

УДК 681.51

Модельно-ориентированное проектирование систем управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов

Половко С. А., Попов А. В., Серов Д. К., Щур Н. А.

Постановка задачи: в настоящее время активно развивается область подводной робототехники: повышается степень автономности подводных роботов и расширяется спектр решаемых ими задач. Все это неизбежно ведет как к росту размерности задач проектирования системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), так и к увеличению требуемого объема испытаний, что, в свою очередь, приводит к увеличению общей стоимости проектирования. **Целью работы** является разработка методики проектирования систем управления движением АНПА, позволяющей за счет максимального использования математических экспериментов на различного рода моделях сократить время и стоимость проектирования системы управления АНПА. **Используемые методы:** разработка моделей движения АНПА осуществлялась в соответствии с известными принципами гидродинамики. Задача проектирования системы управления движением АНПА решалась в соответствии с известными принципами теории автоматического управления, а также методами нелинейной стохастической оптимизации. **Новизна:** заключается в использовании набора моделей движения АНПА на различных этапах проектирования системы управления. В частности, в данной работе помимо классических аналитических моделей предлагается использовать кибернетические и гидродинамические модели для решения задачи синтеза и отладки системы управления. **Результат:** использование предложенной методики проектирования системы управления движением АНПА позволило добиться требуемого качества системы управления при решении задачи позиционирования малоинерционного АНПА в условиях наличия априорных неопределенностей и комплексного влияния возмущающих факторов. **Практическая значимость:** представленная методика может быть использована при проектировании системы управления движением крупногабаритных АНПА с целью снижения времени и стоимости проектирования системы управления за счет учета различного рода возмущающих факторов в процессе синтеза системы управления и снижения требуемого количества натурных экспериментов.

Ключевые слова: АНПА, система управления движением, модельно-ориентированное проектирование, кибернетическая модель, возмущающие факторы.

Актуальность

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) активно применяются для решения исследовательских и технологических задач в водной среде [1]. При этом по мере освоения уже имеющихся АНПА возрастает потребность в их совершенствовании: в расширении состава выполняемых функциональных задач, в возрастающей степени сложности таких задач, повышенным требованиям к условиям их выполнения. Такая тенденция неизбежно приводит к усложнению АНПА: возрастает количество

Библиографическая ссылка на статью:

Половко С. А., Попов А. В., Серов Д. К., Щур Н. А. Модельно-ориентированное проектирование систем управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 3. С. 22-48. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-022-048

Reference for citation:

Polovko S. A., Popov A. V., Serov D. K., Tschur N. A. Model-based Motion Control System Design for Autonomous Unmanned Underwater Vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 3, pp. 22-48 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-022-048

навесного оборудования, увеличиваются и усложняются составы измерительного и движительно-рулевого комплексов. Это, в свою очередь, приводит к проблемам разработки систем управления и обработки информации, которая и без того осложняется нестационарным характером водной среды, а также сложностью и дороговизной проведения натуральных испытаний АНПА.

В связи с этим ключевую роль в процессе разработки системы управления АНПА играет цифровое моделирование, позволяющее провести синтез алгоритма управления, проанализировать возможное влияние характеристик подсистем объекта управления на качество функционирования всей системы управления в целом, а также выявить возможные нештатные ситуации и разработать методы их парирования.

Как показывают результаты последних отечественных [2], [3] и зарубежных [4], [5] работ проектирование системы управления АНПА наиболее часто осуществляют на базе аналитических динамических моделей, предложенных Фоссеном [6].

$$M\dot{v} + C_v(v)v + D(v)v + f_g(\Theta) = f_u(n) + f_c(v_c, \Theta) \quad (1)$$

где: $M = M_{RB} + M_A$ – матрица масс и моментов инерции аппарата; M_{RB} – диагональная матрица масс и моментов инерции твердого тела; M_A – матрица присоединенных масс и моментов инерции; v – проекция вектора угловых и линейных скоростей аппарата на оси связанной с аппаратом системы координат; $C_v = C_{RB} + C_A$ – матрица Кориолиса; C_{RB} – матрица Кориолиса для твердого тела; C_A – составляющая матрицы Кориолиса, обусловленная гидродинамикой; D – матрица демпфирования; f_g – проекции вектора гравитационных сил и моментов на оси связанной с аппаратом системы координат; Θ – вектор углов ориентации; f_u – проекция вектора сил тяги и моментов двигателей на оси связанной с аппаратом системы координат; n – вектор частот вращения двигателей; f_c – проекция вектора сил и моментов, вызванных течениями, на оси связанной с аппаратом системы координат; v_c – вектор линейных скоростей течения.

Данные модели предполагают описание динамики аппарата путем добавления в уравнения динамики твердого тела присоединенных масс, а также гидродинамических сил и моментов сопротивления, упрощенно характеризующих влияние жидкости на аппарат. Тем не менее, для составления данных моделей требуется наличие априорных знаний о различных коэффициентах, характеризующих гидродинамические силы и моменты, оказывающие влияние на динамику аппарата, точное определение которых аналитически для АНПА сложной формы трудновыполнимо и для получения которых необходимо провести значительное число идентификационных натуральных испытаний, что может быть ресурсозатратно, особенно для крупногабаритных АНПА.

При этом на данных моделях не учитывается ряд гидродинамических эффектов, возникающих при сложном движении АНПА, например снижение эффективности подруливающих устройств при движении на маршевых движителях [7], характерный для крупногабаритных АНПА торпедообразной формы. Таким образом, аналитические модели, с одной стороны, не обладают доста-

точной точностью для валидации системы управления, а с другой стороны являются сильно нелинейными, что затрудняет синтез системы управления путем аналитического анализа с использованием методов теории автоматического управления [8].

В связи с этим в данной работе предлагается дополнительно ввести кибернетические и гидродинамические модели в процесс синтеза системы управления АНПА с целью повышения ее эффективности и снижения необходимого для отладки системы управления количества натурных испытаний. Также предлагается проанализировать существующие модели движения АНПА с целью создания научно-обоснованной методики проектирования систем управления АНПА, предполагающей использование различных моделей АНПА на определенных этапах проектирования системы управления.

Постановка задачи

Для постановки задачи рассмотрим типовую структурную схему управления движением АНПА, представленную на рис. 1.

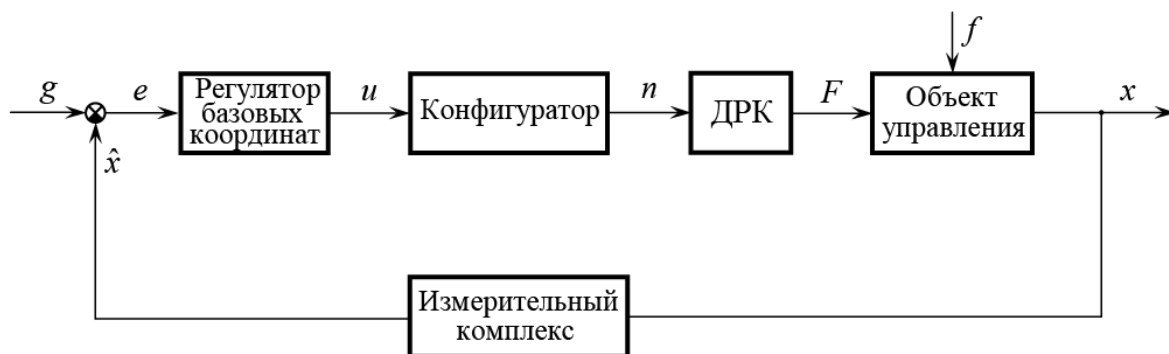


Рис. 1. Структурная схема управления движением АНПА

где: g – заданный вектор значений базовых координат, e – ошибка регулирования, u – вектор управляющих воздействий «виртуальных» движителей, n – вектор управляющих воздействий движителей АНПА, F – сила тяги, развиваемая движительно-рулевым комплексом (ДРК), f – возмущающее воздействие, x – вектор состояния ОУ, \hat{x} – наблюдаемое значение вектора состояния.

В соответствии с представленной схемой синтез системы управления АНПА сводится к решению двух независимых задач:

- синтез законов управления координатами АНПА, определяющими его местоположение и ориентацию в пространстве;
- синтез конфигуратора, решающего задачу распределения управляющих сигналов по отдельным составляющим ДРК.

При решении первой задачи формируются законы управления по трем линейным и трем угловым координатам, однозначно определяющих положение АНПА в пространстве. В дальнейшем эти координаты будем называть базовыми. В результате решения данной задачи формируется закон управления для

некоего «виртуального» движителя, осуществляющего управление только по своей базовой координате.

Однако на практике каждый из компонентов ДРК как малогабаритных, так и крупногабаритных АНПА оказывает влияние сразу на несколько базовых координат. В связи с этим необходимо в процессе проектирования системы управления также выполнить синтез закона распределения управляющих воздействий по компонентам ДРК, который может быть представлен в общем виде следующим образом

$$n = B^* \cdot u \quad (2)$$

где: B^* – матрица конфигурации движителей.

Задача определения матрицы конфигурации, АНПА является темой отдельных исследований. В частности, матрица конфигурации может определяться на основании состава и геометрического расположения ДРК с использованием оптимизации методами квадратичного программирования [9], а также аналитических методов, таких как метод псевдообращения [10], метод последовательного распределения управляющих воздействий [11] и метод перераспределения управляющих воздействий [12].

Каждый из приведенных методов имеет свои ограничения по быстродействию и возможности учета аппаратных ограничений управляющего воздействия, таких как, например, зона нечувствительности и максимальная частота вращения движителей. В связи с чем для АНПА, в особенности реконфигурируемых, синтез конфигуратора является критически важным этапом проектирования системы управления.

Таким образом, задача синтеза системы управления может быть декомпозирована в следующем виде:

- разработка математических моделей для отладки системы управления АНПА;
- синтез регуляторов базовых координат, предполагающих парирование возможных внешних возмущающих воздействий, на математических моделях движения АНПА;
- синтез конфигуратора на основании имеющихся данных о геометрических параметрах АНПА и составе ДРК с последующей отладкой на математических моделях движения АНПА;
- исследование эффективности работы системы управления на математических моделях АНПА с учетом возможных ограничений бортового оборудования и измерительного комплекса.

Предложенная методика проектирования системы управления АНПА

Как уже было отмечено ранее, помимо классических аналитических динамических моделей (1) нами предлагается также ввести в процесс проектирования системы управления АНПА гидродинамические и кибернетические модели.

Под гидродинамическими моделями будем понимать модели, основанные на методах вычислительной гидродинамики, в которых моделирование осу-

ществляется путем совместного решения уравнений Навье-Стокса [13] и уравнений динамики твердого тела. Наиболее часто данные модели при проектировании динамики АНПА находят применение для решения задач оптимизации его формы [14] или определения гидродинамических параметров для аналитической модели [15], однако с использованием алгоритмов деформации сетки на данных моделях возможно также осуществлять управляемое движение АНПА [16]. Данные модели, как правило, обладают высокой точностью моделирования, однако крайне низким быстродействием, в связи с чем могут быть использованы для отладки системы управления только на заключительных этапах ее проектирования.

Под кибернетическими моделями будем понимать упрощенные одноконтурные модели с линеаризованной динамикой объекта управления, описанные с использованием типовых блоков ТАУ [17]. Как правило, отдельная кибернетическая модель создается для каждого контура управления или режима движения и может служить для определения параметров регуляторов с использованием методов оптимизации или методов аналитического синтеза регуляторов классической ТАУ [8]. Данные модели обладают крайне высоким быстродействием и их можно считать достаточно точными в окрестностях точки линеаризации при совершении типовых движений, например поворота или перемещения по одной из базовых координат, однако их точность значительно снижается при выполнении более сложных движений, предполагающих одновременное использование нескольких контуров управления.

Таким образом, представленные модели обладают своими достоинствами и недостатками, в связи с чем нами предлагается использовать описанные выше модели на различных этапах проектирования АНПА с целью формирования методики проектирования систем управления АНПА, схема которой представлена на рис. 2.

В соответствии с предложенной методикой первом этапе проектирования системы управления по известным параметрам АНПА, таким как состав движительно-рулевого комплекса, геометрия аппарата, а также его массогабаритные характеристики, в специализированной среде моделирования (например, «Логос») разрабатывается гидродинамическая модель динамики АНПА. Суть этого этапа заключается в построении расчетных гидродинамических сеток, задании граничных условий, а также задании в модели динамики твердого тела и алгоритмов деформации сеток для моделирования движения АНПА.

На следующем этапе проводится ряд натуральных испытаний и экспериментов на гидродинамической модели, по результатам которых осуществляется верификация и, при необходимости, доработка гидродинамической модели. Точность модели в данном случае может оцениваться, например, как интеграл модуля невязки между аналогичными натурными экспериментами и экспериментами на модели

$$I(t) = \int_0^t |e(t)| dt \quad (3)$$

где: $I(t)$ – интегральный критерий точности; $e(t)$ – невязка между моделями; t – время, с.

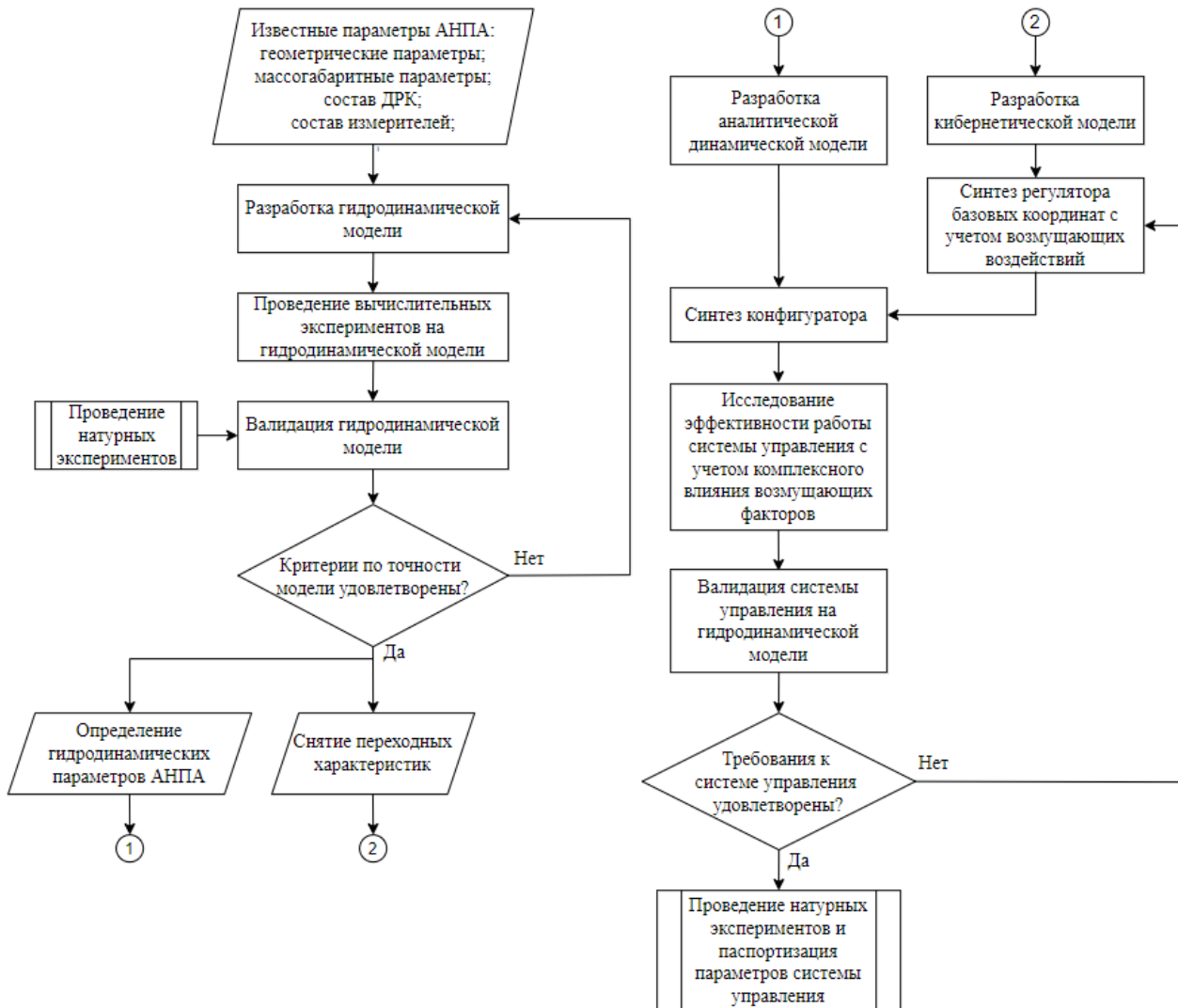


Рис. 2. Схема предложенной методики проектирования системы управления АНПА

Разработанная модель позволяет достаточно точно моделировать динамику движения подводного аппарата, однако обладает высокой вычислительной сложностью. Расчеты могут занимать в сотни раз больше времени, чем проведение аналогичных натуральных экспериментов, в связи с чем решение задачи оптимизации алгоритмов управления на данных моделях не представляется возможным, вследствие чего при синтезе алгоритма управления целесообразно переходить на упрощенные модели, обладающие большим быстродействием. По этой причине на гидродинамической модели проводится ряд идентификационных испытаний, позволяющих оценить динамику движения аппарата и построить переходные процессы, описывающие перемещение по каждой из базовых координат, определить диагональные коэффициенты матриц демпфирования, а

также коэффициенты присоединенных масс и построить соответствующие кибернетическую и аналитическую динамическую модели.

Синтез регуляторов базовых координат целесообразно проводить на кибернетических моделях, обладающих наибольшим быстродействием. Для этого необходимо определить переходные характеристики для разных режимов движения АНПА, для которых требуется разработка системы управления. Далее полученная переходная характеристика аппроксимируется одной из типовых передаточных функций, описывающей динамику объекта управления, с дальнейшим добавлением в модель возмущающих факторов, таких как течения, погрешности определения базовых координат, задержки управления и измерительного комплекса и т. д.

Структурная схема кибернетической модели в общем виде представлена на рис. 3.

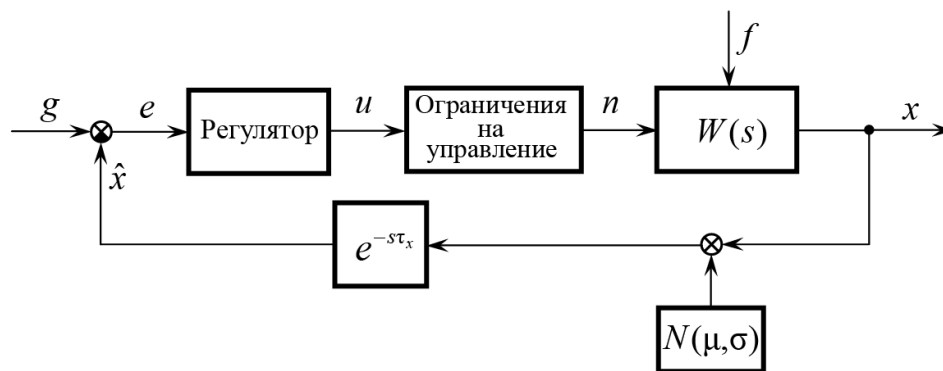


Рис. 3. Структурная схема кибернетической модели

где: g – заданное значение базовой координаты; e – ошибка регулирования базовой координаты; u – управляющее воздействие, выдаваемое регулятором; n – фактическое управляющее воздействие; f – возмущающее воздействие; $W(s)$ – передаточная функция, характеризующая динамику объекта управления; x – вектор состояния объекта управления; $N(\mu, \sigma)$ – нормально распределенное шумовое воздействие с математическим ожиданием μ и среднеквадратичным отклонением σ ; τ_x – временная задержка наблюдения вектора состояния; \hat{x} – наблюдаемое значение вектора состояния.

Несмотря на то, что данные модели достаточно точно отражают динамику объекта управления в окрестности точки линеаризации, они не позволяют в полной мере учесть взаимное влияние контуров управления друг на друга, в связи с чем плохо подходят для моделирования комплексных движений. Однако в процессе синтеза алгоритма управления неучтенная динамика объекта управления может быть представлена в виде нестационарного возмущающего воздействия, которое может быть компенсировано за счет использования адаптивного регулятора.

По этой причине синтез регулятора базовых координат целесообразно проводить на кибернетических моделях с использованием методов оптимизации по выбранному критерию, зависящему от поставленной задачи. Как прави-

ло, для этого используют интегральные критерии точности и энергоэффективности с ограничением на возможное перерегулирование и колебательность.

Далее решается задача распределения управляющих воздействий регуляторов базовых координат по компонентам ДРК таким образом, чтобы сохранить независимость контуров управления друг относительно друга. Это может быть обеспечено путем аналитического определения конфигурационной матрицы и ее масштабирования, исключающего превышения существующих физических ограничений на управление, с последующей проверкой управляемости полученных регуляторов, например методами псевдообращения или последовательного распределения управляющих воздействий [18].

Аналитическая динамическая модель (1) может быть далее использована для проверки эффективности совместной работы регулятора базовых координат и конфигуратора, а также моделирования ситуаций, проверку которых невозможно выполнить на одномерных кибернетических моделях. В частности, на данных моделях может исследоваться эффективность совместной работы контуров управления при наличии комплексного влияния возмущающих факторов. Таким образом, могут быть выявлены критические значения возмущающих факторов, составлены требования, предъявляемые системой управления к измерительному комплексу и бортовому вычислителю, а также доказана робастность регулятора при различных значениях аппаратных ограничений.

После обеспечения робастности синтезированных алгоритмов управления базовыми координатами и алгоритмов, обеспечивающих распределения управляющих воздействий по компонентам ДРК, проводится интеграция системы управления АНПА, разработанной с помощью одномерных кибернетических моделей, с гидродинамической моделью динамики аппарата с проведением дальнейших математических экспериментов для проверки качества синтезированной системы управления. Тем самым обеспечивается «вложенность» моделей: параметры кибернетических моделей определяются на основании экспериментов, полученных на гидродинамической модели, а гидродинамическая модель в дальнейшем интегрируется с кибернетическими моделями с целью проведения «чистой» оценки эффективности разработанного алгоритма управления перед проведением натурных испытаний и паспортизации параметров системы управления.

Таким образом, предложенная методика позволяет выполнять синтез алгоритмов управления АНПА в кратчайшие сроки с учетом ограничений, накладываемых на управление, и различного рода возмущающих воздействий за счет совместного использования различных моделей динамики АНПА на разных этапах проектирования системы управления.

Пример применения методики

В качестве примера применения предложенной методики рассмотрим синтез системы управления малогабаритного необитаемого подводного аппарата, выполняющего операцию позиционирования. Внешний вид макета необитаемого подводного аппарата представлен на рис. 4.



Рис. 4. Макет АНПА

ДРК данного аппарата состоит из восьми винтовых движителей, четыре из которых ориентированы вертикально, а другие четыре – горизонтально. Таким образом, данный аппарат является гиперизбыточным, в связи с чем в процессе проектирования системы управления необходимо как провести синтез базовых регуляторов, так и конфигуратора. Схема геометрического расположения движителей аппарата в разных проекциях представлена на рис. 5.

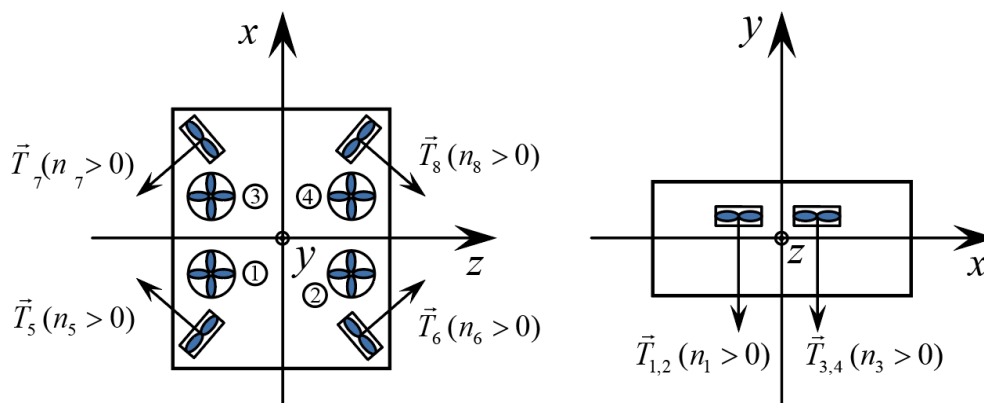


Рис. 5. Схема расположения движителей аппарата. Обозначение на рисунке: \vec{T}_i – направление вектора тяги движителя при положительном значении управляющих воздействий

Для описания процесса построения различных моделей для данного АНПА введем базовую систему координат (БСК) и связанную с аппаратом систему координат (ССК), представленные на рис.6.

Центр связанной системы координат жестко связан с центром масс аппарата. Уравнения динамики твердого тела при составлении гидродинамической и кибернетической модели записываются в связанной системе координат, так как на данную систему координат проецируются гидродинамические силы и силы тяги движителей аппарата.

Базовая система координат является неподвижной. Предполагается, что текущие значения базовых координат аппарата определяются в базовой системе координат. Перевод векторов из базовой системы координат в связанную, и наоборот, осуществляется с использованием соответствующих матриц поворота

в соответствии с выбранной последовательностью поворотов углов Эйлера при переходе от базовой системы координат в связанную [6].

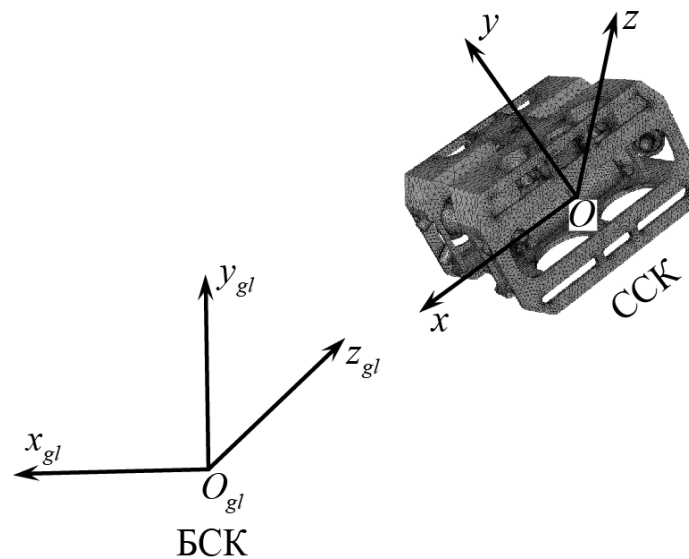


Рис. 6. Системы координат АНПА

В соответствии с предложенной методикой на первом этапе проектирования системы управления была разработана гидродинамическая модель движения необитаемого подводного аппарата. Для этого использовалась модель геометрии аппарата, максимально приближенная к реальной геометрии, включающая в себя раму, блоки плавучести, три цилиндрических контейнера с полезной нагрузкой, закрепленных внутри рамы, а также восемь винтовых движителей Т200 с обтекателями. Массогабаритные параметры, определенные на основании имеющегося макета АНПА, представлены в таблице 1. Метацентрическая высота 0,014 м была определена в результате серии натурных экспериментов с грузами, подвешенными на аппарат, находящийся в воде.

Таблица 1 – Массогабаритные параметры АНПА

Параметр АНПА	Значение параметра
Масса	43 кг
Ширина	0,51 м
Высота	0,405 м
Длина	0,65 м
Метацентрическая высота	0,014 м

Для проведения гидродинамических расчетов вокруг модельной геометрии аппарата была построена расчетная сетка, состоящая из 1 млн. ячеек. Размер первой пристенной ячейки составляет 1 мм, далее ее размерность возрастает по мере удаления от аппарата. Данная сетка стыкуется с внешней сеткой, на границе которой задано условие постоянного давления. Граница внешней сетки удалена от аппарата на 2000 м, что позволяет вести расчет для траекторий движения сопоставимой длины. Модель геометрии АНПА, используемая при мо-

делировании, а также пример изображения расчетной сетки вокруг АНПА, приведены на рис. 7.

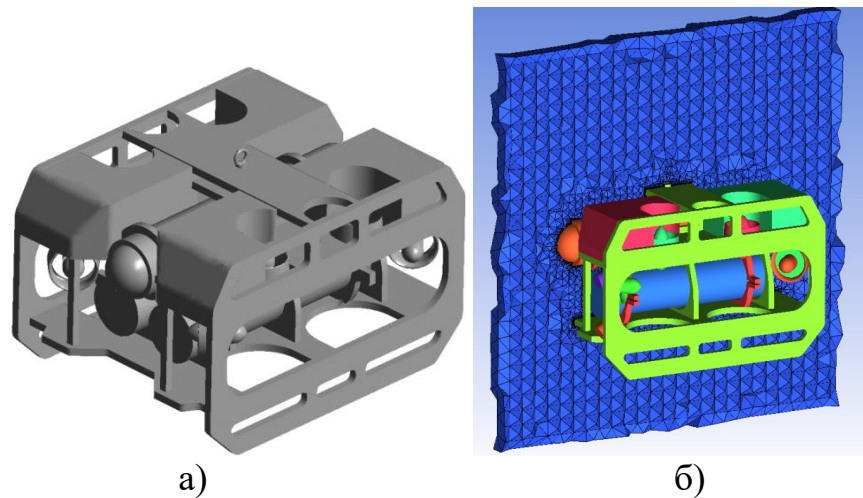


Рис. 7. Модель геометрии АНПА (а) и сечение расчетной сетки вокруг АНПА (б), используемые в гидродинамической модели

Расчет гидродинамических сил, возникающих в результате вращения движителей, осуществлялся в соответствии с формулой [19]

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (4)$$

где: T – упор гребного винта; K_T – коэффициент упора гребного винта; ρ – плотность воды; n – частота вращения гребного винта; D – диаметр гребного винта.

Определение коэффициента упора гребного винта осуществлялось в соответствии с кривой действия, представленной на рис. 8.

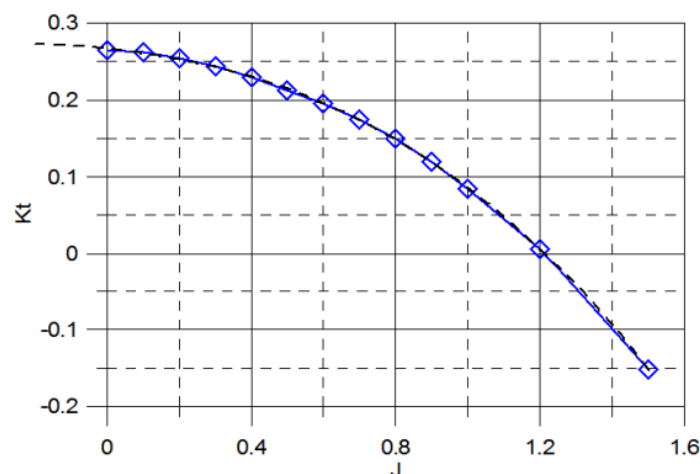


Рис. 8. Кривая действия винта Т200

Для получения указанной кривой действия была проведена обширная серия гидродинамических расчетов, в которых при постоянной скорости вращения винта менялась скорость потока, натекающего на двигательную колонку. В результате аппроксимации расчетных данных была получена следующая зависимость коэффициента гребного упора от поступи гребного винта

В расчётах детально воспроизводилась геометрия винтов T200 компании BlueRobotics (рис. 9), установленных на ТНПА. Сетка на поверхности лопасти винта даёт представление о качестве разрешения полей течения. Для расчёта пограничного слоя на лопастях, вблизи лопасти генерировались сеточные пограничные слои, состоящие из гексагональных ячеек, с безразмерным расстоянием до стенки $Y^+ < 1$, что позволяет вести расчёт без использования пристенных функций. Расчёты проводились стационарной постановке в секторе, содержащем одну лопасть винта с использованием периодического граничного условий на границах сектора. Размерность сетки для сектора составила 348 тыс. ячеек. Для учёта вращения винта решались уравнения во вращающейся системе координат.

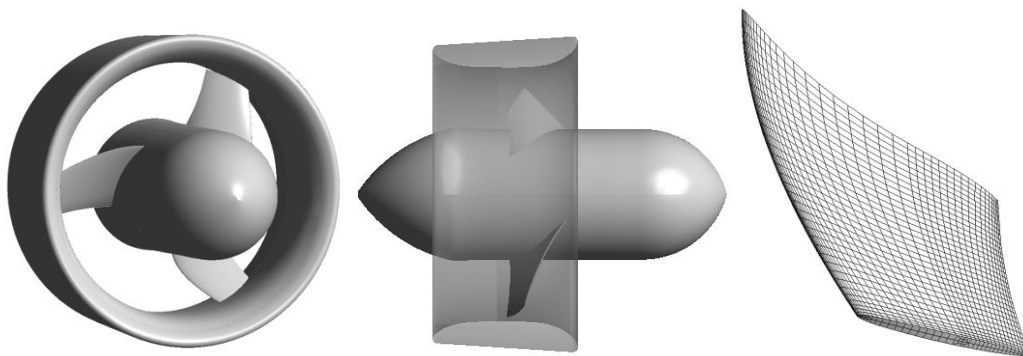


Рис. 9. Модель геометрии для двигательной колонки винта T200

На рис. 10 показано поле вертикальной скорости, демонстрирующее струю, формируемую винтом. Частота оборотов винта 3900 об/мин – это максимальная частота, заявленная производителем.

На рис. 11. показано поле давления на стороне разрежения и стороне давления лопастей, полученное в гидродинамическом расчете. Можно отметить, что основной вклад в упор винта вносит передняя кромка лопастей, на которой наблюдается самый значительный перепад давлений.

Полученные безразмерные кривые (2.1 и 2.2) для упора винта T200 в дальнейшем используются для получения уже размерных значений упора при любых скоростях аппарата и частотах вращения винта. Важно отметить, что для случая стоячей воды, упор, полученный в расчете, практически совпал с данными по упору, предоставленными самим производителем винта T200.

$$\begin{cases} K_T = 0,267 - 0,049J + 0,090J^2 - 0,042J^3, J \in (0;2) \\ K_T = -0,039J^2, J \in [2;\infty) \end{cases} \quad (5)$$

где: $J = v_B / (nD)$ – поступь гребного винта; v_B – скорость набегающего потока на винт.

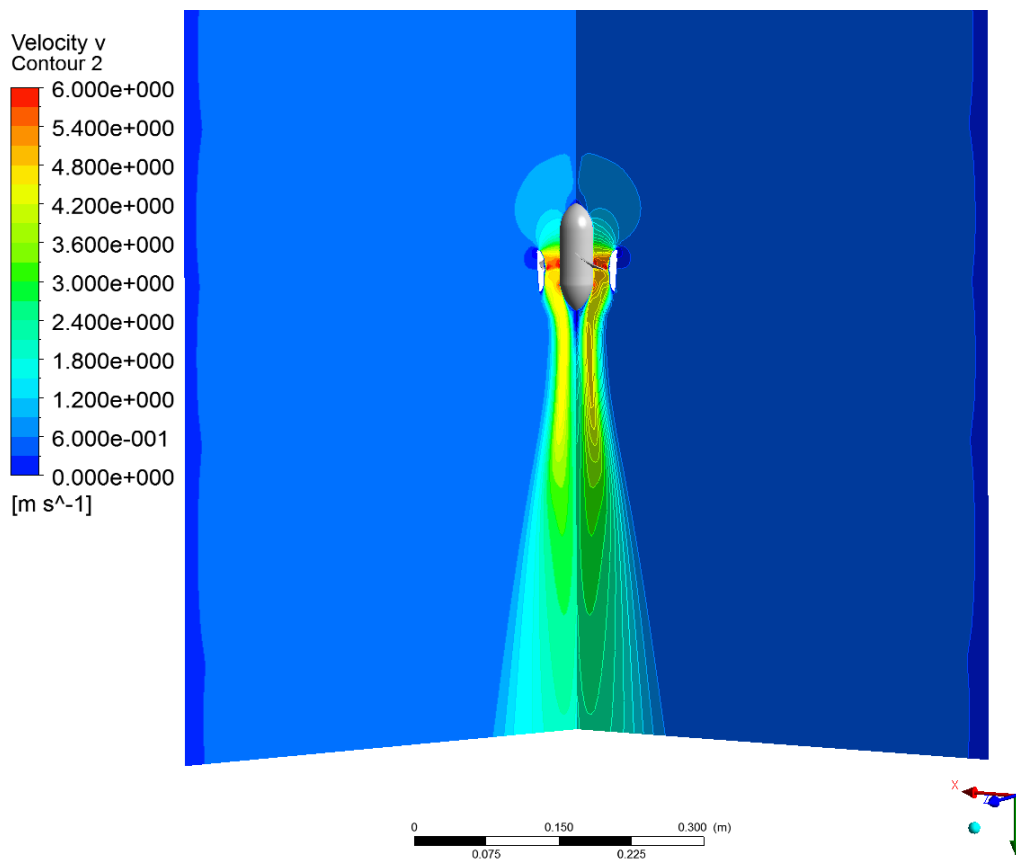


Рис.10. Поле вертикальной скорости в вертикальной плоскости

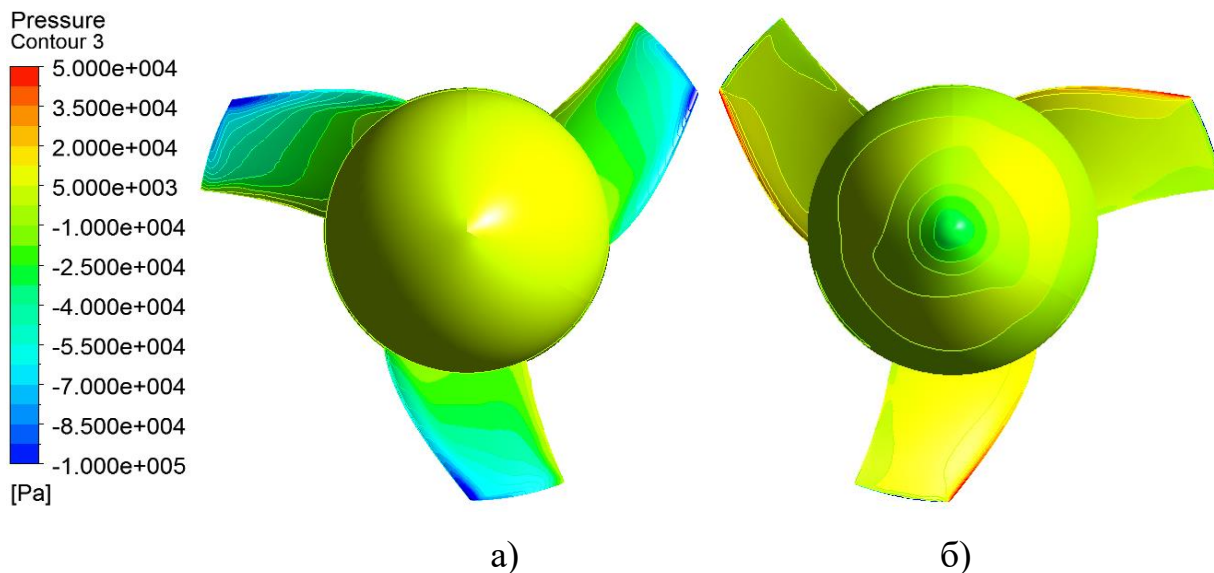


Рис. 11. Поле давления на лопастях винта и корпусе движителя на стороне разрежения (а) и на стороне давления (б)

При моделировании гидродинамики подводного аппарата в сопряженной постановке помимо моделирования тяги движителей важно также учитывать силы, воздействующие на корпус аппарата при наличии струи от движителя. Для этого канал внутри обтекателя разбивается примерно посередине на 2 части и ставится пара граничных условий, позволяющих задавать расход

внутри обтекателя. Считается, что расход пропорционален частоте оборота винта двигателя: $Q_{ПВ} = k_v \cdot n$, где коэффициент k_v определяется в дополнительных расчетах с работающим винтом в канале обтекателя.

На рис. 12 (а) показано поле вертикальной скорости в плоскости $Z=0,15$, полученное в сопряженном гидродинамическом расчете для всплывающего аппарата. Можно отметить наличие вертикальных струй, направленных вниз со значительными отрицательными скоростями. Их наличие обусловлено работой четырёх вертикально расположенных двигателей. Поле модуля скорости в горизонтальной плоскости (рис. 12(б)) также демонстрирует наличие пары струй от работающих двигателей. Данное поле получено в сопряженном гидродинамическом расчете для аппарата, раскручивающегося вокруг вертикальной оси за счёт работы двух горизонтально ориентированных двигателей.

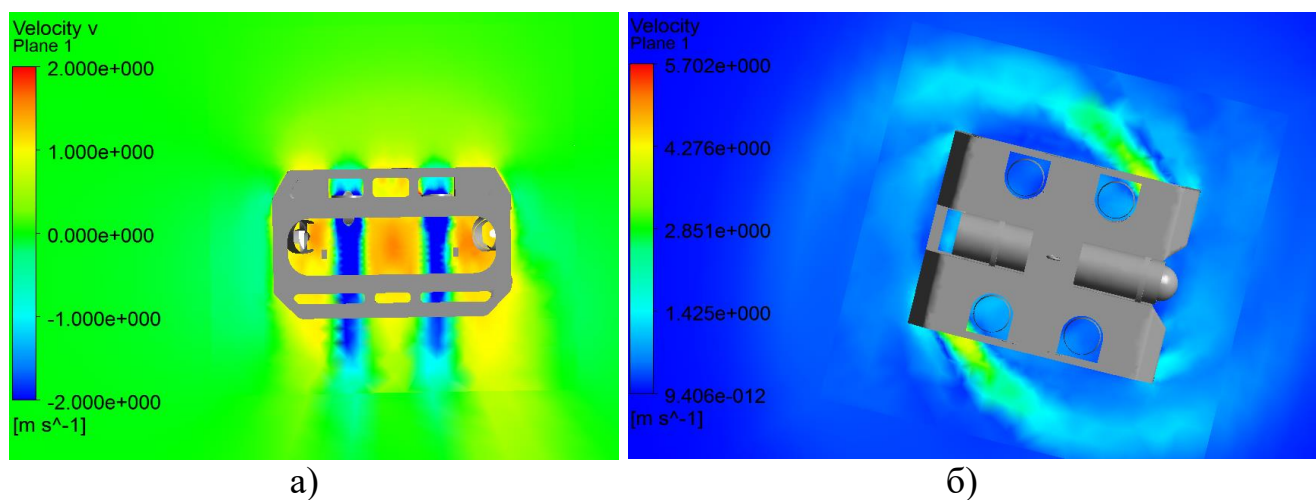


Рис. 12. Поле вертикальной скорости в плоскости $Z=0,15$ (а) и поле модуля скорости в горизонтальной плоскости (б)

Течение внутри обтекателя формирует силу, действующую на сам обтекатель, которая учитывается в кривой действия (5). При моделировании струи в расчёте отпадает необходимость учитывать в модели силу на обтекатель, так как она автоматически появляется из решения уравнений гидродинамики. Для этого случая используется модифицированная кривая действия, построенная по данным о тяге только на винте без обтекателя.

$$\begin{cases} K_T = 0,254 - 0,381J + 0,072J^2 - 0,129J^3, J \in (0;2) \\ K_T = -0,039J^2, J \in [2;\infty) \end{cases} \quad (6)$$

Полученная модель была верифицирована на основании натуральных экспериментов и в дальнейшем использована для определения параметров кибернетической и аналитической динамической моделей.

Для получения кибернетических моделей были сняты переходные процессы для каждого из контуров управления, на основании которых путем линейной аппроксимации были получены передаточные функции для каждого из контуров управления.

В частности, для линейных скоростей, а также угловой скорости поворота вдоль оси ОУ были получены передаточные функции вида инерционного звена первого порядка

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} \quad (7)$$

где: k – коэффициент усиления; s – оператор дифференцирования; T – постоянная времени.

Динамика аппарата при повороте по дифференту и крену, в свою очередь, была аппроксимирована передаточными функциями вида инерционного звена второго порядка

$$W(s) = \frac{k}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (8)$$

где: ξ – коэффициент затухания.

Пример параметров кибернетической модели, полученных в результате идентификационных экспериментов, представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры кибернетической модели

Базовая координата	Передаточная функция	Параметры передаточной функции
Координата, характеризующая движение в продольном направлении, X	$\frac{k}{(Ts + 1)s}$	$k = 0,0030; T = 2,83$
Координата, характеризующая движение в вертикальном направлении, Y	$\frac{k}{(Ts + 1)s}$	$k = 0,0021; T = 3,61$
Координата, характеризующая движение в поперечном направлении, Z	$\frac{k}{(Ts + 1)s}$	$k = 0,0017; T = 1,88$
Угол курса, φ	$\frac{k}{(Ts + 1)s}$	$k = 0,0072; T = 0,73$
Угол крена, θ	$\frac{k}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1}$	$k = 0,0029; T = 0,73;$ $\xi = 0,31$
Угол дифферента, ψ	$\frac{k}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1}$	$k = 0,0033; T = 0,90;$ $\xi = 0,14$

Также гидродинамическая модель была использована для определения ряда гидродинамических параметров, вводимых в аналитическую модель, в частности диагональных элементов матрицы присоединенных масс и матрицы демпфирования.

$$M_A = \begin{bmatrix} 48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 132 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$$

$$D(v) = \begin{bmatrix} -0,71|v_x| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,99|v_y| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,98|v_z| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5,4|\omega_x| - 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -7,7|\omega_y| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5,8|\omega_z| - 0,5 \end{bmatrix}$$

где: v_x, v_y, v_z – проекция вектора линейных скоростей аппарата на оси ССК;
 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекция вектора угловых скоростей аппарата на оси ССК.

Далее на кибернетических моделях был проведен синтез оптимальных алгоритмов управления с учетом возмущающих факторов, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Возмущающие факторы, учтенные в кибернетической модели

Возмущающий фактор	Значение возмущающего фактора
Дискретность управления, Δt	0,1 с
Задержка наблюдения, τ_x	0,3 с
Погрешность определения базовой координаты, σ	0,03 м
Погрешность определения производной базовой координаты, σ_v	0,05 м/с
Зона нечувствительности управляющего воздействия, $ u_{\min} $	340 об/мин
Максимально допустимое значение управляющего воздействия, $ u_{\max} $	2500 об/мин

Предполагалось, что система управления должна обеспечивать переход аппарата в заданную точку без перерегулирования и колебательности за кратчайшее время. Далее система управления должна гарантировать удержание аппарата в заданной точке с точностью не менее 0,1 м, в том числе под возможным воздействием сил течений или остаточной плавучести.

В связи с этим при синтезе регуляторов линейных координат в модель также было добавлено внешнее возмущающее воздействие f , характеризующее возможное влияние сил течений или остаточной плавучести на динамику аппарата. Для их учета представленная передаточная функция для линейных координат кибернетической модели (5) была преобразована к уравнению динамики вида:

$$\ddot{x} = \frac{ku - \dot{x} + f}{T} \quad (9)$$

где: x – значение линейной базовой координаты; u – возмущающее воздействие; f – возмущающее воздействие; k, T – параметры передаточной функции.

В качестве базовых регуляторов для угловых координат были выбраны классические ПД-регуляторы. Для управления линейными координатами, в свою очередь, в связи с возможным наличием внешних возмущающих воздействий был выбран двухконтурный регулятор скорости [20], структурная схема которого приведена на рис. 13.

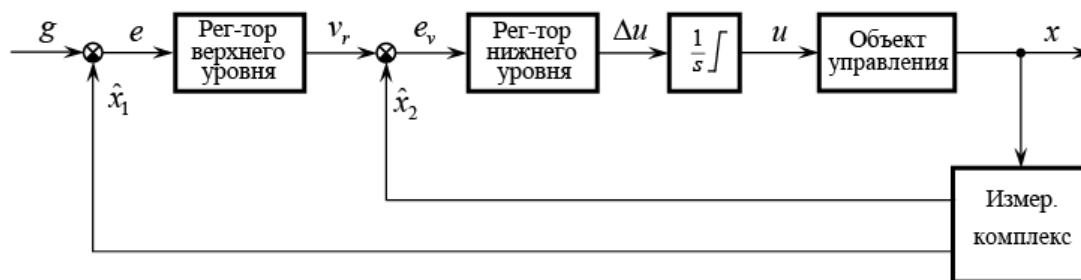


Рис. 13. Двухуровневый регулятор скорости для управления линейными координатами. Обозначения на рисунке: g – заданное значение координаты; e – ошибка регулирования; v_r – заданное значение скорости; e_v – ошибка регулирования скорости; Δu – определенное изменение управляющего воздействия; u – управляющее воздействие регулятора; x – вектор состояния объекта управления; \hat{x}_1 – наблюдаемое значение координаты; \hat{x}_2 – наблюдаемое значение скорости

В представленной схеме регулятор верхнего уровня представляет собой кусочно-линейную аппроксимацию желаемой зависимости между заданной скоростью и координатой аппарата, в то время как регулятор нижнего уровня за счет наличия интегральной составляющей обеспечивает адаптацию к возможным возмущающим воздействиям. В связи с интегральным управлением по скорости и отсутствием дополнительных блоков адаптации для компенсации внешних возмущающих воздействий, для данного регулятора не характерно ни перерегулирование, свойственное ПИД-регулятору, ни ухудшение качества управления при наличии значительных задержек и погрешностей измерений, свойственное, например, более классическим адаптивным ISMC или ADRC-регуляторам.

Решение задачи оптимизации параметров базовых регуляторов линейных координат для гарантии робастности системы управления осуществлялось при различных значениях внешнего возмущающего воздействия в диапазоне $f \in [-0,5; 0,5]$ м/с, в связи с чем задача оптимизации была задана в виде

$$K = \arg \min_K I_{\Sigma}(K, t) \quad (10)$$

где: K – вектор параметров оптимизации; I_{Σ} – результирующий функционал оптимизации; t – время моделирования.

Функционал оптимизации был задан в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\Sigma}(K, t) = \sum_0^n I_i(K, t), \\ I_i(K, t) = \int_0^t (|x_i(K, t) - g| \cdot m) dt \text{ при } \text{sign}(g - x(0)) \cdot (x_i(t, K) - g) \leq h_{\max} \\ I_i(K, t) = \int_0^t (|x_i(K, t) - g| + w \cdot |\ddot{x}_i(t, K)|) dt \text{ при } |x_i(t, K) - g| \leq h_{\text{start}} \\ I_i(K, t) = \int_0^t |x_i(t, K) - g| dt \text{ при } (\text{sign}(g - x(0)) \cdot (x_i(t, K) - g) > h_{\max}) \wedge \\ \wedge (|x_i(t, K) - g| > h_{\text{start}}) \end{array} \right. \quad (11)$$

где: $I_i(t)$ – критерий точности переходного процесса при f_i возмущающем воздействии; $x(t)$ – значение базовой координаты АНПА; g – заданное значение базовой координаты; h_{\max} – максимально допустимое отклонение относительно заданного положения; $m \geq 1$ – весовой коэффициент, характеризующий штраф за перерегулирование; h_{start} – расстояние относительно заданного положения, на котором необходимо обеспечить плавность переходного процесса; $w \geq 0$ – весовой коэффициент, характеризующий плавность завершения переходного процесса; $I_i(t)$ – интегральный критерий точности, соответствующий возмущающему воздействию f_i ; $I_{\Sigma}(t)$ – результирующий функционал оптимизации.

Таким образом, моделирование на каждом такте оптимизации выполнялось при различных значениях возмущающего воздействия f , при этом в качестве функционала оптимизации использовался суммарный критерий $I_{\Sigma}(t)$, складываемый из интегральных критериев точности $I(t)$, соответствующих каждому отдельно взятому значению возмущающего воздействия. Для обеспечения требуемого качества управления в функционал оптимизации были дополнительно добавлены штрафные слагаемые, гарантирующие отсутствие перерегулирования, а также плавность завершения переходного процесса.

Пример полученного в результате оптимизации графика переходного процесса при управлении движением в продольном направлении при значении аппаратных ограничений, приведенных в таблице 3, а также различных значениях возмущающих воздействий, представлен на рис. 14.

Далее с учетом геометрического расположения движителей (рис. 5) был проведен синтез конфигулятора АНПА. Для этого была составлена матрица конфигурации (2), позволяющая преобразовать управляющие воздействия базовых регуляторов в заданные частоты вращения движителей следующего вида

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

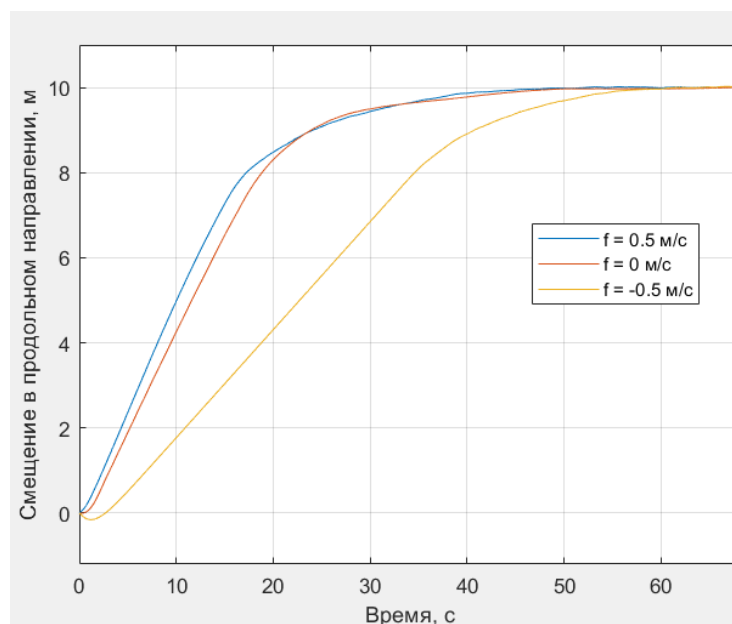


Рис. 14. Графики переходного процесса для движения в продольном направлении при различных значениях возмущающего воздействия

Таким образом, горизонтальные движители 5-8 (рис. 5) расположенные под углом 45 градусов относительно продольной оси симметрии аппарата, обеспечивают управление углом курса, а также линейными перемещениями в горизонтальной плоскости. Вертикальные движители 1-4 (рис. 5), в свою очередь, обеспечивают управление углами дифферента и крена, а также линейным перемещением в вертикальном направлении.

Далее в соответствии с предложенной методикой на аналитической динамической модели было проведено исследование эффективности совместной работы всех контуров управления при различных показаниях задержек, погрешностей и дискретности управления с целью проверки робастности системы управления к ограничениям бортовой аппаратуры.

Для этого было выполнено многократное моделирование работы системы управления при параметрах, представленных в таблице 4.

Таблица 4 – Возмущающие факторы, учтенные в аналитической модели

Возмущающий фактор	Диапазон значений	Шаг моделирования в диапазоне
Дискретность управления, Δt	0,02-0,15 с	0,02 с
Задержка наблюдения базовых координат, τ_x	0-0,5 с	0,1 с
Погрешность определения линейных базовых координат, σ_x	0-0,05 м	0,01 м
Проекция скорости течения на оси базовой СК, $v_c = [v_{cx}, v_{cy}, v_{cz}]$	[0,3, 0, 0,1] м/с	–
Остаточная плавучесть, F_y	5 Н	–

Целью системы управления при данном моделировании было движение вперед в продольном направлении на 3 м с дальнейшим удержанием аппарата с в окрестностях заданной точки. Регуляторы углов ориентации, в свою очередь, обеспечивали их стабилизацию относительно нулевого положения. В результате моделирования для каждой из комбинаций возмущающих факторов было получено свое значение погрешности позиционирования. Для визуального отображения влияния комбинаций возмущающих факторов на точность позиционирования построено облако точек, представленное на рис. 15. Красным цветом обозначены комбинации факторов соответствующие максимальной погрешности позиционирования более 0,1 м; синим – в диапазоне 0,05–0,1 м; зеленым – менее 0,05 м.

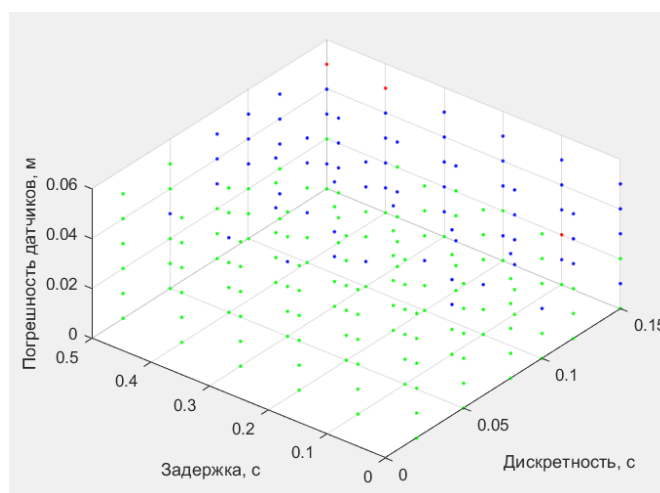


Рис. 15. Облако точек, характеризующее максимальную погрешность позиционирования АНПА при различных значениях возмущающих факторов

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что точность позиционирования уменьшается при больших значениях погрешности измерения базовых координат, а также повышении дискретности управления, при этом в значительной мере не зависит от значений задержки управляющего сигнала.

Тем не менее, превышение максимально допустимой точности позиционирования происходит только при максимальных значениях всех анализируемых факторов, в связи с чем спроектированную систему управления можно считать робастной по отношению к возмущающим факторам.

В качестве заключительного этапа проектирования системы управления была проведена валидация системы управления на гидродинамической модели при выборочных значениях комбинаций возмущающих факторов. В данном случае моделирование было проведено при следующих значениях аппаратных ограничений:

- дискретность управления, $\Delta t = 0,1$ с;
- задержка определения базовых координат, $\tau_x = 0,3$ с;
- погрешность измерения базовых координат, $\sigma_x = 0,03$ м.

В результате были получены графики линейных перемещений аппарата, представленные на рис. 16 (а). Также для демонстрации эффективности предложенной методики был построен совместный график переходного процесса по продольной координате на всех используемых моделях АНПА, представленный на рис. 16 (б).

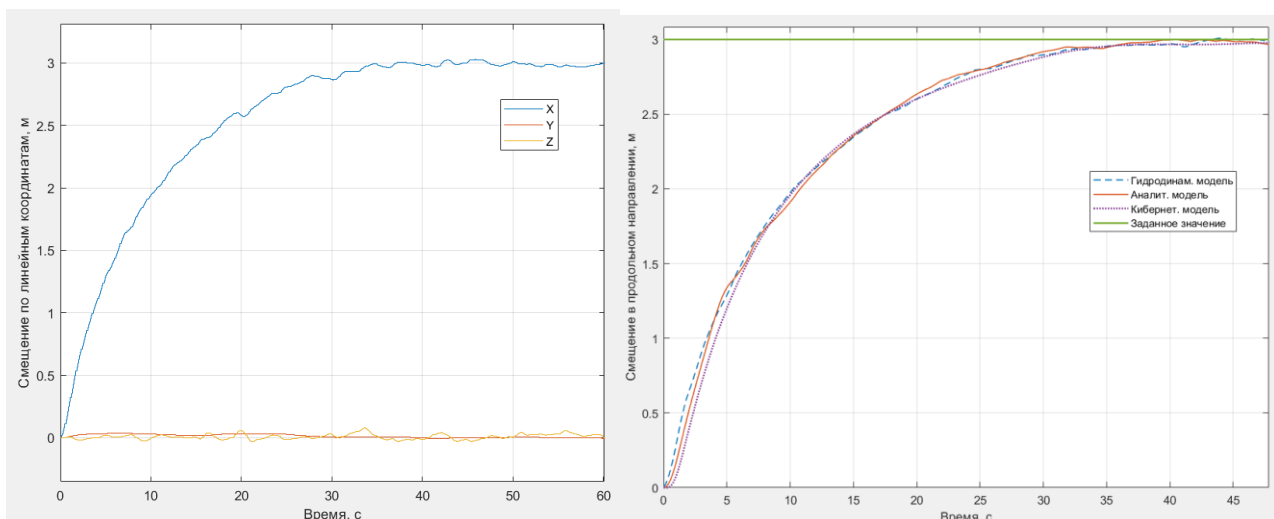


Рис. 16. Значения линейных координат, полученных при моделировании на гидродинамической модели (а) и значения смещений в продольном направлении, полученные при выполнении аналогичных экспериментов на всех моделях (б)

Исходя из полученных графиков (рис. 16) можно сделать вывод об эффективности спроектированной системы управления, позволяющей обеспечить высокую точность позиционирования при различных значениях возмущающих воздействий. Совместный график переходных процессов, полученных с разных моделей (рис. 16 (б)), демонстрирует высокое соответствие моделей между собой. Таким образом, можно судить об эффективности предложенной методики, заключающейся в совместном использовании различных моделей для проектирования системы управления АНПА.

Выводы

Представленная методика модельно-ориентированного проектирования системы управления позволяет сократить требуемое количество натуральных испытаний что способствует как уменьшению времени на проектирование систем управления АНПА, так и сокращению материальных затрат на ее разработку. Элементами новизны предложенного решения по сравнению с известными подходами к проектированию систем управления АНПА является использование кибернетических и гидродинамических моделей для синтеза и отладки систем управления с учетом возможных аппаратных ограничений и внешних возмущающих воздействий.

В ходе работы на примере синтеза системы управления малогабаритного АНПА пошагово продемонстрировано практическая реализация представленной методики, а также ее эффективность при управлении наиболее точной гидродинамической модели АНПА.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России на 2024 год № 075-00697-24-00 от 27.12.2023 FNRG-2022-0017 1021060307691-2-1.2.1; 2.2.2 «Развитие теории синтеза оптимального управления гиперизбыточных роботов подводного базирования в условиях не прогнозируемых нестационарных течений и потоков».

Литература

1. Бахарев С. А., Карасев В. В., Карасев А. В. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения Мирового океана // Научные труды Дальрыбвтуза. 2015. Т. 35. С. 41-51.
2. Киселев Л. В., Костенко В. В., Медведев А. В., Быканова А. Ю. Проблемно-ориентированная интегральная система управления движением и динамика гибридного АНПА в режиме контроля шумовой подводной обстановки // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 4 (46). С. 29-42. doi: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_03.
3. Гаврилина Е. А. Подход к построению системы управления подводного аппарата повышенной маневренности, работоспособной во всем диапазоне углов ориентации // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 2 (40). С. 39-50. doi: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_05.
4. Xiong Y., Pan L., Min X., Xiao H. Motion control and path optimization of intelligent AUV using fuzzy adaptive PID and improved genetic algorithm // Mathematical Biosciences and Engineering. 2023. Vol. 20. P. 9208-9245. doi: 10.3934/mbe.2023404.
5. Arcos-Legarda J., Gutiérrez A. Robust Model Predictive Control Based on Active Disturbance Rejection Control for a Robotic Autonomous Underwater Vehicle // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11. № 929. P. 1-18. doi: 10.3390/jmse11050929.
6. Fossen I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – Chichester: John Wiley & Sons LTD, 2011. – 575 p.

7. Юрканский А. В., Ремизов И. И. О необходимости учета изменений тяги подруливающих устройств при исследовании динамики подводных аппаратов // Сборник тезисов 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». 2023. С. 101-103.

8. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1975. – 413 с.

9. Baldini A., Fasano A., Felicetti R., Freddi A., Longhi S., Monteriù A. A constrained thrust allocation algorithm for remotely operated vehicles // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51 (29). P. 250-255. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.511.

10. Kokegei M., He F., Sammut K. Fully coupled 6 degree-of-freedom control of an over-actuated autonomous underwater vehicle // Autonomous underwater vehicles. 2011. P. 147-170. doi: 10.5772/25064.

11. Kirchengast M., Steinberger M., Horn M. Input Matrix Factorizations for Constrained Control Allocation // IEEE Transactions on Automatic Control. 2018. Vol. 63 (4). P. 1163-1170. doi: 10.1109/TAC.2017.2739648.

12. Khan H., Rajput J., Ahmed S., Sarmad M., Sharjil M. Robust Control of Overactuated Autonomous Underwater Vehicle // Proceedings of 2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). 2018. P. 269-275. doi: 10.1109/IBCAST.2018.8312235.

13. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: ОГИЗ, 1947. – 929 с.

14. Григоров М. Ю. Проблемы обеспечения управляемости подводных аппаратов с альтернативной архитектурой кормового оперения // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». 2024. С. 127-138.

15. Castillo-Zamora J., Camarillo-Gómez K., Pérez-Soto G., Rodriguez J., Morales-Hernández L. Mini-AUV Hydrodynamic Parameters Identification via CFD Simulations and Their Application on Control Performance Evaluation // Sensors. 2021. Vol. 21 (820). P. 1-25. doi: 10.3390/s21030820.

16. Щур Н. А., Половко С. А., Деулин А. А. Применение методов вычислительной гидродинамики для получения характеристик переходных процессов АНПА // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. № 4. С. 287-295. doi: 10.31776/RTSJ.8405.

17. Горюнов В. В., Половко С. А., Щур Н. А. Технология создания кибернетических моделей для синтеза и отработки регуляторов системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8. №4. С. 308-318. doi: 10.31776/RTSJ.8407.

18. Солнышкин С. А. Исследование алгоритмов распределения управляющих воздействий для управления движением гиперизбыточных необитаемых подводных аппаратов с использованием переменного количества движителей // Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». 2023. С. 105-112.

19. Жученко М. М., Иванов В. М. Расчеты гребных винтов. – Л.: Машгиз, 1958. – 276 с.

20. Серов Д. К. Синтез алгоритмов управления движением необитаемого подводного аппарата в условиях непрогнозируемых течений и прочих возмущающих воздействий // Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». 2023. С. 167-174.

References

1. Bakharev S. A., Karasev V. V., Karasev A. V. The use of autonomous unmanned underwater vehicles in the process of studying the world ocean. *Scientific Journal of DALRYBVTUZ*, 2015, vol. 35, pp. 41-51 (in Russian).

2. Kiselev L. V., Kostenko V. V., Medvedev A. V., Bykanova A. Y. Problem-oriented integrated motion control system and dynamics of a hybrid auv in the underwater noise control mode. *Underwater Investigations and Robotics*, 2023, no. 4 (46), pp. 29-42 (in Russian). DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_03

3. Gavrilina E. A. Approach to the control system design for a highly maneuverable underwater vehicle operating across the entire range of orientation angles *Underwater Investigations and Robotics*, 2022, no. 2 (40), pp. 39-50 (in Russian). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_05

4. Xiong Y., Pan L., Min X., Xiao H. Motion control and path optimization of intelligent AUV using fuzzy adaptive PID and improved genetic algorithm. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2023, vol. 20, pp. 9208-9245. DOI: 10.3934/mbe.2023404

5. Arcos-Legarda J., Gutiérrez A. Robust Model Predictive Control Based on Active Disturbance Rejection Control for a Robotic Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 929, pp. 1-18. DOI: 10.3390/jmse11050929

6. Fossen I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Chichester, John Wiley & Sons LTD, 2011. 575 p.

7. Yurkanski A. V., Remizov I. I. Necessity of taking into account changing thrust during the dynamics research of underwater vehicles thruster. *Abstracts of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2023, pp. 101-103 (in Russian).

8. Yurevich E. I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Leningrad, Energy, 1975. 413 p. (in Russian).

9. Baldini A., Fasano A., Felicetti R., Freddi A., Longhi S., Monteriù A. A constrained thrust allocation algorithm for remotely operated vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51 (29), pp. 250-255. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.511

10. Kokegei M., He F., Sammut K. Fully coupled 6 degree-of-freedom control of an over-actuated autonomous underwater vehicle. *Autonomous underwater vehicles*, 2011, pp. 147-170. DOI: 10.5772/25064.

11. Kirchengast M., Steinberger M., Horn M. Input Matrix Factorizations for Constrained Control Allocation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, vol. 63 (4), pp. 1163-1170. DOI: 10.1109/TAC.2017.2739648.

12. Khan H., Rajput J., Ahmed S., Sarmad M., Sharjil M. Robust Control of Overactuated Autonomous Underwater Vehicle. *Proceedings of 2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 2018, pp. 269-275. DOI: 10.1109/IBCAST.2018.8312235.

13. Lamb G. *Hydrodynamics*. Moscow, OGIZ Publ., 1947. 929 p. (in Russian).

14. Grigorov M. Y. Problems of ensuring the maneuverability of underwater vehicles with an alternative stern architecture. *Materiali XIX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Perspektivnie sistemi i zadachi upravleniya»*, 2024, pp. 127-138 (in Russian).

15. Castillo-Zamora J., Camarillo-Gómez K., Pérez-Soto G., Rodriguez J., Morales-Hernández L. Mini-AUV Hydrodynamic Parameters Identification via CFD Simulations and Their Application on Control Performance Evaluation. *Sensors*, 2021, vol. 21 (820), pp. 1-25. DOI: 10.3390/s21030820.

16. Tschur N. A., Polovko S. A., Deulin A. A. Application of the computational fluid dynamics methods to obtain the characteristics of AUV transient responses. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 287-295 (in Russian). DOI: 10.31776/RTCJ.8405.

17. Goryunov V. V., Polovko S. A., Schur N. A. Technology of cybernetic models' creating for the synthesis and refinement of autonomous underwater vehicle motion control system controllers. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 308-318 (in Russian). DOI: 10.31776/RTCJ.8407.

18. Solnyshkin S. A. Study of control allocation algorithms for over-actuated underwater vehicle motion control using variable number of thrusters. *Abstracts of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2023, pp. 105-112 (in Russian).

19. Zhuchenko M. M., Ivanov V. M. *Rascheti grebnikh vintov* [Thrusters calculations]. Leningrad, Mashgiz, 1958. 276 p. (in Russian).

20. Serov D. K. Synthesis of algorithms for motion control of uninhabited underwater vehicle in the presence of unpredictable currents and other disturbances. *Abstracts of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2023, pp. 167-174 (in Russian).

Статья поступила 30 июля 2024 г.

Информация об авторах

Половко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук. Ведущий научный сотрудник, научный руководитель научно-исследовательского центра. Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики. Область научных интересов: подводная робототехника, математическое моделирование, управление робототехническими комплексами. E-mail: polovko@rtc.ru

Попов Александр Владимирович – кандидат технических наук. Заместитель директора по научной работе. Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики. Область научных интересов:

математическое моделирование, управление робототехническими комплексами.
E-mail: aporov@rtc.ru

Серов Данила Константинович – инженер 911 лаборатории «Численного моделирования». Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики. Область научных интересов: подводная робототехника, математическое моделирование, управление робототехническими комплексами. E-mail: d.serov@rtc.ru

Щур Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук. Математик 911 лаборатории «Численного моделирования». Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики. Ведущий Электроник. Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов: подводная робототехника, математическое моделирование, вычислительная гидродинамика. E-mail: koliambos@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21.

Model-based Motion Control System Design for Autonomous Unmanned Underwater Vehicles

S. A. Polovko, A. V. Popov, D. K. Serov, N. A. Tschur

Problem statement. Nowadays the underwater robotics field is actively developing: the degree of autonomy of underwater robots is increasing and the range of the tasks they solve is expanding. All this inevitably leads to an increase in the size of the design problems for the control system of autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) as well as to an increase in the required volume of experiments, which, in turn, leads to an increase in the overall design cost. **Purpose.** The goal of the work is to develop a methodology for planning AUV motion control systems, which makes it possible to make maximum use of mathematical experiments on variable-type models to reduce the time and cost of designing AUV control systems. **Methods.** The development of AUV motion models was carried out in accordance with the known principles of hydrodynamics. The problem of designing an AUV motion control system was solved in accordance with the well-known principles of automatic control theory, as well as nonlinear stochastic optimization methods. **Novelty.** Elements of Novelty are concluded in the use of AUV motion models at various stages of control system design. In this work, in addition to classical analytical models, cybernetic and hydrodynamic models are used to solve problems of synthesis and debugging of the control system. **Results.** The use of the proposed methodology for designing an AUV motion control system ensures the required quality of the control system while ensuring the task of positioning a low-inertia AUV in the presence of a priori uncertainties and disturbances. **Practical relevance.** The presented methodology can be used in the design of motion control systems for large-sized AUVs to reduce the time and cost of designing a control system by taking into account disturbances in the process of synthesizing the control system and reducing the required number of full-scale experiments.

Key words: AUV, motion control system, model-based design, cybernetic model, disturbances.

Information about Authors

Sergey Anatolievich Polovko – Ph.D. of Engineering Sciences. Leading researcher, scientific director of the Research Center. Russian State Scientific Center

for Robotics and Technical Cybernetics. Field of research: underwater robotics, mathematical simulation, robotic control systems. E-mail: polovko@rtc.ru

Alexandr Vladimirovich Popov – Ph.D. of Engineering Sciences. Deputy director for scientific work. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. Field of research: mathematical simulation, robotic control systems. E-mail: apopov@rtc.ru

Danila Konstantinovich Serov – engineer of 911 Laboratory of Numerical Simulation. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. Field of research: underwater robotics, mathematical simulation, robotic control systems. E-mail: d.serov@rtc.ru

Nikolai Alekseevich Tschur – Ph.D. of Physics and Mathematics Sciences. Mathematician of 911 Laboratory of Numerical Simulation. Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics. Leading electronics engineer. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Field of research: underwater robotics, mathematical simulation, computational fluid dynamics. E-mail: koliambos@mail.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihorecky prospekt, 21.