci} - x_{Ae})^2 + (y_{ci} - y_{Ae})^2 - \tilde{R}_c^2} \cos\left(\arctan\left((y_{ci} - y_{Ae})/(x_{ci} - x_{Ae})\right) \pm \gamma_i\right),$$

$$y_{Pni} = \sqrt{(x_{ci} - x_{Ae})^2 + (y_{ci} - y_{Ae})^2 - \tilde{R}_c^2} \sin\left(\arctan\left((y_{ci} - y_{Ae})/(x_{ci} - x_{Ae})\right) \pm \gamma_i\right)$$

для передней полусферы исходного положения НПА и

$$x_{Pni} = -\sqrt{(x_{ci} - x_{Az})^2 + (y_{ci} - y_{Az})^2 - \tilde{R}_c^2} \cos\left(\arctan\left((y_{ci} - y_{Az})/(x_{ci} - x_{Az})\right) \pm \gamma_i\right),$$

$$y_{Pni} = -\sqrt{(x_{ci} - x_{Az})^2 + (y_{ci} - y_{Az})^2 - \tilde{R}_c^2} \sin\left(\arctan\left((y_{ci} - y_{Az})/(x_{ci} - x_{Az})\right) \pm \gamma_i\right)$$

для задней полусферы исходного положения НПА. При этом знак перед γ_i зависит от выбора движения НПА по одной из двух возможных окружностей (см. рис. 3.14).

Как и при позиционном управлении НПА, в данном случае из двух рассчитанных возможных траекторий его движения к объекту (с учетом разворота на объект) в качестве желаемой также необходимо выбирать наименьшую по протяженности траекторию.

Для проверки работоспособности разработанных алгоритмов формирования программных сигналов движения НПА в режиме его подхода к объекту с заданной ориентацией было проведено математическое моделирование, при этом параметры НПА и его СУ принимались такими же, как в п.3.3.1, а параметры для вычисления промежуточных точек P_i имели следующие значения $R_L = 2.5$ м, $\psi_A = 20^0$.

Результаты математического моделирования подхода НПА с одним движителем к целевой точке с заданной ориентацией показаны на рис. 3.15 [20, 81,85].



Рис.3.15 Траектории движения НПА и процессы изменения его координат при подходе к объекту с различных направлений

В процессе моделирования считалось, что НПА в исходном положении имеет координаты (0, 0, 0) и $\psi = \theta = 0$, а целевая точка имеет координаты (50, 50, 20). На рис. 3.15а изображены три траектории движения НПА (в пространстве и в проекции на горизонтальную плоскость):

- по кратчайшей траектории (кривая 1) без задания определенной ориентации на объект *O*,

- подход к объекту *O* (кривая 2) под углом $\psi_0 = \pi/2$,

- подход к объекту O (кривая 3) под углом $\psi_0 = -\pi/2$.

Причем при движении НПА по траекториям 2 и 3 использовался закон формирования его программного движения на основе алгоритма построения ломаной линии разворота на объект (см. выражения (3.24) и (3.25)).

На рис. 3.15б показаны процессы изменения углов ψ и θ для указанных трех режимов движения НПА к объекту (кривые 1, 2 соответствуют траектории 1, кривые 3 и 4 – траектории 2, а кривые 5 и 6 - траектории 3).

Как видно из рис. 3.15, НПА, использующий только один движитель с изменяющейся ориентацией вектора тяги, может с высокой точностью перемещаться в заданную точку пространства с требуемой ориентацией. Однако для реализации данной возможности необходимо формировать программные сигналы движения, поступающие на его СУ с учетом ограничений, накладываемых на его маневренность.

3.3.3 Режим движения НПА по произвольной пространственной траектории

Помимо различных режимов движения НПА с одним движителем к заданной целевой точке важным является также режим его движения по пространственной траектории. Структура СУ и регуляторы для этого режима управления не отличаются от режима движения к заданной точке, однако реализация указанного режима движения имеет ряд особенностей.

Для точного отслеживания рассматриваемым НПА произвольных пространственных траекторий следует иметь в виду, что его движение в вертикальной плоскости возможно только тогда, когда момент $M_{\partial y}$, создаваемый его движителем в

этой плоскости, может преодолевать момент M_{zcy} остойчивости, существующий всегда при $\theta \neq 0$ и описываемый выражением (2.5).

Очевидно, что для постоянного преодоления НПА момента M_{acy} требуется наличие некоторого упора τ_{∂} движителя (см. выражения (3.1)-(3.2)), который приводит к появлению продольной скорости движения НПА, минимальная величина которой определяется величиной угла θ . Поэтому для правильного задания закона движения НПА (как функции времени) по выбранной пространственной траектории предварительно следует оценить минимальную скорость его продольного движения, необходимую для поддержания требуемого угла $\theta \neq 0$.

Для определения указанной наименьшей скорости движения НПА при его движении по заданной пространственной траектории будем полагать, что $\delta_d = \delta_{dmax}$. В этом случае при создании момента $M_{\partial y}$ проекция силы тяги движителя на ось x будет равна $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial} \cdot \cos(\delta_{d \max})$. Причем в установившемся режиме эта сила тяги равна силе гидродинамического сопротивления, направленной вдоль продольной оси НПА, т.е. с учетом первого уравнения (2.4) имеет место равенство:

$$F_{z\partial x} = -d_{1x}v_x - d_{2x}v_x/v_x = \tau_{\partial} \cdot \cos(\delta_{d\max}).$$
(3.28)

Из выражений (2.4), (2.5) и (3.28), учитывая, что $M_{ecy} = M_{dy}$, несложно получить соотношения

$$v_{x\min} > \frac{d_1 + \sqrt{d_1^2 + 4d_2(\frac{m_a g Y_c \sin \theta}{tg(\delta_{d\max})\overline{PG}})}}{2d_2}.$$
 (3.29)

При этом форма траекторий и режим движения НПА с одним поворотным движителем должна быть такой, чтобы учесть ограничения их маневренности, описываемые уравнениями (3.21), (3.23), (3.29) [152], а учет ограничений маневренности этих НПА при их движении по траекториям, формируемым в процессе их работы, могут обеспечиваться применением алгоритмов предективного формирования этих траекторий [90, 149].

Результаты моделирования движения НПА с одним поворотным маршевым движителем по сложной пространственной траектории показаны на рис. 3.16а и 3.16б.





Рис. 3.16. Траектория движения (a) и процессы изменения ошибок и углов ориентации НПА (б) при его перемещении по сложной пространственной траектории

На рис. 3.16а цифрами 1 и 2 изображены соответственно программное и фактическое движения НПА в пространстве, а также проекции этих траекторий на горизонтальную и вертикальную плоскости. Причем программная траектория движения задавалась с помощью соответствующих законов изменения пространственных координат НПА во времени. При этом проекция на ось *x* скорости движения НПА по указанной траектории во время всего его движения равнялась 1 м/с, а скорость его движения вдоль траектории была переменной.

На рис. 3.166 представлены ошибки слежения по каждой линейной координате $\varepsilon_x = x^* - x$, $\varepsilon_y = y^* - y$, $\varepsilon_z = z^* - z$ (кривые 1, 2, 3, соответственно), а также процессы изменения углов ψ (кривая 4) и θ (кривая 5) при движении НПА по указанной пространственной траектории. Следует отметить, что ошибки слежения по координатам x, y и z (см. рис. 3.16б) в основном обусловлены не отклонением НПА от желаемой траектории его движения, а временным запаздыванием в отслеживании движения программной точки, перемещающейся по этой желаемой траектории в соответствии с заданным законом. В этом легко убедиться, если сравнить, реальную траекторию движения НПА (см. кривую 2 на рис. 3.16а) с желаемой траекторией его движения (см. кривую 1 на рис. 3.16а). При этом максимальная величина отклонения реальной траектории движения НПА от его программной траектории движения по модулю нигде не превышала 0.8 м, что вполне достаточно для выполнения большинства операций. Но при увеличении скорости и кривизны траектории точность работы синтезированной СУ будет существенно снижаться, приводя к неприемлемо большим отклонениям НПА от предписанных траекторий. Указанное снижение точности движения НПА по пространственной траектории в этом случае происходит в основном из-за невозможности с помощью простых СУ быстро компенсировать взаимовлияния между степенями свободы HΠA, которые существенно возрастают с ростом скорости движения. Поэтому для обеспечения высокоточного движения таких НПА по всем участкам пространственной траектории необходимо разработать методы, повышающие точность этого движения за счет формирования новых программных сигналов и режимов движения, гарантирующих

движение НПА по заданной пространственной траектории с заданной точностью.

Следует отметить, что все полученные в данном подразделе результаты могут быть легко распространены на НПА с классической компоновкой движительного комплекса, состоящего из четырех кормовых движителей [1], так как указанные НПА обладают аналогичными ограничениями на маневренность и управляющие воздействия, что и НПА с одним поворотным движителем.

3.4 Выводы

В данной главе был предложен метод синтеза СУ движением НПА, имеющих обтекаемую форму, ограниченное количество степеней свободы и предназначенных для высокоскоростного и точного движения вдоль протяженных пространственных траекторий. Указанные НПА имеют уменьшенные величины взаимовлияний между их степенями свободы, что позволяет использовать в их СУ простые линейные регуляторы. При этом указанные СУ должны учитывать ограничения, накладываемые на маневренность НПА в процессе их движения к заданной точке пространственной траектории.

В качестве примера такого НПА был рассмотрен НПА с одним поворотным движителем, который позволяет создавать и ориентировать в нужном направлении силу тяги движителя, а также одновременно компенсировать опрокидывающий момент, действующий на НПА со стороны движителя.

В данной главе были получены следующие основные результаты.

1. Была разработана структура СУ НПА с одним поворотным движителем, которая позволяет обеспечить формирование необходимых сил тяги и моментов для управления движением этого НПА и одновременно компенсировать опрокидывающий момент, действующий со стороны винта движителя на НПА.

2. Был разработан метод решения обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя НПА, позволяющий без использования дополнительных логических условий формировать желаемые значения углов поворота электроприводов этого устройства ориентации. При этом указанный метод имеет

небольшую вычислительную сложность, так как в процессе вычисления используется небольшое количество тригонометрических операций.

3. Были разработаны подходы к формированию программных сигналов движения НПА для различных режимов: подход к произвольной целевой точке, подход к произвольной целевой точке с заданной ориентацией и движение по заданной пространственной траектории. Указанные подходы позволяют учитывать особенности формирования силы тяги и моментов с помощью поворотного движителя, а также учитывать ограничения маневренности рассматриваемого НПА. При этом указанные результаты могут быть распространены на НПА, которые обладают другой компоновкой движительного комплекса, например, состоящего из четырех кормовых движителей.

4. МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ ДВИЖЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В предыдущих разделах были разработаны методы синтеза высокоточных СУ движением для НПА двух типов: НПА с шестью степенями свободы, выполняющих точные операции вблизи объектов работ и НПА, имеющих обтекаемую форму, ограниченное количество степеней свободы и предназначенными для движения вдоль протяженных пространственных траекторий. При этом в процессе исследовании этих СУ было отмечено, что точность движения НПА по участкам пространственной траектории с большой кривизной существенно снижается при увеличении скорости этого движения. Это объясняется либо входом в насыщение отдельных движителей НПА, что характерно для НПА первого типа, либо снижением точности работы простых СУ, которые не могут быстро компенсировать увеличение взаимовлияний между степенями свободы НПА, что характерно для НПА второго типа. Для того чтобы избежать указанного снижения точности необходимо в процессе движения НПА так изменять программные сигналы, которые задают траекторию и режим движения НПА, чтобы их отработка с помощью бортовой СУ гарантировала бы заданную точность движения этого НПА по всем участкам пространственной траектории независимо от типа его СУ.

В данной главе разрабатываются методы формирования таких программных сигналов движения, которые позволяют обеспечить движение НПА по заданной пространственной траектории с максимально возможной скоростью при одновременном сохранении заданной точности этого движения.

4.1 Обоснование возможности обеспечения высокоточного управления движением НПА по заданной пространственной траектории на основе изменения программных сигналов его движения

Рассмотрим НПА, оснащенный системой управления вида:

$$u(t) = F_{\mu}(\varepsilon(t), X^{*}(t)), \qquad (4.1)$$

где $u(t) \in \mathbb{R}^n$ - вектор сигналов управления движителями НПА; n – количество движителей НПА; $X^*(t) = (x^*(t), y^*(t), z^*(t))^T \in \mathbb{R}^3$, $X(t) = (x(t), y(t), z(t))^T \in \mathbb{R}^3$ - соответственно, вектор координат целевой точки в абсолютной СК, определяющей желаемое положение НПА на пространственной траектории его движения, и вектор его текущего положения в этой СК; $\varepsilon(t) = X^*(t) - X(t) \in \mathbb{R}^3$ - вектор динамической ошибки движущегося НПА. Далее будем считать, что в процессе движения НПА по заданной пространственной траектории точность этого движения определяется только положение указанного НПА относительно заданной траектории, а его ориентация является несущественной. При этом выражение (4.1) может описывать различные типы СУ НПА: линейные, нелинейные, робастные и т.д.

Пусть вектор $X^*(t)$ формируется с помощью выражения [34]:

$$\dot{X}^{*}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ g'_{y}(x^{*}) \\ g'_{z}(x^{*}) \end{bmatrix} \Phi(x^{*})\upsilon^{*} = f_{v}(x^{*})\upsilon^{*}, \qquad (4.2)$$

где
$$\Phi(x^*) = (1 + (g'_y(x^*))^2 + (g'_z(x^*))^2)^{-1/2};$$
 $g'_y(x^*) = \frac{\partial g_y(x^*)}{\partial x^*}, \quad g'_z(x^*) = \frac{\partial g_z(x^*)}{\partial x^*};$

 $g_y(x^*), g_z(x^*)$ - функции, описывающие заданную траекторию движения НПА в вертикальной и горизонтальной плоскостях, соответственно; v^* - программная скорость движения НПА вдоль заданной траектории.

Сформированные на основе выражений (4.2) программные сигналы представляют собой сложные зависимости от времени. Указанные сигналы подаются на вход СУ НПА, которая формирует такой вектор *и* сигналов управления, который стремиться обнулить динамическую ошибку управления $\varepsilon(t)$, что позволит обеспечить точное движение НПА по заданной траектории.

Очевидно, что величины элементов вектора $\varepsilon(t)$ зависят от программной скорости движения НПА по заданной траектории, которая будет определять скорость

изменения во времени программных сигналов (см. выражение (4.2)). Также указанные величины элементов вектора $\varepsilon(t)$ зависят от кривизны текущего участка траектории, так как при движении по криволинейным участкам НПА должен одновременно двигаться по нескольким линейным и вращательным степеням свободы, что приводит к появлению сил взаимовлияния между ними, отрицательно влияющих на точность работы СУ НПА. Кроме того, динамическая ошибка работы СУ НПА зависит от типа этой СУ, вектора Q_{UV} параметров НПА и вектора F_{ε} внешних воздействий:

$$\varepsilon(t) = F_{\varepsilon}(X^{*}(t), F_{u}(\cdot), Q_{UV}, F).$$
(4.3)

Если НПА движется по криволинейной траектории, то наличие вектора $\varepsilon(t) \neq 0$ приводит также и к появлению ненулевого вектора $\varepsilon_n(t) \in \mathbb{R}^n$ (см. рисунок 4.1) его отклонения от самой заданной траектории (от точки X_n). Причем элементы вектора $\varepsilon_n(t)$ будут являться функциями векторов $X(t), \varepsilon(t)$ и текущих параметров заданной траектории движения НПА:

$$\varepsilon_n(t) = F_n(X(t), g_v(\cdot), g_z(\cdot), \varepsilon(t)).$$
(4.4)



Рисунок 4.1 Схема движения НПА по пространственной траектории

Следует отметить, что в случае движения НПА по пространственной траектории точность этого движения следует определять величиной отклонения НПА от указанной траектории, а не величиной динамической ошибки. При этом между указанными величинами всегда будет выполняться условие:

$$0 \le \|\varepsilon_n\| \le \|\varepsilon\|. \tag{4.5}$$

Из выражений (4.3) и (4.4) видно, что при заданной траектории движения НПА уменьшать величину $\|\varepsilon_n\|$ можно, уменьшая $\|\varepsilon\|$. Традиционный подход решения указанной задачи заключается в создании более сложных и точных СУ, которые позволят обеспечить уменьшение динамической ошибки за счет более точного учета динамики НПА. Однако это приведет к сложностям в реализации созданных СУ на бортовом компьютере НПА, и при этом все равно остается проблема входа движителей НПА в насыщение при отработке сигналов управления, сформированных этой СУ, особенно при его движении с высокой скоростью.

Другой подход к повышению точности движения НПА по заданной траектории без изменения типа их СУ, как следует из выражения (4.3), заключается в изменении параметров программного сигнала $X^*(t)$. Далее определим возможные пути изменения параметров этого сигнала, обеспечивающие высокоскоростное и высокоточное движение НПА по заданной пространственной траектории. При этом будем полагать, что условие точного движения НПА по заданной траектории определяется следующим выражением:

$$||\varepsilon_n(t)|| \le \varepsilon_{\partial on} , \qquad (4.6)$$

где \mathcal{E}_{don} - допустимое отклонение НПА от заданной траектории его движения.

Как видно из выражения (4.2) программный сигнал $X^*(t)$, а следовательно, и величина динамической ошибки $\varepsilon(t)$, зависят от программной скорости υ^* движения НПА. Чем выше указанная скорость движения, тем большую величину имеют сигналы управления, поступающие на движители НПА. Кроме того, как было отмечено выше, движение с повышенной скоростью по криволинейным участкам траектории требует одновременного изменения нескольких угловых и линейных координат НПА, что, в свою очередь, вызывает увеличение негативных взаимовлияний между каналами управления этих НПА. Необходимость компенсации этих взаимовлияний также требует формирования сигналов управления повышенной величины. В результате движители НПА по отдельным его степеням свободы могут входить в насыщение, и возможен сходит НПА с заданной траектории.

Для исключения этой ситуации необходимо снижать программную скорость движения НПА по участкам траекторий с большой кривизной. При этом во время его движения по участкам траекторий с небольшой кривизной или по прямолинейным участкам указанные негативные эффекты проявляются гораздо слабее, что позволяет увеличить программную скорость движения, не опасаясь схода НПА с заданной траектории.

Другим подходом к изменению программного сигнала движения НПА является формирование такой новой программной траектории $\tilde{X}^*(t) = F_T(X^*(t), \varepsilon(t))$, которая с учетом величины $\varepsilon(t)$ динамической ошибки, обусловленной использованием СУ НПА, приводила бы к движению этого НПА по исходной траектории $X^*(t)$ с заданной точностью (см. неравенство (4.6)). При этом необходимым условием работоспособности указанного подхода является наличие запаса мощности движителей НПА, так как в этом подходе не предусматривается настройка программной скорости движения.

Таким образом, возможно два подхода к изменению программных сигналов для обеспечения точного движения НПА по заданной траектории. Первый подход заключается в изменении программной скорости движения НПА в зависимости от кривизны текущего участка траектории, что позволит учесть выход в насыщение исполнительных устройств, а также повысить скорость движения НПА на участках траектории с небольшой кривизной. Второй подход заключается в формировании новой программной траектории движения на основе заданной, учитывающей точность работы СУ НПА, что позволит обеспечить желаемую точность движения НПА по исходной траектории независимо от типа использующейся СУ. Однако этот метод не позволяет учитывать насыщения движителей НПА, что в отдельных случаях приведет к сходу НПА с заданной траектории. Поэтому наиболее целесообразно применять эти два подхода совместно: подход на основе изменения программной

траектории позволит гарантировать точное движение НПА по указанной траектории даже при использовании простых СУ, а подход основанный на изменении программной скорости движения НПА позволит учесть насыщения его движителей и обеспечить движение НПА с максимально возможной скоростью. В результате совместное использование указанных подходов позволит синтезировать СУ НПА, обеспечивающие высокоскоростное и высокоточное движение НПА по сложным пространственным траекториям.

Далее разработаем методы формирования программных сигналов движения НПА, основанные на выявленных подходах.

4.2 Метод автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории

Ранее отдельными авторами уже предпринимались попытки разработки алгоритмов настройки программной скорости движения НПА. В работе [34] на основе соотношений полученных кинематических vже предлагался подход К автоматическому формированию скорости движения НПА по заданным траекториям. Однако этот подход не позволяет учесть ограничения мощности исполнительных движителей и динамику самого НПА. А это, как показывают выполненные исследования, приводит к появлению существенного отклонению аппарата от заданной траектории. В работе [208] желаемый режим движения НПА по заданной траектории формируется на основе уравнений динамики И кинематики, описывающих работу этого НПА и его движительного комплекса. Однако в этой работе строится разомкнутая СУ, которая не обеспечивает точного результирующего движения $H\Pi A.$ Поэтому возникает необходимость в разработке метода формирования программной скорости движения НПА, избавленного от указанных недостатков.

Исходя из вышесказанного, задачу синтеза метода формирования программной скорости НПА при его движении по заданной пространственной траектории можно сформулировать следующим образом. Пусть НПА содержит СУ вида (4.1) на вход которой подается программный сигнал, формируемый с помощью выражения (4.2).

Необходимо выбрать такой закон изменения программной скорости движения этого НПА по заданной траектории (4.2), при которой неизменно обеспечивалось бы выполнение неравенства (4.6). То есть для уменьшения отклонения НПА от программной траектории движения предлагается использовать такой закон управления, который обеспечивал бы формирование необходимой скорости перемещения этого аппарата по пространственной траектории с учетом кривизны отдельных ее участков.

Для решения поставленной задачи можно использовать два подхода. Первый заключается в предварительном расчете профиля программной скорости движения НПА вдоль заданной траектории. Его можно реализовать, используя выражения (4.2), (4.3), (4.4) и (4.6) для получения выражения вида:

$$\varepsilon_{\partial on} = \|\varepsilon_n(t)\| = \|F_n(v^*, F_u(\cdot), Q_{UV}, g_v(\cdot), g_z(\cdot), \varepsilon(t))\|.$$

$$(4.7)$$

Разрешая уравнение (4.7) относительно v^* , можно получить профиль изменения программной скорости движения НПА вдоль заданной пространственной траектории, обеспечивающей максимально быстрое движение этого НПА по указанной траектории при одновременном выполнении условия (4.6). Однако выражение (4.7) представляет собой сложное нелинейное дифференциальное уравнение, решение которого в реальном масштабе времени крайне затруднительно. Поэтому профиль вдоль заданной траектории программной скорости движения необходимо рассчитывать заранее, перед началом движения НПА. Кроме того, для корректного решения указанного уравнения необходимо полностью знать параметры НПА, что обычно является невыполнимым. Также следует отметить, что часто заранее невозможно знать даже вид траектории движения НПА, так как она может меняться в процессе выполнения им подводных операций в заранее неизвестном окружении (обход препятствий, подход к обнаруженному объекту и т.д.).

Второй способ предполагает использование методов теории автоматического управления для формирования программной скорости движения НПА в зависимости от величины его текущего отклонения от заданной траектории. Для реализации

указанного подхода в СУ НПА создается дополнительный контур управления, обеспечивающий автоматическое формирование $v^*(t)$ в зависимости от текущего отклонения НПА относительно заданной траектории (4.2). При этом значение программной скорости $v^*(t)$ должно формироваться таким образом, чтобы неизменно обеспечивалось выполнение неравенства (4.6).

Обобщенная структурная схема предлагаемой системы автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданным пространственным траекториям показана на рис. 4.2 [51, 53, 93, 111]. Перед началом работы этой системы задается описание желаемой траектории движения НПА (выражения (4.2)), величина ε_{on} опорного отклонения НПА от заданной траектории, а также вектор $X_0^* = (x_0^*, y_0^*, z_0^*)^T$ начальной точки этой траектории. Причем значение $\varepsilon_{on} < \varepsilon_{don}$ заведомо выбирается таким, чтобы в процессе движения НПА неизменно выполнялось условие (4.6).



Рис. 4.2 Обобщенная структурная схема системы автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории

С использованием текущих значений элементов векторов $X^*(t)$ и X(t) формируется сигнал [93, 153, 154]

$$E(t) = k_{\varepsilon} \varepsilon_m(t) + \varepsilon_n(t), \qquad (4.8)$$

который служит для оценки точности движения НПА по заданной траектории. Вид этого сигнала будет пояснен ниже. В выражении (4.8) используются следующие обозначения: $\varepsilon_m(t) = ||\varepsilon(t)||$ - Евклидова норма вектора $\varepsilon(t)$; $k_{\varepsilon} = const$ положительный коэффициент, определяемый с помощью выражения $k_{\varepsilon} = \varepsilon_{on} / \varepsilon_m^{\partial on}$, где $\varepsilon_m^{\partial on}$ - допустимое значение $\varepsilon_m(t)$.

После включения системы (см. рис. 4.2) в зависимости от начальных значений векторов $X_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ и $X_0^* = (x_0^*, y_0^*, z_0^*)^T$ регулятор R (о его выборе будет сказано ниже) формирует сигнал желаемого значения $\upsilon^*(t)$. На основе этого сигнала с использованием выражений (4.2) в блоке формирования программных сигналов рассчитываются элементы вектора $X^*(t) = (x^*(t), y^*(t), z^*(t))^T$, которые поступают на вход СУ НПА и позволяют получить сигнал u(t) (см. выражение (4.1)), управляющий всеми его движителями. Работа системы оканчивается после подхода НПА к конечной точке программной траектории, когда начинает выполняться условие $x^* \ge x_{max}^*$, или при обнулении сигнала $\upsilon^*(t)$ на выходе регулятора R с помощью нулевого сигнала S (см. рис. 4.2).

Величина $\mathcal{E}_n(t)$ в (4.8), формируемая на выходе блока формирования отклонения (БФО) НПА от заданной траектории, вычисляется как расстояние от текущего положения НПА (вектор *X*) до ближайшей точки траектории X_n (x_n, y_n, z_n) (см. рис. 4.1).

Значение желаемой скорости υ^* движения НПА (см. рис. 4.2) формируется на выходе регулятора *R*, на вход которого поступает сигнал $\xi(t) = \varepsilon_{on}$ - E(t). После интегрирования выражения (4.2) в блоке формирования программных сигналов с учетом значения υ^* несложно определить текущие величины элементов вектора $X^*(t)$.

Регулятор *R* работает следующим образом [83, 93, 98]. Если $\xi(t) < 0$, то справедливо неравенство $E(t) > \varepsilon_{on}$. В этом случае *R* будет уменьшать $\upsilon^*(t)$. Это приведет к уменьшению $||\varepsilon(t)||$, а также согласно (4.5) и (4.8) - к уменьшению $\varepsilon_n(t)$ и E(t). Если $\xi(t) > 0$, то $E(t) < \varepsilon_{on}$ и, следовательно, есть возможность увеличить

скорость движения НПА по траектории. В последнем случае регулятор R будут увеличивать значение $\upsilon^*(t)$. Однако величина υ^* никогда не должна быть отрицательной. То есть всегда должно выполняться условие

$$\upsilon^{*}(t) = \begin{cases} \upsilon^{*}(t), & e c \pi u \ \upsilon^{*}(t) > 0\\ 0, & e c \pi u \ \upsilon^{*}(t) < 0 \end{cases}$$
(4.9)

Выполнение условия (4.9) особенно важно в начале движения НПА, когда ввиду возможного большого начального рассогласования между исходным положением НПА и начальной точкой на траектории его последующего движения величина E(t) может оказаться слишком большой и сигнал $\xi(t)$ будет иметь большое отрицательное значение. В этой ситуации выполнение условия (4.9) позволит зафиксировать положение желаемой точки X^* на траектории до тех пор, пока НПА с помощью своей следящей системы не подойдет к ней на расстояние, меньшее ε_{on} . Только после этого $v^*(t)$ начнет увеличиваться, обеспечивая перемещение НПА по заданной пространственной траектории.

Следует отметить, что при формировании $\xi(t)$ сигнал E(t) (см. выражение (4.8)), который включает в себя две составляющие: $\varepsilon_n(t)$ и $\varepsilon_m(t)$, можно было бы заменить только сигналом $\varepsilon_n(t)$. Однако на отдельных участках траектории движения НПА это приводило бы к недопустимо большому увеличению сигнала υ^* , который значительно снижал бы точность движения НПА по всей траектории. Этот факт можно пояснить с помощью рис. 4.3 [93].

Предположим, что желаемая траектория движения НПА имеет протяженный прямолинейный участок (участок AB на рис 4.3). При движении НПА по этому участку наличие $|| \varepsilon || \neq 0$ не приводит к его отклонению от желаемой траектории $(\varepsilon_n(t)=0)$, так как вектор $\varepsilon(t)$ на указанном участке направлен вдоль траектории (точки X_1 и X_1^* на рис. 4.3). Поэтому на указанном прямолинейном участке траектории движения НПА всегда выполнялось бы неравенство

 $\xi(t) = \varepsilon_{on} - \varepsilon_n(t) = \varepsilon_{on} > 0$, что приводило бы к неограниченному увеличению $\upsilon^*(t)$. А это, в свою очередь, приводило бы к недопустимо большому увеличению $||\varepsilon(t)||$, в том числе и по причине входа исполнительных движителей в насыщение.



Рис. 4.3 Особенности движения НПА по различным участкам пространственной траектории

Если точка $X^*(t)$ с высокой скоростью при большом значении $|| \varepsilon(t) ||$ выйдет на криволинейный участок траектории (см. участок ВС на рис.4.3), то используемая СУ уже не сможет обеспечить точное прохождение НПА по всем участкам этой криволинейном траектории. Это объясняется тем, что регулятор *R* начнет уменьшать $\upsilon^*(t)$ только тогда, когда будет выполняться неравенство $\varepsilon_{on} - \varepsilon_n(t) < 0$ (см. точку X_2 рис. 4.3). Но при этом программная точка $X_2^*(t)$ уже может пройти пик траектории. Кроме того, постоянная ориентация НПА на ушедшую вперед точку $X^*(t)$ не позволит ему пройти по всей программной траектории. В результате значительный участок этой траектории будет «срезан» (см. точки $X_3^*(t)$ и $X_3(t)$), то есть задача точного прохождения НПА по всей траектории выполнена не будет.

Следовательно, при формировании величины $\upsilon^*(t)$ необходимо специально вводить ее ограничение, а значит и ограничение величины $||\varepsilon(t)||$ (особенно на прямолинейных участках траекторий движения НПА). Для этого при формировании сигнала E(t) помимо $\varepsilon_n(t)$ необходимо учитывать и значение $||\varepsilon(t)||$ (см. выражение (4.8)). При этом первое слагаемое в выражении (4.8) будет являться определяющим при движении НПА по прямолинейным участкам траектории, а второе – при его движении по участкам траектории с большой кривизной. Указанное свойство системы позволяет косвенно учесть не только ограничение мощности используемых движителей, но также динамические свойства НПА и инерционность его СУ. Все это повышает точность отработки НПА любых участков произвольных пространственных траекторий.

После определения основных особенностей предлагаемой системы автоматического формирования программной скорости движения НПА, рассмотрим задачу выбора регулятора *R* этой скорости.

4.2.1 Метод синтеза регулятора программной скорости движения НПА

Перед синтезом регулятора *R* следует построить математическую модель объекта управления, на вход которого подается сигнал v^* , а на выходе формируется величина Е, вычисляемая по выражению (4.8). Этот объект включает в себя блок формирования задающих сигналов (он описывается выражением (4.2)), СУ НПА и сам НПА (см. рис. 4.2). Очевидно, что модель указанного объекта управления, включающая сложные вычисления $\varepsilon(t)$ и $\varepsilon_n(t)$, является нелинейной. При этом вид траектории движения НПА заранее неизвестен. Использовать эту модель для синтеза регулятора *R* весьма затруднительно. Поэтому, как будет показано ниже, для упрощения процедуры синтеза, полагая, что параметры объекта меняются незначительно за время протекания переходных процессов, вместо сложных нелинейных преобразований в указанной модели целесообразно использовать некоторые переменные коэффициенты, значения которых меняются в известных диапазонах [93, 153]. При этом регулятор R должен обеспечивать заданные показатели качества регулирования величины Е для всех возможных комбинаций значений этих коэффициентов. В этом случае регулятор *R* удается синтезировать независимо от формы траектории движения НПА, а его вид существенно упрощается.

Вначале оценим величину *E* рассматриваемой системы (см. рис. 4.2). Используя неравенство (4.5), можно записать

$$\varepsilon_n = k_e \varepsilon_m, \tag{4.10}$$

где $0 \le k_e \le 1$. Подставив (4.10) в (4.8), получим

$$E = (k_{\varepsilon} + k_{e})\varepsilon_{m} = \widetilde{k}_{e}\varepsilon_{m} , \qquad (4.11)$$

где $k_{\varepsilon} \leq \tilde{k}_{e} \leq k_{\varepsilon} + 1.$

Использование величины \mathcal{E}_m приводит к большим затруднениям при синтезе регулятора R, поэтому для упрощения процесса синтеза заменим ее величиной $\tilde{\mathcal{E}}_m = |\mathcal{E}_x| + |\mathcal{E}_y| + |\mathcal{E}_z|$, где $\mathcal{E}_x, \mathcal{E}_y, \mathcal{E}_z$ - соответствующие элементы вектора $\mathcal{E}(t)$. Для указанной замены воспользуемся тем фактом, что нормы векторов $||a||_1 = \sum_{i=1}^n |a_i|$ и

$$||a||_2 = (\sum_{i=1}^{n} |a_i|^2)^{1/2}$$
 удовлетворяют неравенству [22]:

$$\|a\|_{2} \le \|a\|_{1} \le n^{1/2} \|a\|_{2}.$$
(4.12)

Из выражения (4.12) следует справедливость равенства:

$$\varepsilon_m = k_m \widetilde{\varepsilon}_m, \tag{4.13}$$

где коэффициент k_m удовлетворяет неравенству $1/\sqrt{3} \le k_m \le 1$.

Будем полагать, что с учетом незначительной скорости изменения параметров НПА использование СУ (4.1) позволяет описать динамику его движения по каждой поступательной степени свободы передаточными функциями $W_x(s)$, $W_y(s)$, $W_z(s)$. Поскольку передаточные функции относительно ошибок по каждой степени свободы НПА имеют вид

$$W_{\varepsilon x}(s) = 1 - W_x(s), W_{\varepsilon y}(s) = 1 - W_y(s), W_{\varepsilon z}(s) = 1 - W_z(s),$$

то с учетом равенства |a| = sign(a)a, а также выражений (4.11), (4.12) и (4.13) можно записать

$$E(s) = \left[sign(\varepsilon_x)W_{\varepsilon x}(s)x^*(s) + sign(\varepsilon_y)W_{\varepsilon y}(s)y^*(s) + sign(\varepsilon_z)W_{\varepsilon z}(s)z^*(s)\right]k_m \widetilde{k}_e.$$
(4.14)

Если предположить, что используемая СУ (4.1) позволяет описать динамику НПА по каждому каналу управления одинаковыми передаточными функциями $W(s) = W_x(s) = W_y(s) = W_z(s)$, то выражение (4.14) примет вид

$$E(s) = k_m \tilde{k}_e W_{\varepsilon}(s) (sign(\varepsilon_x) x^*(s) + sign(\varepsilon_y) y^*(s) + sign(\varepsilon_z) z^*(s)), \qquad (4.15)$$

где $W_{\varepsilon}(s) = 1 - W(s)$.

Из выражений (4.2) несложно получить:

$$\dot{y}^{*}(t) = \frac{dg_{y}(x^{*})}{dx^{*}}\frac{dx^{*}}{dt} = \frac{g_{y}'(x^{*})}{\Phi(x^{*})}\upsilon^{*}(t), \\ z^{*}(t) = \frac{dg_{z}(x^{*})}{dx^{*}}\frac{dx^{*}}{dt} = \frac{g_{z}'(x^{*})}{\Phi(x^{*})}\upsilon^{*}(t).$$
(4.16)

Из выражения (4.16), записанного в области изображений, непосредственно следует

$$x^{*}(s) = k_{vx}\upsilon^{*}(s)/s, \ y^{*}(s) = k_{vy}\upsilon^{*}(s)/s, \ z^{*}(s) = k_{vz}\upsilon^{*}(s)/s, \ (4.17)$$

где
$$k_{vx} = 1/\Phi(x^*), k_{vy} = \left(\frac{dg_y(x^*)}{dx^*}\right)/\Phi(x^*), k_{vz} = \left(\frac{dg_z(x^*)}{dx^*}\right)/\Phi(x^*)$$
 - текущие значения

соответствующих функций, изменения которых незначительны за время переходных процессов, протекающих в каждом канале управления НПА.

С учетом (4.17) выражение (4.15) можно преобразовать к виду

$$E(s) = k_m \tilde{k}_e \frac{W_{\varepsilon}(s)}{s} (sign(\varepsilon_x)k_{vx} + sign(\varepsilon_y)k_{vy} + sign(\varepsilon_z)k_{vz})\upsilon^*(s).$$
(4.18)

Так как НПА является инерционным объектом управления, то формируемая программная точка всегда будет опережать текущее положение НПА. Это означает, что, когда скорость движения НПА по соответствующей координате отрицательна, то желаемое значение этой координаты меньше, чем ее текущее значение, и, наоборот, при положительной скорости, значение желаемой координаты будет всегда больше, чем ее текущее значение. Поэтому можно утверждать, что знак желаемой скорости движения НПА по соответствующей координате совпадает со знаком динамической ошибки по этой координате. Исключения составляют малые участки траекторий, на которых происходит изменение знака скорости движения НПА по отдельным координатам, например, на резких изгибах этих траекторий. Несовпадения знака динамической ошибки НПА по соответствующей координате со знаком желаемой скорости движения на воротких промежутках времени, поэтому в дальнейших рассуждениях их можно не учитывать.

С учетом вышесказанного, а также того, что $\Phi(x^*) > 0$, предпоследний сомножитель выражения (4.18) может быть представлен в виде

$$k_{v}^{*} = |k_{vx}| + |k_{vy}| + |k_{vz}|.$$
(4.19)

Из выражений (4.2) и (4.17) видно, что для величин k_{vx}, k_{vy}, k_{vz} всегда будет выполняться равенство $(k_{vx}^{2} + k_{vy}^{2} + k_{vz}^{2})^{1/2} = 1$. Поэтому, с учетом неравенства (4.12) можно записать:

$$1 \le k_{\nu}^* \le \sqrt{3}$$
. (4.20)

В результате с учетом выражений (4.18) - (4.20) и введенных допущений математическая модель части системы, которая будет использована для расчета регулятора *R*, приближенно может быть представлена в виде [93, 153]:

$$E(s) = k_v^* k_m \tilde{k}_e \frac{W_{\varepsilon}(s)}{s} \upsilon^*(s), \qquad (4.21)$$

где $k_{\varepsilon}\sqrt{3}/3 \le \widetilde{k}_e k_m k_v^* \le (1+k_{\varepsilon})\sqrt{3}$.

Синтез регулятора *R*, формирующего значения программной скорости υ^* движения НПА по задаваемой траектории, будем выполнять с учетом того, что на его борту используется децентрализованная система управления вида (2.28), (2.56), (2.119), которая позволяет описать пространственное движение этого НПА по всем поступательным степеням свободы с помощью матричного дифференциального уравнения

$$\ddot{X} + C_U \dot{X} + KX = C_U \dot{X}^* + KX^* , \qquad (4.22)$$

где $C_U \in R^{3\times 3}$, $K_U \in R^{3\times 3}$ - диагональные матрицы с положительными элементами. Из уравнения (4.22) несложно получить передаточные функции по ошибке

$$W_{\varepsilon}(s) = \frac{s^2}{s^2 + c_{\mu}s + k_{\mu}},$$
(4.23)

для каждого канала управления поступательным движением НПА, где $c = c_i > 0$, $k_u = k_{ui} > 0$, $i = (\overline{1,3})$ – элементы матриц C_U и K_U , соответственно.

С учетом выражений (4.21) и (4.23) передаточная функция части системы (см. рис 4.2) может быть представлена в виде

$$W_{p}(s) = E(s)/\upsilon^{*}(s) = \tilde{k}_{e}k_{m}k_{v}^{*}s/(s^{2} + c_{u}s + k_{u}).$$
(4.24)

Очевидно, что, если передаточная функция регулятора *R*(*s*) будет иметь вид

$$R(s) = k_r \frac{T_r s + 1}{s},\tag{4.25}$$

то с учетом выражения (4.24) передаточная функция разомкнутой цепи системы автоматического формирования скорости движения НПА будет описываться выражением:

$$W_r(s) = R(s)W_p(s) = \frac{k_r \tilde{k_e} k_m k_v^* (T_r s + 1)}{s^2 + c_u s + k_u}.$$
(4.26)

Как видно из выражения (4.26), устойчивость системы после ее замыкания отрицательной обратной связью не будет зависеть от величины коэффициентов $k_r, \tilde{k}_e, k_m, k_v^*$. Поэтому параметры регулятора $R - k_r$ и T_r можно выбирать любыми в зависимости от требуемых показателей качества работы системы. Но чем больше будет значение коэффициента k_r , тем меньше будет отклонение величины E от ε_{on} , и тем ближе к ε_{don} можно будет выбирать ε_{on} .

Помимо описанного выше метода синтеза регулятора программной скорости движения НПА можно использовать подход, основанный на нечеткой логике [110], который позволяет обеспечить учет ограничений, накладываемых на величину этой программной скорости, а также осуществить синтез и настройку этого регулятора без использования математической модели ОУ для этого регулятора.

Кроме того, проведенные исследования показывают, что предложенный метод формирования программной скорости можно использовать не только для НПА, но и для других робототехнических систем, в частности, многозвенных манипуляторов [97, 99].

4.2.2 Исследование системы формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории

Для проверки работоспособности и эффективности разработанной системы формирования программных сигналов управления движением НПА было проведено моделирование ее работы. При этом полагалось, что в состав НПА (см. рис. 4.2) уже включена децентрализованная СУ (см. выражения (2.28), (2.56) и (2.18)), которая позволяет описать его динамические свойства с помощью уравнения, аналогичного (4.22), при движении одновременно по трем степеням свободы: перемещение вдоль горизонтально расположенных осей *x*, *y* абсолютной системы координат и вращение вокруг ее вертикальной оси *z*. Кроме того, полагалось, что НПА имеет одинаковые движители, которые описываются апериодическими звеньями. Силы тяги этих движителей и вращающий момент создаются независимо по каждой степени свободы НПА. На величины тяг и момента, развиваемых этими движителями, накладывались следующие ограничения: $|\tau_{\partial x}| \leq 200 \ H$, $|\tau_{\partial z}| \leq 100 \ H$, $|M_{\partial y}| \leq 10 \ H \cdot M$.

При моделировании использовалась математическая модель НПА (2.1)-(2.6). Параметры этой модели имеют следующие величины: масса НПА $m_a = 100 \ \kappa c$; моменты инерции НПА относительно его главных осей инерции: $J_{xx}= 2 \ \kappa c \ m^2$, $J_{yy} = 10 \ \kappa c \ m^2$, $J_{zz} = 10 \ \kappa c \ m^2$; коэффициенты гидродинамических сопротивлений при движении НПА $d_{2x} = 50 \ \kappa c \ m^1$, $d_{2y} = 100 \ \kappa c \ m^1$, $d_{2z} = 100 \ \kappa c \ m^1$, $d_{1x} = 25 \ \kappa c \ c^1$, $d_{1y} = 50 \ \kappa c \ c^{-1}$, $d_{1z} = 50 \ \kappa c \ c^{-1}$, $d_{2x}' = 8 \ H \ m \ c^2$, $d_{2y}' = 15 \ H \ m \ c^2$, $d_{1x}' = 4 \ H \ m \ c$, $d_{1y}' = 7,5 \ H \ m \ c$, $d_{1z}' = 7,5 \ H \ m \ c^2$, $d_{2y} = 15 \ H \ m \ c^2$, $d_{1x} = 4 \ H \ m \ c$, $d_{1y}' = 7,5 \ H \ m \ c$, $d_{1z}' = 7,5 \ H \ m \ c^2$, $d_{5} = 1 \ \kappa c \ m^2$, $\lambda_6 = 1 \ \kappa c \ m^2$; метацентрическая высота $Y_c = 0.02 \ m$; постоянная времени движителей $T_0 = 0.1 \ c$. Параметры СУ по каждому каналу управления НПА выбирались такими, чтобы их динамические свойства, как по линейным, так и по вращательным степеням свободы были одинаковыми. При этом элементы матриц *C* и *K* в уравнении (4.22) имели следующие значения: $k_{ui} = 1$, $c_{ui} = 0.3$, $i = \overline{1,3}$, параметры регулятора R(s) – значения $k_r = 10$, $T_r = 0.5c$, $k_c = 0.2$, a $\varepsilon_{an} = 0.2 \ m$.

В процессе моделирования исследовалось указанное плоское горизонтальное движение НПА по траектории, описываемой уравнением $y^*(t) = 10\sin(\pi x^*(t)/20)$, где значение $x^*(t)$ формировалось с использованием выражения

$$\dot{x}^{*}(t) = \frac{\upsilon^{*}(t)}{\left(1 + (\pi/2\cos(\pi x^{*}(t)/20)^{2})^{1/2}\right)},$$

построенного на основе (4.2). При этом полагалось, что $x_0^* = 0$ и $y_0^* = 0$, а при движении НПА его продольная ось всегда направлена на перемещающуюся программную точку. С учетом последнего желаемый угол курса НПА рассчитывался с помощью выражения (3.18).

На рис. 4.4 показан процесс изменения величин $\dot{x}^*(t)$, $\dot{x}(t)$, $\dot{y}^*(t)$, $\dot{y}(t)$, а также $\upsilon^*(t)$ и $\upsilon(t) = (\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{1/2}$ в системе, изображенной на рис. 4.2 [93, 100].



Рис. 4.4. Процессы изменения $\dot{x}^{*}(t)$, $\dot{x}(t)$, $\dot{y}^{*}(t)$, $\dot{y}(t)$, $v^{*}(t)$ и v(t) при движении НПА

Как видно из рис. 4.4, при входе соответствующих движителей НПА в ограничения для сохранения требуемой точности его движения по программной траектории происходило автоматическое уменьшение программной скорости движения НПА по этой траектории. При этом программная скорость $\upsilon^*(t)$ его движения менялась от 0.85 м/с до 2,2 м/с, а реальная $\upsilon(t)$ – от 0.9 м/с до 2 м/с, что объяснялось наличием соответствующих ограничений движителей, а также инерционностью самого НПА и его СУ.

На рис. 4.5 показаны процессы изменения величин $\upsilon^*(t)$, $\upsilon(t)$, $\varepsilon_n(t)$, E(t) и y(t) при движении НПА по рассматриваемой траектории. Из этого рисунка видно, что минимальное и максимальное значения $\upsilon^*(t)$ формируются при движении НПА по участкам траектории с максимальной и минимальной кривизной, соответственно (см.

кривую y(t)). При этом на участках траектории, близких к прямолинейным, $\varepsilon_n \to 0$, значение $\upsilon^*(t)$ возрастает, а реальная скорость $\upsilon(t)$ движения НПА достигает максимума, поскольку его движители входят в насыщение, что приводит к резкому возрастанию ε_m и увеличению E(t). В результате E(t) становится больше ε_{on} и величина $\upsilon^*(t)$ начинает снижаться. Следует отметить, что на всех участках траектории выполнялось неравенство $\varepsilon_n(t) < \varepsilon_{on}$, то есть для рассматриваемого случая можно выбирать $\varepsilon_{on} = \varepsilon_{don}$.



 $v^*(t) = scale(M/c); v(t) = scale(M/c); y(t) = scale \cdot 5(M); \varepsilon_n(t) = scale \cdot 0.2(M); E(t) = scale \cdot 0.2(M)$ Рис.4.5 Процессы изменения $v^*(t)$, y(t), $\varepsilon_n(t)$, E(t) при использовании системы автоматического формирования программных сигналов движения НПА

Для сравнения на рис. 4.6 представлены результаты моделирования движения НПА по той же самой траектории, но уже без использования системы автоматического формирования программной скорости его движения. При этом подбиралось такое значение $v^*(t) = 0.9 \text{ м/c} = \text{const}$, при котором на любых участках указанной траектории движения НПА всегда обеспечивалось выполнение условия $\varepsilon_n(t) < \varepsilon_{on}$. Из этого рисунка видно, что при движении НПА по указанной траектории с выбранной постоянной программной скоростью υ^* величина ε_n также не превышает 0.2 м. Однако для прохождения одного периода участка траектории тратится не 45, как для системы с автоматическим выбором программной скорости движения НПА, а уже 66 секунд. При этом НПА с указанной автоматической системой идет по той же самой траектории не только быстрее, но и точнее.



 $\upsilon^{*}(t) = scale(m/c); v(t) = scale(m/c); y(t) = scale \cdot 5(m); \varepsilon_{n}(t) = scale \cdot 0.2(m), \dot{x}^{*}(t) = scale(m/s), x(t) = scale(m/c), y^{*}(t) = scale(m/s), y(t) = scale(m/c)$

Рис. 4.6 Движение НПА без использования системы автоматического формирования величины программной скорости

Таким образом, результаты моделирования полностью подтвердили не только работоспособность, но и высокую эффективность синтезированной системы автоматического формированию программной скорости $\upsilon^*(t)$ движения НПА по криволинейным траекториям.

4.3 Метод автоматической коррекции программной траектории движения НПА

Метод автоматической настройки программной скорости, разработанный в предыдущем разделе, позволяет увеличить точность движения НПА по заданной

пространственной траектории. Однако это происходит за счет уменьшения скорости движения НПА даже в том случае, когда есть запас мощности движителей. Такая ситуация характерна для НПА, имеющих простые СУ, динамическая точность работы которых существенно снижается при увеличении скорости движения НПА. Поэтому необходимо разработать метод повышения точности движения НПА по заданной пространственной траектории без снижения программной скорости этого движения в случае, когда движители НПА имеют запас мощности.

Таким образом, задача разработки указанного метода будет формулироваться следующим образом. Пусть НПА имеет следящую СУ (4.1), которая обеспечивает его устойчивое движение вдоль заданной пространственной траектории. При этом вектор $X^*(t)$ формируются с помощью выражения (4.2). Необходимо разработать принцип и способ формирования такого программного сигнала управления движением НПА, который позволил бы отрабатывать все участки произвольно заданной пространственной траектории. СУ вида (4.1), неизменно обеспечивая выполнение условия (4.6).

4.3.1 Особенности коррекции программных сигналов движения НПА

Как уже было отмечено ранее решение указанной задачи будет заключаться в формировании такой новой программной траектории движения, отработка которой СУ НПА с некоторой динамической ошибкой приведет к тому, что НПА будет двигаться по исходной траектории.

С учетом выражений (4.3), (4.4) несложно получить уравнение

$$\left\|\varepsilon_{n}(t)\right\| = \left\|F_{n}(X(t), g_{y}(\cdot), g_{z}(\cdot), F_{\varepsilon}(\widetilde{X}^{*}(t), F_{u}(\cdot), Q_{UV}))\right\| = 0, \qquad (4.27)$$

справедливость которого гарантирует движение НПА по произвольной пространственной траектории с любой достижимой им скоростью и с нулевым отклонением от этой траектории. Однако аналитическое решение уравнения (4.27) относительно текущего желаемого положения программной точки $\tilde{X}^*(t) \in \mathbb{R}^3$ в

пространстве возможно только в крайне редких частных случаях простейшего описания НПА и его СУ, а численное решение этого уравнения в реальном масштабе времени возможно только с использованием мощных вычислительных средств, которые не могут быть установлены на борту НПА. Поэтому вместо точного решения уравнения (4.27) следует использовать приближенное, которое позволит обеспечить выполнение неравенства (4.6). Определим новое желаемое положение программной точки $\tilde{X}^*(t)$ в виде [94, 142]:

$$\widetilde{X}^{*}(t) = X^{*}(t) + \Delta X^{*}(t),$$
(4.28)

где $\Delta X^*(t) \in \mathbb{R}^3$ - вектор дополнительного программного сигнала, смещающего программную точку $X^*(t)$ с предписанной траектории движения НПА.

Выбор сигнала $\Delta X^*(t)$ можно осуществить, исходя из следующих соображений. При отработке программного сигнала $X^*(t)$, определяющего желаемую (программную) траекторию движения НПА (сплошная линия на рис. 4.7), точка X(t), соответствующая реальному положению НПА, проходит по некоторой траектории (штриховая линия на рис. 4.7) на расстоянии $\|\varepsilon_n(t)\|$ от программной траектории. Если вместо сигнала $X^*(t)$ использовать сигнал $\tilde{X}^*(t)$, траектория которого в пространстве обозначена пунктирной линией на рис. 4.7, которая повторяет штриховую линию, располагаясь симметрично относительно траектории изменения программного сигнала (сплошной линии), то реальное движение НПА $\tilde{X}(t)$, очевидно, будет проходить уже, например, по штрих-пунктирной линии (см. рис. 4.7) на значительно меньшем расстоянии от траектории $X^*(t)$. При этом будет выполняться условие

$$\varepsilon(t) = X^*(t) - X(t) \approx \widetilde{X}^*(t) - \widetilde{X}(t) = \widetilde{\varepsilon}(t).$$

Заранее определить значения $\|\mathcal{E}_n(t)\|$ невозможно, так как они зависят от

параметров траектории $X^*(t)$, режима движения НПА вдоль этой траектории, от параметров его взаимодействия с окружающей средой, динамических свойств НПА, и других факторов. То есть траекторию сигнала $\tilde{X}^*(t)$ можно формировать только в процессе движения НПА.



Рис.4.7 Движение НПА вблизи программной траектории

Определим вектор $\Delta X^*(t)$ в виде:

$$\Delta X^{*}(t) = X_{n}(t) - X(t) = \varepsilon_{n}(t).$$
(4.29)

Тогда с учетом (4.28) и (4.29) будем иметь [52, 94]

$$\widetilde{X}^*(t) = X^*(t) + \varepsilon_n(t). \tag{4.30}$$

Следует отметить, что при использовании дополнительного сигнала $\Delta X^*(t)$ динамическая ошибка слежения НПА за точкой $\tilde{X}^*(t)$ будет по-прежнему весьма большой, но расстояние $\|\tilde{\varepsilon}_n(t)\|$ между ним (см. точку $\tilde{X}(t)$ на рис. 4.7) и предписанной ему траекторией движения, задаваемой точкой $X^*(t)$, значительно сократится (см. вектор $\tilde{\varepsilon}_n$ на рис. 4.7). При этом НПА никогда не будет пересекать траекторию $X^{*}(t)$ под действием сигнала $\Delta X^{*}(t)$, поскольку при его приближении к этой траектории сигнал $\Delta X^{*}(t)$ стремится к нулю, обнуляясь при нахождении НПА на самой этой траектории.

Однако при формировании сигнала $\tilde{X}^*(t)$ возникает проблема, связанная с тем, что определить сигнал X(t) нахождения НПА в пространстве при отсутствии сигнала $\Delta X^*(t)$ уже невозможно, поскольку, если вводится сигнал $\Delta X^*(t)$, то НПА под его действием будет находиться уже в точке $\tilde{X}(t)$ вблизи траектории, определяемой непрерывно перемещающейся точкой $X^*(t)$. То есть в данном случае возникает задача хотя бы приближенного формирования сигнала $\Delta X^*(t)$, который будет постоянно удерживать НПА вблизи предписанной траектории с использованием сигнала $\tilde{X}(t)$ его реального текущего расположения относительно указанной траектории (см. рис.4.7).

Эту задачу будем решать с помощью СУ, изображенной на рис. 4.8.



Рис. 4.8 Блок - схема системы программного управления движением НПА

Из рис. 4.8 видно, что используемая СУ имеет два входа. На один вход подается сигнал $X^*(t)$, а на другой – сигнал $\tilde{X}_n(t)$, определяемый при реальном движении НПА вблизи предписанной траектории, но при этом в процессе формирования сигнала $\tilde{X}^*(t)$ (4.30) используется уже не сигнал $\Delta X^*(t)$ (4.29), а сигнал $\Delta \tilde{X}^*(t)$, определяемый с помощью выражения

$$\Delta \widetilde{X}^{*}(t) = k_{\mathcal{B}n} \left[\widetilde{X}_{n}(t) - \widetilde{X}(t) \right] = k_{\mathcal{B}n} \widetilde{\mathcal{E}}_{n}, \quad (\widetilde{\mathcal{E}}_{n} << \mathcal{E}_{n})$$
(4.31)

где $k_{sn} = \text{const} > 1 - \text{коэффициент}$, величина которого стандартными методами теории автоматического управления выбирается такой, чтобы условие (4.6) для рассматриваемого НПА выполнялось на всех участках заданной траектории, и при этом всегда сохранялась устойчивость СУ. Выбор коэффициента k_{sn} всегда может быть проверен в процессе моделирования движения НПА.

Следует отметить, что предложенный способ формирования программного управления движением НПА по траектории справедлив для любого вида уже установленной в нем СУ вида (4.1). Особенности этих СУ влияют только на выбор величины коэффициента $k_{\varepsilon n}$. Основной же задачей при формировании программного сигнала (4.31) является определение вектора $\tilde{\varepsilon}_n$.

4.3.2 Исследование метода коррекции программной траектории движения НПА

Для проверки работоспособности и эффективности разработанной системы коррекции программной траектории движения НПА было проведено моделирование ее работы. При моделировании использовалась такие же параметры математической модели НПА, как и в предыдущем разделе.

Полагалось, что в состав НПА уже включена СУ, содержащая простейшие типовые регуляторы в каждом канале управления положением и ориентацией этого НПА. Передаточная функция этих регуляторов для всех степеней свободы имела вид:

$$W(s) = K \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1},$$

а ее параметры имели значения: K = 20, $T_1 = 2.51 c$, $T_2 = 0.01 c$, а остальные параметры СУ - значения: $k_{cn} = 8$, $k_e = 0.1$, $\varepsilon_{on} = 0.12 m$.

При моделировании исследовалось плоское горизонтальное движение НПА по траектории, описываемой уравнением $y^*(t) = 10\sin(\pi x^*(t)/20)$. Это движение

начиналось при нулевых начальных значениях $x_0^* = 0$ и $y_0^* = 0$, продольная ось НПА в процессе его движения всегда была направлена на перемещающуюся программную точку $\tilde{X}^*(t)$, а программная скорость движения НПА по указанной траектории была постоянной. Желаемый угол курса НПА рассчитывался с помощью выражений (3.18).

На рис. 4.9 показаны процессы изменения величин v(t), $\|\tilde{\varepsilon}(t)\|$, $\|\tilde{\varepsilon}_n(t)\|$ и y(t) во время движения НПА по рассматриваемой траектории при использовании программного сигнала (4.28), (4.31).



 $\upsilon(t) = scale(\mathfrak{M}/c); \ y(t) = scale \cdot 5(\mathfrak{M}); || \tilde{\varepsilon}_n(t) || = scale \cdot 0.2(\mathfrak{M}); || \tilde{\varepsilon}(t) || = 2 \cdot scale(\mathfrak{M})$ Рис. 4.9 Процесс изменения переменных $\upsilon(t), z(t), || \tilde{\varepsilon}_n(t) ||, || \tilde{\varepsilon}(t) ||$ при использовании программных сигналов вида (4.28), (4.31) и при постоянной желаемой скорости движения НПА

При этом программная скорость движения НПА имела следующее значение: $v^* = const = 1 \text{ м/c}$. Из этого рисунка видно, что максимальное значение $||\tilde{\varepsilon}_n(t)||$ составляет 0.13 м.

Для сравнения на рис. 4.10 показаны процессы изменения тех же величин, при $v^* = const = 1 \text{ м/c}$, но при традиционном использовании сигнала $X^*(t)$, который соответствовал точке на предписанной траектории движения НПА и формировался с помощью выражений (4.2). Из рис.4.10 видно, что в этом случае максимальное отклонение НПА от траектории достигает 0.95 м. То есть использование сигнала

 $\tilde{X}^{*}(t)$ (4.28), (4.31) более чем в 7 раз увеличивает точность движения НПА по предписанной траектории без изменения его СУ. При этом величины реальных динамических ошибок $\|\tilde{\varepsilon}(t)\| u \|\varepsilon(t)\|$ (см. рис. 4.7) работы систем при двух указанных выше различных способах формирования программных сигналов (см. рис. 4.9 и 4.10) остаются практически одинаковыми.



 $\upsilon(t) = scale(M/c); \ y(t) = scale \cdot 5(M); \|\varepsilon_n(t)\| = scale(M); \|\varepsilon(t)\| = 2 \cdot scale(M)$

Рис. 4.10 Процесс изменения переменных $\upsilon(t)$, y(t), $||\varepsilon_n(t)||$, $||\varepsilon(t)||$ при использовании программных сигналов вида (4.2) и при постоянной желаемой скорости движения НПА

4.4 Разработка метода высокоскоростного и высокоточного движения НПА по пространственной траектории

Ранее был разработан метод формирования программной скорости движения НПА (см. выражения (4.8), (4.9), (4.21), (4.25)), который позволяет обеспечить движение НПА по заданным пространственным траекториям с максимально возможной скоростью, при которой гарантируется заданная точность этого движения, а также метод коррекции программных траекторий движения НПА (см. выражения (4.28), (4.31)), обеспечивающий увеличение точности движения этих НПА по исходным траекториям.
Первый метод позволяет учесть ограничения мощности движителей при движении НПА по заданным пространственным траекториям, а второй метод позволяет перераспределить управляющие сигналы между различными движителями НПА так, чтобы повысить точность движения этих НПА за счет более полного задействования других каналов управления. Поэтому одновременное использование указанных методов в СУ НПА позволит наиболее полно использовать энергетические возможности движительного комплекса НПА и тем самым реализовать высокоточное движение НПА по заданной пространственной траектории с предельно высокой скоростью даже при использовании простых линейных СУ [93].

Как уже отмечалось ранее, программный сигнал (4.28), (4.31) должен обеспечивать движение НПА по предписанной траектории с максимально допустимым отклонением, определяемым условием $||\tilde{\varepsilon}_n(t)|| \leq \varepsilon_{don}$, аналогичным условию (4.6). Однако при этом должно быть обеспечено и максимально возможное быстродействие НПА (максимально возможная скорость перемещения по траектории) с учетом энергетических возможностей его движительного комплекса. Для этого необходимо осуществлять автоматическую подстройку величины υ^* с учетом текущих параметров траектории движения НПА и возможного входа в насыщения его движителей. Для решения этой задачи можно использовать подход, предложенный ранее. При этом величина $\upsilon^*(t)$ должна формироваться с помощью следующего выражения:

$$\upsilon^{*}(t) = R(p)(\varepsilon_{\partial on\partial} - k_{\varepsilon} || \widetilde{\varepsilon}(t) ||), \qquad (4.32)$$

где R(p) - передаточная функция регулятора желаемой скорости движения НПА, \mathcal{E}_{dond} - допустимая динамическая ошибка управления НПА.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае настройка величины v(t)осуществляется не для обеспечения заданной точности движения НПА по траектории (она уже гарантируется соответствующим выбором сигнала $\tilde{X}^{*}(t)$), а для предотвращения схода НПА с этой траектории ввиду входа отдельных его движителей в насыщение.

Обобщенная блок-схема предложенной системы формирования программных сигналов $\tilde{X}^*(t)$, одновременно обеспечивающей предельно возможную скорость движения НПА вдоль предписанной траектории, показана на рис. 4.11. На этом рисунке введены следующие обозначения: R – регулятор желаемой скорости движения НПА; БФО – блок формирования вектора отклонения $\Delta \tilde{X}^*(t)$ НПА от предписанной траектории; S – сигнал прекращения движения НПА.



Рис.4.11 Блок-схема предложенной системы формирования программных сигналов движения НПА

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного подхода было проведено моделирование в процессе которого параметры НПА, его СУ и вид программной траектории движения были такие же как и в подразделе 4.3.2. При этом параметры регулятора программной скорости движения НПА

$$R(p) = \frac{k_r(T_r p + 1)}{p}$$

имели значения: $k_r = 5$, $T_r = 0.4 c$.

На рис. 4.12 показаны процессы изменения величин $\upsilon^*(t)$, z(t), $\|\tilde{\varepsilon}_n(t)\|$, $\|\tilde{\varepsilon}(t)\|$ во время движения НПА по рассматриваемой траектории при использовании сигнала

 $\tilde{X}^{*}(t)$ (4.28), (4.31) и дополнительного контура настройки желаемой скорости его движения.



 $\upsilon^*(t) = scale(M/c); \upsilon(t) = scale(M/c); y(t) = scale \cdot 5(M); || \tilde{\varepsilon}_n(t) || = scale \cdot 0.2(M); || \tilde{\varepsilon}(t) || = scale \cdot .2(M)$ Рис.4.12 Процесс изменения переменных $\upsilon^*(t), y(t), \tilde{\varepsilon}_n(t), || \tilde{\varepsilon}(t) ||$ при одновременном использовании сигнала $\tilde{X}^*(t)$ и контура автоматической настройки $\upsilon^*(t)$ НПА

Из этого рисунка видно, что использование предложенного подхода позволяет обеспечить движение НПА по всем участкам траектории с повышенной скоростью υ , изменяющейся в диапазоне от 0.9 *м/с* до 1.4 *м/с*. При этом отклонение НПА от траектории не превышает 0.13 м, а время прохождения им одного периода траектории равно 46 с, вместо 62 с в системе, без использования контура настройки $\upsilon^*(t)$ (см. рис. 4.9). То есть, использование предложенной системы формирования $\tilde{X}^*(t)$ позволяет не только более чем в 7 раз повысить точность движения НПА по предписанной траектории, но и в 1.35 раз увеличить скорость этого движения без какого-либо усложнения СУ НПА.

На рис. 4.13 показана предписанная траектория движения НПА (кривая 1), траектория, которая формируется сигналом $\tilde{X}^*(t)$ синтезированной системы (кривая

2), а также реальная траектория движения НПА (кривая 3). Из этого рисунка видно, что реальное положение НПА и целевая точка $\tilde{X}^*(t)$ всегда находятся по разные стороны от предписанной траектории движения.



Рис. 4.13 Особенности движения НПА по криволинейной траектории

Таким образом, результаты моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного подхода с помощью которого синтезируются системы автоматического формирования программных сигналов $\tilde{X}^*(t)$ для управления движением НПА по сложным пространственным траекториям с предельно высокой скоростью этого движения.

4.4 Способ определения вектора отклонения НПА от программной траектории движения

Как видно из выражений (4.8) и (4.29) для реализации предложенных методов формирования программных сигналов движения НПА необходимо использовать информацию о векторе \mathcal{E}_n отклонения НПА от заданной пространственной траектории. При этом способ расчета указанного вектора отклонения зависит от способа описания программной траектории движения НПА. Далее будет рассмотрено

два подхода к его определению: при задании траектории с помощью выражения вида (4.2) и с помощью сплайнов третьего порядка.

4.4.1 Определение вектора отклонения НПА от траектории, задаваемой аналитическими выражениями вида (4.2)

При описании траектории НПА выражениями (4.2) вычисление вектора \mathcal{E}_n заключается в расчете координат точки $X_n(t)$, которая является ближайшей к НПА точкой, лежащей на программной траектории. Для определения координат этой точки можно воспользоваться двумя подходами.

Первый подход заключается в следующем. Пусть вектор X_{τ} касательной к заданной траектории в точке X_n имеет координаты $X_{\tau} = f_v(x_n) = (1, \frac{dg_v(x^*)}{dx^*}\Big|_{x^*=x_n}, \frac{dg_z(x^*)}{dx^*}\Big|_{x^*=x_n})^T = (1, g'_v(x_n), g'_z(x_n))^T$ [27]. Вектор,

соединяющий точки X и X_n, перпендикулярен вектору X_τ и, следовательно, будет выполняться условие:

$$X_{\tau} \cdot (X_n - X) = (x_n - x) + g'_{\nu}(x_n)(y_n - y) + g'_{\nu}(x_n)(z_n - z) = 0.$$
(4.33)

Добавив к уравнению (4.33) выражения (4.2), получим систему уравнений, решение которой и будет определять координаты искомой точки *X_n*.

Основным недостатком приведенного метода является то, что при его использовании необходимо числено решать систему нелинейных уравнений, что значительно увеличит нагрузку на бортовой компьютер. Однако, поскольку часто $\|\varepsilon_n(t)\|$ всегда много меньше радиуса кривизны траектории, то можно применить приближенный метод расчета вектора $\varepsilon_n(t)$, заменяя его вектором $\hat{\varepsilon}_n(t)$, перпендикулярным прямой *N*, касательной к траектории движения НПА в точке $X^*(t)$.

Координаты точки $\hat{X}_n(t)$ (см. рис. 4.14) будем определять в полусвязанной с НПА СК с ортами $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$, всегда параллельными осям абсолютной СК *x*, *y*, *z*, и центром, совпадающим с центром масс НПА и точкой $x_{(t)}$. В этой СК точка $X^*(t)$ задается координатами вектора $\varepsilon(t) = (\varepsilon_{\hat{x}}, \varepsilon_{\hat{y}}, \varepsilon_{\hat{z}})^T$, а точка $\hat{X}_n(t)$ - координатами вектора $\hat{\varepsilon}_n(t)$.



Рис. 4.14 Схема для вычисления элементов вектора $\hat{\mathcal{E}}_n$

Уравнение касательной N, проходящей через точку $X^*(t)$ и совпадающей с вектором υ^* , имеет вид [27]:

$$\frac{\hat{x} - \varepsilon_{\hat{x}}}{f_1} = \frac{\hat{y} - \varepsilon_{\hat{y}}}{f_2} = \frac{\hat{z} - \varepsilon_{\hat{z}}}{f_3}, \qquad (4.34)$$

где f_1, f_2, f_3 - элементы вектора $f_{\nu}(x^*)$ (4.2). Уравнение плоскости *G*, проходящей через точку X(t) в СК $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ и перпендикулярной прямой *N*, имеет вид [27]:

$$f_1\hat{x} + f_2\hat{y} + f_3\hat{z} = 0. \tag{4.35}$$

Решая совместно уравнения (4.34) и (4.35), получим выражение [94]

$$\hat{\varepsilon}_{n}(t) = \begin{bmatrix} f_{2}^{2} + f_{3}^{2} & -f_{1}f_{2} & -f_{1}f_{3} \\ \frac{f_{2}^{3} + f_{2}f_{3}^{2} - f_{1}}{f_{1}} & 1 - f_{2}^{2} & -f_{2}f_{3} \\ \frac{f_{3}^{3} + f_{2}^{2}f_{3} - f_{1}}{f_{1}} & -f_{2}f_{3} & 1 - f_{3}^{2} \end{bmatrix} \varepsilon(t),$$

позволяющее легко, но приближенно формировать вектор $\varepsilon_n(t)$.

4.4.2 Определение вектора отклонения НПА от траектории, формируемой на основе сплайнов третьего порядка

Другим способом задания траектории движения НПА является использование сплайнов. Это позволяет сформировать пространственную траекторию движения НПА на основе заданного количества базовых точек, по которым должен пройти НПА в процессе выполнения миссии. Этот метод является более простым и естественным для оператора способом задания пространственной траектории движения НПА по сравнению с использованием выражения (4.2). Кроме того, данный способ позволяет автоматически формировать указанную траекторию движения в процессе выполнения миссии НПА.

Рассмотрим сначала процесс формирования программных сигналов движения целевой точки по пространственной траектории, заданной на основе сплайнов.

Первый шаг состоит в формировании сплайнов, проходящих через заданные опорные точки. При этом для формирования траектории будем использовать сплайны Безье, так как они позволяют задать гладкую траекторию движения НПА и их легко представить в виде функций времени. Указанные сплайны задаются координатами двух опорных точек, лежащих на траектории движения, и двумя дополнительным управляющим точкам, определяющими направление касательной к траектории в этих опорных точках. Пример построения указанного сплайна показан на рис. 4.15.



Рис. 4.15 Процесс формирования сплайнов по заданным точкам

Алгоритм расчета положения целевой точки, движущейся по заданной траектории состоит из следующих этапов [64].

1) Расчет координат управляющих точек сплайна:

$$\Delta P_{i} = \frac{P_{i} - P_{i-1}}{\|P_{i} - P_{i-1}\|}, \Delta P_{i+1} = \frac{P_{i+1} - P_{i}}{\|P_{i+1} - P_{i}\|},$$

$$\Delta P_{i}^{C} = k_{pi} \|P_{i} - P_{i-1}\| \frac{(k_{ci}\Delta P_{i} + (1 - k_{ci})\Delta P_{i+1})}{\|(k_{ci}\Delta P_{i} + (1 - k_{ci})\Delta P_{i+1})\|},$$

$$P_{i}^{1} = P_{i} + \Delta P_{i}^{C}, P_{i}^{2} = P_{i+1} + \Delta P_{i+1}^{C},$$
(4.36)

где $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ - координаты опорной точки, через которую должна пройти траектория движения; P_i^j , $j = \overline{(1,2)}$ - координаты управляющих точек сплайна; k_{pi}, k_{ci} - коэффициенты, располагающие управляющие точки между начальной и конечной точкой сплайна.

Следует отметить, что коэффициент $0 \le k_{ci} \le 1$ задает наклон касательной к траектории в опорной точке, и для большинства случаев можно выбирать $k_{ci} = 0.5$, а коэффициент $k_{pi} \ge 0$ задает длину плеча сплайна и влияет на кривизну полученной траектории (при $k_{pi} = 0$ траектории будут прямолинейными). На рис. 4.16а показаны примеры траекторий сгенерированные с различными значениями коэффициентов k_{pi} ($k_{pi} = 0$ - черная сплошная линия, $k_{pi} = 0.2$ - черная пунктирная линия, $k_{pi} = 0.4$ - серая линия), а на рис. 4.166 показаны траектории при различных значениях k_{ci}

 $(k_{ci} = 0$ - черная сплошная линия, $k_{ci} = 0.5$ - черная пунктирная линия, $k_{ci} = 1.0$ - серая линия).





$$X^{*}(\delta) = (1-\delta)^{3} P_{i} + 3t(1-\delta)^{2} P_{i}^{1} + 3t^{2}(1-\delta) P_{i}^{2} + \delta^{3} P_{i+1} = f_{B}(\delta), \qquad (4.37)$$

где $\delta \in [0,1]$ - нормированное время движения целевой точки по сплайну между точками P_i и P_{i+1} .

Скорость движения изображающей точки определяется скоростью изменения нормированного времени. Однако если использовать линейную зависимость величины переменной δ от времени движения целевой точки по сплайну, то скорость этого движения будет неравномерной вдоль сплайна и, кроме того, трудно прогнозируемой. Для решения задачи обеспечения движения целевой точки по сплайну с заданной скоростью был разработан и реализован итерационный алгоритм, который, последовательно увеличивая значение переменной δ , позволяет рассчитать такие координаты X^* целевой точки, которые соответствовали бы ее перемещению вдоль сплайна с желаемой скоростью υ^* за время τ дискретизации системы. Указанный алгоритм имеет следующий вид [65, 107]:

1)
$$i = 0: T^* = v^* \tau, X_i^* = X^*(t), \delta_i = \delta(k),$$

2) $i > 0: \delta_{i+1} = \delta_i + \Delta \delta, X_{i+1}^* = f_B(\delta_{i+1}),$
 $T_{i+1} = T_i + ||X_{i+1}^* - X_i^*||, i = i + 1, e c \pi T_{i+1} < T^*,$
(4.38)
3) $X^*(t + \tau) = f_B(\delta_i + \frac{T^* - T_i}{T_{i+1} - T_i} \Delta \delta), e c \pi T_{i+1} \ge T^*,$

где υ^* – программная скорость движения НПА по заданной траектории; T^* – путь, который проходит точка $X^*(t)$ по траектории за период τ дискретизации системы, двигаясь со скоростью υ^* ; $\Delta \delta$ – приращение нормированного времени на каждой итерации работы алгоритма; $\delta(k)$ – значение нормированного времени, соответствующее предыдущему положению точки $X^*(t)$.

На рис. 4.17 показано изменение программной скорости движения вдоль траектории, описываемой сплайном Безье, при использовании предложенного алгоритма. Желаемая величина программной скорости движения была задана 1м/с.



Рис. 4.17 Изменение величины программной скорости движения целевой точки (T_L – путь, пройденный точкой X^* по траектории)

Как показывают исследования, предложенный алгоритм (см. выражения (4.37) - (4.38)) позволяет за 2-3 итерации определить очередное положение целевой точки на заданной траектории и обеспечить точность поддержания заданной скорости движения в пределах 0.004м/с.

Для определения вектора отклонения НПА от программной траектории его движения, в случае, когда программные сигналы, задающие движение НПА по этой траектории, формируются с помощью выражений (4.37) - (4.38), необходимо использовать алгоритм, работа которого показана на рис. 4.18.

Указанный алгоритм состоит из следующих шагов [66, 107]:

1) рассчитать расстояние r_1 от НПА до программной точки X^* , находящейся на траектории его движения;

2) уменьшить текущее значение переменной δ_i на малую величину Δs ;

3) по выражению (4.37) рассчитать координаты точки X_n^i на траектории, которые соответствуют значению переменной $\delta_{i+1} = \delta_i - \Delta s$;

4) рассчитать расстояние r_2 от НПА до точки X_n^i ;

5) если $r_2 \leq r_1$, то $r_1 = r_2$ и перейти на шаг 2, иначе координаты точки X_n^{i-1} являются координатами искомой точки X_n .



Рис. 4.18 Определение координат ближайшей к НПА точки, лежащей на заданной траектории

Этот алгоритм имеет малую вычислительную сложность и позволяет за несколько шагов (обычно не более 6) вычислить ближайшую к НПА точку на заданной траектории с точностью, зависящей от величины Δs .

Таким образом, в данном разделе были разработаны методы расчета величины отклонения НПА от программной траектории движения для разных способов задания этих траекторий. Указанная величина отклонения необходима для реализации систем автоматической настройки программных сигналов движения НПА, разработанных в данной главе.

4.5 Экспериментальные исследования разработанных систем высокоточного управления движением НПА

Для проверки эффективности разработанных методов высокоточного управления высокоскоростным движением НПА по пространственным траекториям были проведены экспериментальные исследования с использованием 2-х разных АНПА: АНПА «НМ-2», созданном в Тайваньском национальном университете, и АНПА «МАRК», созданном в Дальневосточном федеральном университете.

В данном разделе представлены результаты этих экспериментальных исследований.

4.5.1 Экспериментальные исследования системы формирования программных сигналов движения с использованием АНПА «НМ-2»

Внешний вид АНПА «НМ-2» показан на рис. 4.19 [106]. Этот АНПА имеет 4 движителя, которые обеспечивают ему движение по трем степеням свободы: движение вперед, поворот по углу курса и движение вдоль вертикальной оси. Масса АНПА составляет 400 кг, а максимальные значения сил тяги и моментов, развиваемых движительным комплексом по отдельным степеням свободы, имеют следующие значения: $\tau_{dx} = 400H$, $\tau_{dz} = 200H$, $M_{dz} = 10HM$.

Сигнал управления для каждой степени свободы формировался с помощью типовых ПД-регуляторов, а программные сигналы движения с помощью выражений (4.30)-(4.32), (4.36)-(4.38).

Сигналы обратных связей для СУ АНПА формировались с помощью бортовой навигационной системы, которая содержала следующий набор датчиков: доплеровский лаг, GPS-приемник, компас и трехосевой датчик угловых скоростей.

Навигационная информация о положении, ориентации и скорости движения формировалась в бортовом компьютере АНПА с использованием расширенного фильтра Калмана.





Рис. 4.19 АНПА, который использовался в экспериментах: (a) внешний вид, (б) в процессе экспериментов

Дискретность формирования управляющих сигналов, поступающих на движители АНПА, составляла 0.65с. Эта величина определялась частотой работы доплеровского лага, которая, в свою очередь, определяла частоту формирования сигналов обратных связей.

В процессе проведения экспериментальных исследований проводился сравнительный анализ эффективности работы традиционных СУ АНПА, содержащих только регуляторы движения по отдельным степеням свободы АНПА, и СУ, содержащей синтезированную систему автоматического формирования программных сигналов (см. рис. 4.11). При этом параметры регуляторов

программных сигналов движения имели следующие значения: $k_{sn} = 4$, $k_{\varepsilon} = 0.065$, $\varepsilon_{don} = 0.5 M$.

Результаты движения АНПА по заданной траектории при использовании традиционной СУ показаны на рис. 4.20 и 4.21 [106]. На рис. 4.20 показана реальная (черная кривая) и желаемая (серая кривая) траектории движения АНПА. На рис. 4.21 показано изменение отклонения АНПА от заданной траектории. При этом скорость движения АНПА по заданной траектории задавалась постоянной и равной 0.6 м/с.



Рис. 4.20 Траектория движения АНПА при использовании традиционных СУ



Рис. 4.21 Отклонение АНПА от заданной траектории при использовании традиционных СУ

Как видно из представленных рисунков, максимальная величина отклонения АНПА от заданной траектории достигает 0.8 м, при этом, как видно из рисунка 4.20, реальная траектория движения АНПА не совпадает с заданной траекторией, даже на прямолинейных участках.

Результаты экспериментальных исследований работы СУ АНПА, содержащих дополнительные контуры настройки программных сигналов движения, показаны на рис. 4.22-4.24.



Рис. 4.22 Траектория движения АНПА при использовании СУ с контуром настройки параметров



Рис. 4.23 Процесс изменения программной скорости движения АНПА

На рис. 4.22 показана реальная (черная кривая) и желаемая (серая кривая) траектории движения АНПА. При этом в процессе движения АНПА программная скорость его движения автоматически подстраивалась на основе выражения (4.32)., Процесс изменения этой скорости показан на рис. 4.23, а на рис. 4.24 показан процесс изменения величины отклонения АНПА от заданной траектории.

Как видно из приведенных рисунков использование СУ АНПА, которая включает дополнительный контур настройки программных сигналов движения, позволяет обеспечить желаемую точность движения АНПА по заданной траектории. Из рис. 4.22 видно, что использование указанного контура позволяет добиться совпадения реальной траектории движения с заданной, за исключением участков с большой кривизной. Однако на этих участках отклонение АНПА от заданной траектории не превышает заданного значения (см. рис. 4.24). Кроме того, рис. 4.23 показывает, что указанная СУ позволяет автоматически установить такое значение программной скорости движения АНПА, при котором обеспечивается желаемая точность этого движения.



Рис. 4.24 Процесс изменения отклонения АНПА от заданной траектории при использовании системы автоматической настройки программных сигналов

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на АНПА «HM-2» подтвердили работоспособность предложенных систем управления. При этом указанные системы управления позволяют в явном виде задать желаемую точность движения АНПА по траектории и обеспечить автоматическую настройку

параметров программных сигналов движения так, чтобы СУ этого АНПА обеспечивала эту точность. При этом недостаточно высокая эффективность этих систем на данном АНПА объясняется низкой частотой работы его СУ, которая не позволяет быстро реагировать на появление отклонений АНПА от заданной траектории. Как будет показано на примере другого АНПА этот недостаток полностью снимается при увеличении частоты работы его бортовой СУ.

4.5.2 Экспериментальные исследования системы автоматического формирования программных сигналов движения с использованием АНПА «MARK»

Для проверки эффективности работы предложенной системы траекторного управления АНПА были проведены натурные эксперименты с использованием АНПА «МАРК», созданного в Дальневосточном федеральном университете. Внешний вид указанного АНПА показан на рис. 4.25 [107].



Рис. 4.25 Внешний вид АНПА «МАРК»

Указанный АНПА имеет три степени свободы: движение вперед и повороты по углу крена и дифферента. Основные его характеристики приведены в таблице 4.1.

Морские испытания работы СУ АНПА были выполнены в августе-сентябре 2013 года в заливе Петра Великого Японского моря [94]. В процессе проведения экспериментов исследовалось движение АНПА МАРК по гладкой программной траектории в различных режимах работы его СУ (см. рис. 4.11). Параметры этой СУ имели следующие значения:

Максимальная рабочая глубина погружения, м	200
Масса, кг	50
Длина, мм	1800
Диаметр корпуса, мм	230
Максимальная скорость, м/с	3
Автономность (при скорости хода 1 м/с), час	18

Таблица 4.1. Характеристики АНПА «МАРК»

1) контур управления положением: регулятор продольного движения: $\tau_{dx} = 100 E_{LX} + 200 \dot{E}_{LX}$, где E_{LX} - проекция вектора динамической ошибки на ось xсвязанной с АНПА СК; регулятор угла курса $M_{dz} = 90\Delta\psi^* + 200\Delta\dot{\psi}^*$, где $\Delta\psi^*$ рассогласование между желаемым и текущим углами курса АНПА, рассчитываемое на основе выражений (3.18); регулятор угла дифферента $M_{dy} = 40\Delta\theta^* + 100\Delta\dot{\theta}^* + 0.5\int\Delta\theta^* dt$, где $\Delta\theta^*$ - рассогласование между желаемым и текущим углами дифферента АНПА, рассчитываемое на основе выражений (3.16);

2) контур формирования положения точки $\tilde{X}^{*}(t)$ в АСК (см. рис. 4.11): $k_{\omega} = 2$, $\Delta s = 0.01$;

3) контур формирования U^* (см. рис. 4.11): $\mathcal{E}_{\partial on} = 0.6$ м, $k_{\varepsilon} = 0.12$, $R(p) = (k_i + k_p p) / p$, $k_p = 4$, $k_i = 2$.

Траектория движения АНПА в рассматриваемых экспериментах определялась выражениями (4.36), (4.37) с параметрами $k_{pi} = 0.3$, $k_{ci} = 0.5$, и проходила через точки (0,0,0)-(20,0,0)-(20,-20,0)-(0,-20,0)-(0,0.0).

На рис. 4.26 показано движение АНПА по заданной программной траектории (серая линия) с постоянной скоростью 1м/с. При этом на рис. 4.26а показано реальное движение АНПА по этой траектории с использованием только типовой СУ (сплошная черная линия), а на рис. 4.266 – его движение с использованием СУ, включающей

синтезированный с помощью выражений (4.31) дополнительный контур формирования положения точки \tilde{X}^* (пунктирная черная линия).

На рис. 4.27 показан процесс изменения величины отклонения АНПА от программной траектории при его движении с использованием типовой СУ (серая линия) и СУ, содержащей контур формирования положения точки \tilde{X}^* (черная линия).

Из рис. 4.27 видно, что использование в СУ АНПА синтезированного контура непрерывного формирования положения точки \tilde{X}^* позволяет увеличить точность его движения по указанной программной траектории более чем в 4 раза (с 1.3м до 0.28м).



Рис. 4.26 Траектория движения АНПА без использования (а) и с использованием (б) дополнительного контура формирования положения точки \tilde{X}^*



Рис. 4.27 Процесс изменения величины $\varepsilon_n(t)$ без использования и с использованием в СУ АНПА дополнительного контура формирования точки \tilde{X}^*

При этом величина максимального отклонения АНПА от заданной траектории в 2 раза меньше допустимой величины $\varepsilon_n^* = 0.6$ м, что указывает на возможность повышения скорости его движения.

Отметим, что величины управляющих сигналов, вырабатываемых СУ АНПА по каждому каналу управления, имели ограничения, соответствующие максимальным по модулю значениям сил тяги (моментов), вырабатываемых его движителями.

На рис. 4.28 и 4.29 показаны результаты экспериментальных исследований движения АНПА по гладким траекториям с заданной динамической точностью при использовании СУ, содержащей все синтезированные контуры управления (см. рис. 4.11). Черная линия на рис. 4.28 соответствует реальной траектории движения АНПА, серая – программной траектории, а пунктирная – виртуальной траектории движения точки \tilde{X}^* , определяемой по выражениям (4.31). На рис. 4.29 показаны процессы изменения программной скорости движения АНПА (черная линия), его реальной скорости (пунктирная линия) и величины его отклонения от программной траектории (серая линия).

Из этих рисунков видно, что программная скорость движения АНПА при перемещении по сложной программной траектории меняется в широких пределах от 1.5 м/с до 0.2 м/с, уменьшаясь на участках с большой кривизной, когда увеличивается отклонение АНПА от программной траектории, и увеличиваясь в противном случае

на участках с малой кривизной. Но указанное отклонение никогда не превышает $\varepsilon_n^* = 0.6 \,\mathrm{M}$.



Рис. 4.28 Траектория движения АНПА при автоматической настройке его программной скорости движения



Рис. 4.29 Процессы изменения программной и реальной скоростей движения АНПА, а также его отклонения от заданной траектории

Кроме того, из рис. 4.29 видно, что величина реальной скорости движения АНПА меняется с некоторым динамическим запаздыванием по отношению к программной скорости. Это объясняется как инерционностью АНПА, так и тем, что

программная скорость в данном случае задает не скорость движения самого АНПА, а скорость движения целевой точки \tilde{X}^* . При этом снижение указанной программной скорости приводит к уменьшению расстояния между АНПА и этой точкой, но в процессе приближения АНПА к точке \tilde{X}^* его реальная скорость будет снижаться медленнее, чем программная скорость.

На рис. 4.30 показаны процессы изменения формируемых с помощью СУ АНПА сигналов по каналу продольного движения (а) и каналу курса (б) при его движении по рассматриваемой гладкой траектории. На этих рисунках «1» соответствует максимальному значению управляющих сигналов по соответствующему каналу управления.



Рис. 4.30 Процесс изменения управляющих сигналов АНПА по каналу продольного движения (a) и по каналу управления углом курса (б)

Из рис. 4.30 видно, что при движении АНПА по участкам траектории с малой кривизной формируются наибольшие значения управляющих сигналов по продольному каналу движения, увеличивая скорость движения этого АНПА. И,

наоборот, при прохождении АНПА участков с большей кривизной эти сигналы уменьшаются.

Исследования показали, что при использовании всех синтезированных контуров в СУ АНПА время его прохождения рассмотренной траектории составило 78 с, а время прохождения этой же траектории с постоянной скоростью 1 м/с – 85 с. Относительно небольшое снижение времени прохождения заданной траектории объясняется отсутствием на этой траектории длинных участков с малой кривизной, на которых возможно движение АНПА с более высокой скоростью. Кроме того, следует отметить, что при использовании СУ с контуром автоматической настройки программной скорости движения АНПА наблюдается некоторое увеличение максимального отклонения АНПА от программной траектории по сравнению с использованием СУ, имеющей только контур формирования точки \tilde{X}^* , но при этом величина отклонения неизменно соответствовала условию (4.6) на всех участках траектории. То есть введение контура автоматического формирования программной скорости одвижения.

Таким образом, результаты 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.

4.6 Выводы

Таким образом, в данной главе была решена задача разработки подхода к синтезу систем автоматической настройки параметров программных сигналов движения НПА по сложным пространственным траекториям, обеспечивающих предельно быстрое движение НПА по указанным траекториям при сохранении заданной точности (отклонения от траектории) этого движения. Причем эти системы имеют простую реализацию и могут использоваться с уже существующими СУ НПА,

что позволяет обеспечить их широкое применение при модернизации существующих и создании новых НПА с новыми функциональными свойствами и возможностями.

В главе были получены следующие результаты.

1. Был разработан метод синтеза системы автоматического формирования программной скорости движения НПА по заданной траектории, позволяющий формировать такое максимальное значение указанной скорости, которое обеспечивает сохранение желаемой точности движения НПА по этой траектории при использовании уже существующей СУ НПА. Преимуществом указанной системы является возможность автоматического учета возможности входа движителей по отдельным степеням свободы НПА в насыщения.

2. Был разработан метод синтеза системы автоматической коррекции программных траекторий движения НПА, который позволяет существенно повысить точность их движения по исходным пространственным траекториям без изменения использующейся системы управления положением этого НПА. При этом реализация указанного метода не требует точных знаний о параметрах НПА, а также внешних возмущениях, действующих на него процессе движения.

3. Был разработан метод синтеза многоконтурной системы настройки использующей программных сигналов движения, одновременно систему автоматической настройки программной скорости движения НПА и систему программной траектории его движения, коррекции которая позволяет при использовании простейших линейных регуляторов обеспечить движение НПА на энергетических возможностей пределе движительного комплекса при одновременном сохранении заданной точности этого движения.

4. Было проведено математическое моделирование и всесторонние экспериментальные исследования предложенных систем высокоточного управления движением различных НПА по сложным траекториям с высокой скоростью, которые подтвердили высокую эффективность разработанных подходов по сравнению с традиционными системами управления.

5. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В данной главе разрабатываются методы обработки информации, поступающей от бортовых датчиков НПА, для решения двух задач: формирования всех необходимых обратных связей для реализации СУ НПА, а также идентификации параметров НПА для проведения синтеза и математического моделирования этих СУ.

5.1 Разработка метода комплексирования данных, поступающих от бортовых датчиков НПА

Как уже было отмечено ранее, высококачественная работа СУ НПА невозможна без формирования сигналов обратных связей, которые позволяют определять все используемые параметры движения указанных НПА с требуемой точностью. Однако формирование этих сигналов является весьма сложной задачей. Это объясняется тем, что, во-первых, набор навигационно-пилотажных датчиков НПА часто ограничен ввиду ограничения массо-габаритных показателей и стоимости НПА. Во-вторых, данные, поступающие от этих датчиков, сильно зашумлены и периодически могут выдавать прерывающиеся и недостоверные данные. В-третьих, часто информация от различных датчиков поступает с разной частотой, которая может быть много меньше частоты дискретизации используемых СУ НПА. Поэтому на каждом шаге работы этой СУ обновленная информация от отдельных датчиков может оказаться недоступной.

В настоящее время указанная проблема является актуальной не только для НПА, но и для многих типов мобильных роботов, где для ее решения используются различные подходы. В частности, в работе [24] получены аналитические выражения для определения ориентации летательного аппарата на основе измерения его угловых скоростей и линейных ускорений. Однако указанный подход не позволяет учесть шумы и разные периоды дискретизации данных, поступающих от бортовых датчиков. Другим способом комплексирования данных от бортовых датчиков различных мобильных роботов является использование метода наименьших квадратов [188].

Однако эффективно использовать эти подходы можно только для динамических объектов, описываемых линейными моделям, что для НПА справедливо в отдельных простых режимах движения.

В настоящее время основным методом решения проблемы увеличения точности навигационных систем мобильных роботов различного назначения является использование фильтров Калмана [168, 207]. Это объясняется положительным опытом их применения, способностью указанных фильтров подавлять шумы и восстанавливать неизмеряемые компоненты вектора состояния динамических объектов. Пример использования фильтра Калмана для решения задачи реализации навигационной системы колесными роботами на основе комплексирования данных, поступающих от инерциальной и глобальной навигационных систем, поступающих с разной частотой, рассматривается в работе [43]. В работе [115] предложен подход к построению системы инерциальной навигации колесного робота на основе нелинейного фильтра Калмана, учитывающий проскальзывание его колес. Однако, несмотря на высокую эффективность существующих методов комплексной обработки информации, поступающей от навигационных датчиков мобильных роботов, их использование в НПА затрудняется его более сложной математической моделью. Кроме того, многие датчики НПА имеют различный и недопустимо большой период дискретизации, а на точность информации, получаемой от этих датчиков, большое влияния оказывают параметры внешней среды.

Таким образом, задача создания метода эффективного комплексирования данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков НПА, который позволил бы увеличить точность получения этих данных, определить неизмеряемые параметры движения НПА, а также точно формировать полный вектор сигналов обратных связей на каждом шаге дискретизации СУ, по-прежнему остается нерешенной и актуальной. Причем мировой опыт показывает, что создавать этот метод целесообразно на основе фильтра Калмана, хорошо зарекомендовавшего себя при решении подобных задач, но обязательно с учетом специфики НПА.

5.1.1 Постановка задачи комплексирования сигналов, поступающих от датчиков НПА

Для разработки метода комплексирования сигналов, поступающих от различных датчиков НПА, необходимо задаться его математической моделью. Наиболее полная динамическая модель пространственного движения НПА с учетом влияния подводных течений, аналогичная уравнениям (2.1)-(2.6), задается нелинейными дифференциальными уравнениями, которые в матричной форме имеют вид [156]:

$$\mathbf{M}\boldsymbol{v} + \mathbf{C}(\boldsymbol{v}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{D}(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{\tilde{v}}_c)(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{\tilde{v}}_c) = \boldsymbol{\tau}, \qquad (5.1)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\varphi - & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi + & 0 & 0 & 0\\ & -\cos\psi\sin\theta\cos\varphi & +\sin\psi\cos\varphi & & & \\ \frac{\sin\theta}{\sin\theta} & \cos\theta\cos\varphi & -\cos\theta & 0 & 0 & 0\\ -\sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi + & \cos\psi\cos\varphi - & 0 & 0 & 0\\ & +\cos\psi\sin\varphi & -\sin\psi\sin\theta\sin\varphi & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\mathrm{tg}\theta\cos\varphi & \mathrm{tg}\theta\sin\varphi\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} & -\frac{\sin\varphi}{\cos\theta}\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}, (5.3)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{v}\,,\tag{5.2}$$

где $\boldsymbol{\tilde{v}}_{c} = [\boldsymbol{\mathcal{O}}_{cx}, \boldsymbol{\mathcal{O}}_{cy}, \boldsymbol{\mathcal{O}}_{cz}, 0, 0, 0]^{T} \in \mathbb{R}^{6}$ - вектор проекций скорости течения на оси ССК.

Состав датчиков бортовой навигационной системы НПА зависит от его типа и назначения. Большинство НПА, предназначенных для автономного выполнения различных миссий, имеют следующий набор навигационно-пилотажных датчиков:

1) акселерометры, измеряющие линейные ускорения $[v_x, v_y, v_z]$ по всем трем осям ССК;

2) доплеровский лаг, измеряющий линейные скорости [v_{dx} , v_{dy} , v_{dz}] НПА относительно окружающей среды по всем трем осям ССК;

3) датчики угловых скоростей (ДУС) $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ по трем осям ССК;

датчик ориентации НПА, измеряющий углы крена, дифферента и курса
 [φ,θ,ψ] в АСК;

5) гидроакустическая навигационная система (ГАНС), измеряющая линейные координаты НПА [*x*, *y*] в АСК;

6) датчик глубины НПА, измеряющий координату *z* в АСК.

Сигналы этих датчиков содержат шумы, обусловленные наличием электромагнитных помех и особенностями их конструкции. Причем периоды обновления данных, получаемых от указанных датчиков, могут различаться в десятки раз, а некоторые из них могут в разы превышать период выработки сигналов управления НПА, что существенно снижает точность его управления, особенно при движении на высоких скоростях. Поэтому одна из главных задач системы комплексирования данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков НПА, заключается в формировании всех необходимых данных для выработки сигналов управления с периодом, равным периоду дискретизации его СУ.

Следует отметить, что для коррекции текущих показаний бортовых датчиков НПА и расчета неизмеряемых параметров его движения все алгоритмы комплексирования данных должны использовать математическую модель движения этого НПА. Причем это можно сделать, учитывая только кинематическую модель (выражения (5.2), (5.3)), так как она связывает все параметры движения НПА и переменные, измеряемые его навигационно-пилотажными датчиками. Кроме того, эта модель не содержит переменных или неопределенных коэффициентов, что позволяет обеспечить высокую точность работы алгоритма комплексирования.

Таким образом, в данном разделе ставится и решается следующая задача. На основе кинематической модели движения НПА, описываемой выражениями (5.2), (5.3), необходимо разработать метод и алгоритм комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков НПА, позволяющий определять все требуемые параметры его движения (включая неизмеряемые) и обеспечивать обновление указанных данных на каждом шаге дискретизации входных сигналов его СУ. Причем этот алгоритм должен обладать вычислительной сложностью, позволяющей

формировать все сигналы управления с использованием типовой бортовой ЭВМ НПА в реальном масштабе времени.

5.1.2 Алгоритм комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков НПА

При построении алгоритма комплексирования данных будет использован фильтр Калмана, широко применимый для решения подобных задач [207]. Кроме того, с его помощью будет решена и задача подавления шумов датчиков, и задача определения неизмеряемых параметров движения НПА. Поскольку модель (5.2), (5.3) является существенно нелинейной, то целесообразно использовать сигма-точечный фильтр Калмана (СТФК) [168, 176], позволяющий работать с моделями данного вида без их линеаризации.

Предлагаемый алгоритм комплексирования данных с навигационнопилотажных датчиков НПА, построенный на основе СТФК, работает следующим образом. На каждом шаге его работы формируется вектор измерений, состоящий только из актуальных данных, получаемых от указанных датчиков. Под актуальными понимаются данные, с момента обновления которых прошло не более одного периода дискретизации входных сигналов СУ. Поскольку периоды обновления данных с разных датчиков различны, то указанный вектор измерений имеет переменный размер. Этот вектор поступает на вход СТФК, параметры которого динамически меняются в зависимости от размерности вектора измерений. На выходе СТФК на основе модели (5.2), (5.3) формируются оценки всех необходимых параметров движения НПА. Обычно при решении задачи комплексирования данных, имеющих разные периоды дискретизации, полагается, что большее время обновления данных датчика соответствует более зашумленному сигналу. Ha основе этого OT предположения вводят дополнительные весовые коэффициенты, с помощью которых снижается правдоподобность данных от этого датчика [199]. Предлагаемый подход не требует введения этих коэффициентов, а также проведения дополнительных расчетов для устаревших данных.

Рассмотрим работу СТФК при комплексировании данных от навигационнопилотажных датчиков НПА более подробно. Этот фильтр работает с нелинейными моделями вида:

$$Z_{k+1} = F_{UKF}(Z_k) + \xi_k, (5.4)$$

$$Y_k = H(Z_k) + \zeta_k, \tag{5.5}$$

где $Z = [\mathbf{a}^T, \mathbf{v}^T, \mathbf{x}^T]^T \in \mathbb{R}^{18}$ - вектор состояния фильтра; $\mathbf{a} = [\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ вектор линейных и угловых ускорений НПА в ССК; $Y_k \in \mathbb{R}^m$ - вектор измерений; $F(Z_k) \in \mathbb{R}^n$ - вектор-функция, описывающая переход системы из состояния Z_k в Z_{k+1} ; $H(Z_k) \in \mathbb{R}^m$ - вектор-функция измерения; $\xi_k \in \mathbb{R}^n$ и $\zeta_k \in \mathbb{R}^m$ - векторы шумов системы и измерений, соответственно, которые считаются Гауссовскими случайными процессами; n – порядок системы; m – количество измеряемых величин.

Так как в предлагаемом алгоритме используется кинематическая модель движения НПА (см. выражения (5.2), (5.3)), то вектор-функция $F_{UKF}(Z_k)$ имеет вид:

$$F_{UKF}(Z_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_k \\ \mathbf{a}_k \Delta t + \mathbf{v}_k \\ \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \mathbf{a}_k \Delta t^2 / 2 + \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \mathbf{v}_k \Delta t + \mathbf{x}_k \end{bmatrix},$$
(5.7)

где $\mathbf{a}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{x}_k$ - значения соответствующих векторов для состояния Z_k (см. выражение (5.6)); Δt - период дискретизации входных сигналов СУ.

Модель (5.7) можно использовать только тогда, когда скорость подводных течений равна нулю. Это объясняется тем, что доплеровский лаг измеряет скорость движения НПА не относительно АСК, а только относительно окружающей среды. Поэтому при наличии подводных течений модель (5.7) необходимо представить в виде [67, 103]:

$$F_{UKF}(\overline{Z}_k) = \left[\frac{\mathbf{a}_k}{\frac{\mathbf{a}_k \Delta t + \mathbf{v}_k}{\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)\mathbf{a}_k \Delta t^2 / 2 + \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)\mathbf{v}_k \Delta t + \mathbf{x}_k}}{\frac{\mathbf{v}_{ck}}{\mathbf{v}_{ck}}} \right],$$
(5.8)

где $\overline{Z} = [a^T, v^T, x^T, v_c^T]^T \in R^{21}$ - вектор состояния системы, включающий вектор состояния НПА Z и вектор проекций скорости подводного течения $v_c = [v_{cx}, v_{cy}, v_{cz}] \in R^3$ на оси АСК.

Для модели (5.8) можно не только использовать показания доплеровского лага, но и оценивать скорость течения, что важно для реализации высокоточного управления движением НПА.

В общем случае вектор-функция $H(Z_k)$ (см. выражения (5.5)) описывает нелинейные взаимосвязи между измерениями датчиков и элементами вектора состояния НПА. В рассматриваемом случае практически все навигационнопилотажные датчики аппарата за исключением доплеровского лага непосредственно измеряют параметры его движения. Поэтому уравнение (5.5) можно представить в следующем виде [103]:

$$Y_{k} = H(\overline{Z}_{k}) + \zeta_{k} = \overline{H}(\mathbf{x}_{k})\overline{Z}_{k} + \zeta_{k}, \qquad (5.9)$$

$$\overline{H}(\mathbf{x}_{k}) = \begin{bmatrix} \frac{A}{V(\mathbf{x}_{k})} \\ \frac{\Omega}{-\frac{S}{-\frac{D}{-\frac{1}{-\frac$$

где

$$\begin{split} Y_{k} &= [\upsilon_{x}(k), \upsilon_{y}(k), \upsilon_{z}(k), \upsilon_{dx}(k), \upsilon_{dy}(k), \upsilon_{dz}(k), \omega_{x}(k), \omega_{y}(k), \omega_{z}(k), x(k), y(k), z(k), \varphi(k), \\ \theta(k), \psi(k)]^{T} - вектор измерений на шаге k; \ \upsilon_{dx}, \upsilon_{dy}, \upsilon_{dz} - данные с доплеровского лага; \\ A &= [I_{3\times3} \quad 0_{3\times18}] \in R^{3\times21}; \ V = [0_{3\times6} \quad I_{3\times3} \quad \tilde{J}_{k}(\mathbf{x}_{k})] \in R^{3\times21}; \ \Omega = [0_{3\times9} \quad I_{3\times3} \quad 0_{3\times9}] \in R^{3\times21}; \\ S &= [0_{2\times12} \quad I_{2\times2} \quad 0_{2\times7}] \in R^{2\times21}; \ D = [0_{1\times14} \quad 1 \quad 0_{1\times6}] \in R^{1\times21}; \ \Phi = [0_{3\times15} \quad I_{3\times3} \quad 0_{3\times3}] \in R^{3\times21}; \end{split}$$

0 и I – нулевые и единичные матрицы соответствующих размерностей; $\tilde{J}_k(\mathbf{x}_k) = -J_1(\mathbf{x}_k)^{-1} \in R^{3 \times 3}$.

Как уже отмечалось ранее, в процессе работы системы предлагается так изменять размер вектора измерений Y_k , чтобы он содержал только актуальные данные этих датчиков. При этом следует изменять и элементы блочной матрицы $\overline{H}(\mathbf{x})$.

Например, если на текущем шаге *k* дискретизации СУ актуальными являются данные с акселерометров, ДУС и датчика ориентации НПА, то вектор Y_k уже имеет вид: $Y_k = [\upsilon_x(k), \upsilon_y(k), \upsilon_z(k), \omega_x(k), \omega_y(k), \omega_z(k), \varphi(k), \theta(k), \psi(k)]^T$, а соответствующая

ему блочная матрица \overline{H}_k - вид: $\overline{H}_k = \begin{vmatrix} A \\ \Omega \\ - \\ \Phi \end{vmatrix}$.

После формирования вектора Y_k и соответствующей ему матрицы \overline{H}_k с помощью СТФК можно провести оценку параметров движения НПА, используя следующий алгоритм [168]:

1) Инициализация k = 0:

$$\hat{Z}_0 = \mathbf{E}[Z_0],$$

$$P_0 = \mathbf{E}[(\bar{Z}_0 - \hat{Z}_0)(\bar{Z}_0 - \hat{Z}_0)^T],$$
(5.10)

где $\hat{Z}_k \in \mathbb{R}^n$ - оценка вектора \overline{Z} ; $P_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ - ковариационная матрица ошибок оценки вектора \overline{Z} ; n = 21 – размерность вектора состояния системы; $E[\cdot]$ - символ математического ожидания.

2) Вычисление значений сигма-точек на шаге $k \in \{1, ..., \infty\}$:

$$\chi_{k-1} = [\hat{Z}_{k-1}, \hat{Z}_{k-1} + \gamma \sqrt{P_{k-1}}, \hat{Z}_{k-1} - \gamma \sqrt{P_{k-1}}],$$

$$W_0^{(a)} = \frac{\mu}{n+\mu}, \quad W_0^{(c)} = \frac{\mu}{n+\mu} + 1 - \sigma^2 + \vartheta,$$

$$W_i^{(a)} = W_i^{(c)} = \frac{\mu}{2(n+\mu)}, \quad i = 1, ..., 2n,$$
(5.11)

где $\chi \in R^{n \times (2n+1)}$ - матрица сигма-векторов; $W^{(a)} \in R^{2n+1}$, $W^{(c)} \in R^{2n+1}$ - векторы весовых коэффициентов; \mathcal{G} - константа, содержащая в себе предварительную информацию о законе распределения элементов вектора \overline{Z} (для Гауссовского распределения $\mathcal{G} = 2$ [153]); σ - константа, определяющая диапазон рассеивания сигма-точек вокруг элементов вектора \hat{Z}_k ; $\gamma = n + \mu$; μ - масштабирующий коэффициент.

3) Обновление соответствующих выражений на очередном шаге $k \in \{1, ..., \infty\}$:

$$\chi_{k|k-1}^{*} = F_{UKF}(\chi_{k-1}),$$

$$\hat{Z}_{k}^{-} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i}^{(a)} \chi_{i,k|k-1}^{*},$$

$$P_{k}^{-} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i}^{(c)} (\chi_{i,k|k-1}^{*} - \hat{Z}_{k}^{-}) (\chi_{i,k|k-1}^{*} - \hat{Z}_{k}^{-})^{T} + Q_{UKF},$$

$$\chi_{k|k-1} = [\chi_{k|k-1}^{*}, \chi_{0,k|k-1}^{*} + \gamma \sqrt{P_{k}^{-}}, \chi_{0,k|k-1}^{*} - \gamma \sqrt{P_{k}^{-}}],$$

$$Y_{k|k-1}^{*} = H(\chi_{k|k-1}),$$

$$\hat{Y}_{k}^{-} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i}^{(a)} Y_{i,k|k-1}^{*},$$
(5.12)

где $\chi_k^* \in \mathbb{R}^{n \times (2n+1)}$ - матрица преобразованных с помощью вектор-функции $F_{UKF}(\cdot)$ сигма-векторов; $\hat{Z}_k^- \in \mathbb{R}^n$ - апостериорная оценка вектора состояния; $Y_k^* \in \mathbb{R}^{m \times (2n+1)}$ матрица преобразованных с помощью вектор-функции $H(\cdot)$ сигма-векторов; $\hat{Y}_k^- \in \mathbb{R}^m$ - апостериорная оценка вектора измерений; $P_k^- \in \mathbb{R}^{n \times n}$ - апостериорная оценка ковариационной матрицы ошибки оценивания вектора состояния; $Q_{UKF} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ матрица ковариаций шумов системы.

4) Обновление измерения:

$$P_{\tilde{y}_{k}\tilde{y}_{k}} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i}^{(c)} (\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k}^{-}) (\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k}^{-})^{T} + R_{UKF},$$

$$P_{x_{k}y_{k}} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i}^{(c)} (\chi_{i,k|k-1} - \hat{Z}_{k}^{-}) (Y^{*}_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k}^{-})^{T}, \qquad (5.13)$$

$$K_{k} = P_{x_{k}y_{k}} P_{\tilde{y}_{k}\tilde{y}_{k}}^{-1}, \qquad (5.14)$$

$$\hat{Z}_{k} = \hat{Z}_{k}^{-} + K_{k} (Y_{k} - \hat{Y}_{k}^{-}), \qquad P_{k} = P_{k}^{-} - K_{k} P_{\tilde{y}_{k}\tilde{y}_{k}} K_{k}^{T},$$

где $P_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k} \in R^{m \times m}$, $P_{x_k y_k} \in R^{m \times n}$ - промежуточные матрицы с переменными элементами; $K_k \in R^{n \times m}$ - матрица коэффициентов усиления; $R_{UKF} \in R^{m \times m}$ - матрица ковариаций шумов измерений, размерность которой меняется в соответствии с размерностью вектора измерений Y_k .

Выражения (5.10)-(5.13) в указанном выше алгоритме позволяют получить оценку вектора \hat{Z}_k , которую можно использовать для формирования управляющих сигналов. При этом, как видно из этих выражений, размерность вектора измерений Y_k существенно влияет на количество операций при вычислении значений Y_k^* , \hat{Y}_k^{-} , $P_{y_k y_k}$, $P_{x_k y_k}$ и K_k , уменьшаясь с уменьшением размерности этого вектора. Поэтому предлагаемое автоматическое уменьшение размерности вектора Y_k в случаях, когда актуальными являются данные, получаемые только от части датчиков НПА, позволяет существенно снизить вычислительную сложность всей процедуры комплексирования. При этом вектор обратных связей обновляется на каждом шаге дискретизации СУ НПА независимо от периодов обновления данных на выходах всех его навигационно-пилотажных датчиков.

5.1.3 Результаты математического моделирования работы алгоритма комплексирования данных, получаемых от бортовых датчиков НПА

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного метода комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков НПА, было проведено численное моделирование. В процессе моделирования шаг дискретизации

СУ НПА принимался равным $\Delta t = 0.1$ с, что в несколько раз меньше постоянных времени НПА. Элементы диагональных матрицы ковариаций R_{UKF} и Q_{UKF} имеют следующие значения: $R_{UKF} = diag(6 \cdot 10^{-5}, 6 \cdot 10^{-5}, 6 \cdot 10^{-5}, 6 \cdot 10^{-3}, 6$

Параметры бортовых навигационно-пилотажных датчиков приведены в таблице 5.1. Из этой таблицы видно, что три датчика, установленные на борту НПА, обновляют информацию с периодом, меньшим периода дискретизации СУ НПА, поэтому данные от этих датчиков являются актуальными на каждом шаге дискретизации СУ. Периоды обновления данных от других датчиков значительно превышают период дискретизации СУ, что может значительно снизить точность управления НПА при его движении на больших скоростях.

	Акселеро-	Доплеровский	ДУС	ГАНС	Датчик	Датчик
	метры	лаг			глубины	ориентации
Период обновления (сек.)	0.005	1.5	0.005	3.5	0.6	0.005
Погрешность	0.04 м/c ²	0.15 м/с	0.02 рад/с	2 м	0.2 м	0.02 рад

Таблица 5.1 Основные характеристики навигационно-пилотажных датчиков НПА

Шум в сигналах датчиков моделировался как аддитивный белый шум с амплитудой, равной погрешности в соответствующем датчике (в соответствии с таблицей 5.1).

Движение НПА осуществлялось под действием сил тяги $\tau_{\partial x} = 50 H$, $\tau_{\partial y} = 0$, $\tau_{\partial z} = 10 H$ и моментов $M_{\partial x} = 0$, $M_{\partial y} = 2 Hm$, $M_{\partial z} = 3 \cdot \sin(0.2 \cdot t) Hm$, создаваемых его движительным комплексом. Во время этого движения у НПА изменялись все компоненты его вектора состояния. Вектор скорости течения был принят равным: $\upsilon_c = [0.3 \ m/c, -0.4 \ m/c, 0.2 \ m/c].$

Результаты моделирования работы предложенного алгоритма комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков НПА показаны на

рис. 5.1-5.2 [103]. На этих рисунках цифрой 1 обозначена кривая, соответствующая реальному значению конкретной переменной (сплошная черная линия), цифрой 2 – кривая, соответствующая значению этой переменной, формирующемуся на выходе СТФК (сплошная серая линия), а цифрой 3 – данные, поступающие от соответствующего навигационно-пилотажного датчика НПА.



Рис. 5.1 Результат оценивания линейных (а - $\dot{\upsilon}_x$, б - $\dot{\upsilon}_y$, в - $\dot{\upsilon}_z$) ускорений НПА с использованием разработанного алгоритма

На рис. 5.1 показаны результаты оценивания вектора линейных (рисунок 5.1 ав) ускорений НПА. Как уже отмечалось выше, данные от акселерометров обновляются на каждом шаге работы СУ НПА, поэтому основная задача при обработке этих данных состояла в подавлении помех. Из рис. 5.1 а-в видно, что в результате работы алгоритма комплексирования происходит эффективное подавление помех в сигналах, поступающих от акселерометров, измеряющих линейные ускорения. Максимальное отклонение сигнала с выхода СТФК от
реального значения соответствующего линейного ускорения не превышает 0.02 м/с², что в 2 раза меньше среднего значения допустимой погрешности (см. таблицу 5.1) сигнала этого датчика.

При оценке с помощью предложенного алгоритма угловых ускорений наблюдаются достаточно большие запаздывания по отношению к реальным значениям, которые обусловлены определенной инерционностью СТФК. Поэтому указанные координаты, если они необходимы для формирования сигналов управления НПА лучше измерять с помощью соответствующих датчиков, например, МТАА-2033 [195].

На рис. 5.2 показаны результаты работы алгоритма комплексирования при оценке линейных (рис. 5.2 а-в) и угловых (рис. 5.2 г-е) скоростей движения НПА. Из рис. 5.2 а-в видно, что данные, поступающие от доплеровского лага, значительно отличаются от реальных значений скорости движения НПА. Это обусловлено наличием течения (пунктирные линии под номером 4, на рис. 5.2 а-в).

В результате работы предложенного алгоритма комплексирования данных от соответствующих датчиков НПА удается разделить скорость течения в АСК и скорость движения НПА в ССК. При этом точность восстановления скорости течения (сплошные черные линии под номером 5 на рис. 5.2 а-в) составляет 0.015 м/с, а скорости движения НПА 0.028 м/с, что почти в 6 раз меньше погрешности доплеровского лага. Кроме того, (см. рис. 5.2 а-в) сигналы линейных скоростей, оцененные с помощью СТФК, обновляются с периодом в 0.1 с., а не 1.5 с., как у лага. Погрешности на начальном этапе оценки соответствующих величин объясняются переходными процессами в СТФК, которые завершаются после 10 с. работы системы.

Так как сигналы от ДУС обновляются с периодом, намного меньшим периода дискретизации СУ НПА, то основная задача, стоящая перед алгоритмом комплексирования при оценке угловых скоростей движения НПА, заключалась в подавлении помех, содержащихся в сигналах соответствующих датчиков.



Рис. 5.2 Результат оценивания линейных (а - υ_x , б - υ_y , в - υ_z) и угловых (г - ω_x , д - ω_y , е - ω_z) скоростей движения НПА с использованием разработанного

Как видно из рис. 5.2 максимальное отклонение сигналов, формирующихся на выходе СТФК, от их реальных значений не превышает 0.008 с⁻¹, что в 2,5 раза меньше, чем погрешность измерений ДУС.

На рис. 5.3 показаны результаты оценивания положения (рис. 5.3 а-в) и ориентации (рис. 5.3 г-е) НПА.



Рис. 5.3 Результат оценивания линейных (а - *x*, б - *y*, в - *z*) и угловых (а - φ , б - θ , в - ψ) координат НПА с использованием разработанного алгоритма

Из рис. 5.3а и 5.3б видно, что сигналы, соответствующие координатам *x* и *y*, формирующиеся на выходе СТФК, имеют отклонения от реальных значений не более 0.35 м. Это почти в 6 раз меньше средней погрешности ГАНС. При этом после обновления данных с ГАНС происходит и коррекция сигнала на выходе СТФК, а в промежутках между обновлением указанных данных координаты НПА оцениваются на основе информации, поступающей от других навигационно-пилотажных датчиков.

На рис. 5.3в показан результат работы предложенного алгоритма при оценке глубины погружения НПА (координата z). Из этого рисунка видно, что сигнал указанной оценки, формирующийся на выходе СТФК, в некоторых местах имеет заметную погрешность. Это объясняется тем, что диапазон изменения координаты z очень мал (всего от 0.5м до -0.5м относительно начального положения НПА). Однако предложенный алгоритм, уменьшая в 6 раз период обновления информации о глубине НПА, в среднем позволяет уменьшить отклонение измерения от реального значения до 0.1 м. А это в 2 раза меньше средней погрешности измерений датчика глубины (в соответствии с таблицей 5.1).

На рис. 5.3г-е показаны результаты работы алгоритма комплексирования при оценке ориентации НПА. В данном случае основной целью измерений также было подавление помех в сигналах датчика ориентации НПА. Из этих рисунков видно, что отклонение сигналов на выходе СТФК от реальных значений углов ориентации НПА не превышает 0,005 рад. Это в 4 раз меньше уровня помех в сигналах датчика ориентации.

Таким образом, результаты моделирования подтвердили не только работоспособность, эффективность но И предложенного алгоритма комплексирования данных с навигационно-пилотажных датчиков НПА. При этом указанный алгоритм обеспечивает обновление информации о векторе состояния НПА с периодом, равным периоду дискретизации СУ НПА, независимо от периода обновления данных, поступающих от всех навигационно-пилотажных датчиков НПА, значительно подавляя помехи измерений.

5.2 Разработка метода идентификации параметров НПА

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов исследования качества создаваемых СУ является математическое моделирование. В случае НПА использование математического моделирования является наиболее актуальным, так как проведение натурных испытаний требует использования больших материальных ресурсов, а также может подвергнуть НПА опасности повреждения.

При этом точность полученных результатов зависит от точности используемой математической модели исследуемого объекта управления. Однако идентификация параметров НПА является сложной задачей, так как большинство этих параметров невозможно вычислить аналитически, а можно определить только в процессе проведения сложных и дорогостоящих экспериментов.

Можно выделить три большие группы методов, применяющихся для решения задачи идентификации параметров НПА. Первая группа основана на проведении натурных экспериментов с реальными образцами или макетами НПА, включая их обдувку в аэродинамических трубах. Вторая предполагает использование сложного специализированного программного обеспечения и компьютерных моделей. Однако, несмотря на наличие сложного и дорогостоящего оборудования, а также большие группы методов не позволяют обеспечить трудозатраты, указные часто идентификацию требуемых параметров НПА с заданной точностью. Особенно если они изменяются в процессе работы НПА.

Третья группа осуществляет идентификацию параметров НПА в процессе их реального движения, в частности, с использованием различных модификаций метода наименьших квадратов (МНК) [173] и упрощенных линеаризованных моделей движения НПА. В работе [198] описан один из методов идентификации параметров НПА при его движении в горизонтальной плоскости на основе МНК. В этом методе данные для идентификации формируются на основе обработки изображений с внешней видеокамеры. В работе [160] метод идентификации коэффициентов гидродинамических сопротивлений судна построен на основе модифицированного МНК. Однако все эти методы можно эффективно использовать только для определения параметров линейных моделей, что для НПА возможно только в редких частных случаях.

Для идентификации параметров нелинейных динамических моделей часто используют нейронные сети [235]. В частности, в работе [123] предлагается метод идентификации сил гидродинамического сопротивления НПА с помощью радиальнобазисной нейронной сети. Однако, несмотря на свою достаточно высокую эффективность, модели, получаемые на основе нейронных сетей, представляют собой

модели типа «черный ящик», которые крайне сложно использовать в процессе синтеза СУ НПА.

Дополнительной проблемой является и весьма ограниченный набор бортовых датчиков НПА, что не позволяет получить все необходимые данные, которые необходимы для реализации большинства методов идентификации. Известные методы идентификации параметров сложных динамических объектов, построенные на основе неполных измерений вектора их состояния [167], имеют большую вычислительную сложность и для НПА мало применимы. Тем не менее, алгоритмы идентификации текущих параметров НПА с использованием его бортовой ЭВМ позволяет существенно упростить и ускорить сам процесс идентификации, корректируя режимы движения НПА для уточнения его отдельных параметров. Поэтому задача снижения вычислительной сложности алгоритмов определения текущих значений параметров НПА в реальном масштабе времени является важной и актуальной.

Для разработки эффективного метода идентификации параметров НПА необходимо вначале определить, какие именно параметры подлежат идентификации. Как видно из выражений (2.1) - (2.6), математическая модель НПА имеет 33 параметра, подлежащих идентификации: 31 элемент матрицы \mathbf{M}_{Π} и 12 элементов гидродинамических коэффициентов вязкого трения d_1, d_2, d'_1, d'_2 по всем степеням свободы НПА.

При этом вектор данных, необходимых для идентификации параметров НПА, описываемого указанной моделью НПА, имеет вид:

$$Z = [\mathcal{O}_x, \mathcal{O}_y, \mathcal{O}_z, \mathcal{O}_x, \mathcal{O}_y, \mathcal{O}_z, \mathcal{O}_x, \mathcal{O}_y, \mathcal{O}_z, \mathcal{O}_x, \mathcal{O}_y, \mathcal{O}_z, x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^I \in \mathbb{R}^{18}$$
(5.14)

10

и в большинстве случаев недоступен для непосредственного измерения навигационно-пилотажными датчиками НПА.

Традиционные подходы к идентификации параметров сложных динамических объектов, которые построены на неполном измерении вектора их состояния,

используют расширенный вектор данных, включающий полный вектор состояния этих объектов и дополнительный вектор параметров [167]. В случае НПА размерность такого расширенного вектора и модели, в которой он используется, слишком высоки. В результате вычислительная сложность алгоритма идентификации параметров НПА становится слишком большой для реализации на обычной бортовой ЭВМ.

Исходя из отмеченного, в данном разделе ставится задача разработки нового метода и алгоритма идентификации параметров НПА, который описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений (2.1) - (2.6). Этот метод и алгоритм должны быть построены на основе ограниченного набора данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков этих НПА. При этом указанная идентификация должна производиться с помощью бортовой ЭВМ в процессе движения НПА в реальном масштабе времени.

5.2.1 Метод идентификации параметров НПА

Как уже отмечалось ранее, основным фактором, определяющим вычислительную сложность алгоритма идентификации параметров НПА и возможность его реализации в реальном масштабе времени на бортовой ЭВМ, является размерность его модели. Поэтому необходимо снизить эту размерность без снижения точности идентификации.

Следует отметить, что в процессе идентификации вначале решается задача восстановления вектора Z, а затем с его использованием выполняется идентификация параметров НПА. Полная модель НПА состоит из уравнений динамики (2.1)-(2.5) и кинематики (5.2), (5.3). Последние связывают между собой все элементы вектора состояния НПА и не содержат неизвестных параметров, подлежащих идентификации, которые присутствуют только в уравнениях динамики. Поэтому поставленную задачу идентификации параметров математической модели НПА в условиях неполного измерения элементов вектора его состояния можно разбить на два последовательных этапа: восстановление вектора Z и идентификация параметров его математической модели. При этом на каждом этапе можно использовать только часть полной модели

НПА, что значительно снижает размерность моделей, применяемых при идентификации, и существенно уменьшает вычислительную сложность используемого алгоритма.

Блок-схема работы предлагаемого алгоритма идентификации параметров математической модели НПА показана на рис. 5.4 [102, 143].



Рис. 5.4 Блок-схема алгоритма идентификации параметров математической модели НПА

В начале работы этого алгоритма происходит инициализация элементов вектора состояния НПА и параметров его математической модели исходными значениями вектора Z_0 и вектора q_0 параметров НПА, требующих идентификации. Затем на основе данных, поступающих от навигационно-пилотажных датчиков, формируется вектор измерений Y_k , который поступает на вход блока восстановления полного вектора состояния НПА. Указанный блок построен на основе подхода, описанного в разделе 5.1, который, используя СТФК и кинематическую модель движения НПА, позволяет восстановить вектор *Z* даже с учетом различных периодов поступления данных от всех его навигационно-пилотажных датчиков.

В результате на выходе блока комплексной обработки данных от бортовых датчиков НПА формируется оценка вектора $Z_k \in R^{18}$ (в соответствии с выражением (5.14)), на основе которой идентифицируются параметры НПА. Причем эту модель с учетом уравнения (5.1) следует описывать в виде [168]:

$$q(k+1) = q(k),$$

$$\widetilde{H}(k) = F_{IUV}(Z_k, q(k)) + \mathcal{G}(k), \qquad (5.15)$$

где *q*(*k*) - вектор параметров НПА, требующих идентифиции, имеющий вид:

$$q(k) = [\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{44}, \lambda_{45}, \lambda_{46}, \lambda_{55}, \lambda_{56}, \lambda_{66}, d_{1x}, d_{2x}, d_{1y}, d_{2y}, d_{1z}, d_{2z}, d_{1x}', d_{2x}', d_{1y}', d_{2y}', d_{1z}', d_{2z}']^T$$
(5.16)

 $F_{IUV}(Z_k,q(k)) \in \mathbb{R}^6$ - вектор-функция, описывающая модель динамики НПА; $\tilde{H}(k) \in \mathbb{R}^6$ - вектор измеряемых переменных НПА; $\mathcal{G}(k) \in \mathbb{R}^6$ - вектор аддитивного Гауссовскиого белого шума измерений с матрицей ковариаций $R_{LKF}(k)$.

Для приведения модели динамики НПА к виду (5.15) в уравнениях (2.1) - (2.5) перенесем влево все слагаемые, не зависящие от неизвестных параметров НПА. В результате получим:

$$\boldsymbol{\tau} - \mathbf{M}_{\mathrm{A}}\boldsymbol{\upsilon} - \mathbf{C}_{\mathrm{A}}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} - \boldsymbol{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{M}_{\mathrm{H}}\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{C}_{\mathrm{H}}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\upsilon})\boldsymbol{\upsilon}.$$
(5.17)

Матричное уравнение (5.17) можно заменить системой, состоящей из шести дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} S_{1} = \lambda_{11}\upsilon_{x} + \lambda_{12}\upsilon_{y} + \lambda_{13}\upsilon_{z} + \lambda_{14}\varpi_{x} + \lambda_{15}\varpi_{y} + \lambda_{16}\varpi_{z} + \alpha_{3}\varpi_{y} - \\ -\alpha_{2}\varpi_{z} + d_{1x}\upsilon_{x} + d_{2x}|\upsilon_{x}|\upsilon_{x}, \\ S_{2} = \lambda_{12}\upsilon_{x} + \lambda_{22}\upsilon_{y} + \lambda_{23}\upsilon_{z} + \lambda_{24}\varpi_{x} + \lambda_{25}\varpi_{y} + \lambda_{26}\varpi_{z} - \alpha_{3}\varpi_{x} + \alpha_{1}\varpi_{z} + \\ + d_{1y}\upsilon_{y} + d_{2y}|\upsilon_{y}|\upsilon_{y}, \\ S_{3} = \lambda_{13}\upsilon_{x} + \lambda_{23}\upsilon_{y} + \lambda_{33}\upsilon_{z} + \lambda_{34}\varpi_{x} + \lambda_{35}\varpi_{y} + \lambda_{36}\varpi_{z} + \alpha_{2}\varpi_{x} - \\ -\alpha_{1}\omega_{y} + d_{1z}\upsilon_{z} + d_{2z}|\upsilon_{z}|\upsilon_{z}, \\ S_{4} = \lambda_{14}\upsilon_{x} + \lambda_{24}\upsilon_{y} + \lambda_{34}\upsilon_{z} + \lambda_{44}\omega_{x} + \lambda_{45}\omega_{y} + \lambda_{46}\omega_{z} + \alpha_{3}\upsilon_{y} - \alpha_{2}\upsilon_{z} + \beta_{3}\omega_{y} - \\ -\beta_{2}\omega_{z} + d'_{1x}\omega_{x} + d'_{2x}|\omega_{x}|\omega_{x}, \\ S_{5} = \lambda_{15}\upsilon_{x} + \lambda_{25}\upsilon_{y} + \lambda_{35}\upsilon_{z} + \lambda_{45}\omega_{x} + \lambda_{55}\omega_{y} + \lambda_{56}\omega_{z} - \alpha_{3}\upsilon_{x} + \alpha_{1}\upsilon_{z} - \\ -\beta_{3}\omega_{x} + \beta_{1}\omega_{z} + d'_{1y}\omega_{y} + d'_{2y}|\omega_{y}|\omega_{y}, \\ S_{6} = \lambda_{16}\upsilon_{x} + \lambda_{26}\upsilon_{y} + \lambda_{36}\upsilon_{z} + \lambda_{46}\omega_{x} + \lambda_{56}\omega_{y} + \lambda_{66}\omega_{z} + \alpha_{2}\upsilon_{x} - \alpha_{1}\upsilon_{y} + \beta_{2}\omega_{x} - \\ -\beta_{1}\omega_{y} + d'_{1z}\omega_{z} + d'_{2z}|\omega_{z}|\omega_{z}|\omega_{z}, \end{cases}$$

$$(5.18)$$

где $\alpha_i, \beta_i, i = 1...3$ - промежуточные переменные, вычисляемые по выражениям (2.2); $S = [S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6]^T \in \mathbb{R}^6$ - вектор, элементы которого вычисляются по выражениям:

$$S_{1} = T_{x} - (W - B)\sin\theta - ((\omega_{y} + \omega_{x}\omega_{z})Y_{c} + \upsilon_{x} - \upsilon_{y}\omega_{z} + \upsilon_{z}\omega_{y})m_{a},$$

$$S_{2} = T_{y} + (W - B)\cos\theta\sin\varphi - ((\omega_{y}\omega_{z} - \omega_{x})Y_{c} + \upsilon_{y} - \upsilon_{z}\omega_{x} + \upsilon_{x}\omega_{z})m_{a},$$

$$S_{3} = T_{z} + (W - B)\cos\theta\cos\varphi - (-(\omega_{x}^{2} + \omega_{y}^{2})Y_{c} + \upsilon_{z} + \upsilon_{y}\omega_{x} - \upsilon_{x}\omega_{y})m_{a},$$

$$S_{4} = M_{x} - y_{B}B\cos\theta\cos\varphi - (Y_{c}W - z_{B}B)\cos\theta\sin\varphi - \omega_{x}J_{xx} + \omega_{y}\omega_{z}J_{yy} - \omega_{y}\omega_{z}J_{zz} - (\omega_{x}\omega_{z} - \omega_{y} - \omega_{y}^{2})J_{xy} + (\omega_{z} + \omega_{x}\omega_{y})J_{xz} - \omega_{z}^{2}J_{yz} + (\upsilon_{y} + \upsilon_{x}\omega_{z} - \upsilon_{z}\omega_{x})m_{a}Y_{c},$$

$$S_{5} = M_{y} + x_{B}B\cos\theta\cos\varphi - (Y_{c}W - z_{B}B)\sin\theta - \omega_{x}\omega_{z}J_{xx} - \omega_{y}J_{yy} + \omega_{x}\omega_{z}J_{zz} + (\omega_{x} + \omega_{y}\omega_{z})J_{xz} + (\omega_{z} - \omega_{x}\omega_{y})J_{yz} - (\upsilon_{x} - \upsilon_{y}\omega_{z} + \upsilon_{z}\omega_{y})m_{a}Y_{c},$$

$$S_{6} = M_{z} - x_{B}B\cos\theta\sin\varphi - y_{B}B\sin\theta + \omega_{x}\omega_{y}J_{xx} - \omega_{x}\omega_{y}J_{yy} - \omega_{z}J_{zz} + (\omega_{x}^{2} - \omega_{y}^{2})J_{xy} + (\omega_{x} - \omega_{y}\omega_{z})J_{xz} + (\omega_{y} + \omega_{x}\omega_{z})J_{yz}.$$

Из выражений (2.2) видно, что значения промежуточных переменных α_i , β_i ($i = \overline{1,3}$) линейно зависят от параметров НПА. При этом уравнения системы (5.18) также являются линейными относительно этих параметров. Поэтому математическая модель динамики НПА, записанная в виде (5.15), также будет линейна относительно параметров НПА (вектора *q*) и ее можно представить в виде [102]:

$$q(k+1) = q(k),$$

$$S(X_k) = \Phi_I(Z_k)q(k) + \mathcal{G}(k),$$
(5.20)

где $\Phi_I(Z_k) \in \mathbb{R}^{33 \times 6}$ - матрица, сформированная на основе системы (5.18).

Поскольку модель (5.20) является линейной относительно вектора *q*, то для идентификации его элементов можно воспользоваться линейным фильтром Калмана (ЛФК), который обладает небольшой вычислительной сложностью.

Блок идентификации параметров НПА работает следующим образом [168, 173]. Вначале происходит инициализация элементов вектора $\hat{q}(0) = q_0$ и матрицы $P_I(0) = P_{I0}$ ($P_I(k) \in R^{33 \times 33}$ - ковариационная матрица ошибки оценки вектора $\hat{q}(k) \in R^{33}$ параметров математической модели НПА), а затем - обновление всех этих элементов на шагах $k \in [1,...,\infty]$ с помощью выражений

$$K_{I}(k) = \frac{P_{I}(k-1)\Phi_{I}^{T}(k)}{R_{LKF}(k-1) + \Phi_{I}(k)P_{I}(k-1)\Phi_{I}^{T}(k)},$$

$$\hat{q}(k) = \hat{q}(k-1) + K_{I}(k)(S(k) - \hat{q}^{T}(k-1)\Phi_{I}(k)),$$

$$P_{I}(k) = P_{I}(k-1) - K_{I}(k)\Phi_{I}^{T}(k)P_{I}(k-1).$$

(5.21)

При этом в процессе вычислений по формулам (5.21) на вход ЛФК с выхода блока комплексирования данных от бортовых датчиков НПА оценка вектора Z_k , а на его выходе формируется оценка вектора параметров математической модели НПА.

Оценим вычислительную сложность предложенного алгоритма идентификации по сравнению с традиционным. При этом будем полагать, что на первом этапе восстановления полного вектора состояния используется алгоритм, описанный в разделе 5.1.

Вычислительная сложность предложенного алгоритма идентификации складывается из вычислительных сложностей СТФК и ЛФК. Для СТФК эта сложность составляет $O(L^3)$ [168] (L = 18- размерность вектора Z (см. выражение (5.14)).Сложность ЛФК складывается вычислительных сложностей ИЗ математических операций обращения и умножения матриц, которые можно оценить следующим образом [23]: сложность операции обращения матрицы $O(G^3)$, сложность операции умножения $O(N^2G)$, где N = 33 - размерность вектора идентифицируемых параметров, G = 6 - размерность функции измерения, равная количеству дифференциальных уравнений, описывающих динамику НПА. Таким образом,

общую вычислительную сложность предлагаемого алгоритма можно оценить величиной:

$$O(L^3) + 5 \cdot O(N^2G) + O(G^3) = O(18^3) + 5 \cdot O(33^2 \cdot 6) + O(6^3) = O(32886).$$

При использовании традиционного алгоритма для идентификации параметров НПА применяется математическая модель с размерностью вектора состояния L = 18+33 = 51, т.к. она складывается из размерностей вектора Z и вектора идентифицируемых параметров. При этом в процессе идентификации должен использоваться СТФК, так как эта модель является существенно нелинейной. Поэтому вычислительная сложность традиционного алгоритма равна $O(L_T^{3}) = O(51^3) = O(132651)$, что почти в шесть раз выше вычислительной сложности предлагаемого подхода, который может быть реализован на бортовой ЭВМ НПА в реальном масштабе времени.

5.2.2 Результаты математического моделирования алгоритма идентификации параметров НПА

Для проверки работоспособности и эффективности подхода к идентификации параметров НПА было проведено численное моделирование, в процессе которого использовалась математическая модель НПА, описываемая уравнениями (2.1) - (2.6) со следующими параметрами: $m_a = 300 \kappa c$, $Y_c = 0.02 m$, $J_{xx} = 9\kappa c \cdot m^2$, $J_{yy} = 30\kappa c \cdot m^2$, $J_{zz} = 30\kappa c \cdot m^2$; $\lambda_{11} = 80\kappa c$, $\lambda_{22} = 140\kappa c$, $\lambda_{33} = 140\kappa c$, $\lambda_{44} = 5\kappa c \cdot m^2$, $\lambda_{55} = 30\kappa c \cdot m^2$, $\lambda_{66} = 30\kappa c \cdot m^2$, $\lambda_{ij} = 0$, $i \neq j, i, j = \overline{(1,6)}$; $d_{1x} = 30\kappa c \cdot c^{-1}$, $d_{2x} = 10\kappa c \cdot m^{-1}$, $d_{1y} = 60\kappa c \cdot c^{-1}$, $d_{2y} = 30\kappa c \cdot m^{-1}$, $d_{1z} = 60\kappa c \cdot c^{-1}$, $d_{2z} = 30\kappa c \cdot m^{-1}$, $d_{1x} = 20 Hmc$, $d'_{2x} = 10 Hmc^2$, $d'_{1y} = 40 Hmc$, $d'_{2y} = 20 Hmc^2$, $d'_{1z} = 40 Hmc$, $d'_{2z} = 20 Hmc^2$, a матрица ковариаций шумов измерений для ЛФК имела вид $R_{LKF} = 0.05 \cdot I_{6\times 6}$.

В блоке восстановления полного вектора состояния НПА использовался алгоритм комплексирования данных от навигационно-пилотажных датчиков НПА,

построенный на основе СТФК и описанный в разделе 5.1. Состав и характеристики бортовых датчиков НПА описаны в таблице 5.1.

Моделирование работы алгоритма идентификации параметров НПА проводилось при его движении под действием упоров $\tau_{\partial x} = 50 \cdot \sin(0.03 \cdot t)$, $\tau_{\partial y} = 50 \cdot \sin(0.02 \cdot t)$, $\tau_{\partial z} = 50 \cdot \sin(0.01 \cdot t)$, $M_{\partial x} = 0$, $M_{\partial y} = 5 \cdot sign(\sin(0.2 \cdot t))$, $M_z = 22 \cdot \sin(0.1 \cdot t + \pi)$, создаваемых его движительным комплексом. Указанный режим является наиболее «напряженным» и выбирался с учетом того, чтобы можно было идентифицировать все параметры НПА. В более простых режимах движения НПА его математическая модель упрощается (так как отдельные слагаемые становятся равными нулю) и, следовательно, уменьшается количество параметров, подлежащих идентификации.

На рис. 5.5 представлены результаты идентификации присоединенных масс (рис. 5.5а-в) и моментов инерции (рис. 5.5г-е) по всем степеням свободы НПА.

Из этих рисунков видно. что процесс исходной идентификации присоединенных масс НПА занимает около 60 с, а присоединенных моментов инерции - примерно 200 с. При этом ошибка определения присоединенных масс составляет 2%, а присоединенных моментов инерции - 10-15%. Относительно большое время идентификации параметров объясняется сложностью математической модели НПА и сильными помехами в восстановленном векторе его состояния. Увеличение времени и погрешностей определения присоединенных моментов инерции ΗΠΑ по сравнению с присоединенными массами объясняется необходимостью использования восстановленных значений угловых ускорений, заметно отстающих от своих реальных значений ввиду инерционности СТФК.

Результаты идентификации гидродинамических коэффициентов по линейным и вращательным степеням свободы НПА представлены на рис. 5.6 а-е. На этих рисунках цифрой 1 обозначены кривые, соответствующие процессам идентификации гидродинамических коэффициентов, для линейной, а цифрой 2 – для квадратичной зависимостям гидродинамических сил (моментов) от скорости движения НПА по его отдельным степеням свободы.



Рис. 5.5 Результаты идентификации присоединенных масс и моментов инерции НПА

Из представленных рисунков идентификации видно, что время гидродинамических коэффициентов НПА по разным степеням свободы находится в диапазоне от 50 до 200 с. При этом погрешность определения указанных параметров 2 10%. до Большой разброс времени идентификации составляет от гидродинамических коэффициентов объясняется различием режимов движения НПА по отдельным степеням свободы. Чем меньше воздействий со стороны других степеней свободы, тем быстрее и точнее определяются указанные коэффициенты.



Рис. 5.6 Результаты идентификации гидродинамических коэффициентов по линейным и вращательным степеням свободы НПА

Таким образом, результаты моделирования показали, что предложенный метод идентификации, обладая относительно небольшой вычислительной сложностью, позволяет достаточно точно и быстро оценивать параметры НПА

5.3 Выводы

Таким образом, в данном разделе были разработаны методы обработки данных, поступающих от бортовых навигационно-пилотажных датчиков НПА, которые позволяют сформировать все необходимые обратные связи для реализации СУ НПА, а также на основе этих данных определить параметры НПА, для построения его математической модели, с целью синтеза и моделирования работы СУ этого НПА. В частности, были получены следующие результаты.

1. Был разработан метод комплексирования данных, получаемых от бортовых датчиков НПА, позволяющий восстановить по неполным и зашумленным данным все параметры движения указанного НПА. Кроме того, разработанный алгоритм позволяет обеспечить желаемую частоту обновления данных о параметрах движения НПА, независимо от частоты обновления данных от его бортовых датчиков. При этом использование только актуальных данных позволяет существенно снизить вычислительную сложность алгоритма.

2. Был предложен эффективный алгоритм идентификации параметров НПА, который позволяют учесть ограниченный набор имеющихся навигационно-пилотажных датчиков и обладает приемлемой вычислительной сложностью для их успешной реализации на типовых бортовых ЭВМ. Этот алгоритм состоит из двух этапов. На первом происходит восстановление с помощью его кинематической модели движения НПА всех необходимых для идентификации его параметров данных, а на втором на основе линейного фильтра Калмана происходит идентификация его параметров. Использование на каждом из этих двух этапов только части полной математической модели движения НПА позволяет в несколько раз снизить вычислительную сложность предложенного алгоритма по сравнению с традиционными подходами.

6. РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПОЛУНАТУРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В настоящее время для разработки и настройки СУ НПА широко используется компьютерное моделирование, что позволяет на начальном этапе разработки этих СУ обойтись без сложных и дорогостоящих натурных экспериментов с реальным оборудованием, а также ускорить процесс разработки НПА. Основная цель, которая ставится при компьютерном моделировании работы НПА является разработка и тестирование алгоритмов управления и обработки информации которые в дальнейшем будут использованы в процессе реализации СУ НПА, его навигационной системы, системы технического зрения и т.д. При этом наибольшее распространение получили два подхода к указанному моделированию: использование универсальных сред моделирования (Matlab, Matcad и т.д.) или специализированных моделирующих комплексов, созданных для конкретной модели НПА.

Преимуществом использования универсальных сред моделирования является возможность использования большого количества входящих В ИХ состав инструментов, реализующих различные математические методы синтеза СУ динамическими объектами, а также развитых средств визуализации и анализа полученных при моделировании результатов. Однако основным недостатком использования указанных сред является то, что они позволяют разработать алгоритмы управления, но не позволяют оценить качество реализации этих алгоритмов в реальной бортовой СУ НПА. Кроме того, часто возникает необходимость использования специфических алгоритмов и моделей, реализация которых в универсальных средах моделирования затруднена.

Решение проблем указанных возможно при использовании специализированных моделирующих комплексов, В которых С помощью компьютерного моделирования можно проверить качество реализации бортовой СУ НПА, а также смоделировать специфические условия окружающей среды. Примером такого подхода может служить работа [249], где описывается специализированный программный комплекс для моделирования работы СУ НПА при обнаружении и

исследовании участков химических загрязнений в океане. Особенность указанного комплекса состоит в том, что в нем одновременно используется несколько разных математических моделей: математическая модель динамики НПА, математическая модель распространения загрязнений и математическая модель течений. Другим примером может служить моделирующий комплекс на основе web-технологий, описанный в работе [127] и предназначенный для исследования системы генерации траекторий НПА.

Другой важной проблемой, решаемой специализированными моделирующими комплексами является исследование качества работы бортовой СУ НПА в полунатурном ("hardware-in-loop") режиме моделирования, который позволяет исследовать качество реализации СУ НПА, используя математическую модель этого НПА как объект управления. Указанный подход описан в работе [227], где методика полунатурного моделирования используется для исследования алгоритма обхода препятствий. При этом описание математической модели НПА и его системы управления конвертируется из графического языка Simulink в специальную программу, исполняемую в реальном масштабе времени на отдельном контроллере. Также метод полунатурного моделирования используется в работе [238] для создания специального распределенного моделирования используется с указанными моделями через сетевые интерфейсы.

Несмотря на эффективность использования специализированных моделирующих комплексов, основной их недостаток заключается в их сложной реализации, в частности, в создании специального программного обеспечения, реализующего модель НПА и средств отображения и анализа данных, полученных в процессе моделирования. В тоже время указанные средства удобным образом уже реализованы в универсальных моделирующих средах.

В связи в вышесказанным, необходимо разработать подход к построению моделирующего комплекса, объединяющего преимущества как универсальных, так и специализированных моделирующих комплексов.

6.1 Описание программного комплекса для моделирования движения НПА

Основным принципом при разработке моделирующего комплекса для исследования СУ НПА следует принять его модульность. В соответствии с указанным принципом комплекс должен состоять из независимых функциональных блоков, каждый из которых решает определенный круг задач. На рис. 6.1 приведена блок-схема моделирующего комплекса, разработанного на основе модульного принципа [79].



Рис.6.1 Функциональная схема программного моделирующего комплекса

На схеме выделены три основных блока: блок взаимодействия с пользователем (БВП), блок хранения данных (БХД), блок моделирования (БМ), а также показаны основные потоки данных, которыми обмениваются различные функциональные части комплекса. В свою очередь, каждый из указанных основных блоков разбит на локальные блоки. Такая структура в случае совершенствования комплекса позволяет не изменять весь основной блок, а заменять только конкретный локальный блок, отвечающий за конкретную задачу, согласовав его входную и выходную информацию. Например, при необходимости проверить качество работы различных видов СУ движением НПА, достаточно изменить описание этих СУ, входящее в соответствующий локальный блок блока моделирования, что не затрагивает других частей программного моделирующего комплекса.

Основные блоки этого комплекса выполняют следующие функции.

- Блок взаимодействия с пользователем обеспечивает ввод данных и вывод информации в удобной для пользователя форме. Он позволяет оператору комплекса ставить задачи движения НПА, наблюдать в реальном масштабе времени за показаниями его приборов и сенсоров, а также контролировать в интерактивном режиме выполнение поставленных задач. Внешний вид интерфейса пользователя моделирующего комплекса показан на рис. 6.2 [80].



Рис. 6.2 Внешний вид интерфейса пользователя

Блок моделирования обеспечивает расчет ΗΠΑ движения по сформированной пространственной траектории в среде с заданными параметрами. Кроме того, этот блок моделирует работу расположенных на НПА сенсоров и датчиков, а также СУ его движением и алгоритмов формирования траектории. Следует отметить, что модульная структура комплекса, позволяет в качестве блока моделирования использовать универсальную моделирования. среду Однако необходимым условием для этого является использование алгоритма автоматической синхронизации моделирующего комплекса с универсальной средой моделирования. Указанный алгоритм будет рассмотрен далее.

- Блок хранения данных обеспечивает хранение и передачу данных между основными блоками комплекса. Для этой цели он реализует специальный интерфейс, позволяющий этим блокам и модулям, входящим в их состав, получать и обмениваться необходимыми данными.

В процессе работы комплекса весь обмен данными между блоками осуществляется через БХД. При этом каждый из блоков БВП и БМ как получает из БХД необходимые для работы данные, так и передает туда данные, являющиеся результатом их работы.

Для выполнения функции визуализации движения НПА БВП получает из БХД информацию о текущем состоянии аппарата, его реальном положении и ориентации в пространстве, трехмерную модель рельефа, планируемую траекторию и реально пройденный путь, а также данные с его сенсоров. В БХД со стороны БВП поступают данные о параметрах среды и НПА, введенные пользователем. Кроме того, БВП обеспечивает ввод пользователем задания для НПА и передачу этого задания в формализованном виде в БХД.

Из БМ в БХД поступают:

- информация о расчетном положении НПА в пространстве, показания навигационных приборов и датчиков параметров его движения, а также информация о кинематических параметрах подвижных частей НПА (манипулятор, движитель с изменяемой ориентацией вектора тяги и т.д.);

сформированная траектория движения НПА;

данные, полученные от датчиков, установленных на НПА.

Из БХД в БМ поступают данные о целях и задачах НПА, информация об окружающей среде и параметрах модели аппарата, а также о параметрах воздействия окружающей среды на НПА (подводные течения и т.д.).

Помимо трех основных блоков в программный комплекс входят еще два вспомогательных блока: генератор среды (ГС) и редактор аппарата (РА).

ГС предназначен для создания виртуального испытательного полигона, где и будет происходить движение НПА. ГС позволяет загрузить данные о рельефе, расположить различные дополнительные объекты в испытательной области, задать физические параметры среды (подводные течения, плотность воды, ее соленость, а также освещенность дна и т.д.), наложить на рельеф текстуры для более реалистичной визуализации, сформировать и наложить карты звукопоглощения и звукоотражения для донного рельефа и различных придонных объектов. При этом параметры окружающей среды задаются с помощью регулярных сеток, а их значения в произвольной точке полигона рассчитываются на основе трилинейной интерполяции [80].

РА предназначен для создания моделей различных типов НПА, отличающихся по внешнему виду, особенностям и расположению сенсоров, а также по конфигурации движительного комплекса. Внешний вид интерфейса РА показан на рис. 6.3 [80].

Помимо моделирования динамики НПА, в процессе эксплуатации НПА важную роль играет проверка корректности задания оператором миссии НПА. Для этого может использоваться отдельный модуль, верификатор миссии, который пошагово моделирует выполнение команд НПА, составляющих миссию, и выводит результат в интерфейс моделирующего комплекса [101, 105].

Таким образом, предложенная структура моделирующего комплекса позволяет обеспечить решение всех задач, возникающих при создании и тестировании СУ НПА, а также позволяет использовать в своем составе универсальные среды моделирования, что обеспечивает удобный интерфейс для редактирования моделей НПА и анализа результатов моделирования.



Рис. 6.3 Внешний вид редактора аппарата

6.2 Реализация режима полунатурного моделирования движения НПА

Модульная структура моделирующего комплекса, представленная на рис.6.1, позволяет удобным способом реализовать режим полунатурного моделирования. Для этого блок моделирования (см. рис. 6.1) заменяется на два взаимодействующих компонента: программную реализацию СУ НПА и универсальную среду моделирования. Использование универсальной среды моделирования (например, Matlab) позволяет на этапе тестирования СУ НПА оперативно выводить все возможные данные о движении этих НПА без внесения изменений в сам моделирующий комплекс.

Структурная схема блока моделирования в процессе его работы в режиме полунатурного моделирования показана на рисунке 6.4.

В схеме, показанной на рис. 6.4, может использоваться как программная реализация СУ НПА, выполняющаяся на компьютере в локальной сети, так и непосредственно бортовой компьютер НПА. В первом случае использование полунатурного моделирования позволяет обеспечить проверку правильности программной реализации СУ НПА, а использование в процессе полунатурного

моделирования СУ НПА, выполняющейся на его бортовом компьютере, позволит произвести настройку параметров регуляторов с учетом реального быстродействия компьютера и задержек в передачи данных.



Рис. 6.4 Структурная схема блока полунатурного моделирования работы СУ НПА

Для согласования интерфейсов передачи данных между математической моделью и программной реализацией СУ НПА используется программный модуль сопряжения (см. рис. 6.4). Указанный программный модуль получает данные о движении НПА, рассчитанные в математической модели, преобразует их к требуемому для использования в СУ НПА виду, и передает их по каналу связи в эту СУ. Также он получает от СУ информацию о сигналах управления и после соответствующего преобразования передает их с математическую модель. Использование указанного промежуточного программного модуля позволяет согласовать как форматы и интерфейсы передачи данных, так и обеспечить возможность работы различных частей моделирующего комплекса с разным периодом дискретизации.

При этом для обеспечения совместной работы универсальной среды моделирования, в качестве которой выступает Matlab, и СУ НПА необходимо синхронизировать их работу в реальном масштабе времени.

Далее рассмотрим алгоритм автоматической синхронизации предложенного моделирующего комплекса с универсальной средой моделирования.

6.3 Метод автоматической синхронизации универсальной среды моделирования Matlab с моделирующим комплексом

Обмен данными между средой моделирования Matlab и моделирующим комплексом организован следующим образом. Моделирование динамики НПА происходит в среде Matlab в машинном времени τ_s с шагом интегрирования h_i . Так как в зависимости от желаемой точности моделирования величина h_i может иметь малые значения, то передавать данные из Matlab в СУ НПА и остальные блоки моделирующего комплекса на каждом шаге интегрирования нецелесообразно. Передачу данных из модели в указанные блоки следует организовывать с шагом $\Delta \tau_s = m_s h_i$, где m_s – заданное количество шагов интегрирования модели. При этом в моделирующий комплекс из Matlab передается вектор чисел с плавающей точкой двойной точности, имеющий формат $S_s = \{\tau_i, G\}$, где τ_{si} - текущий момент машинного времени τ_s ; $G = (g_1, ..., g_m)$ - данные о параметрах движения НПА, использующиеся для визуализации его движения и для формирования обратных связей в СУ. Данные из СУ НПА в Matlab поступают в виде вектора чисел с плавающей точкой, имеющего формат $R_s = \{\tau_{sv}, \{P_1, ..., P_n\}\}$, где τ_{sv} - момент машинного времени, для которого были рассчитаны данные, передаваемые в модель; $P_1,...,P_N$ - сигналы управления движителями НПА, передаваемые в Matlab.

Для удобства организации процесса обмена данными между моделью Matlab/Simulink и внешней программной средой были разработаны два дополнительных подблока Simulink [104, 150]. Для приема данных в этих подблоках задаются ip-адрес и номер порта, на который должны отправляться данные, количество элементов в передаваемом векторе данных и интервал приема $\Delta \tau_s$. При передаче данных кроме указанного набора информации, задавался дополнительный параметр, использующийся для синхронизации вычислительных процессов. О его выборе будет сказано ниже.

Основными элементами в указанных подблоках Simulink являются *s*-функции, осуществляющие прием и передачу данных по протоколу UDP. Инициализация указанного протокола в этих функциях происходит в начале процесса моделирования

при создании объектов типа UDP, параметрами которых являются заданные пользователем параметры обмена данными. Передача и прием данных по UDP - протоколу осуществляется с помощью библиотечных функций Matlab fwrite(\cdot) и fread(\cdot), параметрами которых служат экземпляры созданных классов UDP, а также вектор передаваемых данных (для функции fwrite(\cdot)) и количество байт, передающихся в одной дейтаграмме (для функции fread(\cdot)).

Главной особенностью рассматриваемого блока моделирования является наличие двух параллельных вычислительных процессов, происходящих в двух разных приложениях с разной скоростью. При этом учитывается, что процесс передачи блока данных (в том числе и при использовании локальной сети) занимает определенное время. Поэтому может возникнуть ситуация, когда данные о сигналах управления, рассчитанные в СУ НПА, окажутся устаревшими для текущего шага машинного времени в Matlab. Это неизбежно приведет к рассогласованию моделирования динамики движения НПА и работы его СУ. Для устранения указанной ситуации возникает необходимость синхронизации скорости протекания указанных вычислительных процессов. Эта задача будет подробно рассмотрена и решена ниже.

6.3.1 Особенности синхронизации вычислительных процессов СУ и процессов моделирования динамики НПА в Matlab

Пусть машинное время моделирования в Matlab и промежуток реального времени *t*, прошедший с начала процесса моделирования, определяются соотношением

$$\tau_s = k_t t \,, \tag{6.1}$$

где $k_t > 0$ - коэффициент определяющий скорость моделирования.

В настоящее время известен метод синхронизации вычислительных процессов в Matlab, обменивающихся данными по UDP – протоколу [69]. Он предполагает, что во всех этих процессах принимается одинаковая величина коэффициента k_t , что обеспечивает одинаковый темп расчетов и, соответственно, их синхронизацию.

Однако для реальных систем заранее сложно определить скорость выполнения расчетов в различных частях комплекса и точно выбрать величину коэффициента k_t . Поэтому в диссертации предлагается другой метод, позволяющий автоматически обеспечить синхронную работу Matlab и внешних программ.

Вначале сформулируем условия синхронизации. Пусть в некоторый момент машинного времени τ_{si} из Matlab посылаются данные во внешнюю программу. Указанные данные передаются в эту программу за время t_{mp} , обрабатываются в ней в течение времени t_v , а затем результат отсылается обратно в Matlab за время t_{pm} . В результате с учетом (6.1) момент машинного времени τ_r^{si} , в который в Matlab вернутся после обработки внешней программой данные, полученные ранее для момента τ_{si} , будет равен

$$\tau_r^{sl} = \tau_{si} + k_t (t_{mp} + t_v + t_{pm}).$$
(6.2)

Если разность τ_r^{si} - τ_{si} велика, то данные, поступившие в Matlab из внешней программы, будут устаревшими для их использования в текущий момент машинного времени, а результаты моделирования будут ошибочными. Для устранения указанной ситуации необходимо выполнение условия

$$\tau_r^{si} - \tau_{si} = k_t (t_{mp} + t_v + t_{pm}) = \tau_{\varepsilon} \le \tau_{\partial on}, \qquad (6.3)$$

где τ_{don} - допустимая величина задержки при поступлении данных из внешней программы в среду Matlab. Величина τ_{don} зависит от динамических свойств модели и возможной скорости изменения внешних воздействий. При этом всегда должно выполняться неравенство $\tau_{don} \ge \Delta \tau$.

Из выражения (6.3) следует, что уменьшить величину τ_{ε} можно только, уменьшая коэффициент k_t , то есть скорость моделирования в Matlab. Указанное

замедление процесса моделирования можно обеспечить, если в определенные моменты времени, например, при приеме данных, приостанавливать процесс моделирования на некоторый малый промежуток времени t_p . В результате возникает задача выбора такой величины t_p , которая позволит обеспечить выполнение условия (6.3), но при этом не приведет к избыточному замедлению процесса моделирования. Так как заранее сделать этого невозможно, то в данной работе предлагается применить подход, использующийся в системах автоматического управления. Суть этого подхода состоит в том, чтобы величину t_p формировать в зависимости от текущего значения разности $\tau_{\varepsilon} - \tau_{don}$ с помощью следующего выражения:

$$t_{p} = \begin{cases} k_{p}(\tau_{\varepsilon} - \tau_{\partial on}), & e c \pi u \tau_{\varepsilon} > \tau_{\partial on} \\ 0, & e c \pi u \tau_{\varepsilon} \le \tau_{\partial on} \end{cases},$$
(6.4)

где k_p - некоторый положительный коэффициент. Приостановка процесса моделирования на промежуток времени t_p может быть осуществлена с помощью библиотечной функции Matlab *pause*(.).

Очевидно, что для синхронизации процесса моделирования в Matlab с вычислительным процессом, осуществляемым внешней программой, необходимо, чтобы промежуток реального времени Δt между отсылкой данных из Matlab и получением данных после обработки обратно был равен времени $t_{mp} + t_v + t_{pm}$. Только в этом случае можно считать, что все вычислительные процессы в моделирующем комплексе полностью синхронизированы, т.е. протекают с одинаковой скоростью. Следует отметить, что в случае, когда $\Delta t > t_{mp} + t_v + t_{pm}$, дополнительной синхронизации указанных процессов не требуется, так как при $\tau_{don} \geq \Delta \tau$ всегда будет выполняться условие (6.3). Указанная ситуация возможна, когда происходит моделирование сложной динамической системы или когда шаг моделирования достаточно мал.

Если же время моделирования в Matlab меньше, чем время выполнения расчетов во внешней программе и справедливо неравенство $\Delta t < t_{mp} + t_v + t_{pm}$, то условие (6.3) нарушается. В этом случае введение дополнительной задержки t_p увеличивает промежуток времени Δt , который стремится к $t_{mp} + t_v + t_{pm}$, то есть синхронизация вычислительных процессов практически обеспечивается.

Необходимым условием работоспособности предложенного алгоритма синхронизации является передача вместе с основными данными из Matlab значения текущего машинного времени, для которого они были рассчитаны, а также передача этого значения из внешней программы обратно в Matlab. Указанная операция, обеспечивая автоматическую синхронизацию всех вычислительных процессов, не приводит к существенному увеличению объема передаваемых данных.

Следует отметить и еще одну важную особенность работы предложенного алгоритма синхронизации, заключающуюся в том, что в процессе моделирования при приеме данных в Matlab может возникнуть ситуация, когда в буфере udp-порта будет содержаться несколько дейтаграмм. В этом случае следует пользоваться только теми данными, которые рассчитаны для машинного времени, наиболее близкого к текущему. В связи с этим при получении данных в Matlab необходимо выполнять следующие действия [68]:

1. Проверить количество байт, содержащихся в буфере udp-порта. Оно хранится в поле ByteAvailable объекта udp, который используется для приема данных.

2. Определить количество пакетов данных, доступных для считывания:

$$n = udp.ByteAvailable \operatorname{div} (Count_rec+1)*8$$
,

где *Count_rec* – количество переменных во входящем пакете данных, использующихся в Matlab; div – операция взятия целой части от деления.

3. Считать n пакетов с заданного udp-порта и передавать последний пакет в Matlab.

Получать необходимые для работы данные можно и путем уменьшения размера буфера udp-порта до размера принимаемой дейтаграммы, используя поле

InputBufferSize объекта udp. После соответствующего уменьшения в буфере udpпорта будут содержаться только самые «свежие» данные, однако при этом будет теряться информация, которая может потребоваться для дополнительных вычислений в Matlab.

6.3.2 Результаты вычислительного эксперимента

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма синхронизации были проведены вычислительные эксперименты, в которых использовались два персональных компьютера, подключенных к одной локальной сети. На одном компьютере происходил процесс моделирования в Matlab/Simulink, а на втором работала внешняя программа, принимающая данные из Matlab и возвращающая их обратно.

В модели Matlab задавался тестовый сигнал в виде гармонической функции, который с периодом в 0.01с машинного времени передавался во внешнюю программу. Внешняя программа работала в двух режимах. В первом имитировалась минимальная вычислительная нагрузка (данные принимались и сразу же отсылались обратно), а во втором имитировался большой объем вычислений, когда после приема данные отсылались внешней программой с задержкой в 30 мсек. При этом полагалось, что $\tau_{don} = 0.01c$, $k_p = 0.1$.

На рис. 6.5 показан процесс моделирования в случае, когда отсутствует синхронизация между Matlab и внешней программой, при этом внешняя программа работает в режиме имитации минимальной вычислительной нагрузки. На рис. 6.5а цифрой 1 обозначен тестовый сигнал, который передается из Matlab во внешнюю программу, а цифрой 2 - сигнал, который поступает в Matlab. Из этих рисунков видно, что при отсутствии синхронизации даже при минимальной вычислительной нагрузке во внешней программе величина τ_{ε} (см. рис. 6.5б) может достигать 0.7 с, что приводит к существенному искажению исходного сигнала и результатов моделирования в целом.



Рис. 6.5 Процесс моделирования без синхронизации и при минимальной вычислительной нагрузке во внешней программе

На рис. 6.6 показан процесс моделирования с использованием предложенного метода синхронизации. При этом, как и ранее, внешняя программа работала в режиме имитации минимальной вычислительной нагрузки. Обозначения на рис. 6.6а и последующих рисунках аналогичны обозначениям на рис. 6.5а.



Рис. 6.6 Процесс моделирования с синхронизацией и при минимальной вычислительной нагрузке во внешней программе

Из рис. 6.6 видно, что использование предложенного алгоритма синхронизации позволяет более чем в 15 раз уменьшить величину τ_{ε} . При этом следует отметить, что условие (6.4) позволяет приблизить величину τ_{ε} к τ_{don} , но не гарантирует выполнение условия (6.3) на протяжении всего процесса моделирования (см. рис.

6.6б). Это объясняется тем, что при использовании условия (6.4) замедление процесса моделирования происходит тогда, когда условие (6.3) нарушается. Однако при необходимости значение τ_{don} всегда можно задать меньше, чем требуется для осуществления конкретного процесса моделирования. Это обеспечит неизменное выполнение условия (6.3) в течение всего процесса моделирования.

На рис. 6.7 и 6.8 показан процесс моделирования в случае, когда во внешней программе имитируется большая вычислительная нагрузка (задержка составляет 30 мс) при отсутствии синхронизации и с использованием разработанного алгоритма синхронизации, соответственно. Из рис. 6.7 видно, что отсутствие синхронизации приводит к тому, что данные из внешней программы в основном поступают в Matlab с задержкой машинного времени более чем на 1 с, которая для большинства динамических объектов является недопустимо большой.

Однако из рис. 6.8 видно, что при той же самой вычислительной нагрузке предложенный алгоритм синхронизации позволяет уменьшить задержку поступления необходимых данных почти в 30 раз (в основном до 0.04 с машинного времени). При этом можно отметить, что увеличение времени расчетов во внешней программе, хоть и незначительно, но все же повышает τ_{ε} (см. рис. 6.6б и 6.8б). Но указанный эффект можно компенсировать увеличением коэффициента k_p .



Рис. 6.7 Процесс моделирования без синхронизации и при имитации вычислительной нагрузки во внешней программе



Рис. 6.8 Процесс моделирования с синхронизацией и при имитации вычислительной нагрузки во внешней программе

Таким образом, результаты вычислительных экспериментов подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода автоматической синхронизации Matlab с внешней программой, но и необходимость введения такой синхронизации.

6.4 Выводы

В данной главе был разработан подход к построению моделирующего комплекса, позволяющего проводить всестороннее компьютерное моделирование движения НПА в неизвестной окружающей среде и тестировать работу созданных СУ в полунатурном режиме.

В частности были получены следующие результаты.

1. Была разработана схема моделирующего комплекса, построенного по модульному принципу, определен состав отдельных модулей, позволяющий реализовать все необходимые для исследования и тестирования работы СУ НПА функции. При этом предложенная модульная структура комплекса обеспечивает возможность изменять и модифицировать состав модулей, входящих в этот комплекс, в зависимости от потребностей пользователя без необходимости вносить изменения в другие части комплекса.

2. Был разработан подход к полунатурному моделированию работы СУ НПА, при котором программная реализация этой СУ управляет математической моделью НПА, реализованной в универсальной среде моделирования Matlab, что позволяет обеспечить удобный для пользователя интерфейс и возможность использование большого количества инструментов этой среды моделирования.

3. Был разработан метод автоматической синхронизации вычислительных процессов с универсальной средой моделирования и другими модулями моделирующего комплекса, что позволяет существенно расширить возможности по использованию указанного комплекса при выполнении задач моделирования движения НПА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена созданию новых подходов к синтезу СУ пространственным движением НПА, а также методов формирования их программных сигналов, обеспечивающих НПА высокоточное движение по заданной траектории в условиях неопределенности их параметров, наличия взаимовлияний между каналами управления этих НПА, а также ограничений на сигналы управления их исполнительными устройствами.

При этом основными научными достижениями являются.

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.

Метод синтеза самонастраивающихся СУ движителями 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 и тем самым добиться существенного улучшения качества управления как отдельными движителями, так и НПА в целом.

Методы синтеза адаптивных прогнозирующих нейро-нечетких СУ движителями НПА, которые за счет применения специального подхода, используя небольшие по объему обучающие выборки, позволяют в несколько раз сократить время перенастройки нейросетей, выполняя необходимые вычисления в реальном масштабе времени на бортовых компьютерах НПА и тем самым обеспечивая заданные динамические свойства их движителям.

Метод синтеза адаптивных децентрализованных СПС, работающих в вынужденном режиме и предназначенных для управления скоростями движения НПА, а также метод расчета величины шага квантования непрерывных задающих сигналов скоростей в этих СПС, которые позволяют обеспечить их автоматическую

настройку без непосредственного измерения или идентификации параметров НПА и тем самым увеличить точность работы и быстродействие всей СУ НПА в целом.

Метод синтеза СУ для НПА с одним поворотным маршевым движителем, позволяющей за счет введения дополнительного контура стабилизации угла крена и использования разработанного метода решения обратной задачи кинематики устройства ориентации движителя позволяют обеспечивать компенсацию опрокидывающего момента, действующего на этот НПА со стороны вращающегося движителя, а также методы формирования программных сигналов, подаваемых на электроприводы устройства ориентации маршевого движителя НПА и методы формирования траекторий движения этого НПА, которые за счет учета ограниченной маневренности позволяют обеспечить ему точное движение в различных режимах.

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 при сохранении заданной динамической точности этого движения независимо от типа используемых СУ НПА.

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.

Метод идентификации параметров НПА в процессе его работы, обладающий малой вычислительной сложностью и обеспечивающий возможность его реализации на типовых бортовых компьютерах НПА.

Новый подход к разработке универсального моделирующего комплекса, предназначенного для математического и полунатурного моделирования произвольных движений различных НПА, позволяющий за счет использования метода автоматической синхронизации вычислительных процессов применять в процессе исследования работы программной реализации СУ НПА типовые внешние программные среды моделирования.
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автономные подводные роботы: системы и технологии/ под ред.
 М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 398 с.

Агеев М.Д. и др. Автоматические подводные аппараты / М. Д.
 Агеев, Б. А. Касаткин, Л. В. Кисилев и др. – Л.: Судостроение, 1981. – 224 с.

 Агеев М.Д. Автономные необитаемые подводные аппараты. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 272 с.

Агеев М.Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА.
 Подводные роботы и их системы / Отв. ред. Л.В. Киселев. Под общ. ред.
 М.Д.Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – С.33-49.

5. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. - Нижний Новгород: НГУ, 2006. – 93 с.

6. Васильев В.А., Васильев Ю. С., Потехин Ю. П. Исследование динамики и управляемости глубоководных аппаратов // Изв. ВУЗов. Судостроение. – 1975. – №12. – С. 6-11.

7. Васильев К.К., Аникин А.А. Калмановское комплексирование и моделирование навигационных систем // Электронная техника: Межвузовский сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ. – 2005. – С. 18-22.

 Громыко В.Д., Санковский Е. А. Самонастраивающиеся системы с моделью. – М.: Энергия, 1974. – 80 с.

9. Гузев М.А., Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Оценка амплитуды квантования непрерывного задающего сигнала адаптивной системы с переменной структурой // Информационно измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 6. – Т.7. – С. 9-19.

Дыда А.А., Филаретов В.Ф. Адаптивные системы с переменной структурой для управления электроприводом робота // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1987. – № 1. – С.219-230.

11. Дыда А.А. Синтез адаптивного и робастного управления исполнительными устройствами подводных роботов. Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук. - Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 1998.

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

 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.

 Дыда А.А., Филаретов В.Ф. Самонастраивающаяся система с переменной структурой для управления электроприводами манипулятора // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1989. – № 2. – С. 102-106.

15. Егупов Н.Д, Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. – М.: Из-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 744 с.

 Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.

17. Емельянов С.В., Уткин В. И., Таран В. А. и др. Теория систем с переменной структурой/Под ред. С. В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с.

18. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: Изд-во МГУ им. Баумана, 2004. – 480 с.

 Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин// Подводные исследования и робототехника. – 2006. – №1. – С. 31-39.

20. Кавалло Э., Миккелини Р., Юхимец Д.А., Филаретов В.Ф. Особенности конструкции и системы управления автономного подводного аппарата с одним движителем для его точного перемещения в пространстве // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 6. – С. 98-107.

21. Кавалло Е., Микелини Р., Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности создания и управления автономным подводным аппаратом с

одним маршевым движителем // Мехатроника, автоматизация управление. – 2005. – №11. – С. 21-36.

22. Кадец В.М. Курс функционального анализа: Учебное пособие для студентов механико-математического факультета. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2006. – 607 с.

 Кибернетический сборник. Новая серия. Вып. 25. Сб. статей 1983-1985 гг.: Пер. с англ.- М.:Мир. – 1988. – 237 с.

24. Кизимов А.Т., Березин Д.Р., Карабаш Д.М., Летунов Д.А. Бесплатформенная инерциальная курсовертикаль для легкого беспилотного летательного аппарата // Датчики и системы. – 2011. – № 4. – С. 37-42.

25. Киселев Л.В. О точности стабилизации автономного подводного аппарата. Подводные роботы и их системы/ Отв. ред. Л. В. Киселев. Под общ. ред. М. Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – С.84-93.

26. Козлов В.И. Самонастраивающиеся системы с релейными элементами. – М.: Энергия, 1974. – 88 с.

27. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике. – М.: Наука, 1973. –
832 с.

28. Крутько П.Д. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными системами манипуляторов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1988. – №4. – С. 3-13.

 Куаффе Φ. Взаимодействие робота с внешней средой. – М.:Мир, 1985. – 285 с.

Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. – М.:
 Высшая школа, 1980. – 287 с.

31. 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.

32. Лебедев А. В., Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Разработка методов синтеза адаптивных систем управления пространственным движением

подводных аппаратов // Сб. научных статей к тридцатилетию ИАПУ ДВО РАН. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2001. – С. 82-95.

33. Лебедев А.В. Синтез адаптивной системы управления пространственным положением подводного робота. Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Владивосток: Издательство ДВГТУ, 1997. – 133 с.

34. Лебедев А.В. Синтез алгоритма и устройства формирования траектории движения динамического объекта с учетом ограничений на управляющие сигналы // Матер. IX Междунар. Четаевской конф. "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением". Иркутск. – 2007. – Т. 4. – С. 137-145.

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

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

37. Лебедев А.В., Филаретов В.Ф. Синтез многоканальной системы с переменной структурой для управления пространственным движением подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – №3. – С. 170-176.

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

39. Малышев В.А., Тимофеев А.В. Динамика манипулятора и адаптивное управление // Автоматика и телемеханика. – 1981. – №8. – С.90-98.

40. Методы робастного, нейро - нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Изд - во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.

41. Мышляев Ю.И. Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределенности на основе настраиваемого

скользящего режима // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №2. – С. 11-16.

42. Носов Р.Р., Пушкин М.М. Адаптивное управление в линейноквадратичной задаче в условиях априорной неопределенности // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1987. – №4. – С.153-158.

43. Павловский В.Е., Забегаев А.Н., Калиниченко А.В., Павловский
В.В. Объединенная система навигации мобильного робота по маякам и видеоориентирам // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – №10.
– С. 66-71.

44. Палис Ф., Филаретов В.Ф., Цепковский Ю., Юхимец Д.А. Особенности синтеза прогнозирущих систем с нейрофаззи сетями для управления нелинейными динамическими объектами с переменными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 4. – С. 11-18.

45. Палис Ф., Филаретов В.Ф., Цепковский Ю.А., Юхимец Д.А. Применение нейрофаззи сетей для управления движителями подводных аппаратов // Мехатроника, управление и автоматизация. – 2006. – № 3. – С. 25-33.

46. Пантов Е.Н., Махин Е.Е., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.:Судостроение, 1973. – 209 с.

47. Патент РФ №1571548. Релейная адаптивная система / А.А. Дыда
 БИ № 22. 1990.

48. Патент РФ №2147985. Устройство для управления движителем подводного робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, Д.А.Юхимец. БИ №12. 2000.

49. Патент РФ №2209718. Устройство для управления движителем подводного робота / В.Ф.Филаретов, А.В.Лебедев, Д.А.Юхимец. БИ №22. 2003.

50. Патент РФ №2215318. Адаптивная система с переменной структурой для управления скоростью движения подводного робота / В.Ф.Филаретов, Д.А.Юхимец. БИ № 30. 2003.

51. Патент РФ №2445670. Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории / В.Ф.Филаретов, Д.А.Юхимец. БИ № 8. 2012.

52. Патент РФ №2451970. Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории / В.Ф.Филаретов, Д.А.Юхимец. БИ № 15. 2012.

53. Патент РФ №2453891. Устройство формирования программных сигналов управления / В.Ф.Филаретов, Д.А. Юхимец. БИ № 24. 2012.

54. Патент РФ №2523187. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов / В.Ф.Филаретов, Д.А. Юхимец. БИ №20. 2014.

55. Патент РФ №2522856. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов / В.Ф.Филаретов, Д.А.Юхимец БИ №20. 2014.

56. Патент РФ №2522855. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов / В.Ф.Филаретов, Д.А.Юхимец, А.А.Кацурин. БИ №20. 2014.

57. Патент РФ №2523186. Устройство для формирования программных сигналов управления пространственным движением динамических объектов / Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. БИ №20. 2014.

58. Патент №SU1571548. Релейная адаптивная система / Дыда А. А. БИ №22, 1990.

59. Петров Б. Н., Соколов Н. И., Липатов А. В. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

60. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 260 с.

61. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление.
 – М.: Наука, 2003. – 303 с.

62. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1979. – 256 с.

 Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

64. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для Э9ВМ №2014614570. Программа для расчета гладкой траектории движения для мехатронного объекта на основе сплайна Безье/ Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., 2014.

65. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2014614566. Следящий режим движения мехатронного объекта по заданной траектории с заданной скоростью/ Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., 2014.

66. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2014614569. Программа для расчета отклонения положения мехатронного объекта от заданной гладкой траектории/ Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., 2014.

67. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2012617265. Модуль для комплексной обработки данных с датчиков с использованием нелинейного фильтра Калмана/ Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., 2012.

68. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №2012614469. Блок для синхронизации и обмена данными Matlab\Simulink со сторонним программным обеспечением/ Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., 2012.

69. Синхронизация нескольких экземпляров Matlab по UDP протоколу [Электронный ресурс]: вебсайт содержит решение задачи синхронизации нескольких моделей среды моделирования Matlab –Электр. дан. – 2014. Режим доступа – http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/14.php свободный. – Загл. с экрана.

Соколов Н. И., Рутковский В. Ю., Судзиловский Н. В. Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами. – М.:Машиностроение, 1988. – 208 с.

71. Солодовников В.В., Шрамко Л. С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. – М.:Машиностроение, 1972. – 270 с.

72. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические системы. –
 М.:Машиностроение, 1988. – 332 с..

73. Трупов А.Н. Математическая модель подводного аппарата с учетом динамических свойств управляющих систем // Проектирование подводных аппаратов. Сборник научных трудов. – 1990. – С.35-40.

74. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1982. – 368 с.

75. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение с системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974. – 272 с.

76. Филаретов В. Ф. Синтез самонастраивающихся систем управления электроприводами манипуляционных механизмов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1989. – № 12. – С. 24-28.

77. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. – Владивосток: ДВГТУ, 2000. – 304 с.

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

79. Филаретов В.Ф., Бобков В.А., Юхимец Д.А., Мельман С.В., Борисов Ю.С. Программный комплекс моделирования пространственного

движения автономного подводного аппарата// Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 1. – С. 8-13..

80. Филаретов В.Ф., Бобков В.А., Юхимец Д.А., Мельман С.В., Борисов Ю.С. Особенности виртуального моделирования движений подводного аппарата с учетом воздействий со стороны окружающей вязкой среды// Мехатроника, автоматизация и управление. – 2008. – № 4. – С. 41-46.

81. Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Юхимец Д.А. Создание, управление и диагностирование подводных аппаратов с одним маршевым движителем // Вестник ДВО РАН. – 2005. – № 6. – С. 166-173.

82. Филаретов В.Ф., Кавалло Э., Микелини Р., Юхимец Д.А. Особенности создания систем управления подводным аппаратом с одним поворотным движителем // Труды междун. школы-семинара «Адаптивные роботы – 2004», Санкт-Петербург. – 2004. – С. 33-36.

83. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Разработка двухуровневых систем управления движением необитаемых подводных аппаратов по сложным пространственным траекториям // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2011. – Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». – С. 17-25.

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

85. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Системы и устройства управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.

86. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Высокоскоростной автономный робот с одним маршевым движителем // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1-3. – т. 4. – С. 67-72.

87. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Об особенностях управления автономным подводным аппаратом с одним движителем в терминальном

режиме // Материалы междун. научно – технич. конф. «Мехатроника автоматизация, управление». Дивноморское. Россия. – 2007. – С.312-316

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

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

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

91. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез адаптивной системы управления пространственным положением подводного робота // Мехатроника. – 2001. – №1. – С. 54-58.

92. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез нейронной сети для решения обратной задачи кинематики параллельного манипулятора // Труды 7 междун. научно - техн. конф. «Кибернетика и высокие технологии XXI». Воронеж. – 2007. – Т.1. – С. 52-63.

93. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 99-107.

94. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Способ формирования программного управления скоростным режимом движения подводных аппаратов по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 4. – С.167-176.

95. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Сравнительный анализ различных систем управления движением подводного аппарата // Сб. трудов ДВО РИА. Вып. 8. – Владивосток: ДВГТУ. – 2003. – С. 28-42.

96. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Сравнительный анализ эффективности работы линейной и робастной систем управления при движении подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Материалы 5 междун. научно - практ. конф. "Проблемы транспорта Дальнего востока". – 2003. – С. 11-15.

97. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012 – №6. – С. 47-53.

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

99. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов движения многозвенного манипулятора // Труды научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация и управление 2010». С-Пб. – 2010. – С. 404-407

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

101. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Верификатор для проверки миссий автономного подводного аппарата // Информационноуправляющие и измерительные системы. – 2011. – № 11. – Т.9. – С. 44-51.

102. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2012. – №10. – С. 64-70.

103. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2012. – №8. – С. 64-70.

104. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Особенности использования программной среды «МАТLAB» для визуального моделирования движений многозвенных манипуляторов // Мехатроника, автоматизация, управления. – 2010. – № 9. – С. 66-71.

105. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш. Программное обеспечение для проверки миссий автономного подводного аппарата // Материалы 4-ой Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Дивноморское. – 2011. – Т. 2. – С. 421-423.

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

107. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Щербатюк А.Ф., Мурсалимов Э.Ш., Туфанов И.Е. Синтез и исследование системы контурного управления движением подводного аппарата // Труды всероссийского совещания по проблемам управления, Москва. – 2014. – С.3338-3350.

108. Филимонов Н.А. О применимости схем нейронного управления на основе инверсно-прямой модели обучения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 10. – С. 54-60.

109. Фомин В.Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. - М.: Наука, 1981, 447 с.

110. Юхимец Д.А. Синтез нечеткой системы автоматического формирования желаемой скорости движения подводного робота // Материалы 2-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (CD-ROM). Москва. – 2009. – С. 1-8.

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

112. Ястребов В. С., Армишев С. В. Алгоритмы адаптивного движения подводного робота. – М.:Наука, 1988. – 85 с.

113. Ястребов В.С. и др. Системы и элементы глубоководной техники для подводных исследований. – Л.:Судостроение, 1981. – 304 с.

114. Ястребов В.С., Игнатьев М.Б., Кулаков Ф.М. и др. Подводные роботы. – Л.:Судостроение, 1977. – 367 с.

115. Anjum M. L., Park J., Hwang H. and other. Sensor Data Fusion using Unscented Kalman Filter for Accurate Localization of Mobile Robots // Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems 2010, Gyeonggi-do, Korea. – 2010. – P. 947-952.

116. Antonelly G. Underwater Robots. – Springer-Verlag, 2006.

117. Bartels R., Beatty J., Barsky B. An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling. – Morgan Kaufmann, 1987. – 476 p.

118. Baruch I., Hernandez L.-A., Valle J.-R., Barrera-Cortes J. Sliding Mode Control of Aerobic Bioprocess using Recurrent Neural Identifier // Proc. of 16-th IFAC Congress. – 2005. – Paper Tu-A21-TO/4.

119. Bian X., Yan Z., Chen T., Yu D., Zhao Y. Mission management and control of BSA-AUV for ocean survey // Ocean Engineering. – 2012. – Vol. 55. – P. 167-174.

120. Boeing A., Bräunl T. SubSim: An autonomous underwater vehicle simulation package // Proceedings of the 3rd International Symposium on

Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (AMiRE 2005). – 2006. – P. 33-38.

121. Brown J., Tuggle C., MacMahan J., Reniers A. The use of autonomous vehicles for spatially measuring mean velocity profiles in rivers and estuaries // Intelligent Service Robotics. $-2011. - N_{2}4. - P.233-244.$

122. Bulter H., Honderd G., Amerongen J. V. Reference Model Decomposition in Direct Adaptive Control // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 1991. – Vol.5 – N_{2} 3 – P. 199-217.

123. Caccia M., Indiveri G., Veruggio G.. Modelling and identification of open-frame variable configuration unmanned underwater vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2000. – Vol.25 – No.2. – P. 227–240.

124. Cao J., Su Y., Zhao J. Design of an Adaptive Controller for Dive-plane
Control of a Torpedo-shaped AUV // Journal of Marine Science and Applications. –
2011 – Vol. 33. – P. 333-339.

125. Cavallo E., Michelini R., Filaretov V.F. Conceptual design of an AUV equipped with a three degrees of freedom vectored thruster // Int. Journal. Intelligent and Robotic Systems. – 2004. – Vol. 39. – P. 365 - 391.

126. Chatchanayuenyong T., Parnichkun M. Neural network based-time optimal sliding mode control for an autonomous underwater robot // Mechatronics. – 2006. – No.16. – P. 471-478.

127. Chen-Wei Chen, Jen-Shiang Kouh, and Jing-Fa Tsai. Modeling and Simulation of an AUV Simulator With Guidance System // IEEE Journal Of Oceanic Engineering. – 2013. – Vol. 38. – No.2. – P. 211-226.

128. Clarke D. Advances in Model-Based Predictive Control. – Oxford University Press, 1994. – 535 p.

129. Conrado de Souza E, Maruyama N. μ -Synthesis for Unmanned Underwater Vehicles Current Disturbance Rejection // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. – 2011. – Vol. XXXIII. – No. 3. – P. 357-365.

130. Craven P., Sutton R., Burns R. Control strategies for unmanned underwater vehicles // The Journal of Navigation. – 1998. – Vol.51. – No.1. – P.79-105.

131. Damus R., Desset S., Morash J., Polidoro V., Hover F., Chryssostomidis C. A new paradigm for ship hull inspection using a holonomic hover-capable AUV // Informatics in Control, Automation and Robotics. – Springer, 2006. – P. 195-200.

132. de Boor C. A practical guide to splines, Rev. 27. – Springer, 2001. –366 p.

133. Digaňa T. Kalman filtering in multi-sensor fusion // Master's Thesis for the degree of Master of Science in Technology. – Helsinki University of Technology, 2004. – 138 p.

134. Dubovsky S., Papadopoulos E. The Kinematis, Dynamic and Control of Free-Flying and Free-Floating space systems // IEEE Tran. on Robotic and Automation. – 1993. – Vol.9. – No.5. – P.531-543.

135. Dyda A.A., Filaretov V.F. Algorithm of Time-Sub-Optimal Control for Robots Manipulator Drives // Proc. of the 12th World IFAC Congress, Sydney, Australia. – 1993. – P. 314 – 319.

136. Dyda A.A. Design of Adaptive VSS Algorithm for Robot Manipulator Control // Proc. of the 1st Asia Control Conf., Tokyo, Japan. – 1994. – P. 215-221.

137. Egeskov P., Bjerrum A., Pascoal A., Silvestre C., Aage C., Wagner Smitt L. Design, construction and hydrodynamic testing of the AUV MARIUS // Proceedings of the AUV Conference, Cambridge, Massachusetts. – 1994. – P. 199-207.

138. Filaretov V.F., Dyda A.A., Lebedev A.V. The Sliding Mode Adaptive Control System for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 7th International Conf. on Advanced Robotics, Catalonian, Spain. – 1995. – Vol. 8. – P. 263-266.

139. Filaretov V.F., Lebedev A.V. The Variable Structure System Synthesis for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 4th ECPD Int. Conf. on Advanced

Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, Moscow, Russia. – 1998. – P. 417-421.

140. 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. – F-0098. – P.1- 6.

141. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle // International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM). – 2012. – Vol. 3. – No.3. – P. 133-141.

142. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis of Automatic System for Correction of Program Signal of the Underwater vehicle's Movement on Spatial Trajectory // CD-ROM Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2010, KINTEX, Korea. – 2010. – P.126-131.

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

144. Filaretov V.F., Ukhimets D.A. Some features of vectored thruster autonomous underwater vehicle control // Proc. of the 18th DAAAM Int. Symp. «Intelligent Manufacturing & Automation». Zadar, Croatia. – 2007. – P. 821-822.

145. Filaretov V.F., Ukhimets D.A. Synthesis of Underwater Robots Adaptive Velocity Control System // Proc. of the 8th IFAC Symp. on Computer Aided Control System Design, Selford, UK. – 2000. – P. 216-219.

146. Filaretov V.F., Ukhimets D.A. Adaptive Control System with Variable Structure for Underwater Robot // Proc. of the 12^{th} DAAAM Symp. on Intelligent Automation and Manufacturing, Jena, Germany. – 2001. – P. 141-142.

147. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Applying Neural Network to Inverse Kinematics Task of Spherical Parallel Manipulator // Proc. of Int. Conf. on Mechatronics and Automation, Harbin, China. – 2007. – P. 2865-2870.

148. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Design of Adaptive Control System for Autonomous Underwater Vehicle Spatial Motion // Proc. of the 6-th Asian Control Conference. Bali, Indonesia. – 2006. – P. 900-906.

149. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Predictive Trajectory Planning of Vectored Thruster Underwater Vehicle with the Use of the Neural Network // Proc. of the IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Xian, China. – 2008. – P. 1242-1247.

150. Filaretov V., Yukhimets D., Mursalimov E. Matlab using in software for visual simulation of multilink manipulators dynamics // Proc. of First Russia and Pacific conf. on Computer Technology and Applications, Vladivostok, Russia. – 2010. – P. 311-316.

151. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Synthesis of the automatic correction system of the desired signal parameters // Proc. of the 19th of Intern. DAAAM Symp. Trnava, Slovakia. – 2008. – P. 489-490.

152. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Synthesis of the control system of vectored thruster underwater vehicle spatial motion // Proc. of the 8th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symp. Bangkok, Thailand. – 2008. – P. 8-13

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

154. Filaretov V., Yukhimets D. The synthesis of system for automatic formation of underwater vehicle's velocity // Proc. of the 20-th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education", Vienna, Austria. – 2010. – P. 1155-1156.

155. Fjellstad O.E., Fossen T.I., Egeland O. Adaptive Control of ROVs with Actuator Dynamics and Saturation // Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA. – 1992. – P. 513-519.

156. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. – John Willei and Sons, 1994. – 494 p.

157. Fu K.S., Gonzales R.C., Lee C.S. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence. – McGrow–Hill. Inc., 1987. – 580 p.

158. Goheen K. R. Modeling Methods for Underwater Robotic Vehicle Dynamics // Journal of Robotic Systems. – 1991 – Vol.8. – No.3. – P.295-317.

159. Goheen K.R., Jefferys E.R System Identification of ROV Dynamics // Proc. of the 8th Conf. on OMAE, Hague. – 1989. – P. 87-98.

160. Golding B., Ross A., Fossen T. Identification of nonlinear viscous damping for marine vessels // 14th IFAC Symposium on System Identification, Newcastle, Australia. – 2006. – P. 332-337.

161. Goodwin G., Graebe S., Saldago M. Control System Design. – PrienceHall, 2001. – 908 p.

162. Gosselin C., Angeles J. The Optimum Kinematic Design of a Spherical Three-Degree of Freedom Parallel Manipulator // ASME Mechanisms, Transmissions and Automation in Design. – 1989. – Vol. 111. – P. 202-207.

163. Gosselin C., Hamel J-F. The Agile Eye: a High Performance Three Degree of Freedom Camera Orienting Device // Proc. IEEE International Conference of Robotic and Automation, San Diego. – 1994. – P. 116 - 121.

164. Guo J., Chiu F.-C., Huang C.-C. Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle // Ocean Engineering. – 2003. – Vol. 30. – P. 2137-2155.

165. Haddadin S., Weis M., Wolf S., Albu-Schaeffer A. Optimal Control for Maximizing Link Velocity of Robotic Variable Stiffness Joints // Proc. of 18-th IFAC Congress, Milan, Italy. – 2011. – P. 6863-6871.

166. Hall Handbook of multisensor data fusion : theory and practice/ editorsLiggins M., Hall D., Llinas J.- 2nd ed. – CRC Press, 2009. – 872 p.

167. Haykin S. Adaptive Filter Theory. – Prentice-Hall, Inc., 1996. – 480 p.

168. Haykin S. Kalman filtering and neural networks. – John Wiley and Sons, 2001. – 298 p.

169. Healey A.J., Rock S.M., Cody S., Miles D., Brown J.P. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1995. – Vol. 20. – P.354-361.

170. Hsu L., Costa R. R., Lizarralde F. ets. Underwater vehicle dynamic positioning based on a passive arm measurement system // Proc. of the Second International Advanced Robotics Programme Workshop on Mobile Robots for Subsea, Monterey, USA. – 1994.

171. Huang J., Zi B., Zhou J. Sliding Mode Control with Parameter Adaptation for a Class of Cable Feed System // Proc of ICMA 2007, Harbin, China. – 2007. – P. 1202-1206.

172. Humpfries D. Dynamics and Hydrodynamics of Ocean Vehicles // Proc. of IEEE OCEANS'81. – 1981. – Vol. 1. – P.88-91.

173. Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control. – Marsel Dekker Inc, 2002. – 310 p.

174. Irion J., Ball D., Horrell E. The US Government's Role in Deepwater Archaeology:The Deep Gulf Wrecks Project // International Journal of Historical Archeology. – 2008. – No.12. – P. 75-81.

175. Jin J., Jung Ch., Kim D., Chung W. Development of an autonomous outdoor patrol robot in private road environment // Proc. of Int. Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2010, Seoul, Korea. – 2010. – P. 1918-1921.

176. Julier S.J., The scaled unscented transformation // Proc. of the 2002 American Control Conference. Jefferson City, MO, USA. – 2002. – Vol. 6. – P. 4555-4559.

177. Julier S.J., Uhlmann J.K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems \setminus Proc. of AeroSense: The 11th International Symposium on Aerospace: Defence Sensing, Simulation and Controls. – 1997. – P. 182-193.

178. Kane T. R., Likeus P. W., Levinson D. A. Spacecraft Dynamics. – McGraw-Hill Inc., 1983. – 256 p.

179. Khosla P., Kanade T. Parameter Identification of Robot Dynamics // Proc. of IEEE Conf. on decision and Control, Fort Lauderdale, USA. – 1985. – P. 1754-1760.

180. Kim J. Thruster Modeling and Controller Design for Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) // Underwater Vehicles, Rijeka, Croatia, Springer Verlag. – 2009. – P.235-251.

181. Kim J., Han J., Chung W.K., Yuh J. Accurate Thruster Modeling with Non-Parallel Ambient Flow for Underwater Vehicles // Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada. – 2005. – P. 1737-1742.

182. Kooa M.-S., Choi H.-L., Lima J.-T. Universal control of nonlinear systems with unknown nonlinearity and growth rate by adaptive output feedback // Automatica. -2011. - Vol. 47. - P. 2211-2217.

183. Koshkouei A., Burnham K. Sliding Mode Controllers for Active Suspensions // Proc. of 17th IFAC Congress, Seoul, Korea. – 2008.

184. Lakhekar G. V. Tuning and Analysis of Sliding Mode Controller Based on Fuzzy Logic // International Journal of Control and Automation. – 2012 – Vol. 5.
– No.3. – P. 93-110.

185. Landau I., Lozano R., M'Saad M., Karimi A.Adaptive Control:
Algorithms, Analysis and Applications (Communications and Control Engineering).
– Springer, 2011. – 587 p.

186. 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. – P. 420-424.

187. Lee P. M., Lee J. S., Hong S. W. Experimental Study of a Position Control System for ROV // Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conf., San Francisco, USA. – 1992. – P. 533-539. 188. Li R., Zhu Y. M., Han C. Z. Unified optimal linear estimation fusion //
Proc. of International Conference on Information Fusion, MoC2.10–MoC2.17,
Paris, France. – 2000. – P. 486-492.

189. Lin W.-S., Yang P.-Ch. Adaptive critic motion control design of autonomous wheeled mobile robot by dual heuristic programming // Automatica. – 2008. – Vol. 44. – P.2716-2723.

190. Liu G. P. Nonlinear identification and control: a neural network approach. – London, Springer, 2001. – 210 p.

191. Liu L., Fu Z., Song X. Sliding Mode Control with Disturbance Observer for a Class of Nonlinear Systems // International Journal of Automation and Computing. – 2012. – Vol. 9. – No. 5. – P. 487-491.

192. Luo W.-L., Zou Z.-J. Robust Cascaded Control of Propeller Thrust for AUVs // Advances in Neural Networks. Lecture Notes in Computer Science. – 2011.
– Vol. 6676. – P 574-582.

193. Mahesh H., Yuh J., Kakshmi R. A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robotic Manipulator // Journal of Robotic Systems. – 1991.
– Vol.8. – No.3. – P.339-370.

194. Meng J., Zhengrong L., Huaning C., Qing Ch. Adaptive Noise Cancellation Using Enhanced Dynamic Fuzzy Neural Networks // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 2005. – Vol. 13 – No. 3. – P. 331-341.

195. МЕТ Tech [Электронный ресурс]: вебсайт содержит информацию о компании МЕТ Tech, занимающейся созданием различных видов инерциальных датчиков. – Электр. дан. – 2011. Режим доступа - http://www.mettechnology.com/angular-sensors/ свободный. – Загл. с экрана.

196. Michelini R., Cavallo E., Filaretov V., Ukhimets D. Path Guidance and Attitude Control of a vectored Thruster AUV // Proc. of 7-th Int. Biennial ASME Conf. on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA) Manchester, UK. - 2004. - P. 1-8.

197. Michelini R., Cavallo E., Filaretov V., Ukhimets D. Features of vectored-thruster underwater vehicle control // Proc. of 14 IFAC Congress, Praha. – 2005. – P. 1- 6.

198. Mišković, N.; Vukić, Z. & Barišić, M. Identification of coupled mathematical models for underwater vehicles. // Proc. of the OCEANS'07 Conference, Aberdeen, Scotland. – 2007. – P.186-194.

199. Misra P., Augmentation of GPS/LAAS with GLONASS: Performance Assessment, ION GPS-98 Proc., Nashwille. – 1998. – P. 1-7.

200. Narenda K., Annaswamy A. Stable adaptive control. – Prenice-Hall, 2005.

201. Nasuno Y., Shimizu E., Ito M. and etc. Design method for a new control system for an autonomous underwater vehicle using linear matrix inequalities // Artificial Life in Robotics. -2007. - No.11. - P. 149-152.

202. Park I.-W., Kim J.-Y., Cho B.-K., Oh J.-H. Control hardware integration of a biped humanoid robot with an android head // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – Vol. 56. – P. 95–103.

203. Perrier M., Canudas-de-Wit C. Experimental Comparison of PID vs. PID Plus Nonlinear Controller for Subsea Robots // Autonomous Robots. – 1996. – No.3. – P. 195-212.

204. Promtun E., Seshagiri S. Sliding Mode Control of Pitch-Rate of an F-16 Aircraft // Proc. of 17th IFAC Congress, Seoul, Korea. – 2008. – P. 592-598.

205. Ramadorai A. K., Tarn T. J. On Modeling and Adaptive Control of Underwater Robots // Journal of Robotics Systems. – 1993. – Vol.5. – No.1. – P.47-60.

206. Ranjan T.N, Arun N., Navelkar G. Navigation of Autonomous Underwater Vehicle Using Extended Kalman Filter // Trends in Intelligent Robotics. Communications in Computer and Information Science. – 2010. – Vol. 103. – P. 1-9.

207. Raol J. R. Multi-sensor data fusion with MATLAB. – CRC Press, 2010.– 570 p.

208. Repoulias F., Papadopoulos E. On spatial trajectory planning & openloop control for underactuated AUVs // Proc of the 16th IFAC World Congress. Prague, Czech Rep. – 2005. – P. 1-6.

209. Roberts G., Sutton R. Advanced in unmanned marine vessels. – Institute of Engeneering and Technology Cornwall, UK, 2006. – 461 p.

210. Robologix – среда моделирования мобильных и промышленных роботов [Электронный ресурс]: вебсайт содержит информацию о среде Robologix/ Logic Design Inc. - Электр. дан. – 2013. – Режим доступа www.robologix.com свободный. - Загл. с экрана.- Язык англ.

211. Robotic Studio [Электронный ресурс]: вебсайт содержит информацию о среде разработки Microsoft Robotic Studio/ Microsoft Corporation. – Электр. дан. – 2011 – Режим доступа http://www.microsoft.com/robotics/ свободный – Загл. с экрана. - Яз. анг.

212. RobSim – программный комплекс для моделирования роботов и обучения операторов [Электронный ресурс]: вебсайт содержит информацию о моделирующем комплексе RobSim/ НИКИМТ ИТУЦР – Электр. дан. – 2011. – Режим доступа http://www.robsim.dynsoft.ru/ свободный.

213. Rossiter J.A. Model Based predictive control: a practical approach. – CRC press LLC, 2003. – 318 p.

214. Rutkovsky V.Yu., Zemlyakov S.D., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Modeling and adaptive attitude control of observation spacecrafts in view of flexible structure // Proc. of 17th IFAC Congress, Seoul, Korea. – 2008. – P. 3440-3445.

215. Santhakumar M., Kim J. Modelling, simulation and model reference adaptive control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems // Proc. of 11th International Conference on Control, Automation and Systems, South Korea, KINTEX. – 2011. – P. 643-648.

216. Sarangapani J. Neural network control of nonlinear discrete-time systems. – CRC Press, 2006. – 622 p.

217. Scisiliano B., Khanib O. Handbook of Robotics. – New-York, Springer,2010. – 1628 p.

218. Seedhouse E. Deep-Sea Mining and Energy Exploitation. Ocean Outpost, Springer Verlag. – 2011. – P. 127-140.

219. Shi Y., Qian W., Yan W., Li J. Adaptive Depth Control for Autonomous Underwater Vehicles Based on Feedforward Neural Networks // Intelligent Control and Automation. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2006. – Vol. 344. – P 207-218.

220. Slawicski E., Mut V. Control using Prediction for Teleoperation of Mobile Robots // Proc. of ICMA 2007, Harbin, Chaina. – 2007. – P. 1782-1787.

221. Slotine J.–J. E., Coetsee J. A. Adaptive Sliding Controller Synthesis for Nonlinear Systems // Int. J. Contr. – 1986. – Vol. 42. – No. 6. – P. 37-51.

222. Slotine J. Applied nonlinear control. – Prentice-Hall, 1991.– 461 p.

223. Slotine J.–J. E., Li W. On the Adaptive Control of Robot Manipulators // The Int. Journal of Robotics Research. – 1987. – Vol.6. – No.3. – P. 49-59.

224. Smith N. S., Crane J. W., Summey D. C. SDV Simulator Hydrodynamic Coefficients // NCSC Report, №TM-231-78. – 1978. – P.82-96.

225. Song F., Smith S. Combine Sliding Mode Control and Fuzzy Logic Control for Autonomous Underwater Vehicles // Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications, Springer Verlag. – 2006. – P.191-205.

226. Spooner J. et al. Stable adaptive control and estimation for nonlinear systems: neural and fuzzy approximator techniques.– New York, NY: Wiley-Interscience, 2002. – 545 p.

227. Subramanian S., George T., Thondiyath A. Hardware-in-the-Loop Verification for 3D Obstacle Avoidance Algorithm of an Underactuated Flat-Fish Type AUV // Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China. – 2012. – P. 545-550.

228. Sun Y.C., Cheah C.C. Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle // Robotica. – 2008. – Vol. 27. – P. 119-129.

229. Sutton R., Burns R. S., Craven P. J. A Neural Auto-depth Controller for an Unmanned Underwater Vehicle // The Journal of Navigation. – 1997. – Vol. 50. –No.2. – P. 292-302. 230. Suykens J., Vandewalle J., de Moor B. Artificial Neural Networks for Modelling and Control of Non-Linear Systems. – Kluwer, 2010. – 237 p.

231. Suzuki H., Yoshida K. Trajectory Tracking Control of a ROV for Lifting Objects // Proc. of the 1st International Offshore and Polar Engineering Conf.
– 1990. – P. 545-552.

232. Tang S., Ura T., Nakatani T., Thornton B., Jiang T. Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND // Journal of Marine Science and Technology. – 2009. – No.14. – P.373-386.

233. Tao G. Adaptive control design and analysis – John Wiley & Sons, Virginia, USA, 2003. – 640 p.

234. Underwater vehicles/ Edited by A. Inzartsev. – In-Tech, Rijeka, Croatia, 2009. – 582 p.

235. van de Ven P., Refsne J., Johansen T., Flanagan C., Toal D. Identification of minesniper's damping parameters using neural networks // 14th IFAC Symposium on System Identification, Newcastle, Australia. – 2006. – P. 321-325.

236. Waldock M. I., Roberts G. N., Sutton, R. Terrain following control of an unmanned underwater vehicle using artificial neural networks // Proc. of IEE Colloquium on Control and Guidance of Remotely Operated Vehicles, London. – 1995. – P. 4/1-4/8.

237. Wang B., Wan L., Xu Y., Qin Z. Modeling and simulation of a mini
AUV in spatial motion // Journal of Marine Science and Application. – 2009. – Vol.
8. – P. 7-12.

238. Wang Hong-jian, Shi Xiao-cheng, Zhao Jie, Li Juan, Fu Ming-yu. A Semi-physical Virtual Simulation System for AUV // Proc. of Int. conference MTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, 2004, Kobe, Japan. – 2004. – Vol. 3. – P. 1560-1563.

239. Webots – программное обеспечение для моделирования мобильных роботов [Электронный ресурс]: вебсайт содержит информацию о

моделирующем комплексе Webots/Cyberrobotics - Электр. дан. – 2013. – Режим доступа www.cyberbotics.com/ свободный. - Загл. с экрана.

240. Wei W., Xin-Qian B., Zong-Hu C. 3D Track-keeping Method for Autonomous Underwater Vehicle // Journal of Marine Science and Application. – 2002. – Vol. 1. – No.2.– P. 18-22.

241. Weilin H., Carder K., Costello D., Keping D., Zhishen L. Using Unmanned Underwater Vehicles as Research Platforms in Coastal Ocean Studies // Journal of Ocean University of Oingdao. – 2003. – Vol. 2. – No.2 – P. 211-217.

242. Whitcom L. L., Yoerger D. R. Preliminary Experiments in the Model-Based Dynamic Control of Marine Thrusters // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1996. – P.467-472.

243. White B. A., Stacey B. A., Patel Y., Bingham, C. Robust control design of an ROV. Technical Report, Contract No. DRA-PD-102-94. – Cranfeld University, The Royal Military College of Science, 1994.

244. Xilin Y., Matthew G. A Nonlinear Position Controller for Maritime Operations of Rotary-Wing UAVs // Proc. of 18-th IFAC Congress, Milan, Italy. – 2011. – P.1510-1515.

245. Xu L., Dong C., Chen Y. An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Networked Control Systems // Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China. – 2007. – P. 1190-1195.

246. Yoerger D.R., Slotine J.–J.E. Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1985. – Vol. 10. – No.4. – P. 462-480.

247. Yoerger D.R., Slotine J.–J.E. Adaptive Sliding Control of an Experimental Underwater Vehicle // Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, USA. – 1991. – P. 2746-2751.

248. Yoerger D.R., Cooke J.G., Slotine J.-J.E. The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation into Control System Design // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1990.– Vol.15. – No.3. – P. 167-178.

249. Yu T., Zhang A. Simulation Environment and Guidance System for AUV Tracing Chemical Plume in 3-Dimensions // Proc. of 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR). – 2010. – P. 407-411.

250. Yuh J. Modeling and Control of Underwater Vehicles // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – Vol.20. – No.6. – P. 1475-1483.

251. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles // Intellegent Service Robotics. – 2011. – No.2. – P. 221-231.

252. Zhao X., Han J. Yaw Control of RUAVs: an Adaptive Robust $H\infty$ Control Method // Proc. of 17th IFAC Congress, Seoul, Korea. – 2008. – P. 785-790.

253. Zhou H.-Y., Liu K.-Z., Feng X.-Sh. State Feedback Sliding Mode Control without Chattering by Constructing Hurwitz Matrix for AUV Movement // International Journal of Automation and Computing. – 2011. –Vol.8. – No.2. – P.262-268.