На правах рукописи

КОЗЛОВ Юрий Владимирович

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ КООРДИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА РУЛЕВЫЕ УСТРОЙСТВА И СИЛОВУЮ УСТАНОВКУ

Специальность 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009 г.

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник Симаков Игорь Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Скороходов Дмитрий Алексеевич

доктор технических наук, профессор Хименко Виталий Иванович

Ведущая организация: Государственная морская академия имени адмирала С.О. Макарова

Защита состоится «25» марта 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп. IX, ауд. 121.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Автореферат разослан «24» февраля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент Кудряшов Э.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Проблема математического моделирования для автоматизации процессов управления морскими подвижными объектами (МПО) различных классов и назначений, такими как водоизмещающие корабли (суда), обитаемые и необитаемые подводные аппараты (ПА), включая подводные лодки (ПЛ), разрабатывается в течение многих десятилетий. Несмотря на достижения в области создания моделей сложных систем управления движением (СУД) недостаточно исследован ряд теоретических задач. Это относится к задачам математического моделирования оптимального управления процессами пространственного маневрирования ПА при координированном воздействии на комплекс рулевых устройств (РУ) и силовую установку (СУ). Потребность в решении таких задач возникает в экстремальных ситуациях – при управлении расхождением судов, предупреждением столкновений, уклонением от угроз различных видов. Однако не выявлен ряд важнейших свойств МПО как многомерных объектов оптимального управления – предельные возможности по управляемости и поворотливости, характерные свойства и параметры экстремальных траекторий. Современные СУД содержат автономно действующие функциональные подсистемы управления и стабилизации отдельных координат объекта – курс, крен, дифферент, глубина, скорость хода. Решение задач формирования координированных управляющих воздействий на комплекс РУ и СУ представляется проблемным. Аналитические трудности требуют существенных упрощений моделей, включая переход к моделям, описывающим квазиустановившиеся и установившиеся процессы. Аналогичная ситуация имеет место в области управления летательными и космическими аппаратами (ЛА и КА), где имеются решения практически важных задач оптимизации на основе приближенных моделей объектов.

Цель диссертационной работы – разработка комплекса математических моделей для оптимизации и повышения качества процессов маневрирования ПА по временным и траекторным критериям за счет координированного (согласованного) воздействия на комплекс рулевых устройств и силовую установку.

Научной задачей диссертационной работы является разработка конструктивных математических моделей объекта и моделей для обеспечения предельных маневренных возможностей МПО при оптимальных координированных воздействиях на комплекс РУ и силовую установку, формулировка задач координации как задач нелинейного программирования (НП), выявление структуры и характеристик экстремальных траекторий, принципов, моделей и структуры координирующей системы управления (КСУ).

Для достижения перечисленных целей в работе поставлены и решены следующие **научные и практические задачи**:

1. Разработаны математические модели объекта и модели оптимальной координации процессов пространственного маневрирования ПА как задачи НП с воздействиями на рулевую и силовую установки при ограничениях на допустимые значения потенциально-опасных координат объекта – крен и дифферент.

2. Разработаны математические модели нелинейных типовых и функциональных элементов локальных подсистем управления ПА, включающие модели с непрерывными и разрывными характеристиками с регуляризацией. На основе моделей разработана методика адекватной оценки качества оптимальных траекторий и параметров режимов движения МПО на длительных временных участках маневрирования.

3. Разработан комплекс численных методов НП для решения задач координации с учетом выявленных особенностей – невыпуклых функционалов и областей допустимых решений. Разработан характер взаимодействия координации и локальных подсистем, обоснована организация координированного управления СУ и РУ и структуры КСУ.

4. Разработано программное обеспечение для вычислительных экспериментов на основе общих математических моделях системы, включающих модели пространственного движения ПА, модели координации и модели локальных подсистем управления с учетом нелинейных элементов. Специфика моделей позволила выявить предельные маневренные возможности ПА как объекта управления и получить количественные оценки достигаемых результатов.

Объект исследования – математические модели подводного аппарата как наиболее сложного МПО.

Предмет исследования – математические модели, численные методы и программное обеспечение для оптимальной координации пространственного маневрирования ПА по временным и траекторным критериям.

Методы исследования – теория корабля, теория автоматического управления, теория оптимального управления, теория конечномерной оптимизации, теория нелинейных операторов для моделирования системы координации подсистем управления.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели подводного аппарата и методы системы оптимальной координации подсистем управления с воздействием на силовую установку и комплекс рулевых устройств для оптимизации процессов глубокого пространственного маневрирования на основе методов нелинейного программирования.

2. Математические модели подсистем управления подводного аппарата, включающие нелинейные элементы с однозначными, неоднозначными и непрерывными и разрывными характеристиками с регуляризацией.

3. Предельные свойства ПА как объекта оптимального управления с несколькими разнородными управляющими воздействиями.

4. Математические модели вычислительных методов решения задач нелинейного программирования с выпуклыми и невыпуклыми областями допустимых решений.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Научное обоснование комплекса задач НП как математических моделей системы координирующего управления локальными подсистемами ПА в режимах маневрирования. Исследованы свойства ПА как объекта управления с несколькими разнородными управляющими воздействиями и предложен принцип координированного управления СУ и комплексом РУ для оптимизации маневрирования.

2. Разработаны модели координации и вычислительные методы решения задач нелинейного программирования с выпуклыми и невыпуклыми областями допустимых решений, адекватных поставленным задачам .

3. Разработаны регуляризованные модели разрывных нелинейных элементов подсистем ПА с однозначными, неоднозначными и разрывными характеристиками.

Практическая ценность работы. В диссертации изложены принципы построения КСУ силовой установкой и комплексом РУ, обеспечивающие повышение маневренности по временным и по траекторным критериям.

Реализация результатов работы. Результаты использовались в учебном процессе и внедрены в учебный процесс кафедры «Системный анализ и управление» СПбГПУ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Международных и Всероссийских конференциях и опубликованы в материалах конференций (см. список публикаций), а также докладывались на научных семинарах в Военно-морской академии им. Адмирала Флота СССР Кузнецова Н.Г., в Институте проблем управления РАН, на научных конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах», «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки» и др.

Личный вклад автора. Основные научные положения, математические модели, алгоритмы и их программная реализация, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 10 докладов на Международных и Всероссийских конференциях, 1 учебное пособие.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 160 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 158 страницах, содержит 80 рисунков, 3 таблиц, объем приложения составляет 6 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования, описано современное состояние проблем математического моделирования движения МПО, моделей для оптимизации пространственного маневрирования, а также сформулированы задачи разработки математических моделей системы координированного управления.

В первой главе разработаны математические модели движения автоматизированного ПА как многомерного объекта с несколькими управляющими органами различной физической природы. Сформулированы модели квазиустановившихся режимов для оптимального управления типовыми режимов экстренного маневрирования с воздействиями на РУ и СУ.

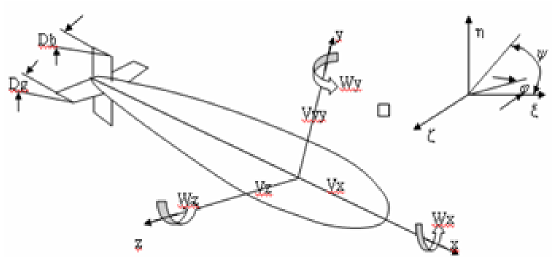

Рис. 1

В качестве основной базовой модели ПА принимается система обыкновенных дифференциальных уравнений 12-го порядка, которая описывает движение объекта как управляемого твердого тела, погруженного в жидкость, в трехмерном пространстве с шестью степенями свободы. При получении такой математической модели использовались общие принципы, изложенные, в частности, в книге Пантова Е.Н., Махина Н.Н., Шереметьева Б.Б. «Основы теории движения подводных аппаратов». – Л.: «Судостроение», 1970. Полная система дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение подводного аппарата, имеет следующий вид.

Уравнения сил:
$$\begin{cases} m_x \cdot V_x' + m_z\omega_y V_z - m_y\omega_z V_y + \lambda_{35}\omega_y^2 - \lambda_{26}\omega_z^2 = R_x, \\ m_y \cdot V_y' + \lambda_{26}\cdot\omega_z' + m_x\omega_z V_x - m_z\omega_x V_z + \lambda_{35}\omega_x\omega_y = R_y, \\ m_z \cdot V_z' + \lambda_{35}\cdot\omega_y' + m_y\omega_x V_y - m_x\omega_y V_x + \lambda_{26}\omega_x\omega_z = R_z; \end{cases} \quad (1)$$

Уравнения моментов:
$$\begin{cases} J_x\omega_x' + (\lambda_{26}+\lambda_{35})(\omega_y V_y - \omega_z V_z) = M_x, \\ J_y\cdot\omega_y' + \lambda_{35}\cdot V_z' + \omega_x\omega_y(J_x - J_z) + V_x V_z(m_x - m_z) - \lambda_{26}\omega_x V_y - \lambda_{35}\omega_y V_x = M_y, \\ J_z\cdot\omega_z' + \lambda_{26}\cdot V_y' + \omega_x\omega_y(J_y - J_x) + V_x V_y(m_y - m_x) + \lambda_{35}\omega_x V_z + \lambda_{26}\omega_z V_x = M_z. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения для расчета углов Эйлера: $\begin{cases} \psi' = \omega_y \cdot \sin\theta + \omega_z \cdot \cos\theta, \\ \theta' = \omega_x - (\omega_y \cdot \cos\theta - \omega_z \cdot \sin\theta) \cdot tg\theta, \\ \varphi' = (\omega_y \cdot \cos\theta - \omega_x \cdot \sin\theta) / \cos\psi \end{cases}$ (3)

Уравнения перемещения центра масс подводного аппарата в земной системе координат:

$$\begin{cases} \xi' = V_x \cdot \cos\varphi \cdot \cos\psi + V_y \cdot (\sin\theta \cdot \sin\varphi - \cos\varphi \cdot \cos\theta \cdot \sin\psi) + V_z \cdot (\cos\varphi \cdot \sin\psi \cdot \sin\theta + \sin\varphi \cdot \cos\theta), \\ \zeta' = -V_x \cdot \sin\varphi \cdot \cos\psi + V_y \cdot (\cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\psi + \sin\theta \cdot \cos\varphi) + V_z \cdot (\cos\theta \cdot \cos\varphi - \sin\theta \cdot \sin\psi \cdot \sin\varphi), \\ \eta' = V_x \cdot \sin\psi + (V_y \cdot \cos\theta - V_z \cdot \sin\theta) \cdot \cos\psi. \end{cases} \quad (4)$$

Уравнение (1) и (2) определяют динамику по линейным и угловым скоростям, а уравнения (3) и (4) задают связь между кинематическими параметрами подводного аппарата в неподвижной и связанной системах координат. Величины R_x, R_y, R_z и M_x, M_y, M_z обозначают проекции сил и моментов, действующих на ПА, на оси связанной системы координат. Общие выражения для этих величин обычно представляются в виде:

$$R_x = A \cdot V^2 (C_x + C_{x\delta} + C_{xV}) + T_x;\ R_y = A \cdot V^2 (C_y + C_{y\delta});\ R_z = A \cdot V^2 (C_z + C_v);$$

$$M_x = B \cdot V^2 (C_{mx} + C_{vmx}) - D \cdot \sin\theta \cos\psi;\ M_y = B \cdot V^2 (C_{my} + C_{vmy}); \quad (5)$$

$$M_z = B \cdot V^2 (C_{mz} + C_{\delta mz}) - D \cdot \sin\psi \cos\theta,$$

где $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ - модуль вектора скорости хода; T – сила тяги винтов; $m_x, m_y, m_z, J_x, J_y, J_z$ - обобщенные массы и моменты инерции; $\lambda_{26}, \lambda_{34}, \lambda_{35}$ - присоединенные статические моменты; A, B, D - постоянные коэффициенты; $C_x, C_y, C_z, C_{mx}, C_{my}, C_{mz}$ - основные гидродинамические коэффициенты ПА; $C_{x\delta}, C_{xv}, C_{y\delta}, C_{z\delta}, C_{vmx}, C_{vmy}, C_{\delta mz}, C_{vmz}$ - гидродинамические коэффициенты для горизонтальных и вертикальных рулей. В приведенных уравнениях, метацентрическая высота принята равной нулю. Уравнения сил и моментов в связи с отличием формы ПА от эллипсоида вращения записаны не в стандартной форме Коши. Для численной реализации модели на ЭВМ осуществлен переход к форме Коши. Полная математическая модель пространственного движения гипотетического ПА с численными значениями параметров, используемая в вычислительных экспериментах, представлена в Приложениях 1 и 2 к диссертации.

В основу математических моделей локальных систем управления и стабилизации курса, крена, дифферента, глубины и скорости хода положены структуры и алгоритмы, представленные в книге Ю.А. Лукомского, В.Г. Пешехонова и Д.А. Скороходова «Навигация и управление движением судов». - СПб, «Элмор», 2002 г. (глава 13 – Системы управления движением подводных аппаратов, с. 315-351).

В работе сформулированы задачи математического моделирования для оптимизации управления в типовых режимах: режим экстренного маневрирования по курсу (в горизонтальной плоскости) по временному и траекторному критериям с учетом ограничений на угол крена по условию безопасного плавания; режим экстренного маневрирования в вертикальной плоскости с изменением глубины за минимальное время и с максимальной крутизной траектории при ограничениях на угол дифферента; режим экстренного пространственного маневрирования с одновременным изменением глубины и курса при ограничениях на углы крена и дифферента.

Модели и решения задач оптимизации траектории при воздействии на РУ и СУ в строгой постановке представляет сложную математическую проблему. Один из подходов к решению состоит в упрощении полной модели движения ПА. Во-первых, для оптимизации отдельных типовых режимов использовано «разделение движений» объекта на продольное и на боковое. Во-вторых, при осуществлении «глубоких маневров» по курсу и по глубине время их осуществления и характеристика крутизны траекторий в целом определяется участками экстремалей установившихся процессов. В работе предложены модели пространственного, продольного и бокового установившихся движений ПА. Предельно упрощенная модель бокового движения ПА при глубоком маневре по курсу имеет вид $\frac{d\xi}{dt}=V\cos(\varphi-\beta),\ \frac{d\zeta}{dt}=-V\sin(\varphi-\beta),\ \beta=-c\delta, \frac{d\varphi}{dt}=\omega_y,\ \omega_y=-aV\delta, \theta=bV^2\delta,$

где ξ,ζ - координаты центра масс ПА корабля в неподвижной (земной) системе координат, V - линейная скорость движения, δ - угол перекладки вертикального руля, β - угол дрейфа, ω_y - угловая скорость вращения корпуса относительно вертикальной оси, φ - курс ПА, θ - угол крена, a , b и c - постоянные коэффициенты. Модель позволяет сформулировать задачу вычисления оптимальных значений скорости V^* и угла перекладки вертикального руля δ^*, при которых достигаются максимальная угловая скорость перехода по курсу и минимальный радиус циркуляции при ограничении угла крена допустимым по условиям безопасности значением $\theta=bV^2\delta\le\theta_0$ и естественных ограничений по скорости хода $0\le V\le V_0$, где V_0 - максимальная скорость, которую может развивать корабль при выбранной СУ, и углу перекладки вертикального руля $0\le\delta\le\delta_0$. Показано, что для ПА (в отличие от ЛА) радиус циркуляции зависит только от угла перекладки руля $R\cong 1/(a\delta)$ и не зависит от скорости хода в диапазоне, в котором не превысит опасного значения. Сформулированная задача оптимизации относится к классу невыпуклых задач. В работе предложены аналогичные упрощенные модели и для других режимов маневрирования.

Во второй главе представлены результаты исследований по развитию теории и разработке математических моделей локальных систем регулирования ПА с нелинейными элементами, имеющими однозначные, многозначные кусочно-непрерывные и разрывные характеристики. К таким звеньям относятся сервомоторы (СМ) с нелинейной скоростной характеристикой и физическими упорами, одно- двухпетлевые гистерезисные звенья, звенья типа «люфт», «зазор», а также элементы, обеспечивающие функции резервирования технических устройств в системе. Для конструирования моделей таких звеньев в работе предложен следующий базис «элементарных» операторов: модуль-функция: $y = |x|$; функция сигнатуры: $y = \frac{d}{dx}(|x|) = sign(x) = |x|/x \equiv x/|x|$, в том числе ее «регуляризованный» вариант: $y = sign(x) \cong x/(|x| + \varepsilon)$, где $\varepsilon > 0$ – малый параметр; импульсная функция: $y = \frac{d}{dx}(sign(x)) \approx \frac{d}{dx}(\frac{x}{(|x| + \varepsilon)}) = \frac{\varepsilon}{(|x| + \varepsilon)^2}$; функция «единичный импульс-прерыватель»: $y = (sign(x-a) - sign(x-b)) \cdot 1/2$, где $a > b$, или в базисе функции $|x|$: $y = \frac{1}{2} \cdot (\frac{x-a}{(|x-a| + \varepsilon)} - \frac{x-b}{(|x-b| + \varepsilon)})$; функции «единичного скачка»: $y_1 = (1 + sign(x-a))/2 \cong (1 + \frac{x-a}{(|x-a| + \varepsilon)})/2$; $y_2 = \frac{1}{2} \cdot (1 - sign(x-b)) \cong \frac{1}{2} \cdot (1 - \frac{x-b}{(|x-b| + \varepsilon)})$, первая из них равна «*1*», если $x > a$, и «*0*» в противном случае, а вторая равна «*1*», если $x < b$, и равно «*0*» в противном случае.

Предложен формализованный метод вывода в базисе «модуль-функция» алгебраического представления нелинейным оператором следующего вида: $y = K_0 + \sum_{i=1}^{n} K_i(|x - a_i| + (x - a_i))$, описывающим непрерывные кусочно-линейные функции , численные значения которых $y_i^*(x = a_i)$ заданы в узлах $x = a_i$. Разработан метод алгебраического описания сложных кусочно-разрывных функций в базисе функций единичного скачка: $F(x) = \sum_{i=1}^{n} h_i(1 + sign(x - a_i))/2$ или в базисе «модуль-функций»: $H_i(x) = h_i(\frac{|x - a_i| + (x - a_i)}{|x - a_i| + \varepsilon})/2$; $F(x) = \sum_{i=1}^{n} H_i(x)$.

В диссертации разработаны уточненные модели нелинейных звеньев с неоднозначными характеристиками. Модель двухполостного СМ, имеющего ограниченную скоростную характеристику и упор представлена в виде нелинейного уравнения $\frac{dy}{dt} = f(x)\left[(1 + sign(y - \underline{y}))/2 - 0.5[1 + sign(f(u))]sign(y - \underline{y}) + sign(y - \overline{y}))\right]$, где $y(t)$ – текущее положение штока СМ; $\underline{y}$ и $\overline{y}$ - нижний и верхний упоры; $x(t)$ – управляющий сигнал – положение управляющего золотника; $f(x) = -c + (|x + c| - |x - c| + 2c)/2$ –

скоростная характеристика СМ, имеющая в вид однозначной кусочно-линейной функции, c - максимальная скорость перемещения штока сервомотора. В работе предложена математическая модель, описывающая процессы в звене типа «люфт»: $y' = |u|(sign(e+b) + sign(e-b))/2;$ $e(t) = x(t) - y(t)$. Модель люфта может быть записана и в базисе функции «Модуль x» $\dfrac{dy}{dt} = 0.5|U|\dfrac{(z+b)|z-b| + (z-b)|z+b|}{(|z+b|+\varepsilon)(|z-b|+\varepsilon)}$, где $z = x - y$. На рис.2 даны результаты вычислительных экспериментов с моделями сервомотора и люфта.

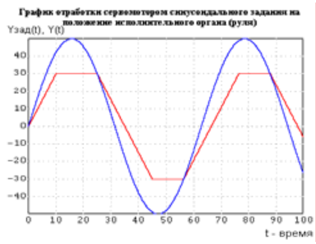

Рис.2а

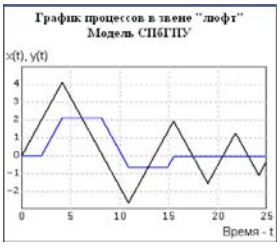

Рис.2б

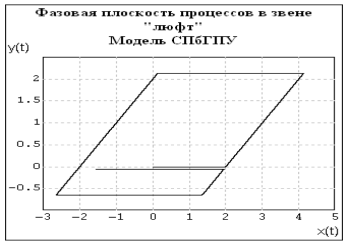

Рис.2в

Рассмотренные элементы с петлей гистерезиса (см. рис.3) имеют зоны неоднозначности, т. е. значения выходного сигнала при входном сигнале $x(t) \in [b_1, b_2]$ и при $x(t) \in [b_3, b_4]$ зависят от знака скорости $u = x'(t)$ входного сигнала. Известные модели таких элементов заданы в предикатной форме и справедливы для монотонного изменения аргумента $x(t)$ в пределах всей петли гистерезиса. В работе предложены математические модели одно- и двухпетлевого гистерезиса. Модель однопетлевого гистерезиса имеет вид

$y' = \delta(x-b_2)|u|(1+sign(u))\frac{1}{2}(1-sign(y-\bar{y}))\frac{1}{2} - \delta(x-b_1)|u|(1-sign(u))\frac{1}{2}(1+sign(y-\underline{y}))/2,$ где входящие в это выражение дельта-функции $\delta(x-b_1)$ и $\delta(x-b_2)$ с достаточно большой точностью могут быть аппроксимированы импульсными функциями $\delta(x-b_i) \cong K(sign(x-b_i+\varepsilon) - sign(x-b_i-\varepsilon))/2,\ K = 1/\varepsilon.$ Для двухпетлевого гистерезиса разработана аналогичная модель, а результаты моделирования даны на рис.3.

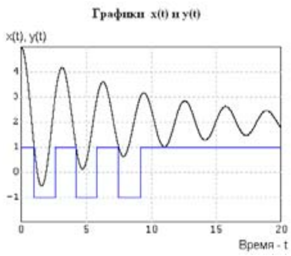

Рис.3а

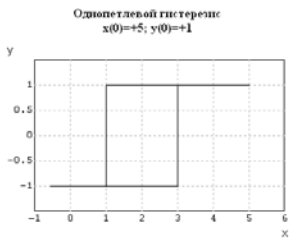

Рис.3б

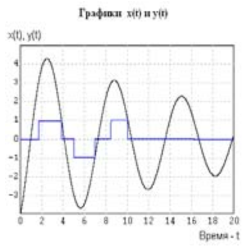

Рис.3в

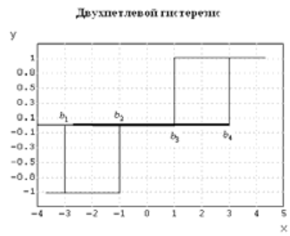

Рис.3г

В третьей главе излагаются методы решения задачи синтеза координирующих управлений на основе решения задач НП. Разработана градиентная система дифференциальных уравнений для решения задач НП с невыпуклыми областями допустимых решений. В таких случаях решение задачи каким-либо методом локальной оптимизации осуществляется из различных точек, задаваемых внутри и вне допустимых области. Из локальных оптимумов определяется глобальный. Основные идеи предлагаемых методов: сведение системы неравенств, описывающей допустимую область, к одному равенству, и сведения системы неравенств к одному эквивалентному неравенству, из которого следует уравнение границы допустимой области; формирование «модифицированной» функции Лагранжа с одним множителем; вычисление «седловой» точки функции Лагранжа с применением градиентных методов.

Для определения глобального минимума в случае невыпуклости допустимой области предложены алгоритмы вычисления решений на границе допустимой области путем ее сканирования с заданными «интервалами» линий и фиксацией глобального оптимума.

В четвертой главе приведены результаты оптимизации траекторий и параметров типовых режимов экстренного маневрирования ПА. Для режима экстренного маневрирования в горизонтальной плоскости с максимальной скоростью изменения курсового угла и с минимальным радиусом циркуляции получены следующие результаты. На основе модели подводного аппарата в виде следующих уравнений: $\frac{d\xi}{dt} = V\cos(\varphi - \beta)$, $\frac{d\zeta}{dt} = -V\sin(\varphi - \beta)$, $\beta = -c\delta$, $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_y$, $\omega_y = -aV\delta$, $\theta = bV^2\delta$ и ограничений: $\theta = bV^2\delta \le \theta_0$, $0 \le V \le V_0$, $0 \le \delta \le \delta_0$ необходимо вычислить оптимальные значения скорости V^* и угла перекладки вертикального руля δ^*, при которых достигает максимума функционал, определяющий максимальную угловую скорость перехода по курсу: $\omega_y = aV\delta$. Данная специальная задача является задачей геометрического программирования, которая заменой переменных сведена к задаче линейного программирования (ЛП): вычислить переменные, минимизирующие одночленный *позином* $g_0(t) = c_1 t^{a_{11}} t_2^{a_{12}} \ldots t_m^{a_{1m}}$ при ограничениях на неотрицательность переменных: $t_i > 0,$ и ограничениях типа неравенств, сформулированных на основе *позиномов*, в следующем виде $g_i(t) = c_i t_1^{a_{i+1,1}} t_2^{a_{i+1,2}} \ldots t_m^{a_{i+1,m}} \le 1,\ i = 1,\ldots,n-1.$ Задача ЛП имеет вид: вычислить переменные, минимизирующие линейный функционал $G_0(z) = a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + \ldots + a_{1m}z_m + C_1$ при линейных ограничениях: $G_i(z) = a_{i+1,1}z_1 + a_{i+1,2}z_2 + \ldots + a_{i+1,m}z_m + C_{i+1}.$ Переменные задач связаны соотношениями: $G_i = \ln\ g_i,\ C_i = \ln\ c_i,\ z_j = \ln t_j;\ g_i = \exp(G_i),\ c_i = \exp(C_i),\ t_j = \exp(z_j).$

Общая задача НП для синтеза координации ПА имеет вид: вычислить $f(x) \to \max$, при ограничениях $g_j(x) \ge 0,\ j = 1,..,m,\quad m < N$, где вектор $x = (x_1, x_2, .., x_N).$ Система неравенств, описывающая допустимую область, равносильна равенству: $G(x)=\sum_{j=1}^{m}\left|g_j(x)\right|-\sum_{j=1}^{m}g_j(x)=0.$ Функция $G(x)$ равна нулю, если выполнены все неравенства, положительна при нарушении одного из них. Функция $G(x)$ определяет «модифицированную» функцию Лагранжа: $L(x,\lambda)=f(x)-\lambda G(x)$, где λ можно рассматривать как множитель Лагранжа или коэффициент штрафования. На основе теорем Каруша (1939 г.) и Куна-Таккера (1951 г.) необходимо вычислить седловую точку, например, методом непрерывного градиента. Вариант градиентной системы дифференциальных уравнений имеет вид: $\frac{dx_i}{dt}=\frac{\partial f}{\partial x_i}-\lambda\sum_{j=1}^{m}\frac{\partial g_j}{dx_i}[\mathrm{sign}(g_j)-1],\ i=1,...,N;\ \frac{d\lambda}{dt}=G(x).$

В общем случае приведя систему неравенств к каноническому виду: $\delta\ge 0,\ \delta_0-\delta\ge 0,\ V\ge 0,\ V_0-V\ge 0,\ \theta_0-bV^2\delta\ge 0$, можно получить равносильное равенство $G(V,\delta)\equiv\left|\delta\right|+\left|\delta_0-\delta\right|+\left|V\right|+\left|V_0-V\right|+\left|\theta_0-bV^2\delta\right|++bV^2\delta-\delta_0-V_0-\theta_0=0.$

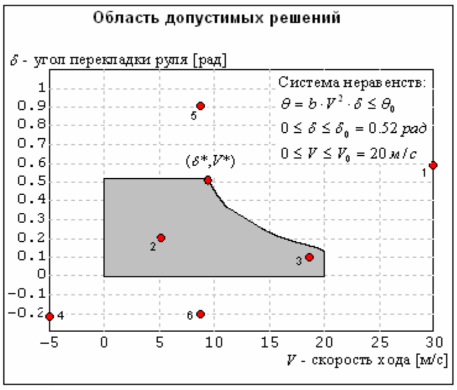

Рис.4

Это равенство описывает допустимую область на плоскости (δ,V). Модифицированная функция Лагранжа примет вид: $L=aV\delta-\lambda G(V,\delta)$. Знак «минус» определяет «механизм штрафования» при нарушении равенства $G(V,\delta)=0.$ При этом, очевидно, что $G(V,\delta)\ge 0$. Градиентные дифференциальные уравнения формируются на основе трех уравнений: $\frac{dV}{dt}=u_1;\ \frac{d\delta}{dt}=u_2;\ \frac{d\lambda}{dt}=u_3$. Требуется определить законы: $u_i=\psi_i(V,\delta),\ i=1,2,3$, обеспечивающие решение задачи оптимизации. Методика главы 3 приводит к соотношениям: $u_1=a\delta-\lambda G_v;\ u_2=aV-\lambda G_\delta;\ u_3=\lambda G$, где G_v и G_δ - частные производные. Для различных начальных условий $V(0)$, $\delta(0)$ и $\lambda(0)\ge 0$ можно получить решения, обеспечивающие в асимптотике максимум функционала $\omega_y=aV\delta$ при условии: $G(V,\delta)=0$. Невыпуклость допустимой области приводит к локальному оптимуму. Для вычисления глобального оптимума варьируются начальные условия для дифференциальных уравнений. Эксперименты подтвердили, что процессы при интегрировании градиентной системы из различных начальных условий приводят к совпадающему решению: $\delta^*=\delta_0;\ V^*<V_0$ (см. табл.1). Полученное решение является оптимальным по критерию максимального быстродействия и по критерию минимизации радиуса циркуляции при выходе ПА на заданный курс.

Таблица 1

№	Начальные условия	Результат			
		V	δ	λ	ω_y
1	$\delta=0.6\ \ V=30\ \ \lambda=0$	9.53301	0.5168	10.0123	0.023
2	$\delta=0.2\ \ V=5\ \ \lambda=0$	9.53033	0.5190	0.2861	0.023
3	$\delta=0.1\ \ V=18\ \ \lambda=0$	9.5297	0.5199	0.1637	0.023
4	$\delta=0.2\ \ V=-5\ \ \lambda=0$	9.5296	0.5190	5.0001	0.023
5	$\delta=0.9\ \ V=7\ \ \lambda=0$	9.5296	0.5199	0.4070	0.023
6	$\delta=-0.2\ \ V=7\ \ \lambda=0$	9.53080	0.5195	0.3121	0.023

Рассматривая структуру критерия оптимальности $W_y = aV\delta$, можно утверждать, что оптимальное решение может находиться только и только на границе допустимой области, для описания которой достаточно рассматривать два определяющих ограничения $\delta \le \delta_0$ и $\theta \equiv b \cdot V^2 \cdot \delta \le \theta_0$. Сведя эти два ограничения к одному равенству, описывающему границу допустимой области, можно сформулировать функцию Лагранжа: $L(V,\delta,\lambda) = aV\delta - \lambda\Gamma(V,\delta)$, где $\Gamma(V,\delta) \equiv (\delta_0+\theta_0)-(1+bV^2)\delta - \left|(\delta_0-\theta_0)-(1-bV^2)\delta\right|$. В результате необходимо интегрирование системы уравнений $\frac{dV}{dt} = a\delta - \lambda\frac{\partial\Gamma}{\partial V}$, $\frac{d\delta}{dt} = aV - \lambda\frac{\partial\Gamma}{\partial\delta}$, $\frac{d\lambda}{dt} = \Gamma(V,\delta)$ при произвольных, но положительных значениях начальных условий $V(0) > 0,\ \ \delta(0) > 0,\ \ \lambda(0) > 0.$ Вычислительные эксперименты показали, что решение задачи Лагранжа совпадали с решениями, полученными выше. Для подтверждения гипотезы о совпадении полученного решения (V^*, δ^*) с глобальным или близким к нему $(W_y \to \max)$ и по траекторному критерию ($R \to \min$) исследованы численно значения критериев путем организации «обхода» границ допустимой области: $F(V,\delta) = 0$.

Уравнение $F(V,\delta) = 0$ является функциональным заданием для объекта: $\frac{dV}{dt} = u_1; \frac{d\delta}{dt} = u_2$, для которого синтезирован закон управления: $u_1 = -\frac{1}{T}\cdot F\cdot F_v \pm \frac{V_0\cdot F_\delta}{\sqrt{F_v{}^2 + F_\delta{}^2}}$; $u_2 = \mp\frac{V_0\cdot F_v}{\sqrt{F_v{}^2 + F_\delta{}^2}}$, где V_0 - постоянной скорость движения по границе, обеспечивающая выполнение функциональной зависимости $F(V,\delta) = 0$ устойчиво и с необходимыми показателями качества. Параллельно вычисляя значения целевой функции $f(v(t),\delta(t))$ как функции времени, можно фиксировать значение экстремума.

Полученные результаты позволили сформулировать в форме принципа управления общий алгоритм координированного управления СУ и РУ при осуществлении глубокого маневра по курсу. При этом значение V^* может быть определено по приближенной формуле $V^* = \sqrt{\frac{\theta_{доп}}{b\cdot\delta_0}}$, где значение b определяется гидродинамическими характеристиками ПА. На рис.5 представлены обобщенные зависимости угловой скорости изменения курса

$\frac{d\varphi}{dt} \equiv \omega_y$ [град/с] и радиуса циркуляции $R_ц$ [м] в функции от линейной скорости хода ПА.

Зависимость $\omega_y(V)$ имеет «излом», явно выраженный «острый» максимум при $V*$, определяемый допустимым углом крена $\theta_{доп}$. Зависимость $R_ц(V)$ характеризует сильную критичность кривизны траектории корабля при превышении скоростью значения $V*$. Резкий спад угловой скорости ω_y и резкое возрастание радиуса циркуляции $R_ц$ при $V > V*$ неизбежны из-за необходимости удерживания угла крена $\theta(t)$ на предельно допустимом уровне, что вынужденно приводит к «снятию» с упора вертикального руля.

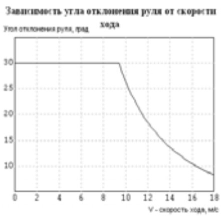

Рис.5а

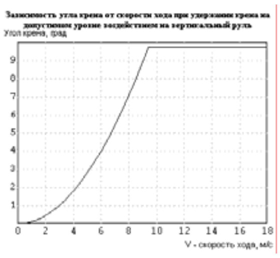

Рис.5б

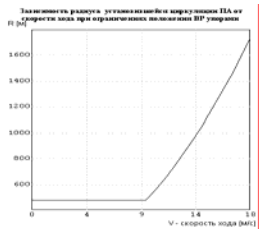

Рис.5в

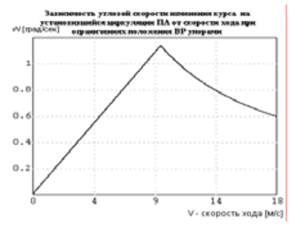

Рис.5г

Алгоритм управления экстренным маневром ПА по курсу имеет следующий вид: при получении команды на маневр должны быть выполнены следующие операции: управление СУ должно обеспечить экстренный переход от любой начальной на оптимальную скорость $V*$; управление рулем должно переключаться с регулятора стабилизации курса φ на регулятор крена с заданием уставки: $\theta_{доп}$ (знак «+» или «-» зависит от направления маневра); при входе курса $\varphi(t)$ в зону его стабилизации $|\varphi(t) - \varphi_{Зад}(t)| < \alpha$ все переключения осуществляются в обратном порядке.

В пятой главе для подтверждения эффективности разработанных моделей и оптимизации объекта , принципа управления, структуры КСУ силовой установкой и рулевыми устройствами создано программное обеспечение в среде моделирующего комплекса ПК «МВТУ», разработанного О.С. Козловым. На комплексе проведена серия экспериментов с полными математическими моделями динамики ПА, описывающими пространственное, горизонтальное и вертикальное движения. Создана технология формирования в среде ПК «МВТУ» виртуальных пультов управления с новыми способами отображения динамической информации (рис.6). Программа реализации математических моделей в ПК МВТУ, представлена в Приложении 1 и 2 к диссертации.

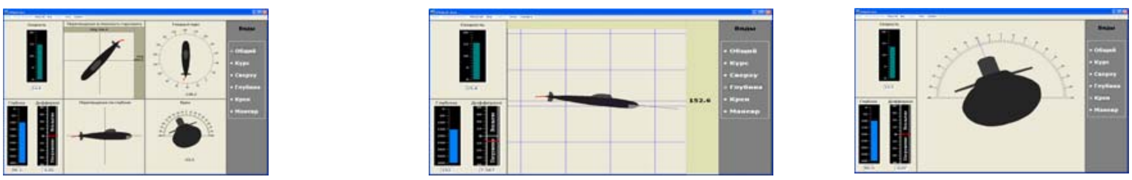

Рис.6

В работе приводятся результаты выполненных вычислительных экспериментов для различных режимов оптимального маневрирования ПА. Так, для режима экстренного маневра в горизонтальной плоскости с выходом ПА на заданный курс с максимальной скоростью хода при наличии и отсутствии КСУ результаты представлены в табличной форме для двух вариантов начальной скорости: $V(0)=2$ м/с и $V(0)=18$ м/с. Во всех случаях ограничение по углу крена принято равным $\theta_0 = 10$ градусов.

Таблица 2

	$V(0)=2$ м/с без КУ	$V(0)=2$ м/с с КУ	$V(0)=18$ м/с без КУ	$V(0)=18$ м/с с КУ
Радиус [м]	~ 1300	~ 500	~ 1800	~ 550
Время перехода [с]	~ 320	~ 180	~ 320	~190

Для иллюстрации приведены «осциллограммы» процессов и траекторий движения ЦТ.

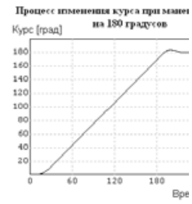

Рис.7.1

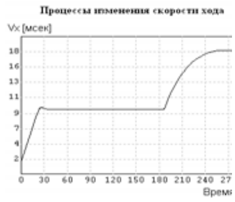

Рис.7.2

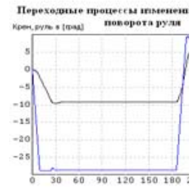

Рис.7.3

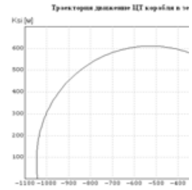

Рис.7.4

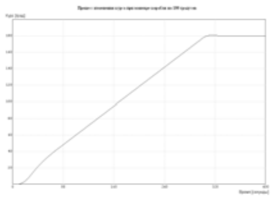

Рис.7.5

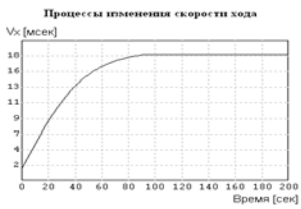

Рис.7.6

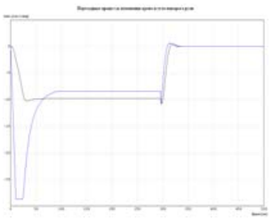

Рис.7.7

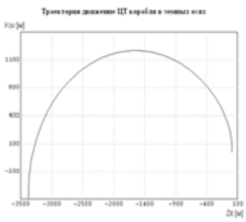

Рис.7.8

Из табл.2 следуют выводы: координации скорости хода для глубоких маневров по курсу сокращает около 2 раз время перехода ПА на новый курс при уменьшении радиуса циркуляции более двух раз. Таким образом, оптимальная координация СУ и РУ повышает качество маневрирования. Анализ процессов по координатам, временным и траекторным критериям доказал допустимость применения упрощенных моделей ПА для синтеза. Вычислительные эксперименты с полными математическими моделями динамики пространственного маневрирования ПА и локальными подсистемами подтвердили близкое к оптимальному качество КСУ и эффективность предложенных моделей.

Заключение по результатам проведенных исследований. В работе содержится новое решение актуальной задачи – задачи координированного управления комплексом РУ и СУ аппарата, обеспечивающее существенное повышение маневренных свойств ПА.

Основными научными результатами, полученными в диссертации, являются:

1. Математические модели для анализа и синтеза координации подсистем ПА как объектов управления с несколькими разнородными управляющими органами СУ и комплексом РУ при оптимизации процессов пространственного маневрирования.

2. Модели и вычислительные методы решения задач НП.

3. Модели типовых кусочно-линейных и регуляризованных разрывных нелинейных звеньев САУ с однозначными и неоднозначными нелинейными зависимостями.

Практическое значение работы. Разработан комплекс математических моделей для построения КСУ силовой установкой и рулевыми устройствами для повышения маневренности ПА. В среде ПК «МВТУ» создан комплекс для анализа систем.

Основные положения диссертации опубликованы в работах, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Козлов Ю.В. Математические модели оптимизации движения подводного аппарата на циркуляции. – «Научно-технические ведомости СПбГПУ». Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление», № 1, 2010. СПб.: изд. СПбГПУ. 2010. с. 55-58.

2. Козлов Ю.В. О неработоспособности динамических систем с «оптимальными» регуляторами, синтезированными методами аналитического конструирования. – «Научно-технические ведомости СПбГПУ», 4-2(52)/2007. СПб,:изд. СПбГПУ, 2007, с.165-168.

3. Козлов Ю.В. Синтез совместного управления движущимися объектами в горизонтальной плоскости // Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», т.1. СПб,:изд. СПбГПУ, 2009. – с. 271-272.

4. Козлов Ю.В., Кузнецова Е.В., Симаков И.П. Синтез системы координированного управления силовой установкой и рулевыми устройствами подводного аппарата при оптимизации процессов маневрирования в экстремальных ситуациях // Труды IX Международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении». СПб,:изд. СПбГПУ, 2005. – с. 456-458.

5. Козлов Ю.В., Симаков И.П. Стабилизация крена корабля в условиях морского волнения и грубость замкнутой системы. // Материалы XII Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и генерация знаний в образовании и науки», т. 1. СПб,:изд. СПбГПУ, 2005. – с. 266-270.

6. Козлов Ю.В., Симаков И.П. Кусочно-линейные и кусочно-разрывные операторы для описания нелинейных динамических звеньев систем автоматического управления // Труды X Международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении», ч.3. СПб,:изд. СПбГПУ, 2006. – с. 112-115.

7. Козлов Ю.В., Симаков И.П. О негрубости и неработоспособности динамических систем, синтезированных «классическими» методами аналитического конструирования оптимальных регуляторов // Труды IX Международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении». СПб,:изд. СПбГПУ, 2005. – с. 450-456.

8. Козлов Ю.В., Симаков И.П. Сравнительный анализ оптимальных управлений процессами маневрирования подводных и летательных аппаратов по временным и траекторным критериям. // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (26.11 – 01.12. 2007 г.). Часть V. - СПб,:изд. СПбГПУ, 2008. – с. 109-110.

9. Козлов Ю.В., Симаков И.П. Развитие вычислительных методов решения задач конечномерной оптимизации с выпуклыми и невыпуклыми областями допустимых решений. // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (26.11 – 01.12. 2009 г.). Часть V. - СПб,:изд. СПбГПУ, 2009.

10. Козлов Ю.В. Анализ грубости методами функционального анализа. – п. 5.6. в кн. В.Н. Козлов, В.Е. Куприянов, В.Н. Шашихин «Управление энергетическими системами. Часть 1. Теория автоматического управления». – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. - с. 236-239.

11. Козлов Ю.В., Симаков И.П. Развитие градиентных методов решения задач конечномерной оптимизации с невыпуклыми областями допустимых решений. – В сб. «Измерительные, вычислительные и управляющие системы». – СПб.: Изд-во СПбГПУ. 2009.

12. Козлов Ю.В. Модели оптимизации установившихся движений подводного аппарата на циркуляции в классе задач нелинейного программирования. Труды научной конференции «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки». СПб: изд. СПбГПУ. 2010. - с. 276-279.