

Севастопольский национальный технический университет

ОСАДЧЕНКО АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ



УДК 681.515

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Специальность 05.13.03 – Системы и процессы управления

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2014

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики в Севастопольском национальном техническом университете, г. Севастополь.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Краснодубец Леонид Андреевич
Севастопольский национальный технический университет, заведующий кафедрой технической кибернетики

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ивченко Валерий Дмитриевич,
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, заведующий кафедрой «Автоматические системы»,

кандидат технических наук,
Лисогурский Александр Сергеевич,
Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, доцент кафедры «Компьютеризированных систем».

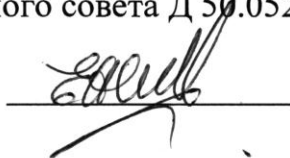
Защита состоится «17» декабря 2014 г. в 13-00 на заседании специализированного ученого совета Д 50.052.02 при Севастопольском национальном техническом университете по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Севастопольского национального технического университета по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 29.

Автореферат разослан: « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета Д 50.052.02

д.т.н., профессор



/ Шушляпин Е.А. /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Транспортные средства на воздушной подушке (ТСВП), благодаря своим уникальным свойствам, обладают высокой готовностью для проведения спасательных операций и доставки грузов в условиях мелководья и необорудованного берега. С появления первых образцов ТСВП интенсивно велись исследовательские и конструкторские работы, что позволило создать транспортные средства, обладающие уникальными возможностями эксплуатации в самых разнообразных условиях и, в частности, над различными видами подстилающей поверхности. В настоящее время класс ТСВП включает обширную номенклатуру транспортных средств, начиная от мобильных роботов с массой в несколько килограммов до десантных кораблей с массой в несколько сот тонн (проект «Зубр»).

ТСВП как объект управления имеет ряд особенностей. Поскольку его движение осуществляется в воздухе, то, в отличие от водоизмещающих судов, ему присуща более высокая подвижность при угловых движениях. Это приводит к тому, что при разворотах угол дрейфа может быстро достигать больших значений, что сопровождается сильным заносом корпусной части и, следовательно, увеличением колебательности и времени переходных процессов во время маневрирования, что в значительной степени усложняет решение задачи следования заданной траектории, а также повышает расход топлива.

Другой особенностью ТСВП является зависимость его динамических характеристик от вида опорной поверхности. Известные системы управления, например, применяемые на ТСВП типа «Зубр», используют пропорционально-дифференциальный закон управления в сочетании с дополнительной обратной связью по углу дрейфа для обеспечения режима стабилизации движения по путевому углу. Такое решение имеет существенный недостаток – параметры настройки регулятора, которые в значительной степени определяются свойствами динамической модели ТСВП, приходится корректировать при переходе от одних условий движения к другим.

В работе конструируются и исследуются законы управления движением ТСВП по назначенной траектории (траекторное управление), а также отдельных его составляющих (поступательное и вращательное движения). При этом задача следования траектории (trajectory-tracking) тесно связана с разработкой законов управления, при помощи которых подвижный объект четко следовал бы по назначенной траектории, заданной уравнениями в параметрической форме.

Классический подход к решению задачи следования траектории для подобных систем использует локальную линеаризацию и рассредоточение координат, чтобы выделить необходимое число степеней свободы как число доступных входов управления. Альтернативные подходы основываются на линеаризации динамического отклонения транспортного средства, что приводит к стационарной линейной системе (метод сбалансированной траектории). Основным ограничением при этом является гарантия устойчивости только в соседних выбранных точках управления. Известны подходы к решению задачи следования назначенной траектории, предусматривающие конструирование законов управления, которые

заставляют автономные транспортные средства следовать заранее установленным траекториям в фазовом пространстве координат. Однако такой путь решения обсуждаемой задачи имеет существенный недостаток – кинематика и динамика транспортного средства обычно представлены нелинейными дифференциальными уравнениями, что усложняет вычисление траектории. Альтернативный метод пространства состояний подход, основан просто на следовании назначенной траектории. При этом цель управления движением по программной траектории естественным путем приводит к постановке и решению обратных задач динамики – вычислению управляющих сил и моментов, входящих в уравнения движения и ведущих центр масс объекта управления вдоль назначенной траектории, заданной уравнениями в параметрической форме. В теории синтеза управлений на основе решения обратной задачи динамики (Барбашин Е.А., Батенко А.П., Крутько П.Д., Isidori A., Monaco S., Normand-Cirot D., Wei Wu и др.) разработаны методы, позволяющие строить управление не только линейными, но и нелинейными системами, осуществлять движение по заданной траектории на конечном и бесконечном интервалах времени. Однако остается актуальной задача разработки альтернативных подходов, в частности, для конструирования адаптивных законов траекторного управления подвижными объектами на основе локальной оптимизации по энергетическим критериям. Предложенные российским ученым Петром Дмитриевичем Крутько «новые технологии проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением», основанные на использовании концепции решения обратных задач динамики в сочетании с локальной оптимизацией по энергетическим критериям, дают относительно простую схему аналитического конструирования законов управления подвижными объектами. Системы с такими законами управления обладают малой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям. При этом для нахождения искомого закона управления не требуется знание детальной модели объекта управления, которая может быть как линейной, так и нелинейной.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационные исследования выполнены в рамках тематики научно-исследовательской работы кафедры технической кибернетики Севастопольского национального технического университета, а результаты исследований являются составной частью отчетов по х/д 1549 (шифр «Вихрь»), «Разработка математических моделей и алгоритмов работы системы управления движением и автомата безопасности для корабля на воздушной подушке», госбюджетной НИР «Математические методы исследования и проектирования систем управления функционально сложными процессами и объектами» (шифр «Изумруд» № 0104U000567) и госбюджетной НИР «Методы анализа и оптимизации функционально сложных процессов и систем» (шифр «Аметист», № 0109U012599).

Цель и задачи исследования. Цель исследования состоит в развитии методов аналитического конструирования непрерывных законов управления движением подвижных объектов на основе решения обратных задач динамики и локальной оптимизации по энергетическим критериям применительно к ТСВП, а также их распространении на системы с дискретным временем.

В диссертационной работе решаются следующие задачи.

1. Конструирование и исследование законов траекторного управления ТСВП, разработка соответствующих регуляторов и методов их синтеза.

2. Конструирование и исследование законов управления угловым движением ТСВП (как случай терминального управления), разработка структуры регуляторов, синтез их параметров и исследование процессов управления угловым движением ТСВП при параметрических и непараметрических возмущениях.

3. Конструирование закона управления для авторулевого путем модификации информационной структуры обратных связей.

4. Формирование подходов для переоборудования непрерывных систем управления в цифровые применительно к ТСВП.

5. Исследование методом натурального и математического моделирования систем управления при параметрических и непараметрических детерминированных возмущениях.

Объект исследования – ТСВП с вентиляторными двигателями.

Предмет исследования – законы управления движением ТСВП.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе применялись методы теории автоматического управления, дифференциальных и конечно-разностных уравнений, решения обратных задач динамики, оптимизации, а также методы компьютерного моделирования с использованием пакета Matlab (лиц. №229443), методы экспериментального исследования макетного образца спроектированного регулятора, предназначенного для работы в составе электропривода.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем.

1. Получил дальнейшее развитие аналитический метод конструирования адаптивных законов траекторного управления ТСВП, который отличается от известных тем, что основан на последовательном решении двух обратных задач динамики: соответственно нахождения управляющих сил по заданной (назначенной) траектории на плоскости и определения необходимого момента вращения по требуемому угловому положению, найденному в результате решения первой задачи.

2. Впервые предложен метод проектирования алгоритмического обеспечения цифровых адаптивных систем управления движением применительно к задачам траекторного управления ТСВП на основе двух последовательных решений обратных задач динамики в сочетании с локальной оптимизацией.

3. Впервые разработан метод терминального управления угловым положением ТСВП на основе планирования назначенной траектории.

4. Впервые разработаны и исследованы дискретные модели систем траекторного управления ТСВП, оснащенных адаптивными регуляторами.

Практическое значение полученных результатов. Практическое значение полученных результатов состоит в разработке методического и программного обеспечения для анализа и синтеза адаптивных непрерывных и цифровых систем управления подвижными объектами, в роли которых выступают ТСВП, предназначенные для функционирования в условиях параметрических и координатных возмущений и (или) не имеют детального математического описания.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ПАО «Завод Фиолент» (г. Симферополь) при выполнении х/д «Вихрь», а также в Институте современных технологий и инноваций FESTO (г. Севастополь), при разработке регуляторов, предназначенных для работы в составе мехатронных систем.

Эффективность применения предложенных законов управления подтверждена в ходе исследования макета адаптивного регулятора, предназначенного для управления скоростью вентиляторного двигателя ТСВП, входящего в структуру траекторного управления.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для проектирования адаптивных регуляторов.

Личный вклад соискателя.

Все научные и практические результаты, которые содержатся в диссертации, получены самостоятельно. При использовании результатов других авторов приводятся ссылки на соответствующие литературные источники. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие результаты.

1. Разработка и исследование аналитического метода конструирования законов управления, применительно к классу транспортных средств на воздушной подушке, который отличается от известных тем, что основан на последовательном решении двух обратных задач динамики, в сочетании с локальной оптимизацией по энергетическим критериям – [1; 8].

2. Проверка полученных теоретических результатов методами компьютерного моделирования, проведение и анализ компьютерных экспериментов – [2; 3; 5; 7; 9; 10].

3. Разработка метода терминального управления угловым положением транспортных средств на воздушной подушке на основе планирования назначенной траектории – [7; 9].

4. Проектирование стендового оборудования для исследования макетного образца адаптивного регулятора, реализующего сконструированный закон управления и предназначенного для работы в составе системы управления скоростью вентиляторного двигателя ТСВП, входящего в систему траекторного управления – [4].

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации докладывались на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня: международной научно-технической конференции “Автоматизация: проблемы, идеи, решения” (Севастополь, 2006, 12-17 сентября), 13 Международной конференция по автоматическому управлению “Автоматика - 2006” (Винница, 2006, 25-28 сентября), всеукраинской научно-технической конференции “Системы управления и автоматика” (Севастополь, 2007, 10-11 апреля), Всероссийском совещании по проблемам управления “ВСПУ - 2014” (Москва, 2014, 16-19 июня), научном семинаре кафедры технической кибернетики Севастопольского национального технического университета (г. Севастополь, июнь 2013).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 работах, среди которых 6 публикаций в специализированных научных изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК Украины, 4 – тезисы докладов на научно-практических конференциях, работ без соавторов – 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов и заключения. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста, включает 83 рисунка (рисунков на отдельных страницах нет), 1 таблицу, 2 приложения и содержит список литературы из 105 наименований, среди которых 25 опубликованы в англоязычных зарубежных изданиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи исследований, перечислены основные результаты диссертационной работы, их научная новизна и практическое значение.

В первом разделе рассмотрен класс ТСВП, включающий суда на воздушной подушке и мобильные роботы, в качестве объектов управления движением. Показаны особенности управления движением ТСВП. Представлена модель управления движением ТСВП с вентиляторными движителями, создающими силу тяги и поворачивающий момент, действующий относительно центра масс. Приведен вывод кинематических и динамических уравнений плоскопараллельного движения ТСВП относительно горизонтальной плоскости в земной системе координат.

Поставлена задача управления движением ТСВП следующего по назначенной траектории. Выполнен обзор существующих методов управления, которые могут быть использованы для управления движением ТСВП по назначенной траектории, для неполноприводных (underactuated) транспортных средств. Рассмотрен подход, связанный с решением обратных задач динамики, предложенный П.Д. Крутько, идея которого основана просто на следовании назначенной траектории, а цель управления движением по программной траектории естественным путем приводит к постановке и решению обратных задач динамики – вычислению управляющих сил и моментов, входящих в уравнения движения и ведущих центр масс объекта управления вдоль назначенной траектории, заданной параметрическими уравнениями. При этом законы управления синтезируются по нелинейным классическим моделям в форме Ньютона, Эйлера или Лагранжа. Полученные таким путем алгоритмы координированного и независимого по степеням свободы управления обладают адаптивными свойствами, имеют унифицированную структуру, которая получается аналитическим путем и легко реализуется на микроконтроллерах. По-существу, этот «энергетический метод» основывается на минимизации локальных критериев в сочетании с методологией решения обратных задач динамики.

Выполнен обзор методов решения задач терминального управления движением ТСВП. Показано, что алгоритмы терминального управления для одномерных и многомерных систем, рассмотренные П.Д. Крутько, синтезируются на основе концепций обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов в окрестности назначенных траекторий движения. Правомерность такого подхода обусловлена тем, что в технических приложениях часто требуется, чтобы движение системы в назначенное состояние проходило по заданной траектории, которая может быть определена или в параметрической форме, или в неявном виде как решение некоторого уравнения. В таком случае требуемые значения параметров движения в конечной точке задаются как

граничные условия на правом конце траектории, а начальное состояние управляемого объекта характеризуется граничными условиями на левом конце траектории. Желаемая траектория движения, соединяющая начальную и конечную точки, может назначаться или отыскиваться в результате решения самостоятельной задачи. Поэтому роль системы автоматического управления сводится к тому, чтобы осуществить движение управляемого объекта по известной программе.

Преимущество методов предложенных Крутько П.Д. заключаются в возможности использовании упрощенных нелинейных моделей объекта управления, отсутствии особенностей в терминальной точке. Эта методология, позволяет использовать единый подход для конструирования законов адаптивного и терминального управлений для подвижных объектов, в частности, ТСВП.

Применение законов терминального управления также открывает новые возможности для использования ТСВП, например, в случае, когда кильватерному строю кораблей предписывается выполнить синхронный поворот «все вдруг» на заданный угол в течение требуемого времени.

Рассмотрены методы модификации алгоритмов управления движением для цифровой системы автоматического управления ТСВП.

Развитие методов проектирования систем управления движением, основанных на применении концепции обратных задач динамики и локальной оптимизации для непрерывных систем, возможно в направлении их применения для цифровых управляющих устройств. Показано, что, простые по структуре и в настройке, такие регуляторы, способны приспосабливаться к динамическим объектам различных систем, придавая им свойства робастности, а также способность эффективно подавлять начальные рассогласования в управляемой координате и действие внешних возмущающих сил при различных начальных условиях, параметрических и координатных возмущениях.

Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во втором разделе применяются технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением для конструирования закона траекторного управления ТСВП с тремя степенями свободы. Выполнена постановка задачи траекторного управления как обратной задачи динамики и ее решение, причем в качестве объекта управления рассматривается ТСВП, которое приводится в движение двумя воздушными движителями — мощными вентиляторами, расположенными симметрично относительно продольной оси, которые обеспечивают не только поступательное, но и вращательное движение, возникающее от момента, формируемого за счет разности тяг движителей.

Лианеризованные уравнения движения объекта управления с тремя степенями свободы запишем в виде

$$M \frac{d^2 q}{dt^2} = -D \frac{dq}{dt} + f, \quad (1)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -d_{\omega} \frac{d\theta}{dt} + \mu \quad (2)$$

с начальными условиями: $t = 0: q(0) = q_0, \frac{dq}{dt}(0) = \dot{q}_0, \theta(0) = \theta_0, \frac{d\theta}{dt}(0) = \dot{\theta}_0,$

где
$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_v & 0 \\ 0 & d_v \end{bmatrix}, f = [f_x \ f_y]^T, q = [x \ y]^T,$$

m и J – масса и момент инерции ТСВП; x и y – координаты местоположения; d_v и d_ω – коэффициенты вязкого трения соответственно при поступательном и вращательном движении; θ – угол между продольной осью ТСВП и осью OX ; $f_x = (F_L + F_R)\cos\theta$, $f_y = (F_L + F_R)\sin\theta$ управляющие функции (силы), обеспечивающие поступательное движение объекта управления; $\mu = l(F_R - F_L)$ – управляющая функция (момент), обеспечивающий вращательное движение объекта управления; F_L и F_R – силы тяги соответственно левого и правого воздушных движителей; l – плечо момента сил F_L и F_R .

Конструирование закона управления выполним в два этапа. На первом этапе задачу следования назначенной траектории сформулируем следующим образом. Пусть движение центра масс ТСВП под действием управляющей силы f описывается дифференциальным уравнением (1) с соответствующими начальными условиями, которое приведем к виду

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -A \frac{dq}{dt} + Bf, \quad (3)$$

где $A = M^{-1}D, B = M^{-1} = \begin{bmatrix} b_0 & 0 \\ 0 & b_0 \end{bmatrix}, f = [f_x, f_y]^T,$

а траектория назначенного движения задана в виде векторного уравнения

$$r(t) = [\varphi_x(t) \ \varphi_y(t)]^T, \quad (4)$$

где $\varphi_x(t)$ и $\varphi_y(t)$ – гладкие функции, имеющие ограниченные производные.

Требуется найти управляющую вектор – функцию $f(t, q, \frac{dq}{dt})$ в форме обратной связи, имеющую ограничения

$$f(t) \geq f_{\min}, f(t) \leq f_{\max}$$

и обеспечивающую перемещение центра масс ТСВП вдоль назначенной траектории (4). Потребуем также при этом, чтобы возможные отклонения положения центра масс от назначенной траектории

$$\Delta(t) = r(t) - q(t) \quad (5)$$

были исчезающими функциями, которые определяются в процессе управляемого движения некоторым эталонным процессом с описанием в виде однородного дифференциального уравнения

$$\frac{d^2 \Delta}{dt^2} + H_1 \frac{d\Delta}{dt} + H_0 \Delta = 0; t = 0: \Delta(t) = \Delta_0, \frac{d\Delta}{dt} = \Delta_1, \quad (6)$$

где коэффициенты матриц H_0 и H_1 следует выбирать такими, чтобы характер и длительность затухания процессов $\Delta(t) \rightarrow 0$ в идентичных по предположению каналах управления в замкнутой системе, полученной из (3)

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -A \frac{dq}{dt} + Bf(t, q, \frac{dq}{dt}), \quad (7)$$

были приемлемыми.

В качестве меры динамического отклонения текущей траектории центра масс ТСВП от назначенной траектории примем критериальную функцию, характеризующую нормированную по массе энергию ускорения, в виде

$$G(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{d^2 q^*}{dt^2} - \frac{d^2 q(f)}{dt^2} \right]^2, \quad (8)$$

где $\frac{d^2 q^*}{dt^2}$ – вектор требуемых ускорений, обеспечивающих движение центра масс вдоль назначенной траектории; $\frac{d^2 q(f)}{dt^2}$ – вектор ускорений центра масс ТСВП, вызываемых приложенной к нему управляющей вектор-функцией.

Таким образом, решение поставленной задачи – нахождение управляющей вектор-функции следует выполнять исходя из требования, чтобы на траекториях управляемого движения значения критериальной функции (8) в каждый момент времени принадлежали малой окрестности ее минимума.

Решение этой обратной задачи динамики выполним путем минимизации (8) градиентным методом, где искомое управление находится из решения дифференциального уравнения

$$\frac{df(t)}{dt} = -\Gamma \frac{\partial G(f)}{\partial f}, \quad (9)$$

где Γ – диагональная матрица параметров $\gamma_x = \gamma_y = \text{const} > 0$, характеризующих скорость приближения вектор-функции $f(t)$ к ее оптимальному значению f_{opt} .

Преобразуем уравнение (9), вычислив производную для критериальной функции (2.8) с учётом (2.3). Имеем

$$\frac{df(t)}{dt} = \Gamma \left[\frac{d^2 q^*}{dt^2} - \frac{d^2 q(f)}{dt^2} \right] B. \quad (10)$$

Далее из уравнения (6) с учетом (5) найдем вектор ускорения $\frac{d^2 q^*}{dt^2}$, который теоретически точно соответствует следованию центра масс объекта управления заданной траектории (2.4), и подставим его в (10). Учитывая (5), имеем

$$\frac{df(t)}{dt} = \Gamma \left[\frac{d^2 \Delta}{dt^2} + H_1 \frac{d\Delta}{dt} + H_0 \Delta \right] B. \quad (11)$$

Выполняя интегрирование (11) при нулевых начальных условиях, можно найти закон управления, определяющий искомую вектор-функцию $f(t)$ в виде

$$f(t) = \Gamma [H_1 \Delta + H_0 \int_0^t \Delta d\tau + \frac{d\Delta}{dt}] B. \quad (12)$$

Как следует из (12), для формирования управляющей вектор-функции $f(t)$ необходима информация о выходах $q(t)$ и $\frac{dq}{dt}$, которая может поставляться при помощи отрицательной обратной связи от навигационной системы, а также информация о требуемой траектории движения $r(t)$ и $\frac{dr}{dt}$, которая может быть сформирована в специальном устройстве - генераторе траектории.

По соотношениям (12), определяющим искомые управляющие функции, можно построить структурную схему регулятора, реализующего сконструированный закон управления по двум степеням свободы ТСВП при его поступательном движении на плоской поверхности. На рис. 2.2 приведена структурная схема такого регулятора для одного из двух идентичных каналов управления.

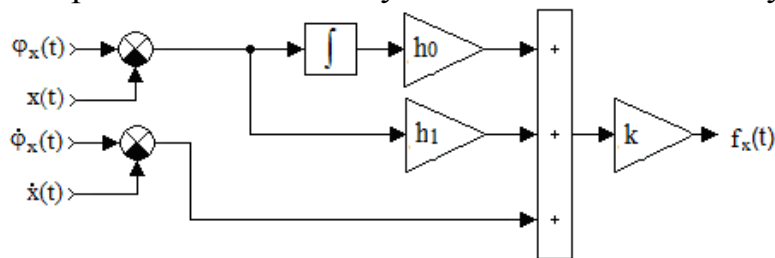


Рис. 2. Структурная схема регулятора, формирующего управляющую функцию $f_x(t)$ для одного канала управления

Найденную управляющую функцию (12), имеющую физический смысл механической силы, нельзя непосредственно использовать для управления ТСВП имеющего три степени свободы. Решение этой задачи выполняется на втором этапе конструирования закона траекторного управления ТСВП, оснащенного двумя вентиляторными движителями. В рассматриваемом случае управляющие воздействия могут быть представлены суммарной силой тяги $F_s(t)$ и моментом вращения $\mu(t)$, который изменяет угол $\theta(t)$, характеризующий угловое положение ТСВП на координатной плоскости OXY . Таким образом, для эффективного управления движением ТСВП вдоль требуемой траектории необходимо выполнить преобразование управляющих функций $f_x(t)$ и $f_y(t)$ в управляющие воздействия $f(t)$ и $\mu(t)$, создаваемые парой воздушных движителей, развивающих силы тяги F_L и F_R (левого и правого) соответственно. Управляющее воздействие f – суммарную силу тяги, которая направлена вдоль продольной оси, можно определить соотношением

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}.$$

Для нахождения управляющего воздействия $\mu(t)$ – момента вращения по известным управляющим функциям f_x и f_y , следует принять во внимание, что функция $\theta(t)$ входит в уравнение (2.1) и связана с управляющими силами соотношением

$$\theta(t) = \arctg \frac{f_y(t)}{f_x(t)}. \quad (13)$$

В этом случае закон управления угловым движением ТСВП (закон авторулевого), при следовании вдоль требуемой траектории (4), можно найти на основании уравнения (2) по аналогии решения задачи конструирования закона управления (12). Найденный закон должен по заданному углу $\bar{\theta} = \text{const}$ формировать управляющую функцию в виде момента вращения $\mu(t)$, обеспечивающую поворот ТСВП на угол $\theta(t) = \bar{\theta}$ и его последующую угловую стабилизацию. В этом случае искомый закон управления угловым движением ТСВП при следовании вдоль требуемой траектории найдем как решение обратной задачи динамики.

Степень приближения процессов в авторулевом и в эталонной модели можно оценивать величиной критериальной функции

$$g_{\mu}(\mu) = \frac{1}{2}[\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}(\mu)]^2, \quad (14)$$

где $\ddot{\theta}^*$ — угловое ускорение, обеспечивающее требуемое угловое движение ТСВП; $\ddot{\theta}(\mu)$ — угловое ускорение, вызываемое управляющим моментом.

Для нахождения искомой управляющей функции $\mu(t)$, обеспечивающей минимум (14), воспользуемся уравнением градиентного метода

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = -\lambda_{\mu} \frac{\partial g_{\mu}(\mu)}{\partial \mu},$$

который после вычисления частной производной для критериальной функции (14) приводится к уравнению, определяющему дифференциальный закон управления в виде

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \lambda_{\mu} \eta_0 [\beta_0(\bar{\theta} - \theta^*) - \beta_1 \dot{\theta}^* - \ddot{\theta}], \quad (15)$$

где β_0 и β_1 — параметры эталонной модели, определяющие желаемую динамику углового движения ТСВП; η_0 — параметр (коэффициент передачи) объекта управления; λ_{μ} — постоянная градиентного метода оптимизации; $\bar{\theta}$ — требуемый угол ориентации ТСВП, который вычисляется по формуле (13); θ^* — сигнал выхода эталонной модели.

Полагая в (15) $\theta^* = \theta$, что соответствует замене сигнала эталонной модели соответствующим сигналом обратной связи от гироскопической измерительной системы, и, интегрируя обе части (15), приведем искомый закон управления угловым движением ТСВП к виду

$$\mu(t) = k_{\mu} \left[\int_0^t \beta_0(\bar{\theta} - \theta) d\tau - \beta_1 \dot{\theta} - \ddot{\theta} \right], \quad k_{\mu} = \lambda_{\mu} \eta_0. \quad (16)$$

Структурная схема регулятора (авторулевого), обеспечивающего угловое движение ТСВП при траекторном управлении, следует из (16) и представлена на рис. 3.

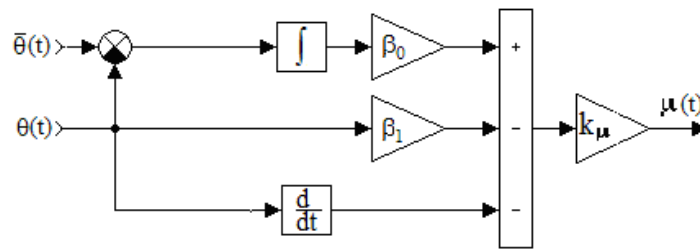


Рис. 3. Структурная схема регулятора (авторулевого), обеспечивающего угловое движение ТСВП при траекторном управлении

Таким образом, задача траекторного управления сводится к трём обратным задачам динамики, которые решаются путем локальной оптимизации по энергетическим критериям. Найденные решения представляются в виде законов управления с обратными связями.

Для формирования сил F_L и F_R могут быть использованы ВИШ на судах с динамическими принципами поддержания и вентиляторные движители на основе ДПТ в мобильных роботах. При управлении ВИШ обычно используют замкнутые системы управления величиной угла установки ВИШ включающие электрогидроприводы и датчики угла установки ВИШ. В системах управления движением мобильных роботов необходимо учитывать инерционные свойства вентиляторных движителей при разработке управляющих устройств для ДПТ, а также нелинейную зависимость силы тяги вентиляторов от управляющего напряжения ДПТ. Необходимо учитывать возможность изменения параметров ДПТ в процессе эксплуатации, под воздействием температурных факторов, которые могут влиять как на электрическое сопротивление обмоток ДПТ, так и на параметры смазочных материалов, а также возможность изменения динамических параметров движителей при климатических воздействиях (налипание влаги и наледи на лопасти вентиляторов).

Применение концепций обратных задач динамики в сочетании с оптимизацией по локальным квадратическим критериям, имеющим физический смысл механической энергии, позволяют аналитическим путем сконструировать закон управления электроприводом. При этом система управления будет обладать адаптивными и робастными свойствами [4], что позволит минимизировать влияние изменения параметров вентиляторных движителей в процессе эксплуатации ТСВП на качество траекторного управления.

Было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы траекторного управления. Для моделирования были использованы параметры модели ТСВП, имеющие следующие значения: $m = 550 \cdot 10^3 \text{ кг}$, $J = 1,79 \cdot 10^8 \text{ кгм}^2$, $d_v = 5,5 \cdot 10^5 \text{ кг/с}$, $d_\omega = 4,1 \cdot 10^4 \text{ кгм/с}$, $l = 10 \text{ м}$, $F_{\max} = 10^7 \text{ Н}$, которые приблизительно соответствуют параметрам десантного корабля на воздушной подушке класса «Зубр» в режиме максимальной загрузки.

Моделирование показало, что действия возмущений вызвали активную и целенаправленную работу вентиляторных движителей. При этом траектория движения центра масс практически совпала с заданной, что позволяет сделать вывод

о высокой эффективности рассматриваемой системы траекторного управления ТСВП.

В третьем разделе конструируется закон терминального управления угловым движением ТСВП, при использовании концепции решения обратной задачи динамики в сочетании с локальной оптимизацией.

При движении на средних и больших скоростях для создания управляющего момента используются аэроули (АР). В таком режиме управления угловым движением ТСВП, при разворотах, угол дрейфа (угол между вектором скорости и вертикальной плоскостью симметрии ТСВП) может достигать больших значений, что сопровождается сильным заносом судна, и, следовательно, увеличением времени переходного процесса, а также повышенным расходом топлива.

При управлении угловым движением ТСВП также необходимо учитывать зависимость его динамических характеристик от вида опорной поверхности, которая приводит к тому, что коэффициенты математической модели, описывающей его движение, скачкообразно изменяются, при переходе от одной опорной поверхности к другой.

Поскольку специфические свойства ТСВП наиболее ярко проявляются при выполнении манёвров, связанных с разворотами, используется его математическая модель для углового движения (рыскания). При этом в качестве средства управления рассматривается вертикальный аэродинамический руль, действие которого определяется углом перекладки.

При малых углах крена движение рыскания ТСВП описывается вектором состояния $x = [\varphi \ \dot{\varphi} \ \beta]$, где φ и $\dot{\varphi}$ соответственно угол рыскания и его производная, а β – угол дрейфа. Соответствующее уравнение состояния, описывающее угловое движение (рыскание) ТСВП, может быть представлено в виде

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} \delta_B, \quad (17)$$

К уравнению объекта (17) необходимо добавить систему уравнений рулевого тракта, преобразующего управляющий электрический сигнал $u(t)$ в угол перекладки аэродинамического руля $\delta_B(t)$, которую можно получить, зная параметры электрогидроусилителя и гидропривода аэроуля.

Следуя методу Крутько П. Д., будем рассматривать модель объекта управления в виде дифференциального уравнения, которое получено в результате преобразования (17)

$$\ddot{\varphi} + a_2 \dot{\varphi} + a_1 \varphi = b_1 \dot{u} + b_0 u \quad (18)$$

где x – управляемая координата, u – управляющая функция, которая может принимать значения в заданных пределах $u^- \leq u \leq u^+$, $a_2 = a_{33} - a_{22}$, $a_1 = a_{33}a_{22} - a_{32}a_{23}$, $a_0 = 0$, $b_1 = -b_{21}$, $b_0 = b_{21}a_{33} + b_{31}a_{23}$. Относительно модели объекта (18) должно выполняться условие: $b_0/b_1 > 0$.

В начальный момент времени $t=0$ состояние объекта определяется значениями:

$$\varphi^{(i)}(0) = \varphi_0^{(i)}, i = 0, 1, 2. \quad (19)$$

Требуется обеспечить перевод системы в терминальное состояние

$$\varphi^{(i)}(T) = \varphi_T^{(i)}, i = 0, 1, 2, \quad (20)$$

соответствующее моменту времени $t = T$, где T – время терминального управления.

Применяемый метод предусматривает последовательное решение двух взаимосвязанных задач с целью конструирования алгоритмов терминального управления подвижным объектом.

Первая задача состоит в задании требуемой траектории как функции времени во время терминального управления, используя (19) и (20). Требуемое поведение объекта управления $y(t)$ формулируется в виде линейной комбинации известных линейно независимых аналитических функций ψ_i

$$y(t) = \sum_{i=0}^5 c_i \psi_i(t), \quad (21)$$

где постоянные коэффициенты c_i определяются из условий

$$y^{(i)}(0) = \varphi_0^{(i)}, y^{(i)}(T) = \varphi_T^{(i)}, i = 0, 1, 2.$$

Вторая задача, решаемая в рамках используемого подхода, заключается в конструировании закона терминального управления, обеспечивающего перевод объекта в требуемое угловое положение (терминальное состояние) по выбранной траектории (21). Для этого вводится функция, характеризующая динамику отклонения движения объекта от заданной траектории, в виде

$$\rho(t) = y(t) - \varphi(t), \rho(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty,$$

характер изменения которой можно задать с помощью эталонного процесса, описанного в виде однородного дифференциального уравнения

$$\ddot{\rho}(t) + h_2 \dot{\rho}(t) + h_1 \rho(t) + h_0 \rho(t) = 0, \quad (22)$$

где коэффициенты h_i выбираются так, чтобы процесс (22) при ненулевых начальных условиях $\rho^{(i)}(0), i = 0, 1, 2$ затухал за время, на порядок меньшее времени терминального управления.

Поиск эффективного алгоритма управления проводится путем минимизации функции

$$G(u) = \frac{1}{2} [\ddot{\varphi}^*(t) - \ddot{\varphi}(t, u)]^2 \quad (23)$$

Таким образом, решение поставленной задачи – нахождение управляющей функций $u(t)$, можно выполнить исходя из требования, чтобы на траекториях управляемого движения значения критерия (23) в каждый момент времени принадлежали малой окрестности их минимума.

Используя метод, описанный во втором разделе получаем уравнения искомого закона управления ТСВП, в виде

$$u(t) = k(\ddot{y}(t) + h_0 f(t) + h_1(y(t) - \varphi(t)) + h_2(\dot{y}(t) - \dot{\varphi}(t)) - \ddot{\varphi}(t)), \quad (24)$$

где $f(t) = \int_0^t (y(\tau) - \varphi(\tau)) d\tau$.

Из (24) следует структурная схема терминального регулятора, изображенная на рис. 4.

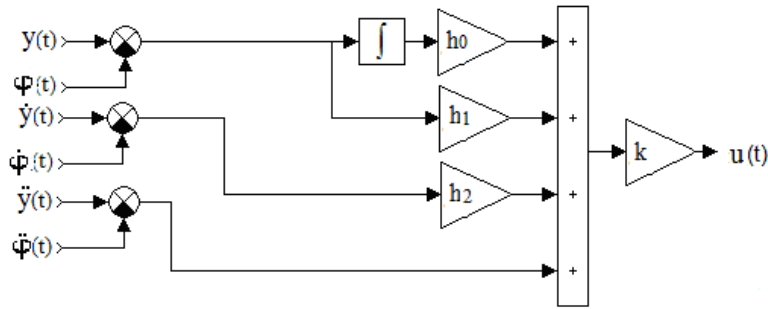


Рис. 4. Структурная схема терминального регулятора (без генератора траектории)

Учёт ограничений u производится на этапе моделирования системы выбором достаточного времени терминального управления T .

Для моделирования числовые значения (17) использованы приведенные в [3]. В итоге, вид уравнения (17) с числовыми коэффициентами следующий

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.143 & -0.059 \\ 0 & 1 & -0.185 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.313 \\ 0.052 \end{bmatrix} \delta_B(t).$$

Для моделирования были выбраны начальные $\varphi_0 = 0, \dot{\varphi}_0 = 0, \ddot{\varphi}_0 = 0$ и конечные условия $\varphi_T = \pi/2, \dot{\varphi}_T = 0, \ddot{\varphi}_T = 0$ и время терминального управления $T = 100c$, что соответствует повороту ТСВП на 90° за время T .

Результаты моделирования при отсутствии возмущений показывают, что за все время терминального управления величина отклонения путевого угла от угла рыскания, вызванного ненулевым углом дрейфа, не более 0,16 рад, а в конечный момент времени ($t = T$) путевой угол по значению приблизительно равен углу рыскания.

Результаты моделирования системы при наличии возмущения, в виде ненулевого начального значения угла рыскания $\varphi(0) = -0.07 \text{ рад}$, показывают, что за относительно короткое время переходного процесса (10 секунд) система подавляет это значительное возмущение, и далее все процессы протекают так же, как в системе без возмущений.

Для исследования чувствительности системы к изменению коэффициентов модели производилось изменение коэффициентов a_{23} и a_{22} в процессе моделирования, что соответствует изменению типа подстилающей поверхности (вода и лед).

Результаты моделирования показали, что, несмотря на значительное изменение параметров модели, угол рыскания практически совпадает с заданным.

В четвертом разделе решаются задачи переоборудования проектируемых систем управления движением ТСВП и модификации информационной структуры обратных связей.

Модификация информационной структуры обратных связей системы автоматической стабилизации путевого угла ТСВП производится с целью уменьшения помех в сигнале управления таким образом, чтобы исключить операцию преобразования задающего воздействия (которое может быть представлено ступенчатой

функцией) и управляемой координаты – угла рыскания, – с помощью аналогового дифференцирующего устройства, входящего в состав ПД - регулятора. Последнее достигается за счет исключения из закона управления слагаемого, содержащего производную от задающего воздействия и включение в него производной от выходной координаты путем введения дополнительной отрицательной обратной связи по скорости угла рыскания. Необходимый сигнал о скорости угла рыскания может быть получен от навигационной системы (например, от скоростного гироскопа).

Далее ставится задача переоборудования системы траекторного управления ТСВП как объекта, уравнения движения которого – (1) и (2). Решение этой обратной задачи динамики выполним путем минимизации (8) градиентным методом, где искомое управление находится из решения дифференциального уравнения (9). В рассматриваемом случае функция управления должна вычисляться бортовым компьютером и, следовательно, она должна иметь ступенчатую форму $v(t) = v(kT)$ при $kT \leq t < kT + T$, где T – период дискретности (скалярная величина). С учетом этого обстоятельства, а также приближенной замены производной в левой части уравнения (9) конечной разностью, приведем его к виду

$$f[T(k+1)] = f(kT) - T \frac{\partial G(f)}{\partial f}; kT \leq t < (k+1)T, k = 0, 1, 2, \dots,$$

что позволяет получить итерационную процедуру

$$f[T(k+1)] = f(kT) + T \left[\frac{d^2 \Delta}{dt^2} + H_1 \frac{d\Delta}{dt} + H_0 \Delta \right] B$$

и соответствующую ей структуру цифрового регулятора для одного из двух одинаковых каналов управления показанную на рис. 5.

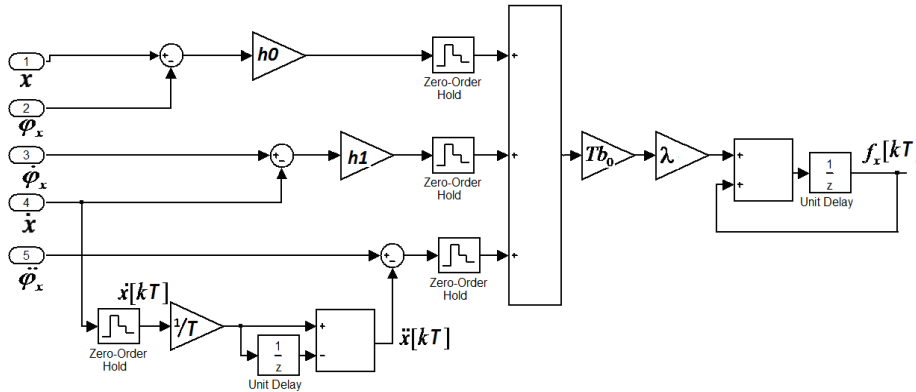


Рис. 5. Структурная схема цифрового регулятора

Аналогично строится дискретный закон управления для авторулевого.

Для технической реализации дискретных регуляторов необходимо выбрать коэффициенты h_0, h_1, λ для поступательного движения и $\beta_0, \beta_1, \lambda_\mu$ для вращательного движения, а также период дискретизации T .

Для нахождения λ_μ необходимо выбрать параметр $K = T\lambda_\mu\eta_0$ — коэффициент усиления регулятора.

Доказывается, что необходимое и достаточное условие асимптотической устойчивости процесса адаптации управляющей функции имеет вид

$$|1 - K\eta_0| < 1.$$

из чего следует:

$$0 < \lambda_{\mu} < \frac{2}{T\eta_0^2}.$$

Аналогично для регуляторов в каналах поступательного движения:

$$0 < \lambda < \frac{2}{Tb_0^2}$$

При таком выборе λ_{μ} и λ обеспечивается асимптотическая устойчивость процесса адаптации текущих значений функций управления к их новым оптимумам, которые находятся в результате решения конечно-разностного уравнений. Коэффициенты моделей эталонных процессов (h_0 , h_1 - для поступательного движения и β_0 , β_1 - для вращательного движения), могут быть найдены исходя из заданных показателей качества переходных процессов в соответствующих каналах управления.

В пятом разделе рассматривается применение сконструированных законов управления для разработки и исследования макета регулятора скорости вентиляторных двигателей (МРСВ) для системы траекторного управления ТСВП. Приводятся результаты сравнения МРСВ с ПИД-регулятором. Для автоматизации синтеза параметров регулятора в соответствии с описанной во втором разделе методикой, разработано специализированное программное обеспечение. В качестве среды разработки использовались средства пакета инженерных прикладных программ MATLAB, а именно Guide User Interface, с помощью которого была разработана программа расчета коэффициентов регуляторов. Для обеспечения интерактивной работы оператора программа оснащена графическим интерфейсом пользователя. Для исследования МРСВ, созданного автором, был изготовлен специальный стенд, представляющий собой замкнутую систему управления скоростью электродвигателя постоянного тока (ДПТ), внешний вид которого представлен на рис. 6.

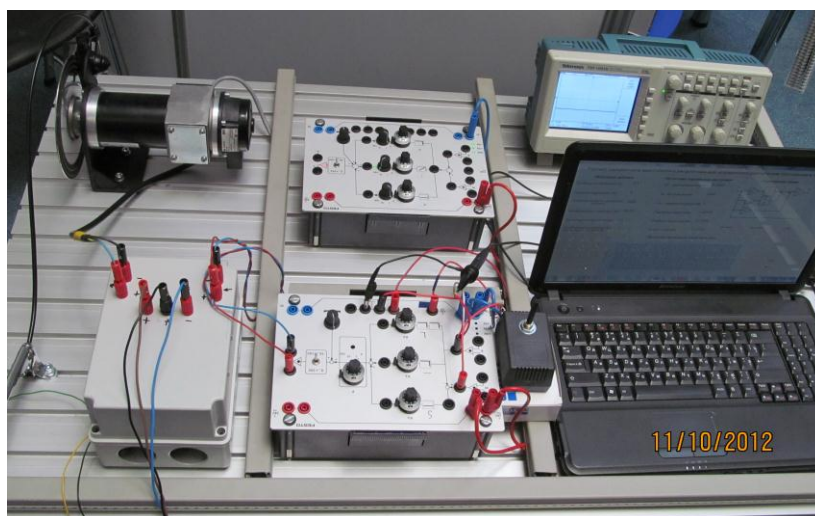


Рис. 6. Внешний вид стенда для исследования МРСВ

Исследование работы изготовленного образца регулятора в составе системы стабилизации скорости вращения ДПТ показало, что вид переходного процесса

системы стабилизации скорости ДПТ с МРСВ практически не отличается от вида переходного процесса эталонной модели.

Кроме того, исследовались робастные свойства системы стабилизации скорости ДПТ с изготовленным образцом МРСВ. При этом наблюдались переходные процессы в системе до и после замены объекта управления. Использовались двигатели фирм Lenze (тип 13.120.45) и VEB Elektromotorenwerk (тип RSM 80/50). Параметры эталонной модели оставались неизменными в обоих экспериментах, а изменялся только коэффициент усиления K . Вид переходных процессов позволяет сделать вывод о незначительных их отличиях, несмотря на существенные отличия динамических параметров ДПТ.

В выводах сформулированы основные результаты, полученные в работе.

В приложениях приведены тексты Matlab программ для синтеза конструируемых регуляторов и акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные научные результаты и выводы состоят в следующем:

1. Разработан метод конструирования адаптивных дискретных законов траекторного управления ТСВП на основе двух последовательных решений обратных задач динамики в сочетании с локальной оптимизацией, позволяющий построить структуру регуляторов и синтезировать их параметры, на основе использования эталонных процессов и моделей. При этом в качестве информации об объекте управления используется только его коэффициент передачи, в роли которого выступает масса или момент инерции. Разработаны и исследованы математические модели систем управления ТСВП с винтами изменяемого шага, оснащенные цифровыми регуляторами. Показано, что коэффициент передачи дискретного регулятора может меняться в достаточно широких пределах $((0,2 \div 0,7)K_{\max})$ и при этом траектория движения управляемого объекта соответствует назначенной траектории, которая формируется в процессе движения специальным устройством — генератором траектории.

2. Методом моделирования показано, что при выборе параметров λ , определяющих сходимость и скорость процессов адаптации, в соответствии с предложенной методикой движение центра масс управляемого объекта в составе замкнутой системы близко к назначенной траектории при сравнительно небольших ($k = 5 \div 10$) коэффициентах передачи регуляторов.

3. Выполнено детальное моделирование спроектированной системы терминального управления угловым положением ТСВП, при управлении аэроулями (без ВИШ). Результаты анализа, выполненного методом моделирования, синтезированных дискретных систем управления движением ТСВП демонстрируют низкую их чувствительность к изменениям параметров управляемого объекта, которые могут возникнуть при смене типа подстилающей поверхности, а также к координатным возмущениям.

4. Спроектирован и изготовлен стенд для исследования макетного образца регулятора, реализующего сконструированный закон управления и предназначенного для управления скоростью вентиляторных движителей ТСВП,

входящего в структуру системы траекторного управления. Экспериментально показано, что изготовленный регулятор придает системе робастные свойства, которые наблюдались при замене одного двигателя, играющего роль объекта управления, на другой с отличительными от прототипа параметрами.

5. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для проектирования и исследования регуляторов, предназначенных для работы в адаптивных системах траекторного управления.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Краснодубец Л.А. Синтез системы управления движением судна на воздушной подушке на основе метода "энергетической оптимизации" / Л.А. Краснодубец, А.Е. Осадченко // Оптимизация производственных процессов. Сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – Вып. 11.- С.84–89.

2. Краснодубец Л.А. Модификация алгоритма управления для САУ кораблем на воздушной подушке / Л.А. Краснодубец, Е.П. Николаенко, А.Е. Осадченко // Сб. науч. тр. Севастопольского военно-морского института им. П.С. Нахимова. – Севастополь, 2005. – Вып. 2(8) – С. 225–231.

3. Краснодубец Л.А. Терминальное управление угловым движением судов на воздушной подушке. / Л.А. Краснодубец, Е.П., М.А. Григоров, А.Е. Осадченко // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2007. — Вып. 83. – С. 17–21.

4. Краснодубец Л.А. Переоборудование системы стабилизации скорости двигателя постоянного тока на основе замены традиционного ПИД-регулятора адаптивным А-регулятором/ Л.А. Краснодубец, А.Е. Осадченко, Э.О. Балаканов // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2014. — Вып. 146. – С.84–89.

5. Краснодубец Л.А. Оптимизация систем автоматизированного электропривода на основе энергетических критериев / Л.А. Краснодубец, В.А. Крамарь, Э.О. Балаканов, А.Е. Осадченко // Оптимизация производственных процессов. Сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2014. — Вып. 14. – С.27–32.

6. Осадченко А.Е. Цифровая система управления угловым движением транспортных средств на воздушной подушке / А.Е. Осадченко // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2014. — Вып. 146. – С.231–239.

7. Краснодубец Л.А. Алгоритмы управления КВП. / Л.А. Краснодубец, Е.П. Николаенко, А.Е. Осадченко, Е.П., М.А.Григоров // Материалы международной научно-технической конференции, “Автоматизация: проблемы, идеи, решения”, г. Севастополь, 12-17 сентября, 2006 г. — СевНТУ, 2006. — С.190.

8. Краснодубец Л.А. Аналитическое проектирование законов траекторного управления мобильными роботами / Л.А. Краснодубец, А.Е. Осадченко // Материалы XII Всероссийского совещания по проблемам управления “ВСПУ - 2014”, г. Москва, 16-19 июня 2014 г. – С.3783–3791.

9. Краснодубец Л.А. Конструирование алгоритмов управления морскими подвижными объектами с изменяющимися характеристиками / Л.А. / Краснодубец, А.Е. Осадченко, В.В. Альчаков // Материалы Всеукраинской научно-технической

конференции «Системы управления и автоматики», 10-11 апреля 2007 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С.11–13.

10. Краснодубец Л.А. Исследование алгоритмов управления кораблем на воздушной подушке / Л.А. Краснодубец, Е.П. Николаенко, А.Е. Осадченко // XIII Международная конференция по автоматическому управлению «Автоматика-2006»: Тезисы докладов тринадцатой международной науч. техн. конф. г. Винница, 25–28 сентября 2006. – Винница: УНИВЕРСУМ – Винница. 2006. – С.264.

АННОТАЦИЯ

Осадченко А.Е. Конструирование и исследование законов управления движением транспортных средств на воздушной подушке. – Рукопись.

Решаются задачи конструирования и исследования законов траекторного управления транспортными средствами на воздушной подушке, разработки структур соответствующих регуляторов и методов их синтеза, конструирования и исследования законов управления угловым движением транспортных средств на воздушной подушке (как случай терминального управления), разработки структуры регуляторов, синтеза их параметров и исследования процессов управления угловым движением транспортных средств на воздушной подушке при параметрических и непараметрических возмущениях. Предложен закон управления для авторулевого путем модификации информационной структуры обратных связей, исследован подход для переоборудования непрерывных систем управления транспортными средствами на воздушной подушке в цифровые.

Исследования методом натурального и математического моделирования систем управления при параметрических и непараметрических детерминированных возмущениях показали, что синтезированные алгоритмы обладают свойствами слабой чувствительности к изменению параметров объекта управления.

Ключевые слова: транспортные средства на воздушной подушке, траекторное управление, математические модели движения, терминальное управление, адаптивное управление, аналитическое конструирование регуляторов, дискретные системы.