

## ОТЗЫВ

официального оппонента профессора Ющенко А.С. на диссертацию Юхимца Д.А. «Методы формирования программных сигналов и автоматического управления движением подводных аппаратов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»

### **Актуальность темы диссертации**

Работа посвящена разработке методов синтеза систем управления необитаемыми (автономными) подводными аппаратами (НПА), обеспечивающими высокую точность движения по сложным пространственным траекториям, в том числе, при движении с высокой скоростью. Повышенные требования к системе управления подводными аппаратами предъявляются при решении широкого круга задач, включая мониторинг подводной среды, проведение аварийно-спасательных работ, картографирования дна, проведение операций по разминированию и т.д. Несмотря на то, что НПА для решения таких задач активно разрабатываются как в России, так и за рубежом, методики проектирования систем управления, в полной мере соответствующих предъявляемым требованиям, в настоящее время не существует. Таким образом, тема диссертации Юхимца Д.А. безусловно является актуальной.

Следует отметить, что автор подробно исследует два основных класса автономных подводных аппаратов. Первый класс – НПА, имеющие сложную форму и предназначенные для точных перемещений вблизи обследуемого объекта. Второй класс – аппараты, имеющие ограниченное число степеней свободы и перемещающиеся с большой скоростью по криволинейным траекториям. Поскольку большая часть современных автономных подводных аппаратов может быть отнесена либо к первому, либо ко второму классу, то можно говорить о разработке методики проектирования перспективных систем управления, которые могут найти широкое практическое применение, что также говорит об актуальности работы.

### **Основные результаты работы**

*Первая глава диссертации* содержит общий анализ особенностей НПА как объектов автоматического управления и достаточно полный анализ существующих работ в рассматриваемой области. Автор обращает внимание на такие особенности НПА как переменность инерционных параметров объекта управления, наличие перекрестных связей между его степенями подвижности, существенное влияние заранее неизвестных внешних воздействий. Можно согласиться с тем, что в предыдущих работах совокупность этих факторов учитывалась не в полной мере. Представляет интерес вывод автора о том, что необходимо при формировании программного сигнала учитывать особенности объекта управления с тем, чтобы повысить скорость его движения без потери точности. Автор также обратил внимание на проблему комплексирования данных, поступающих от бортовых датчиков НПА, и на целесообразность полунатурного моделирования для настройки системы управления в стационарных условиях.

Центральной в диссертации является *вторая глава*, посвященная методике синтеза системы управления НПА. Здесь рассматриваются НПА, способные перемещаться по всем степеням свободы. Приведенная в работе математическая модель такого аппарата является достаточно полной и отражает основные особенности его динамики, включая перекрестные связи между степенями свободы и силы, действующие со стороны внешней среды. Отметим, что модель содержит также и описание движителей НПА, динамика которых существенно влияет на движение аппарата и не всегда принимается во внимание.

В качестве замечания отметим, что в работе не приводятся результаты сравнения результатов моделирования составленной автором модели с результатами испытаний



реального НПА, что затрудняет окончательную оценку её достоверности и полноты. Математическая модель не учитывает также статистический характер внешних возмущений, действующих на НПА со стороны внешней среды.

Поскольку математическая модель является достаточно сложной для анализа, автор предлагает применить здесь метод декомпозиции пространственного движения НПА, разрабатывавшийся ранее В.Ф. Филаретовым, Лебедевым А.В. и др. Применение этого метода в данном случае явилось весьма эффективным приемом, при котором вся система управления НПА была представлена в виде шести сепаратных подсистем, соответствующих степеням свободы аппарата, а взаимосвязи между этими подсистемами рассматриваются как внешние воздействия, входящие в правую часть дифференциальных уравнений сепаратных подсистем. Таким образом, модель не является упрощенной и учитывает основные особенности динамики НПА.

Предложенный подход позволяет осуществить синтез подсистем управления каждой степени свободы по отдельности. На уровне управления движителями основным предлагаемым методом является метод сигнальной настройки по эталонной модели, позволяющей непосредственно управлять силой тяги в соответствии с уравнением (2.13). При этом получен нелинейный закон управления (2.16). Поскольку этот закон содержит номинальные значения переменных параметров  $J_0$ ,  $F_m$ , возникает вопрос об устойчивости системы при изменениях этих параметров во времени. Собственно, для этого и вводится сигнал самонастройки, который и выбирается в соответствии с условием устойчивости по Ляпунову в виде релейной функции (2.23). При этом амплитуда сигнала самонастройки выбирается в виде (2.26), что позволяет учесть и ограничения на диапазон изменений указанных параметров.

Трудно согласиться с автором, что реализация полученного в итоге закона управления (рис. 2.2) не представляет технической проблемы. Реализация закона достаточно сложна и при этом остаются открытыми вопросы о робастности такого управления, т.е. его чувствительности как к отклонениям в реализации устройства, так и к точности измерений с учетом случайности характера изменения параметров.

Отметим, что проведенное моделирование системы управления НПА показало эффективность системы с самонастройкой по эталонной модели, существенное снижение времени переходных процессов. Вместе с тем, поскольку система существенно нелинейна, более убедительным было бы моделирование при изменении переменных параметров во времени в зависимости от решаемой аппаратом задачи. Если это изменение носит случайный характер, то можно было бы определить и статистические характеристики процесса управления, например, среднеквадратическое отклонение реальных процессов от эталонных. Заметим также, что конкретные требования к системе, которые должны быть выполнены в результате синтеза, в работе не оговорены.

Значительный интерес представляет исследование авторов по использованию нечетких нейросетей для адаптивного управления НПА. Однако, как нам кажется, это исследование пока имеет, в большей мере, теоретическое значение. Процесс настройки требует определенного времени и на начальном этапе может возникнуть значительное рассогласование между требуемым и реальным процессом управления. Возможно, в дальнейшем это препятствие можно будет устранить за счет повышения быстродействия вычислительного устройства и проведения параллельных вычислений. К тому же, этот раздел написан слишком кратко, не указан тип ННС, её структура, способ обучения и выбор обучающей выборки. Примеры являются слишком упрощенными. Поэтому представленный материал можно рассматривать как предварительные результаты, которые в дальнейшем могут получить существенное развитие.

Более интересен в плане практического применения раздел 2.3, в котором для управления скоростью НПА предлагается использовать скользящий режим, во время которого, как известно, процесс управления вообще не зависит от изменения параметров системы и даже от изменений в её структуре. Здесь проблема состоит, с одной стороны, в



обеспечении устойчивости скользящего режима, а с другой – в преодолении эффекта «дребезга» реле в окрестности поверхности скольжения. Предлагается оригинальное решение для адаптивного регулятора скорости движения НПА (рис. 2.19), позволяющего повысить быстродействие и динамическую точность процесса управления при благоприятных условиях. Следует отдать должное математической корректности работы, в которой в аналитической форме получены условия попадания изображающей точки в зону устойчивых переключений.

Вместе с тем, надо отметить, что автор ограничивается анализом сильно упрощенной модели второго порядка, приближенно описывающей движение НПА по одной степени свободы, причем при постоянных значениях параметров системы, которые на самом деле меняются в процессе движения. Возможности применения метода в случае совместной работы всех степеней подвижности НПА, с учетом их динамического взаимовлияния не рассматриваются. Не исследованы и способы преодоления эффекта «дребезга» реле, которые на практике усложняют реализацию управления со скользящими режимами, хотя в настоящее время существуют методы, основанные на применении ННС, позволяющие решить и эту проблему одновременно с обеспечением устойчивости скользящего режима.

Полученные при моделировании результаты показали существенные преимущества предлагаемого в работе метода управления по сравнению с традиционным ПИ-регулятором, что позволяет надеяться и на улучшение качества процессов в системе и при совместной работе каналов управления. Этот вывод подтверждается приведенными результатами моделирования пространственного движения НПА с учетом «полной многоканальной системы управления» (с.141). Результаты моделирования показали, что с использованием предложенного способа управления аппарат способен достаточно точно «отработать» заданную пространственную траекторию. Здесь, правда, остаётся открытым вопрос, как определить класс «отрабатываемых» траекторий, если известны характеристики аппарата. Возможны ли ситуации, когда задаётся не только вид траекторий, но и характер изменения скорости вдоль неё? Такая задача характерна, в частности, для задач управления манипуляторами и для её решения применяются сплайны 3-го порядка. Поскольку автор рассматривает каналы управления и по скорости и по положению, вполне возможно, что предлагаемый метод управления позволит решать и такие задачи. Заметим, что поскольку идеальная «развязка» каналов управления едва ли возможна, был бы уместен анализ устойчивости системы, замкнутой по положению, в целом.

Пожалуй, основное замечание по второй главе носит методический характер и состоит в том, что решение задач управления НПА проводится независимо от тех задач, для которых используется сам робот. Возможно, это задачи осмотра сложных поверхностей, рельефа дна, или поиск каких-то объектов на дне и т.п. Из этих задач следуют определенные условия к характеру движения, а уже затем – способы реализации такого движения. При этом должны приниматься в расчет и способы наблюдения, и способы задания цели и способы дистанционного управления, или целеуказания. Было бы более оправдано исходить при синтезе системы управления НПА из требований к выполнению тех операций, для которых предназначен аппарат.

В третьей главе рассматриваются задачи управления аппаратами, имеющими обтекаемую форму и предназначенными для точного и быстрого перемещения по сложным пространственным траекториям. Особенности этих аппаратов является использование одного маршевого двигателя с управляемой ориентацией относительно продольной оси аппарата, что обеспечивает существенные преимущества, указанные в работе. Вместе с тем, задача управления таким аппаратом усложняется по сравнению с традиционным способом управления с помощью рулей, так как теперь управляющие воздействия не могут создаваться независимо по каждой степени свободы НПА.



Насколько известно рецензенту, подробная методика синтеза системы управления такими аппаратами предлагается впервые.

Предложена схема системы управления НПА, учитывающая особенности конструкции аппарата (рис. 3.5). В частности, она содержит блок компенсации опрокидывающего момента, действующего со стороны винта движителя. Для схемы сферического параллельного механизма, предложенного ранее в работах Филаретова В.Ф. и др., автор разработал алгоритм решения обратной задачи кинематики, которое, собственно, и определяет способ управления ориентацией аппарата в пространстве (п.3.3). К достоинству этой части работы можно отнести и тот факт, что разработанный алгоритм был проверен на макете реального устройства управления ориентацией движителя НПА и показал точность позиционирования, достаточную для управления движением аппарата.

В качестве замечания отметим, что и здесь, как и в главе 2, автор не определяет требуемую точность, хотя очевидно, что она зависит от конкретных операций, выполняемых аппаратом. Анализ таких операций позволил бы обосновать требования к аппарату, в том числе, и по точности ориентации в пространстве.

Особенно интересной как в научном, так и в практическом отношении, представляется раздел 3.3, в котором предлагается формировать программные сигналы движения с учетом ограничений самого управляемого НПА, в том числе, ограничений его маневренности. Это тем более важно для рассматриваемой конструкции аппарата, при которой он не может развернуться на месте (с.167). При формировании алгоритма управления принимаются во внимание и ограничения на скорость движения аппарата. Рассмотрены также возможности подхода НПА к целевой точке с заданной ориентацией с использованием позиционного, либо контурного способа управления. Эффективность предложенных здесь алгоритмов управления обоснована результатами математического моделирования.

В качестве замечания отметим, что автор не остановился на возможности применения разработанных алгоритмов для слежения НПА за движущимся объектом, когда целевая точка изменяется в реальном масштабе времени. Такая задача может быть актуальной для рассматриваемого класса НПА.

Вопросам формирования программных законов движения при движении аппарата по заданной пространственной траектории посвящена следующая *четвертая глава*. В определенной степени она обобщает результаты, полученные в предыдущей главе при формировании управляющих сигналов при выведении НПА в заданную точку. Аналогом динамической ошибки, являющейся критерием качества «отработки» траектории является в данном случае величина отклонения от заданной траектории (с.191). Особенностью решения поставленной задачи в работе является сочетание как метода формирования программной скорости в зависимости от характера программной траектории, так и предлагаемого в работе метода формирования новой программной траектории, обеспечивающей, тем не менее, желаемую точность движения по заданной траектории.

Для формирования программной скорости предложена схема на рис. 4.2, предусматривающая регулирование скорости движения аппарата в зависимости от текущего отклонения аппарата от программной траектории. Отметим, что предложенный алгоритм управления позволяет косвенно учесть и динамические свойства объекта управления, изменяя линейную скорость в зависимости от кривизны траектории. В частности, в п.4.2.1 предлагается выбирать параметры регулятора в соответствии с сильно упрощенной моделью динамики объекта управления, полученной в предположении, что параметры объекта меняются незначительно. Однако, конкретных рекомендаций, при каких условиях предложенный метод синтеза регулятора даёт удовлетворительный результат, в работе нет.

Эффективность предложенного способа управления была продемонстрирована методом математического моделирования, правда, на сильно упрощенной, децентрализованной модели объекта управления. Автор не остановился на обосновании



справедливости децентрализованной модели для рассматриваемой конструкции НПА, обладающего определенными особенностями как объекта управления.

В разделе 4.3 предлагается оригинальный способ управления, когда реальная траектория движения НПА «сдвигается» на величину измеряемой динамической ошибки, за счет соответствующего смещения желаемой траектории, которая может быть измерена в текущем времени. Способы измерения ошибки в реальном масштабе времени предлагаются в п.п. 4.4.1 и 4.4.2. Если траектория задана заранее, то с помощью сплайнов третьего порядка действительно можно определить и отклонение от неё в каждый момент времени. Предложенный способ позволит уменьшить реальную величину динамической ошибки, однако, на наш взгляд, следовало обосновать его применимость в различных режимах работы НПА. Не представляется очевидной возможность применения этого способа в случаях, когда траектория заранее неизвестна. Кроме того, возникает вопрос о том, возможно ли при неустранимой за счет синтеза системы управления НПА динамической ошибки достаточно точно выдержать новую программную траекторию.

Эффективность предложенных способов управления с формированием программных сигналов проверялась при экспериментальных исследованиях реальных НПА. Результаты испытаний НПА «НМ-2» показали, что при отработке сложных пространственных траекторий точность системы управления при использовании предлагаемых в работе методов существенно повышается по сравнению с традиционными способами управления, использующими регуляторы движения по отдельным степеням свободы. Эффективность предложенных способов траекторного управления проверялась при испытаниях НПА «MARK», имеющего три степени свободы. В этих экспериментах было показано, что при движении по гладкой пространственной траектории система содержащая контур формирования положения программной точки, позволяет повысить точность «отработки» программной траектории в 4 раза по сравнению с традиционными способами управления. При этом скорость движения аппарата автоматически изменялась в зависимости от кривизны траектории. Таким образом, экспериментальные исследования полностью подтвердили эффективность предложенных в диссертации способов управления НПА.

Отдельная *пятая глава* диссертации посвящена методам обработки информации, поступающей от датчиков НПА. Автор учитывает, что эти данные могут быть зашумлены, или вообще отсутствовать в те или иные моменты времени. Поэтому наиболее верным решением в данном случае явился выбор фильтра Калмана, который, по существу, моделирует кинематику аппарата при наличии шумов и выделяет полезный сигнал, минимизируя среднеквадратическую ошибку. Применение этого подхода позволило получить полный вектор сигналов обратных связей, используемый при формировании управления НПА. Дополнительных обоснований в этой части заслуживают два обстоятельства. Во-первых, нормальный закон распределения для всех случайных факторов, действующих на систему. Во-вторых, сходимость процедуры фильтрации для существенно нелинейной системы. Численное моделирование подтвердило эффективность рассмотренного способа фильтрации при измерении зашумленных данных с акселерометров, а также с датчиков линейных и угловых скоростей.

С использованием фильтра Калмана, позволяющего восстановить в каждый момент времени вектор состояния НПА, автор решает в п. 5.2 важную задачу об идентификации параметров реального НПА. Основное допущение здесь состоит в том, что модель динамики аппарата является линейной относительно оцениваемых параметров. В этом случае можно воспользоваться линейным фильтром Калмана, позволяющего получить оценку вектора параметров. Численное моделирование подтвердило возможность предложенного автором подхода. Практическое его значение в том, что при отладке системы управления НПА может использоваться не реальный аппарат, а его математическая модель.



Метод полунатурного моделирования системы управления НПА рассматривается в последней, *шестой главе* диссертации. Основными компонентами разработанного автором комплекса моделирования являются блок программной реализации системы управления НПА и универсальную среду моделирования. При этом блок программной реализации может присутствовать и в виде реального бортового компьютера НПА. Разработан метод синхронизации между универсальной средой моделирования (Matlab) и другими элементами комплекса. Комплекс дополнен интерфейсом оператора, содержащим визуализацию движения аппарата. Разработанный комплекс полунатурного моделирования позволяет проводить моделирование движения НПА во внешней среде и проводить тестирование и настройку разработанных в диссертации алгоритмов управления, не прибегая к экспериментам с участием реального аппарата. Применение такого комплекса существенно облегчает задачу анализа тех или иных способов управления аппаратом при решении поставленных задач.

#### **Новые научные результаты, полученные в работе.**

В диссертации Юхимца Д.А. получены новые научные результаты, в том числе:

- Разработана система управления НПА с самонастройкой по эталонной модели, основанная на децентрализации математической модели НПА и позволяющая обеспечить заданные характеристики процесса управления.
- Предложен способ управления НПА с использованием скользящих режимов, который позволяет автоматически управлять скоростями движения НПА без непосредственного измерения или идентификации параметров аппарата, что позволяет повысить точность работы и быстродействие аппарата.
- Разработан способ управления НПА с одним маршевым двигателем и с управляемой ориентацией относительно продольной оси аппарата.
- Предложен способ формирования программных сигналов движения с учетом ограничений самого управляемого НПА, в том числе, ограничений его маневренности как при выводе аппарата в заданную точку пространства, так и при движении по заданной программной траектории с обеспечением заданных требований по точности.
- Предложены способы статистической обработки и комплексирования информации, поступающих от датчиков НПА в процессе его работы.
- Предложены принципы построения полунатурного моделирующего комплекса, позволяющего проводить исследование и настройку параметров системы управления НПА, не прибегая к испытаниям реального аппарата.

Отметим, что стиль диссертации близок к стилю хорошего учебного пособия, содержащего подробные объяснения и обоснования, причем изложенного хорошим литературным языком (что далеко не всегда свойственно диссертациям по техническим наукам). После незначительной редакции значительную часть текста работы вполне можно было бы рекомендовать в качестве учебного пособия по управлению НПА для соответствующих специальностей, в том числе, для специальности «Мехатроника и робототехника», по которой ведется подготовка специалистов в ведущих технических университетах РФ.

*Диссертация не лишена недостатков*, которые отмечены выше. В том числе:

- Не проведен анализ операций, выполняемых НПА, на основании которого можно было бы обоснованно определить и требования к системам управления такими аппаратами.
- Не рассмотрена задача слежения аппарата за движущимся объектом и сопровождения такого объекта, представляющая практический интерес.
- Автор допускает, что информационные сигналы от датчиков носят случайный характер. Однако в этом случае случайный характер приобретает и движение системы, что должно отразиться и на выборе показателей её качества. Этот аспект управления НПА в работе рассмотрен только частично – применительно к фильтрации случайных помех.

Очевидно, что эти недостатки имеют частный характер и никак не влияют на общую положительную оценку работы.

По результатам диссертации опубликовано 68 научных работ, в том числе, 19 в изданиях по списку ВАК РФ. Опубликовано монография (в соавторстве). Автором получены 10 патентов на изобретения, относящихся к теме диссертации, а также 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях и хорошо знакомы специалистам.

#### **Заключение.**

В диссертационной работе Юхимца Дмитрия Александровича решена важная научно-техническая проблема, которую можно определить как создание методов адаптивного управления необитаемыми подводными аппаратами. Работа содержит ряд новых научных результатов и представляет значительную практическую ценность, так как предложенные в работе методы синтеза адаптивных систем управления НПА могут найти широкое практическое применение и существенно повысить эффективность применения таких аппаратов.

Диссертация Юхимца Д.А. соответствует требованиям Положения ВАК, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»

Доктор технических наук, профессор кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана

Ющенко Аркадий Семенович



12 октября 2015

Адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
тел. раб.: 8 499 165 17 01; e-mail: robot@bmstu.ru



*Подпись Ющенко А.С.  
Заверено.  
12.10.2015*

ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
НАЗАРОВА О.В.  
ТЕЛ. 8-499-263-60-48