

На правах рукописи

Котов Дмитрий Дмитриевич



**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО
АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА**

*Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и
обработка информации, статистика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

Первухин Дмитрий Анатольевич

Официальные оппоненты:

Пятков Вячеслав Викторович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, 52 отдел военного института (научно-исследовательского), старший научный сотрудник;

Попко Артём Олегович

кандидат военных наук, акционерное общество «Концерн “Научно-производственное объединение “Аврора”», отдел 71, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2025 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геологоразведочных и инспекционных работ минерально-сырьевого комплекса (МСК) на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике. Традиционные методы, используемые сегодня, ограничены в точности, автономности и рентабельности при работе в условиях Арктики, сложного климата, ледовой обстановки и удалённости от инфраструктуры. Решение задач МСК в морских акваториях требует новых подходов, один из которых базируется на применении автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащаемых современными информационно-управляющими системами (ИУС).

Степень разработанности темы исследования

Разработке АНПА и систем управления (СУ) ими посвящены исследования многих отечественных и зарубежных авторов. Существенный вклад в развитие технологий и методов использования АНПА внесли работы В.К. Пшихопова, М.Ю. Медведева, А.Р. Гайдука, А.А. Борейко, В.Е. Горнака, С.В. Мальцевой, Д.Г. Ляхова, С.В. Смирнова, М.И. Чудакова, А. В. Боженова, Е. Д. Безсуднова, В. Г. Бардачевского, Н. П. Лавёрова, а также зарубежных учёных и специалистов, таких как D. Yoerger, H. Singh, B. Jalving, J. Leonard, и компаний Kongsberg Maritime, Bluefin Robotics, Fugro, MBARI и других. В этих исследованиях рассмотрены вопросы конструирования аппаратов, методы навигации, алгоритмы обработки данных и основы автономного управления, однако основной акцент сделан на технических аспектах реализации отдельных задач без комплексного учёта специфики применения АНПА в МСК.

Вместе с тем, остаются недостаточно проработанными вопросы, связанные с интеллектуализацией систем управления АНПА для комплексного выполнения задач МСК, особенно в условиях подлёдных исследований и глубоководных операций на российском континентальном шельфе. Отсутствует целостная концепция ИУС АНПА, учитывающая специфику российского континентального шельфа, Мирового океана и Арктики, что является существенным пробелом в существующих исследованиях.

Объект исследования

Объектом исследования является ИУС АНПА, решающая задачи МСК при выполнении геологоразведочных и инспекционных работ на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике.

Предмет исследования

Предметом исследования являются методы анализа, синтеза, структура и алгоритмы функционирования ИУС АНПА, предназначенных для решения задач МСК на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике.

Идея работы заключается в применении ИУС АНПА, спроектированной с помощью моделирования и структурно-параметрического синтеза для решения задач МСК.

Цель исследования

Разработка методологии построения и применения специализированных ИУС АНПА для повышения эффективности решения задач минерально-сырьевого комплекса в сложных условиях эксплуатации.

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе планируется решить следующие **задачи**.

1. Провести сравнительный анализ существующих отечественных и зарубежных технологий и методов информационного обеспечения и управления АНПА, выявить их преимущества, недостатки и области ограниченного применения.

2. Выполнить системный анализ требований к ИУС АНПА при решении геологоразведочных и инспекционных задач на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике.

3. Разработать концептуальную модель ИУС АНПА, учитывающую специфику применения аппаратов в труднодоступных, подлёдных и глубоководных районах, характерных для условий решения задач минерально-сырьевого комплекса.

4. Обосновать и предложить методы и алгоритмы навигации, адаптивного планирования маршрутов и автономного принятия

решений в условиях ограниченной связи с оператором и неопределённости внешней среды.

5. Разработать имитационную модель ИУС, провести её экспериментальную апробацию и оценить эффективность предложенных решений в типовых сценариях функционирования АНПА при решении задач в интересах МСК.

Научная новизна результатов исследования состоит в обосновании и установлении особенностей функционирования ИУС АНПА, ориентированных специально на решение задач МСК России, в отличие от традиционно используемых унифицированных решений. Сформированы требования к ИУС АНПА, обусловленные задачами МСК. Рассмотрены рациональные варианты структуры ИУС АНПА. Впервые выявлены зависимости между спецификой задач МСК и структурно-параметрическими характеристиками специализированных ИУС АНПА.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1:

п.3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п.7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана и рекомендована к применению концептуальная модель ИУС АНПА, обеспечивающая повышение эффективности задач МСК России.

2. Предложен и рекомендован к использованию метод структурно-параметрического синтеза ИУС АНПА, позволяющий оптимально выбирать и обосновывать состав компонентов и их технические характеристики на стадии проектирования, обеспечивающий повышение надёжности и эффективности автономных операций при выполнении задач МСК.

3. Разработаны алгоритмы и схемотехнические решения информационного обеспечения автономной навигации и адаптивного

планирования миссий АНПА, внедрение которых позволяет расширить область применения аппаратов и повысить точность геолого-геофизических измерений и оперативность инспекционных работ.

4. Выполнена оценка эффективности предложенных решений на основе имитационного моделирования типовых сценариев функционирования АНПА, подтверждающая целесообразность применения разработанной ИУС для решения практических задач МСК России.

5. Результаты диссертационных исследований реализованы при выполнении составной части научно-исследовательской работы в Михайловской военной артиллерийской академии; акт внедрения от 16.01.2025.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использован комплексный подход, включающий обобщение и системный анализ опыта отечественных и зарубежных исследований в области ИУС АНПА. В работе применены методы структурного и параметрического синтеза, сравнительного сопоставления технических решений, математического моделирования и анализа эффективности технологических процессов. Разработана методика структурно-параметрического синтеза ИУС АНПА, которая позволяют обосновывать и рационально выбирать технические характеристики, компоненты СУ, структуру, функции и параметры с учётом специфики задач МСК России.

Экспериментальная часть исследования базировалась на использовании методов компьютерного моделирования, планирования и проведения имитационных экспериментов, реализованных в программной среде MATLAB/Simulink с применением специализированных библиотек. Это позволило проверить ИУС АНПА в условиях, максимально приближенных к реальным сценариям использования аппаратов. Результаты моделирования подтвердили практическую значимость и реализуемость разработанных методов и рекомендаций для проектирования и применения современных ИУС АНПА, предназначенных для решения задач МСК.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная концептуальная модель информационно-управляющей системы АНПА является основой для проектирования систем, предназначенных для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса.

2. Предложенный метод структурно-параметрического синтеза создаёт научно-методическую основу для разработки информационно-управляющей системы АНПА, решающей задачи минерально-сырьевого комплекса в морских акваториях.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена: комплексным анализом предметной области, корректным использованием общепризнанных теорий, методов системного исследования, применением стандартных и апробированных методов математического и имитационного моделирования, использованием современных программных комплексов (MATLAB/Simulink) для проведения численных экспериментов и обработки результатов, а также сравнением полученных результатов с данными, представленными другими авторами и опубликованными в научных источниках. **Достоверность подтверждена** выполнением значительного объёма имитационных экспериментов, воспроизводящих реальные сценарии эксплуатации АНПА, а также практическим внедрением разработанных методик в проектирование ИУС АНПА, что демонстрирует их объективность и применимость в решении актуальных задач минерально-сырьевого комплекса. Результаты моделирования показали статическую сходимость и показали корреляцию с данными натурных экспериментов, что подтверждает адекватность моделей.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих международных научных и научно-практических конференциях.

1. Конференции «XIII Международная научная конференция «Транспортная инфраструктура для устойчивого развития регионов»» (октябрь 2022 г., г. Красноярск),

2. Конференции «Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (ноябрь 2022 г., г. Санкт-Петербург),

3. Конференции «VIII Международная научная конференция «MANAGEMENT, ECONOMICS, ETHICS, TECHNICS – MEET 2022» (октябрь 2022 г., г. Санкт-Петербург),

4. Конференции «VI Международная научно-исследовательская конференция «Наука. Технологии. Общество» (ноябрь 2022 г., г. Саратов).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; проведении анализа и обобщения зарубежной и отечественной научно-технической литературы по теме исследования; разработке концептуальной модели интеллектуальной информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата; создании метода структурно-параметрического синтеза компонентов ИУС АНПА; разработке алгоритмов автономной навигации, адаптивного планирования и оперативного принятия решений; реализации и апробации имитационной модели предложенных решений, а также в формулировке выводов и рекомендаций, имеющих практическое значение для минерально-сырьевого комплекса России. Научные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук* (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus/WoS). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, содержит 133 страниц машинописного текста, 42 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 77 наименований и 2 приложения на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы. Сформулированы цель, задачи работы и научная новизна. Раскрыты тео-

ретическая и практическая значимости исследования. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа задач, решаемых АНПА в морских акваториях, состояния и тенденций развития их систем управления. Рассмотрены современные средства и технологии, применяемые в морских акваториях России, выявлены ограничения традиционных методов, показана перспективность роботизированных решений. Выявлено, что недостаточная автономность и интеллектуализация систем управления ограничивают эффективное использование АНПА. В конце первой главы сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретического исследования, направленные на разработку концептуальной модели функционирования ИУС АНПА для решения задач МСК. Проведен анализ сценариев функционирования АНПА. Дано описание структуры модели, включая внутренние параметры аппарата, внешние факторы, управляющие и выходные воздействия. В конце второй главы сформулированы выводы и рекомендации по использованию результатов.

В третьей главе приведены результаты исследования по разработке метода структурно-параметрического синтеза ИУС АНПА. Обоснованы функциональные требования к системе, построена иерархическая структура ее свойств, разработаны алгоритмы синтеза рациональных вариантов ИУС и критерии их оценки. Выполнен выбор оптимального варианта построения ИУС АНПА на основе комплексных показателей. Получены выводы о целесообразности предложенных решений.

В четвертой главе представлены практические рекомендации по созданию ИУС АНПА для решения задач МСК. Разработана математическая и имитационная модель ИУС АНПА в среде MATLAB/Simulink. Предложены алгоритмы информационного обеспечения, оценки устойчивости и качества управления. Разработаны рекомендации по внедрению предложенных технических решений.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанная концептуальная модель информационно-управляющей системы АНПА является основой для проектирования систем, предназначенных для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса.

В рамках данного положения обоснована необходимость разработки ИУС, обеспечивающей высокую автономность и эффективность операций АНПА для решения задач МСК в морских акваториях. Сравнительный анализ традиционных и роботизированных методов представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Сравнительный анализ традиционных и роботизированных методов

В работе подробно рассмотрены задачи, решаемые АНПА, возможные сценарии их функционирования, включая картографирование морского дна, инспекцию подводных трубопроводов и кабельных трасс, экологический мониторинг, геологоразведочные и гидрофизические исследования (рисунок 2).

Разработана структура модели, выделены ключевые параметры, рассмотрены причинно-следственные связи. По результатам экспертной оценки построена модель ИУС АНПА, описывающая ее свойства и определяющая основные параметры. Модель представлена на рисунке 3.

Построенная модель представляет собой комплексную систему с чётко определёнными причинно-следственными связями

между входными воздействиями, внутренними конструктивно-технологическими характеристиками и выходными параметрами функционирования аппарата.



Рисунок 2 – Возможные сценарии функционирования АНПА

Входные группы воздействий поступают на центральный элемент — математическую модель АНПА, представленную нелинейной системой уравнений движения с медленно изменяющимися во времени параметрами.

Правая часть структурно-функциональной схемы описывает выходной вектор наблюдаемых параметров (глубина, траектория движения, ориентация, состояния систем и коммуникационные сигналы), который используется для оперативного управления миссией, а также формирует обратные связи, поступающие на уровни проектирования и производства.

Высокая согласованность экспертных оценок (коэффициент конкордации $W = 0,77$) подтверждает обоснованность включённых в

модель факторов, что позволяет использовать её в качестве структурно-параметрической основы для проектирования, анализа и оптимизации ИУС АНПА, предназначенных для эффективного решения задач минерально-сырьевого комплекса.

2. Предложенный метод структурно-параметрического синтеза создаёт научно-методическую основу для разработки информационно-управляющей системы АНПА, решающей задачи минерально-сырьевого комплекса в морских акваториях.

Цель данного положения заключается в рациональном выборе компонентов и параметров ИУС на этапе проектирования. Разработан метод, основанный на иерархическом анализе требований и системном подходе к структурно-параметрическому синтезу компонентов системы управления. Рассмотрены функциональные задачи ИУС АНПА (рисунок 4).

Тип задачи, выполняемой ИУС АНПА, напрямую влияет на построение информационно-управляющей системы. Под каждую задачу рассмотрены различные возможные варианты структуры. Общая схема приведена на рисунке 5.

На основе функциональных задач сформированы критерии выбора структуры ИУС:

1. Полнота геологоразведки/мониторинга. Система должна обеспечивать съёмку рельефа без пропусков важных участков, точно фиксировать местоположение аномалий, собирать геохимические и геофизические данные в требуемом объёме.

2. Точность и стабильность навигации. Оценивается предельная ошибка при длительной работе системы (1–2 м на 10 км движения), что критически важно для определения точного расположения обнаруженных объектов.

3. Надёжность. Вероятность отказа системы за 72 часа не должна превышать 5%. В этой категории рассматривается наличие резервирования, а также устойчивость алгоритмов при затухании или потере связи с буями или судном.

4. Энергоэффективность. Система расходует 300–400 Вт·ч в рабочем режиме, включая одновременную работу гидролокаторов и вычислительных блоков. Превышение этих значений приводит к

сокращению полезного времени погружения и уменьшению площади обследования.

5. Совместимость с внешними системами. Аппарат должен гарантированно взаимодействовать с судном-носителем (спутниковая и радиосвязь при всплытии), буями (акустические модемы до 2–3 кбит/с), а также потенциально использовать стационарные маяки для уточнения координат.

6. Стоимость и срок службы. Избыточное усложнение конструкции увеличивает затраты на закупку и обслуживание, но даёт выигрыш в точности и автономности. Необходимо оценить “эффективность на единицу стоимости”.

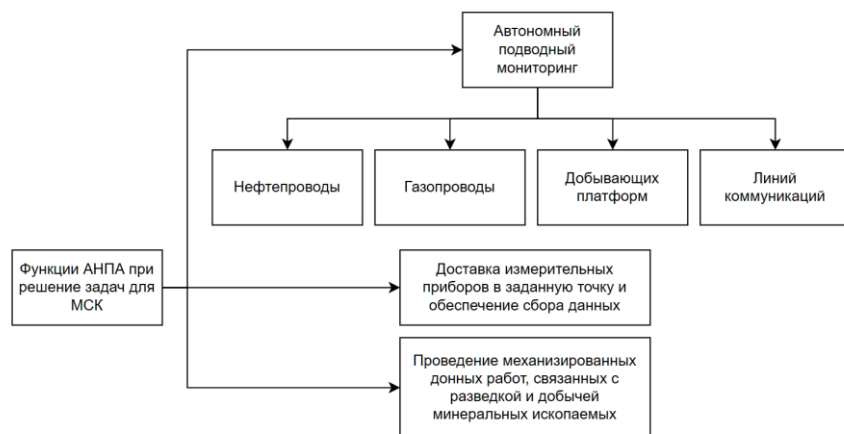


Рисунок 4 – Функции АНПА при решении задач МСК

Опираясь на сформулированные требования к точности навигации, автономности, пропускной способности каналов связи и энергетической эффективности, выполнена последовательная процедура структурно-параметрического синтеза.

После проведения структурно-параметрического синтеза, были спроектированы три варианта ИУС АНПА.

На основании сформулированных критериев был выполнен сравнительный анализ предложенных вариантов ИУС АНПА. Итоговые оценки представлены ниже в табличной форме (Таблица 1).

Где высокая степень оценки означает полное выполнение требований, а низкая – не соответствие требованиям.

Таблица 1 – Сравнение вариантов

№	Критерий оценки	Вариант А	Вариант В	Вариант С
1	Полнота геологоразведки	Средняя	Высокая	Высокая
2	Точность и стабильность навигации	Средняя	Высокая	Высокая
3	Надёжность и устойчивость к отказам	Низкая	Средняя	Высокая
4	Энергоэффективность	Высокая	Средняя	Высокая
5	Совместимость с внешними системами	Средняя	Высокая	Высокая
6	Стоимость и срок службы	Низкая	Высокая	Средняя
Итоговая интегральная оценка		Средняя	Средняя	Высокая

На основе приведённого выше сравнительного анализа рациональных вариантов построения ИУС АНПА по заданным критериям наиболее предпочтительным признан Вариант С (рисунок 6)

Для синтеза системы управления АНПА Построена иерархическая структура свойств информационно-управляющей системы АНПА (рисунок 7).

На уровне планирования миссии используется функция стоимости (1)

$$V(x) = \min_u \{f(x, u) + V(g(x, u))\}, \quad (1)$$

где x – вектор состояние системы, u – вектор управляющих воздействий, $V(x)$ – функция стоимости, оптимальное значение которой нужно найти, $f(x, u)$ – текущие затраты, $g(x, u)$ – изменение состояния системы.

На операционном уровне используются уравнения состояния для моделирования динамики АНПА (2):

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad (2)$$

где f – функция, описывающая, как система изменяется во времени в зависимости от текущего состояния и управления. $x(t)$ – текущее состояние системы в момент времени t , $u(t)$ – функция управления системой.

При разработке системы управления необходимо ввести ряд допущений и ограничений, упрощающих моделирование и проектирование, но не снижающих адекватности результатов.

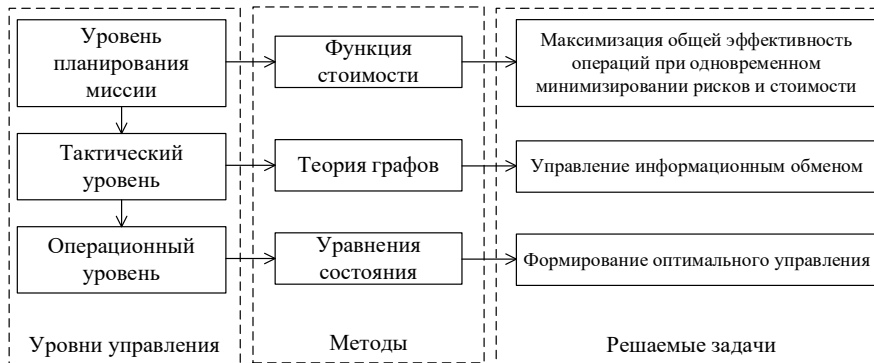


Рисунок 7 – Иерархическая структура свойств ИУС АНПА

Аппарат проектируется нейтрально-плавающим и устойчивым, а управление строится по отдельным каналам при умеренных внешних возмущениях.

В качестве основы математической модели выбран полный комплект уравнений движения твердого тела в шести степенях свободы (6DOF) с параметризацией ориентации через углы Эйлера.

Векторное представление уравнений движения включает уравнения поступательного движения (для линейных скоростей u , v , w вдоль осей X , Y , Z) и уравнения вращательного движения (для угловых скоростей p , q , r вокруг осей X , Y , Z). При допущении постоянной массы m аппарата и постоянных центральных моментов инерции I_x, I_y, I_z (связанных с осями корпуса), уравнения движения в проекциях на оси связанной системы координат принимают вид (3):

$$\begin{cases} m(\dot{u} + qw - rv) = X, \\ m(\dot{v} + ru - pw) = Y, \\ m(\dot{w} + pv - qu) = Z, \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr = M_x, \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr = M_y, \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq = M_z. \end{cases} \quad (3)$$

где X, Y, Z – суммарные проекции внешних сил, действующих на центр масс аппарата вдоль осей X, Y, Z ; M_x, M_y, M_z – суммарные моменты сил относительно центра масс вокруг этих осей.

Модель учитывает конкретную конфигурацию движителей АНПА, определяющую, как управляющие воздействия распределяются по осям движения. В АНПА установлены пять движителей Blue Robotics T200 в следующих точках и ориентациях: два погружных движителя T200 (погружные); два движителя T200 (горизонтальные, кормовые); один поворотный носовой движитель T200.

Для имитации динамики аппарата в режиме реального времени и последующей разработки системы управления, описанная математическая модель реализована в среде MATLAB/Simulink (Рисунок 8).

Основой схемы является стандартный блок 6DOF (Euler Angles) из библиотеки Aerospace Blockset, который интегрирует уравнения движения в шести степенях свободы (Рисунок 9). Этот блок принимает на вход суммарные силы $[X, Y, Z]$ и суммарные моменты $[M_x, M_y, M_z]$, приложенные к центру масс аппарата. Затем вычисляет отклик системы – на выходе блока формируются: текущее положение аппарата (в виде координат по осям Земли X_e, Y_e, Z_e); линейные скорости (u, v, w) в осях аппарата; углы Эйлера (ϕ, θ, ψ); угловые скорости (p, q, r) вокруг осей аппарата.

Параметры блока (масса, тензор инерции) настроены согласно физическим характеристикам рассматриваемого АНПА. Координатные оси блока согласованы с принятой системой: оси тела (X_b, Y_b, Z_b) совпадают с осями аппарата, а плоская система Земли (X_e, Y_e, Z_e) выбрана с осью Z_e направленной вниз (что соответствует использованию углов Эйлера с определением курса ψ вокруг вертикали).

Построена многоконтурная система управления на базе ПИД-регуляторов (4). Оптимизация регуляторов осуществлялась с помощью модуля «PID Tuner» в Matlab/Simulink

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (4)$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие в момент времени t ; K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты, соответственно, $e(t)$ – ошибка между желаемой уставкой и измеренной переменной процесса, t – время, τ – фиктивная переменная интегрирования.

Система управления АНПА включает в себя отдельные контуры регулирования глубины, курса и скорости, с алгоритмом координации каналов для устранения перекрестных воздействий и повышения стабильности управления. Для подтверждения работоспособности и валидации параметров разработанного алгоритма автоматического управления АНПА была проведена серия виртуальных испытаний в среде MATLAB/Simulink.

Для оценки устойчивости и качества системы заданы три типовых сценария миссий (Таблица 2).

Таблица 2 – Три типовых сценария миссий ИУС АНПА для МСК

№	Сценарий	Краткое описание
1	Выход на позицию	Переход из начальной точки А в точку В.
2	Движение галсами	Картографирование участка дна прямолинейными галсами с фиксированной глубиной.
3	Движение на различных глубинах	Плавное изменение глубины

На рисунке 10 показана трёхмерная траектория аппарата при движении галсами вдоль прямоугольного участка дна. Выделяются 11 прямолинейных проходов длиной ~120 м каждый и последовательные повороты, выполняемые при заданной глубине. На следующих рисунках представлены графики переходного процесса по: скорости (Рисунок 11); курсу (Рисунок 12); глубине (Рисунок 13).

В целом система управления обеспечивает устойчивое и повторяемое выполнение шаблона «галсы» без накопления ошибки и

без возникновения автоколебаний. Результаты моделирования подтвердили устойчивость, высокое качество и требуемую точность удержания заданных параметров движения аппарата.

Для ИУС АНПА был разработан интерфейс мониторинга, позволяющий наблюдать за параметрами АНПА и при необходимости вмешиваться (рисунок 14). На интерфейс мониторинга получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024616877 от 26.03.2024.



Рисунок 14 – Программа мониторинга ИУС АНПА

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что, предложенный метод структурно-параметрического синтеза действительно формирует прочную научно-методическую основу для разработки ИУС АНПА, способной эффективно решать задачи МСК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке научно-методических основ создания ИУС АНПА, оптимизированной для решения задач МСК России. Системный анализ отраслевых требований подтвердил потребность в высоко автономных аппаратах, способных работать в Арктике и на глубинах до 3000 м при ограниченной внешней связи.

Сформирована концептуальная модель ИУС, описывающая 48 внутренних и внешних параметров. Экспертно-статистический анализ (коэффициент конкордации 0,77) позволил количественно

ранжировать их значимость. Предложен метод структурно-параметрического синтеза и сравнены три архитектуры. По критериям точности, надёжности, энергоэффективности и стоимости оптимальной признана гибридная схема на базе с децентрализованным распределением функций.

Построена нелинейная 6-мерная модель ИУС АНПА в имитационной среде MATLAB/Simulink. Синтезированные многоконтурные ПИД-регуляторы обеспечивают удержание глубины $\pm 0,05$ м, курса $\pm 3^\circ$ и переходный процесс 10–20 с без перерегулирования, что удовлетворяет требованиям геологоразведки и инспекции трубопроводов.

Выполненное диссертационное исследование позволило решить комплексную научно-практическую задачу создания основы для нового поколения отечественных АНПА, способных эффективно и автономно выполнять геологоразведочные и технологические операции в суровых условиях Мирового океана. Полученные результаты представляют собой значимый вклад в развитие подводной робототехники и открывают возможности для широкого применения роботизированных средств при освоении минерально-сырьевых ресурсов России.

Перспективами дальнейших исследований являются углубление и расширение разработанных подходов за счёт интеграции современных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, что позволит значительно повысить автономность и эффективность ИУС АНПА при решении задач МСК. Кроме того, необходима практическая реализация предложенных решений с последующей экспериментальной апробацией в условиях реальных арктических экспедиций. Также актуально дальнейшее совершенствование специализированной аппаратуры и методик её применения для решения более широкого спектра задач минерально-сырьевого комплекса России в экстремальных морских условиях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Новожилов, И.М. Разработка и прототипирование распределённой системы управления геологоразведывательным необита-

емым подводным аппаратом / И.М. Новожилов, М.Ю. Шестопалов, **Д.Д. Котов**, Т.В. Кухарова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2022. – № 4. – С. 17–28. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-17-28. (БАК №1142 ред. 27.04.2022)

2. Первухин, Д.А. Методы структурно-параметрического синтеза автономных необитаемых подводных аппаратов, предназначенных для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса / Д.А. Первухин, **Д.Д. Котов**, Ю.М. Искандеров // Современная наука и инновации. – 2025. – № 1. – С. 18–40. DOI: 10.37493/2307-910X.2025.1.2. (БАК №2567 ред. 18.03.2025)

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus/WoS):

3. **Kotov, D.D.** Prospects for the Use of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to Solve the Problems of the Mineral Resources Complex (MRC) of the Russian Federation / D.D. Kotov, D.A. Pervukhin, H. Davardoost, O.V. Afanaseva // Journal of Maritime Research. - 2024. – Vol. 21, № 1. – PP. 309-317.

4. Pervukhin, D.A. Development of a Conceptual Model for the Information and Control System of an Autonomous Underwater Vehicle for Solving Problems in the Mineral and Raw Materials Complex / D.A. Pervukhin, **D.D. Kotov**, V. Trushnikov // Energies. – 2024. – Vol. 17, № 23. – P. 5916. DOI: 10.3390/en17235916.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024616877 Российская Федерация. Программа для мониторинга параметров автономного необитаемого подводного аппарата. Заявка №2024614882: заявл. 12.03.2024: опубл. 26.03.2024 / **Д.Д. Котов**, **Д.А. Первухин**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с

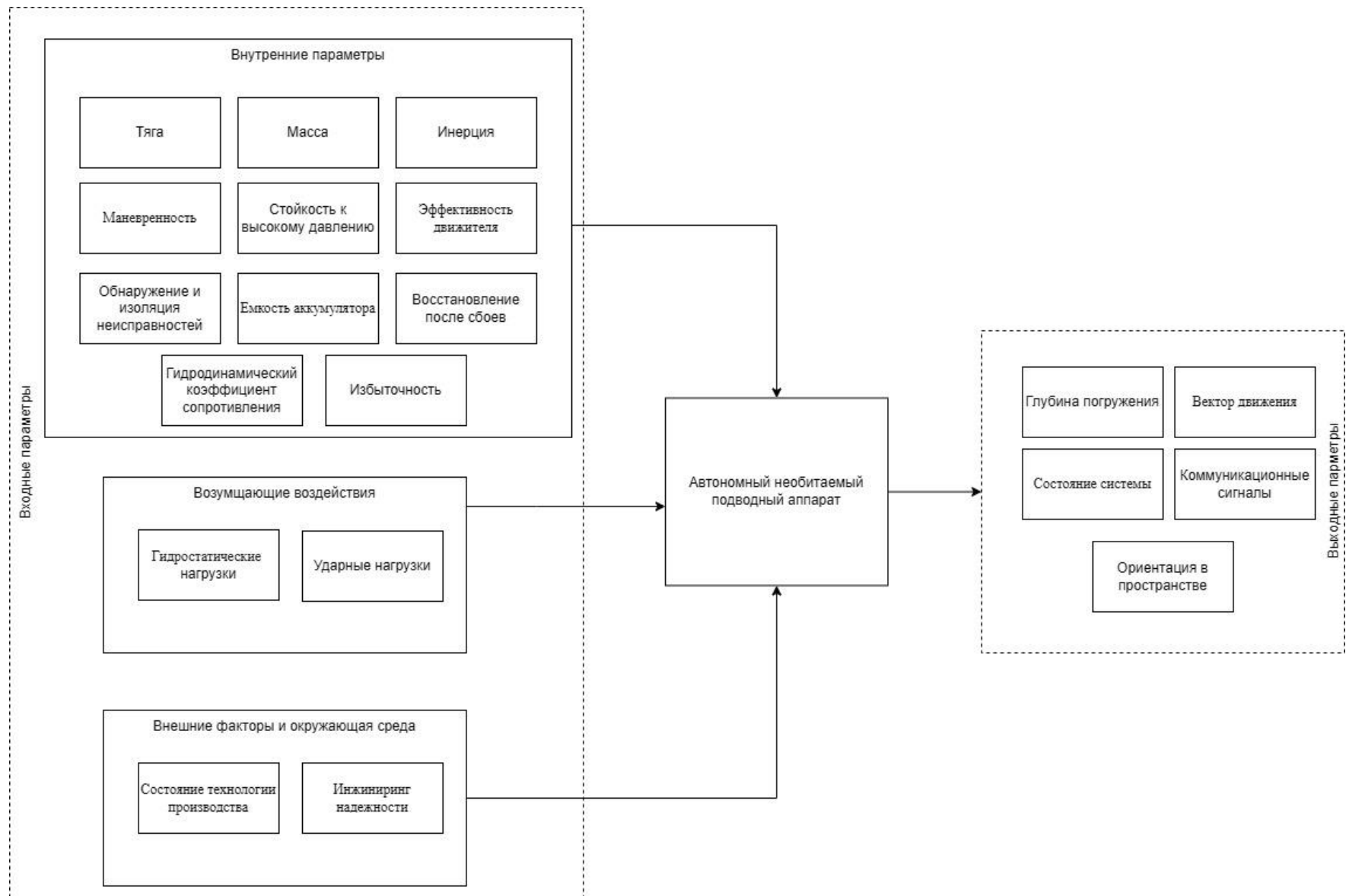


Рисунок 3 – Модель ИУС АНПА

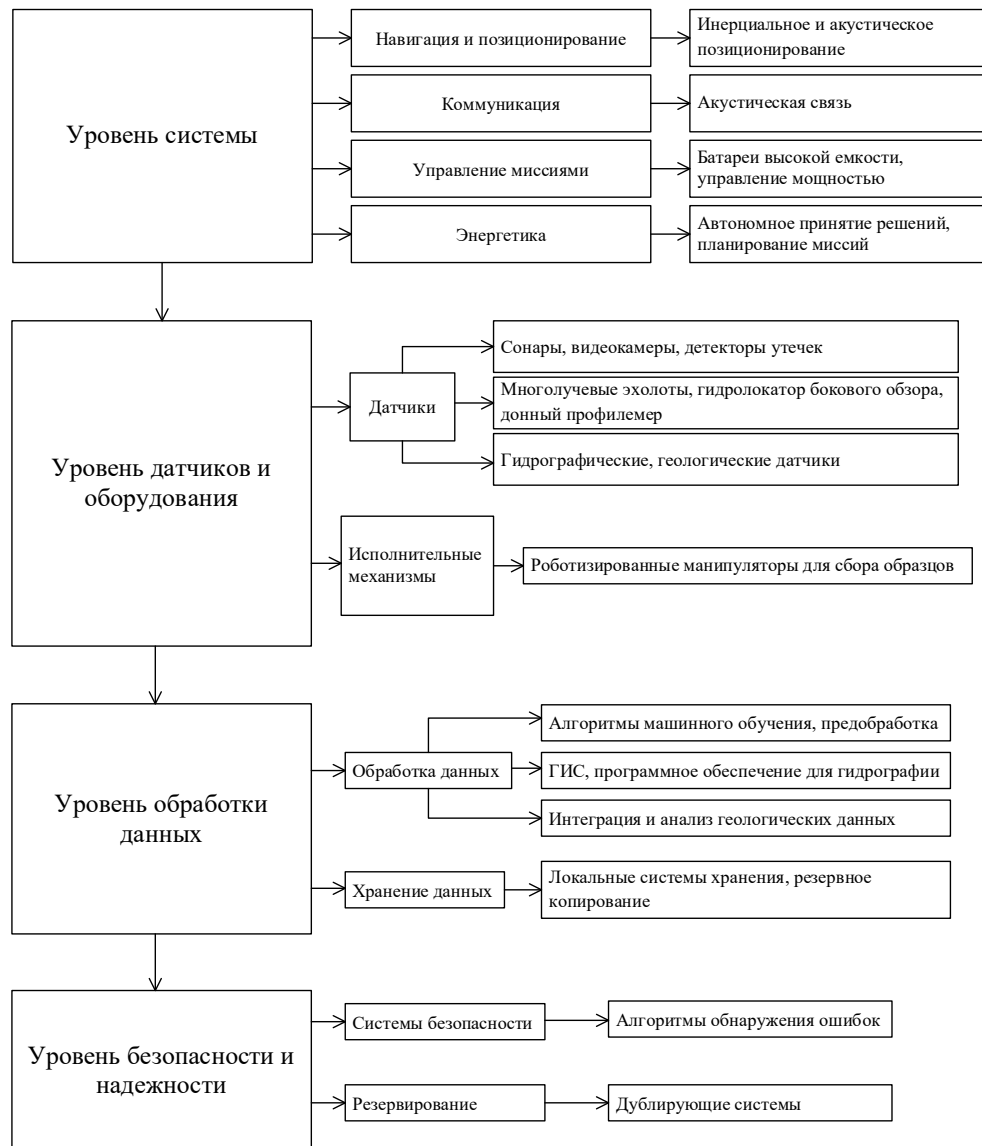


Рисунок 5 – Иерархическая структура свойств ИУС АНПА

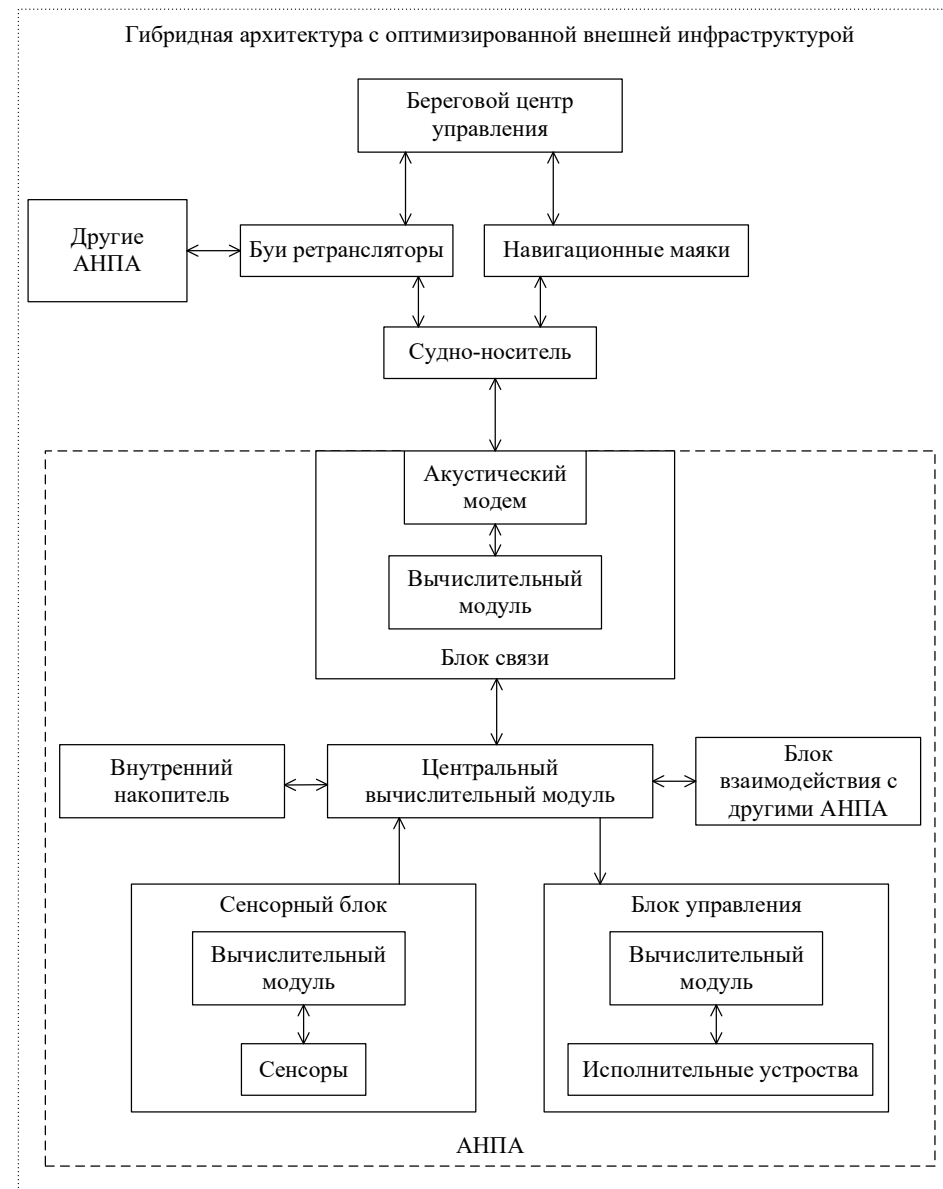


Рисунок 6 – Гибридная архитектура с оптимизированной внешней инфраструктурой

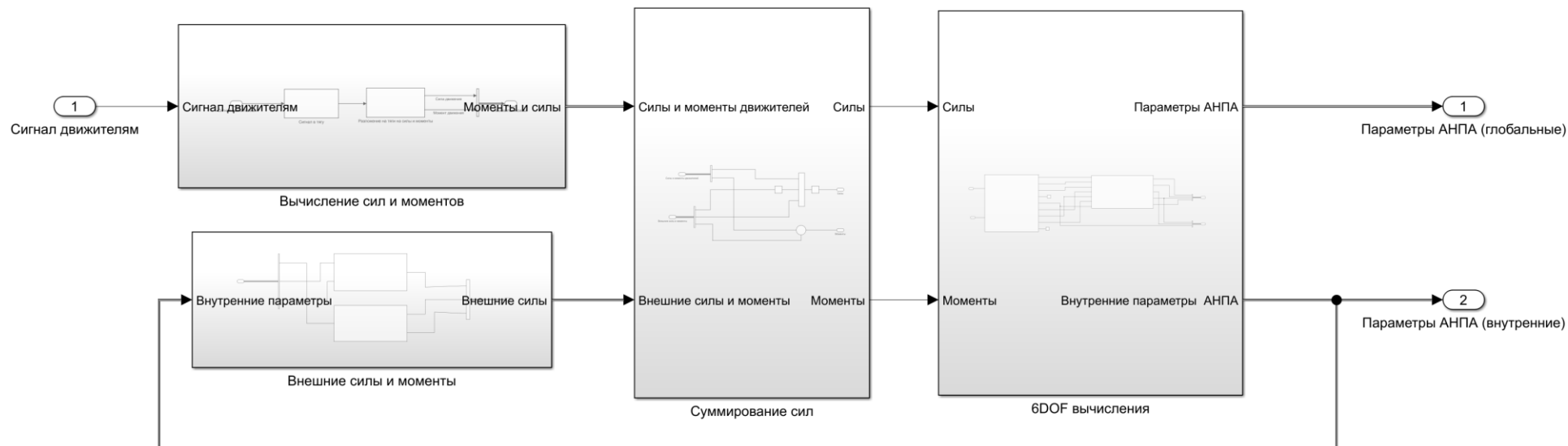


Рисунок 8 – Модель ИУС АНПА в Matlab/Simulink

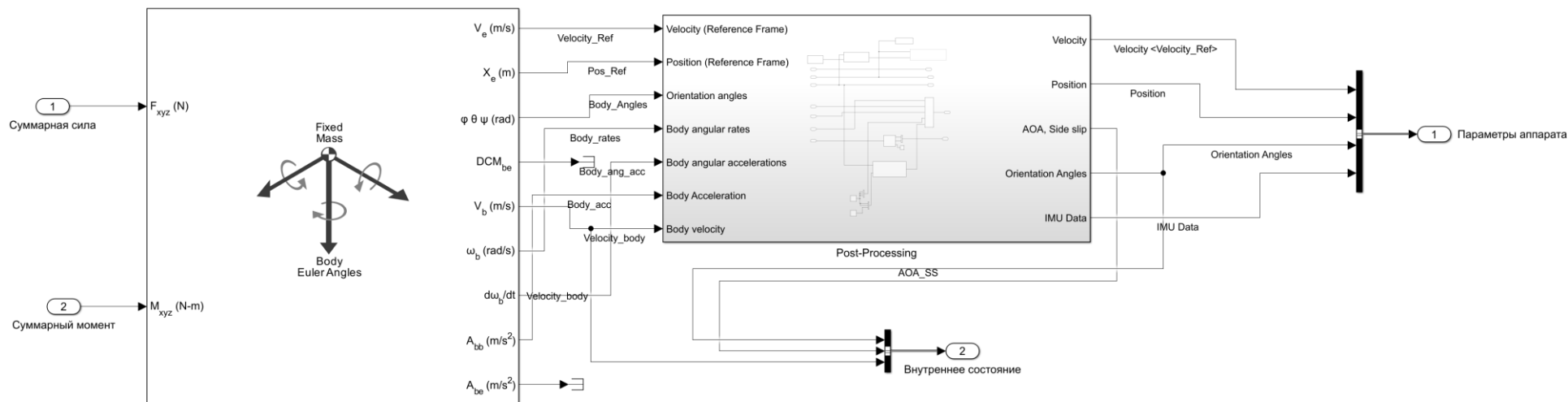


Рисунок 9 – Модель положения АНПА в Matlab/Simulink

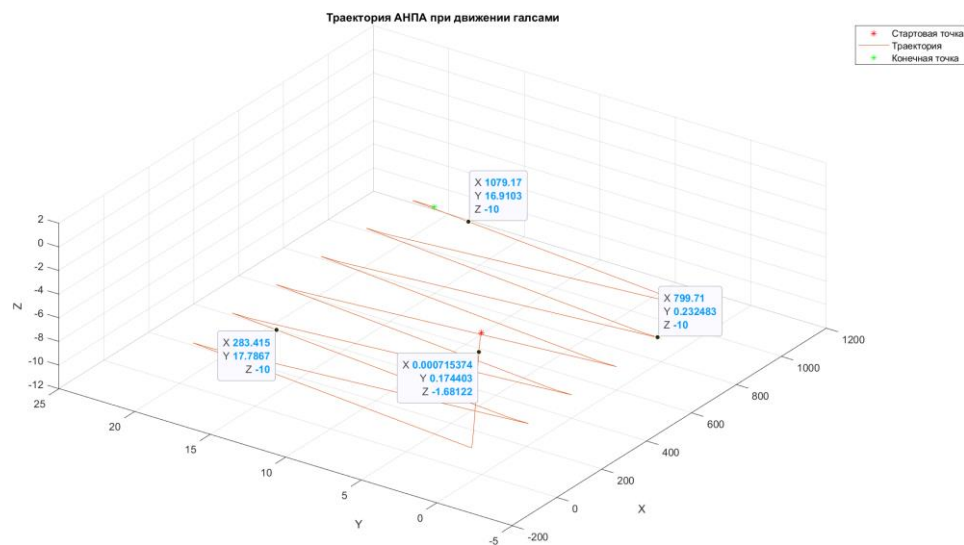


Рисунок 10 – Траектория АНПА при движении галсами

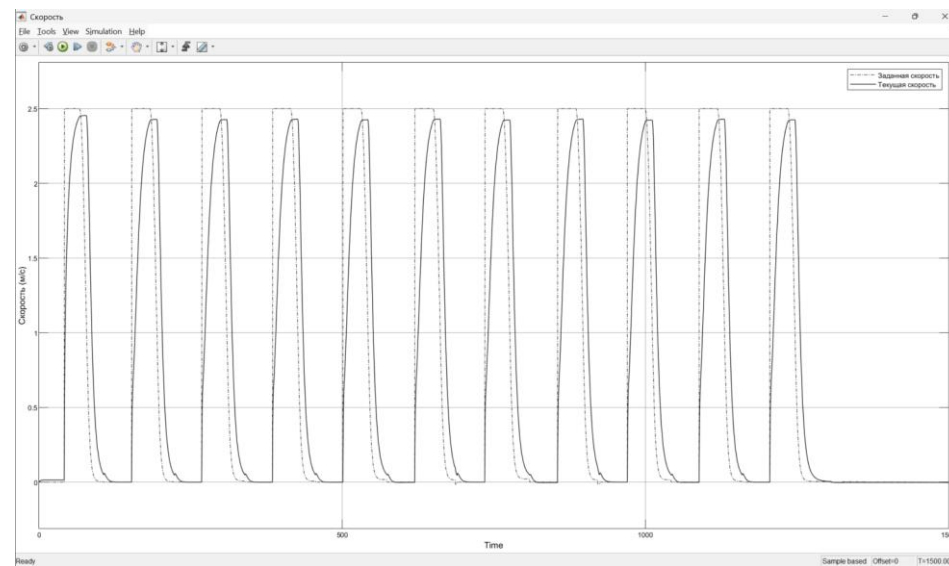


Рисунок 11 – Движение галсами. Переходный процесс по скорости

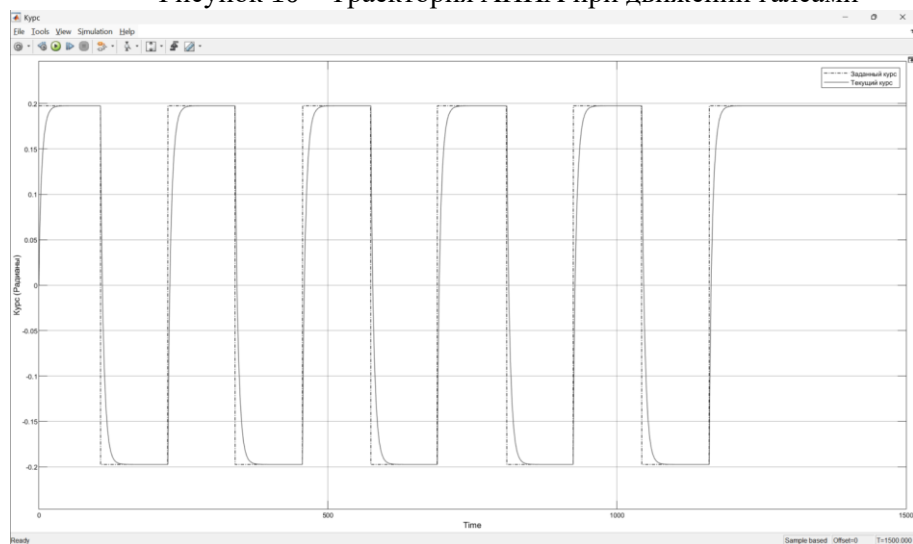


Рисунок 12 – Движение галсами. Переходный процесс по курсу

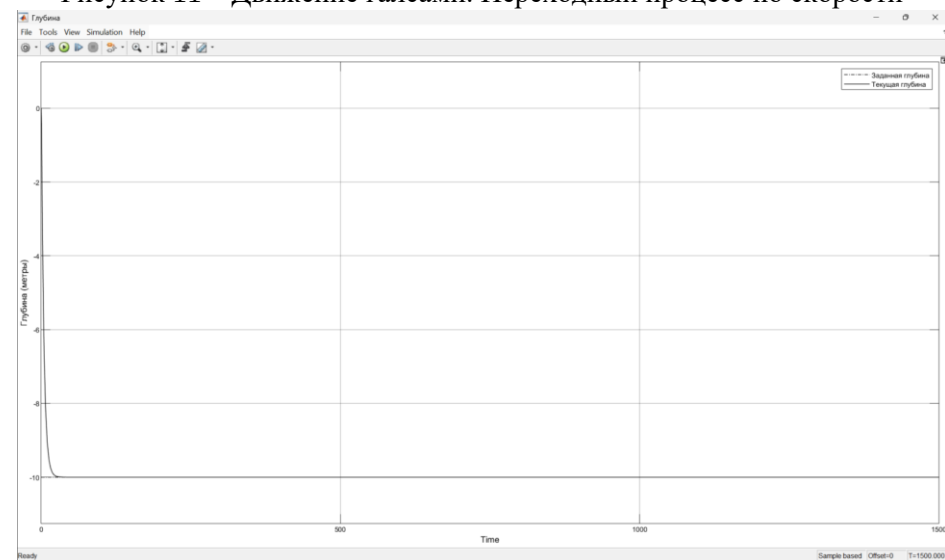


Рисунок 13 – Движение галсами. Переходный процесс по глубине