

С. А. ПОЛОВКО, Д. К. СЕРОВ, А. С. АБРАМЕНКО

**МЕТОД РЕДУЦИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ
РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

В настоящее время активно развивается область подводной робототехники, в частности множится количество задач, решаемых с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), и, как следствие, растут требования к их автономности. Данные факторы неизбежно приводят к увеличению времени и стоимости проектирования систем управления и навигации АНПА, в связи с чем все большую роль начинает играть математическое моделирование. В настоящей статье предложен метод построения системы управления АНПА на базе редуцированных моделей, сформированных в результате численного моделирования. Новизна работы заключается в представлении динамики движения АНПА в виде модифицированных передаточных функций, содержащих нелинейные параметры, которые предлагается определять по результатам численного моделирования. Подход позволяет декомпозировать задачу синтеза алгоритмов управления и свести ее к задаче оптимизации с учетом взаимного влияния контуров управления, что может вызывать затруднения в случае применения традиционных аналитических моделей. Реализация предложенного подхода описывается на примере разработки алгоритма управления АНПА в вертикальной плоскости при движении на заданном отстоянии от поверхности морского дна. Эффективность метода подтверждена в ходе аналогичных математических экспериментов, проведенных на численных моделях.

Ключевые слова: АНПА, система управления, редуцированная модель, численная модель, CFD-модель.

Введение

АНПА широко применяются в ходе биологических и геофизических исследований, для картографирования морского дна и при других технологических операциях в подводных условиях. Ограниченные возможности связи под водой влекут за собой более высокие требования к автономности подводных аппаратов, что в свою очередь приводит к увеличению сроков и стоимости разработки их систем управления и навигации. Поскольку натурные испытания финансово затратны, большую роль в проектиро-

Половко Сергей Анатольевич. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, научный руководитель центра, Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики (С.-Петербург).

Серов Данила Константинович. Аспирант, младший научный сотрудник, и.о. начальника лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики.

Абраменко Анастасия Сергеевна. Инженер, Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики.

вании АНПА играет математическое моделирование, позволяющее синтезировать и отлаживать алгоритмы управления вплоть до непосредственной эксплуатации аппаратов в реальных условиях.

Как правило, алгоритмы управления АНПА реализуются в рамках аналитических моделей, которые можно представить в виде уравнений динамики твердого тела, дополненных слагаемыми (силами и моментами гидродинамического сопротивления, присоединенными массами, а также силами и моментами, вызванными ненулевой плавучестью АНПА), упрощенно описывающими гидродинамику жидкости. В зарубежной литературе наиболее известной формой математического представления динамики АНПА являются уравнения динамики, предложенные Фоссеном [1]. Из отечественной литературы отметим форму уравнений, предложенную Пантовым [2], а также декомпозированные на вертикальные и горизонтальные составляющие уравнения, введенные Лукомским [3].

В большинстве работ, посвященных управлению движением АНПА, построение алгоритмов осуществляется в рамках аналитических моделей. Так, например, в [4] рассмотрена задача управления движением АНПА в горизонтальной плоскости. Алгоритмы управления формируются на базе аналитической модели Фоссена, а в каждом из контуров управления используются нечеткие ПИД-регуляторы.

В [5] решается задача управления АНПА при движении по заданной траектории, при этом регулятор представлен в виде редуцированной модели Фоссена.

В [6] обсуждается управление глубиной погружения АНПА. В качестве модели объекта управления также задействуется редуцированная модель Фоссена, а регулятор построен на эталонной модели, модифицированной наблюдателем на основе перцептрона для компенсации внешних возмущающих воздействий.

В работе [7] описывается управление движением группы АНПА с помощью адаптивного регулятора и дополнительного наблюдателя течения. Устойчивость синтезированной системы управления в работе подтверждается как результатами математических экспериментов, так и методом Ляпунова [8].

В [9] авторы провели сравнительный анализ различных подходов к управлению движением АНПА – в рамках аналитической модели Фоссена с детально определенной матрицей присоединенных масс и упрощенным представлением сил и моментов гидродинамики.

Аналогичные подходы к моделированию динамики АНПА приняты и в отечественных работах, например в [10] и [11].

Существенным недостатком аналитических моделей является большая размерность параметров матриц присоединенных масс и демпфирования, характеризующих силы и моменты гидродинамического сопротивления. В связи с этим в упомянутых исследованиях применялись редуцированные модели, не отражающие характерные для подводных аппаратов нелинейные гидродинамические эффекты, которые критически важны для управления. К таковым относится, например, снижение эффективности работы подруливающих устройств в результате высокоскоростного движения в продольном направлении [12].

В настоящее время активно развивается технология численного моделирования гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD). В рамках данного подхода гидродинамика обтекающей АНПА жидкости моделируется посредством конечно-объемных методов, предполагающих, что уравнения Навье–Стокса [13] решают-

ся в узлах расчетной сетки. Это позволяет наиболее точно воспроизвести гидродинамические эффекты, оказывающие критически важное влияние на управление.

Так, в работе [14] численная гидродинамическая модель использовалась для определения параметров редуцированной аналитической модели с целью дальнейшего синтеза алгоритмов управления. В [15] для вычисления параметров типовой аналитической модели была задействована комбинация численной модели и нейронной сети. В [16] с помощью численной модели была оптимизирована конструкция АНПА на этапе ее проектирования.

Основной недостаток численных моделей – высокая вычислительная сложность решения уравнений Навье–Стокса во всех узлах расчетной области, в результате чего один эксперимент зачастую занимает гораздо больше времени, чем аналогичные натурные испытания. Это не позволяет воспользоваться вышеуказанными моделями напрямую в ходе синтеза алгоритмов управления, а поиск всех параметров аналитической модели требует слишком большого количества экспериментов.

Таким образом, для построения системы управления предлагается привлекать так называемые редуцированные модели, представляющие собой комбинацию типовых инерционных звеньев согласно теории автоматического управления, параметры которых определяются методами оптимизации с использованием численного моделирования.

В настоящей статье развиваются идеи редуцированного моделирования, понятие которого введено нами в [17] и [18]. Этот подход позволяет повысить точность моделей и качество построенных с их использованием систем управления путем учета нелинейных функциональных зависимостей, возникающих при взаимном влиянии контуров управления.

Стоит отметить, что сама идея описывать динамику движения АНПА с помощью редуцированных и аппроксимирующих моделей не нова и наиболее часто рассматривается в контексте применения методов машинного обучения [19, 20]. Преимуществом предлагаемого подхода по сравнению с существующими является небольшое число параметров настройки модели и, соответственно, требуемых для реализации модели экспериментов. Кроме того, подход предоставляет возможность декомпозиции динамики АНПА по контурам управления, что позволяет задействовать модель для оптимизации алгоритмов управления, а также интерпретации ее параметров в виде динамических свойств объекта управления, таких как коэффициент усиления и постоянная времени передаточной функции.

Задача настоящего исследования – построение алгоритма управления АНПА при движении вдоль поверхности морского дна. В последующих разделах статьи в общем виде сформулирован предлагаемый подход к синтезу алгоритмов управления АНПА на базе редуцированных моделей. Поэтапно описывается процесс создания редуцированных моделей на примере типового АНПА цилиндрической формы и синтеза алгоритмов управления верхнего и нижнего уровня. Эффективность разработанных алгоритмов управления подтверждается в ходе математических экспериментов на численной модели гидродинамики. Перечислены основные достоинства и недостатки редуцированного моделирования, а также определены дальнейшие направления исследования.

Постановка задачи исследования

В качестве объекта управления выбран типовой АНПА цилиндрической формы, оснащенный четырьмя маршевыми движителями (МД), которые позволяют переме-

щаться в продольном направлении и управлять углами курса и дифферента, а также вертикальными подруливающими устройствами (ВПУ) для движения в вертикальном направлении при низкой продольной скорости. Рассматривается задача удерживать заданное отстояние (2 м) АНПА от морского дна с неровным рельефом при движении в продольном направлении. Дистанция до дна определяется в вертикальном и продольном направлении при помощи двух эхолотов. Схематическое изображение рассматриваемого объекта управления приведено на рис. 1.

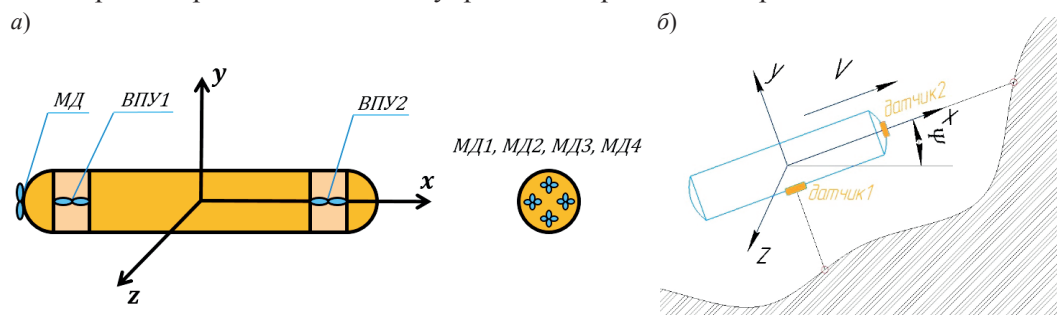


Рис. 1. Схематическое представление АНПА с изображением расположения двигателей (а) и датчиков расстояния (б):

МД – маршевые двигатели; ВПУ – вертикальные подруливающие устройства;
 v – скорость движения АНПА в продольном направлении; ψ – угол дифферента

В настоящей работе предложен метод построения алгоритма управления АНПА при наличии априорных данных только о его геометрии и массоинерционных характеристиках. Чтобы продемонстрировать эффективность нового подхода, рассмотрена задача управления движением АНПА в вертикальной плоскости при его перемещении вдоль поверхности морского дна. Качество работы системы управления определяется среднеквадратическим отклонением фактического маршрута АНПА от заданного, средней скоростью его движения в продольном направлении в рамках заданного сценария, а также временем прохождения заданного маршрута.

Построение алгоритма управления

Основная идея предложенного подхода заключается в реализации трехмерной численной модели с использованием метода конечных объемов с целью вычислить основные динамические параметры АНПА. Далее эта модель задействуется в идентификационных математических экспериментах, в рамках которых определяются как динамика АНПА при линейном и угловом перемещении по каждому из направлений, так и взаимное влияние контуров управления. Чтобы уменьшить размерность решаемой задачи, поскольку с увеличением рассматриваемых контуров управления число требуемых экспериментов растет экспоненциально, предлагается в соответствии с подходом, предложенным Ю.А. Лукомским [3], разделить модель на два независимых контура: движение в горизонтальной (управление углом курса и линейным перемещением в продольном и поперечном направлениях) и вертикальной (управление углом дифферента и линейным перемещением в продольном и вертикальном направлениях) плоскостях. Управление углом крена у аппаратов цилиндрической формы обычно не рассматривается, устойчивость по углу крена обеспечивается наличием метacentрического момента.

Идентификационные эксперименты выполняются в зависимости от решаемой задачи и могут быть направлены на то, чтобы выявить реакцию объекта на ступенчатое воздействие как по одному, так и по нескольким контурам управления, а также на определение переходных процессов по торможению для каждого из них. Далее для каждого контура управления выбирается комбинация типовых инерционных звеньев [8], описывающих динамику объекта. Для определения нелинейностей динамики каждый из параметров типовых инерционных звеньев аппроксимируется полиномами первого или второго порядка в зависимости от величины управляющих параметров. Это позволяет, с одной стороны, учесть нелинейные эффекты, наблюдаемые в гидродинамической модели, а с другой – обеспечить простоту настройки параметров модели.

Зависимость параметров звеньев от изменения управляющих воздействий рассматривается как по отдельности, так и совместно с управляющими воздействиями других звеньев для обеспечения межканального взаимодействия различных контуров управления. В частности, было выявлено, что высокая скорость движения в вертикальном направлении оказывает значительное влияние на динамику движения в продольном направлении, что также было отражено в параметрах модели.

Полученные модели основаны исключительно на результатах экспериментов и не содержат аналитических уравнений, описывающих физические эффекты гидродинамики. Их характер обусловлен разложением модели динамики АНПА на подмодели, каждая из которых относится к одному из контуров управления и основана на модифицированных типовых инерционных звеньях.

В дальнейшем это позволит построить алгоритмы управления как нижнего (обеспечивающего перемещение АНПА), так и верхнего (обеспечивающего смену режимов движения в ходе выполнения сценария) уровней. Благодаря быстроедействию редуцированных моделей синтезировать алгоритмы управления также целесообразно с привлечением методов оптимизации.

На заключительном этапе предложенного метода осуществляется валидация синтезированных алгоритмов управления в рамках CFD-моделей, по результатам которой либо принимается решение о переносе системы управления на бортовой вычислитель, либо дорабатываются редуцированные модели. Схематическое описание предложенного подхода приведено на рис. 2.



Рис. 2. Схема построения системы управления АНПА

Разработка редуцированной модели

В соответствии с предложенным подходом на первом этапе была построена численная гидродинамическая модель АНПА с использованием тетраэдральной сетки переменного размера во всей расчетной области. Моделирование динамики АНПА выполнялось с привлечением типовых методов деформации сетки, а гидродинамики гребных винтов – методом «вмороженного ротора». Более подробное описание гидродинамической модели приведено в [12].

Для синтеза редуцированных моделей были проанализированы переходные процессы, соответствующие каждому из типовых движений АНПА. В рамках численного моделирования на CFD-модели были выполнены серии экспериментов, в ходе которых для МД и ВПУ задавались различные частоты вращения в диапазоне от 0 до 1000 об/мин. Для определения переходных процессов по углу дифферента была задана разница частот вращения между верхним и нижним МД согласно правилу:

$$\begin{cases} n_{\text{в}} = n_0 + \Delta n \\ n_{\text{н}} = n_0 - \Delta n \end{cases}, \quad (1)$$

где $n_{\text{в}}$, $n_{\text{н}}$ – частоты вращения верхнего и нижнего МД соответственно; n_0 – базовая частота вращения каждого из МД, обеспечивающая движение в продольном направлении; Δn – разность частот вращения, обеспечивающая поворот по углу дифферента.

Переходные процессы по вертикальной составляющей скорости определялись путем подачи одинаковой частоты вращения u на носовое и кормовое ВПУ.

В рамках экспериментов осуществлялась и одновременная подача управляющих воздействий на разные контуры управления для определения характера межканального взаимодействия. В результате выявилось следующее: при высокой базовой частоте вращения МД повышается эффективность управления дифферентом, но значительно снижается управляемость МД, если при этом задействованы ВПУ.

Полученные в результате моделирования на CFD-модели графики переходных процессов для различных видов движения приведены на рис. 3.

Анализ переходного процесса по вертикальной составляющей скорости показал, что динамика АНПА в данном направлении может быть представлена в виде инерционного звена первого порядка с переменными параметрами коэффициента усиления и постоянной времени:

$$W_y(s) = \frac{K_y(u)}{T_y(u)s + 1}, \quad (2)$$

где $W_y(s)$ – передаточная функция, характеризующая скорость движения АНПА в вертикальной плоскости; $K_y(u)$, $T_y(u)$ – нелинейные параметры, характеризующие инерционное звено первого порядка; s – оператор, обозначающий дифференцирование по времени.

Переходный процесс при движении по углу дифферента был описан в соответствии с инерционным звеном второго порядка, параметры которого зависели как от базовой частоты вращения, так и от разницы между частотами вращения верхнего и нижнего МД:

$$W_{\psi}(s) = \frac{K_{\psi}(n_0, \Delta n)}{T_{\psi}^2(n_0, \Delta n)s^2 + 2\xi(n_0, \Delta n)T_{\psi}(n_0, \Delta n)s + 1}, \quad (3)$$

где $W_\psi(s)$ – передаточная функция, характеризующая динамику АНПА по углу дифферента; $K_\psi(n_0, \Delta n)$, $T_\psi(n_0, \Delta n)$, $\xi(n_0, \Delta n)$ – нелинейные параметры, характеризующие инерционное звено второго порядка.

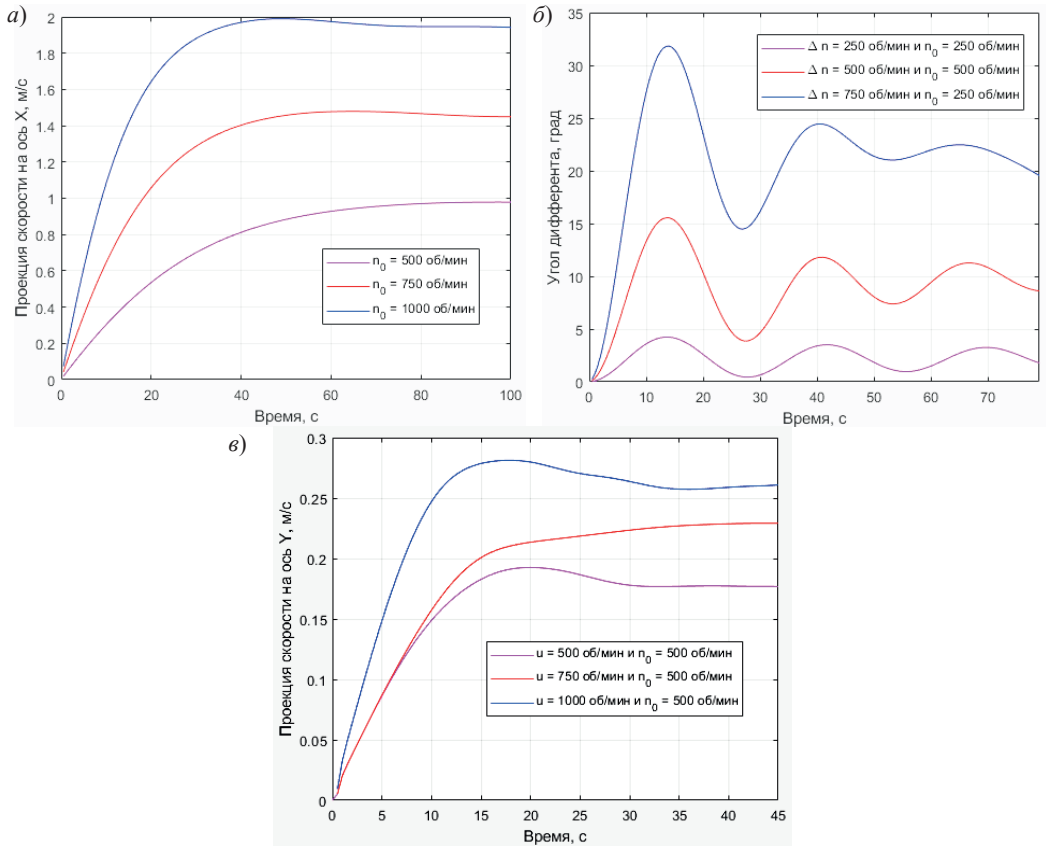


Рис. 3. Графики переходных процессов, полученные на основе CFD-модели для продольной составляющей скорости (а); поворота по углу дифферента при наличии продольной составляющей скорости (б); вертикальной составляющей скорости при наличии продольной составляющей скорости (в)

Аппроксимация динамики АНПА по продольной составляющей скорости выполнялась по аналогии с вертикальным движением – с применением инерционного звена первого порядка, однако была доработана с учетом снижения эффективности МД во время работы ВПУ:

$$W_x(s) = \frac{K_x(n_0) \cdot g(n_0, u)}{T_x(n_0, u)s + 1}, \quad (4)$$

где $W_x(s)$ – передаточная функция, характеризующая динамику движения АНПА в вертикальной плоскости; $K_x(n_0)$, $T_x(n_0, u)$ – нелинейные параметры, характеризующие инерционное звено первого порядка; $g(n_0, u)$ – масштабирующий коэффициент, учитывающий ухудшение работы МД при использовании ВПУ.

Углы атаки и дрейфа в рассматриваемой задаче моделирования были сравнительно малыми, в связи с чем их функциональные зависимости от различных факторов подробно здесь не обсуждаются. Тем не менее благодаря предлагаемому подходу можно рассчитать углы атаки и дрейфа на основании результатов гидродинамиче-

ского моделирования и учесть их изменение в различных режимах движения при построении редуцированной модели.

Аппроксимация параметров передаточных функций осуществлялась методом оптимизации с привлечением среднеквадратического функционала, который характеризует невязку между параметрами инерционных звеньев, определенных в рамках математических экспериментов на CFD-моделях. В качестве аппроксимирующей функциональной зависимости для коэффициентов были выбраны полиномы второго порядка с модульными зависимостями от управляющих параметров для учета возможной реверсной работы МД в процессе торможения:

$$\begin{cases} f_1(a) = k_1 a^2 + k_2 |a| + k_3 \\ f_2(a, b) = c_1 a^2 + c_2 |a| + c_3 b^2 + c_4 |b| + c_5 |a||b| + c_6 \end{cases}, \quad (5)$$

где $f_1(a)$, $f_2(a, b)$ – полиномы второго порядка от одной и двух переменных; k_1, k_2, k_3 – параметры полинома $f_1(a)$; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ – параметры полинома $f_2(a, b)$, где a и b обозначают управляющие воздействия контуров управления, влияющие на динамику соответствующего звена.

Здесь стоит отметить, что в представленных функциональных зависимостях каждый из параметров взят по модулю, что позволяет учесть симметричность поворота по углу дифферента и линейного движения в вертикальном направлении как в положительную, так и в отрицательную сторону.

Так как АНПА не обладает симметричностью относительно вертикальной оси из-за наличия хвостового оперения, для корректного моделирования динамики аппарата при работе МД в реверсном режиме были подобраны различные параметры $K_x(n_0)$ и $T_x(n_0, u)$ согласно формуле (4) при положительном и отрицательном значениях частот вращения n_0 . В результате были получены нелинейные функциональные зависимости коэффициентов всех инерционных звеньев от управляющих воздействий. Примеры визуализации некоторых зависимостей в виде поверхностей приведены на рис. 4.

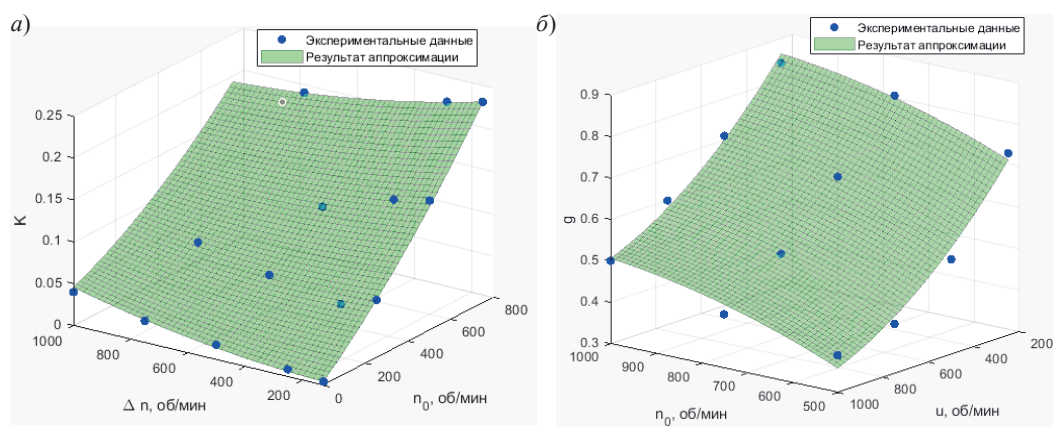


Рис. 4. Визуализированные представления коэффициента усиления для поворота по углу дифферента (а) и масштабирующего коэффициента для вертикального движения (б)

Для валидации полученной модели была проведена серия экспериментальных исследований гидродинамической модели при различных значениях управляющих воздействий и их комбинаций. Сравнительные графики результатов моделирования на редуцированной и CFD-модели по различным контурам управления приведены на рис. 5.

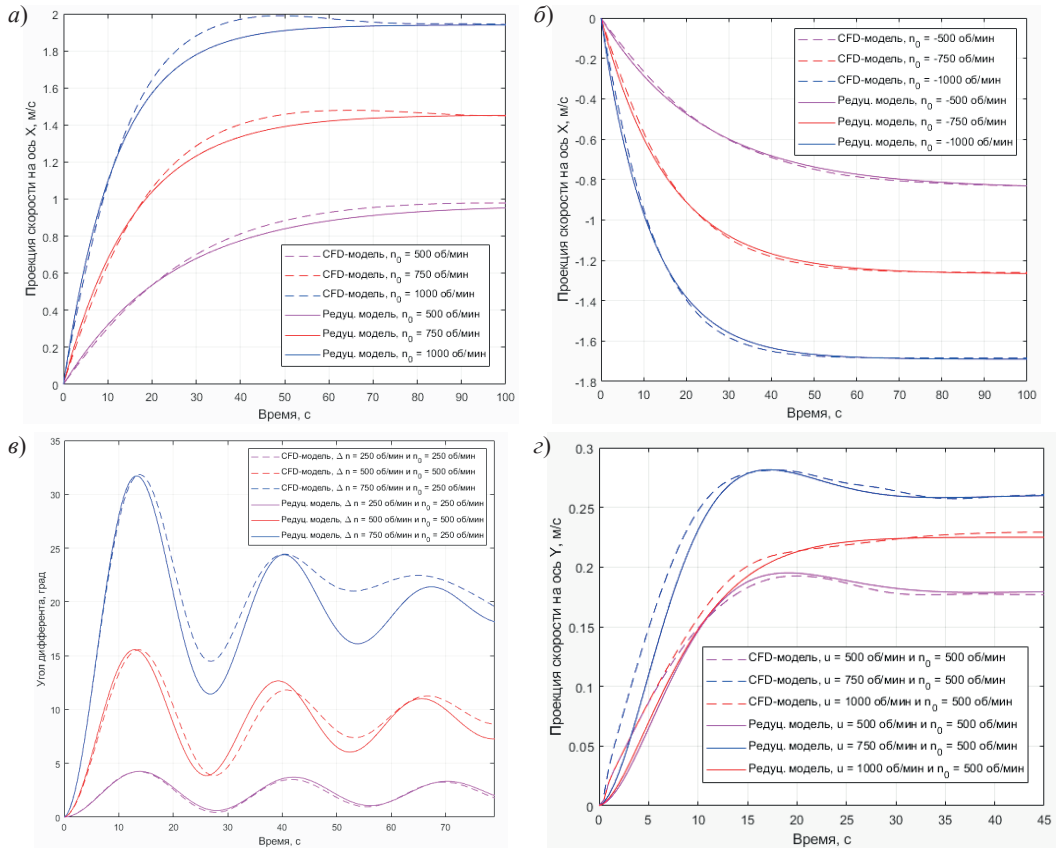


Рис. 5. Сравнительные графики результатов моделирования на редуцированной и CFD-модели по различным контурам управления: а) продольной составляющей скорости, положительное направление вращения МД; б) продольной составляющей скорости, отрицательное направление вращения МД (реверсный режим); в) углом дифферента; з) вертикальной составляющей скорости

Графики, показывающие динамику АНПА при отрицательных значениях частот вращения Δn и u , не приводятся, поскольку в этом случае переходный процесс носит аналогичный характер, что обусловлено симметричной формой АНПА относительно продольной и поперечной осей. Зависимость переходного процесса по углу дифферента и по вертикальной составляющей скорости от частоты вращения МД при работе в реверсном режиме здесь подробно не освещается, поскольку в рассматриваемом сценарии движения реверсный режим необходим только при кратковременном торможении АНПА, если возникает угроза столкновения с препятствием, и не оказывает значительного влияния на динамику управления углом дифферента и вертикальной составляющей скорости аппарата.

Из представленных рисунков можно сделать вывод, что различие между упрощенной редуцированной и более точной CFD-моделью составляет порядка 10% в основном рабочем диапазоне частот вращения МД (250-1000 об/мин). Этого достаточно для синтеза алгоритмов управления. Различия между моделями составили порядка 20-25% при движении по прямой и в вертикальном направлении на малых оборотах движителей (менее 100 об/мин). Тем не менее режимы вращения движителей на малых оборотах при движении АНПА на заданном отстоянии от поверхности морского дна не задействуются, в связи с чем их корректное описание не требуется.

Построение алгоритма управления АНПА

Чтобы обеспечить движение АНПА вдоль морского дна, в рамках редуцированной модели были разработаны алгоритмы управления верхнего и нижнего уровня. Последние предусматривают применение регуляторов, необходимых для выполнения следующих типовых операций АНПА: движение в продольном направлении с заданной скоростью, поворот по углу дифферента на заданный угол, движение в вертикальном направлении с заданной скоростью.

Были сопоставлены различные регуляторы для каждого из контуров управления: классический пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)-регулятор, ПИД-регулятор дробного порядка (Fractional Order Proportional-Integral-Derivative – FOPID) [21] и регулятор, работающий в скользящем режиме (Sliding Mode Control – SMC) [22]. Алгоритм работы FOPID-регулятора может быть представлен в виде

$$u_p(t) = K_p e(t) + K_I D^{-\lambda} e(t) + K_D D^{\mu} e(t), \quad (6)$$

где K_p , K_I , K_D – параметры ПИД-регулятора; u_p – управляющее воздействие регулятора; $e(t)$ – погрешность регулирования; λ , μ – дробные порядки интегрирования и дифференцирования; t – время, D^a – объединенный оператор дифференцирования и интегрирования, у которого положительное значение степени a соответствует степени дифференцирования, а отрицательное – степени интегрирования.

В случае SMC-регулятора была использована типовая скользящая поверхность, а также модифицированный закон управляющего воздействия, позволяющий избежать классического «дребезжания» и сделать закон управления более плавным:

$$\begin{cases} s_{mp}(t) = e(t) + c\dot{e}(t) \\ u_p(t) = k \cdot \tanh(s_{mp}(t)) \end{cases}, \quad (7)$$

где c , k – весовые коэффициенты; s_{mp} – поверхность скольжения; $\tanh(a)$ – функция гиперболического тангенса.

Для оптимизации параметров регуляторов и количественной оценки качества их работы функционалом оптимизации был выбран интегральный функционал средневзвешенного времени модуля погрешности регулирования (Integral of Time-weighted Absolute Error – ITAE), который был вычислен по формуле

$$I(t) = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt, \quad (8)$$

где $I(t)$ – функционал оптимизации; T – общее время моделирования.

В соответствии с данным функционалом погрешность регулирования интегрально накапливается во время переходного процесса, при этом ее весовой вклад в функционал на этапе завершения переходного процесса выше, чем на этапе его начала. Это позволяет, с одной стороны, обеспечить демпфирование колебаний и нулевую погрешность регулирования, а с другой – высокое быстродействие регулятора, что критически важно при движении в априорно неопределенных условиях неровного дна. Длительность моделирования в ходе экспериментов была такой же, как у переходного процесса, чтобы обеспечить его полное завершение по заданному контуру управления. Оптимизация параметров регуляторов в соответствии с заданным функционалом (8) осуществлялась на базе стохастического метода роя частиц [23].

Качество работы отдельных регуляторов при решении каждой из задач в соответствии с заданным функционалом отражено в табл. 1.

Таблица 1

Значение функционала, полученное в результате оптимизации параметров регуляторов

Регулятор	Движение в продольном направлении со скоростью 1 м/с	Поворот по углу дифферента		Движение в вертикальном направлении со скоростью 0,1 м/с
		10°	30°	
ПИД	340	1905	5931	18
FOPID	465	714	2132	8
SMC	132	1191	3452	16

Из таблицы следует, что для управления продольной составляющей скорости наиболее эффективным является SMC-регулятор, а для управления углом дифферента и вертикальной составляющей скорости – FOPID-регулятор. Графики переходных процессов, полученные в результате применения наиболее эффективных из рассмотренных регуляторов, приведены на рис. 6.

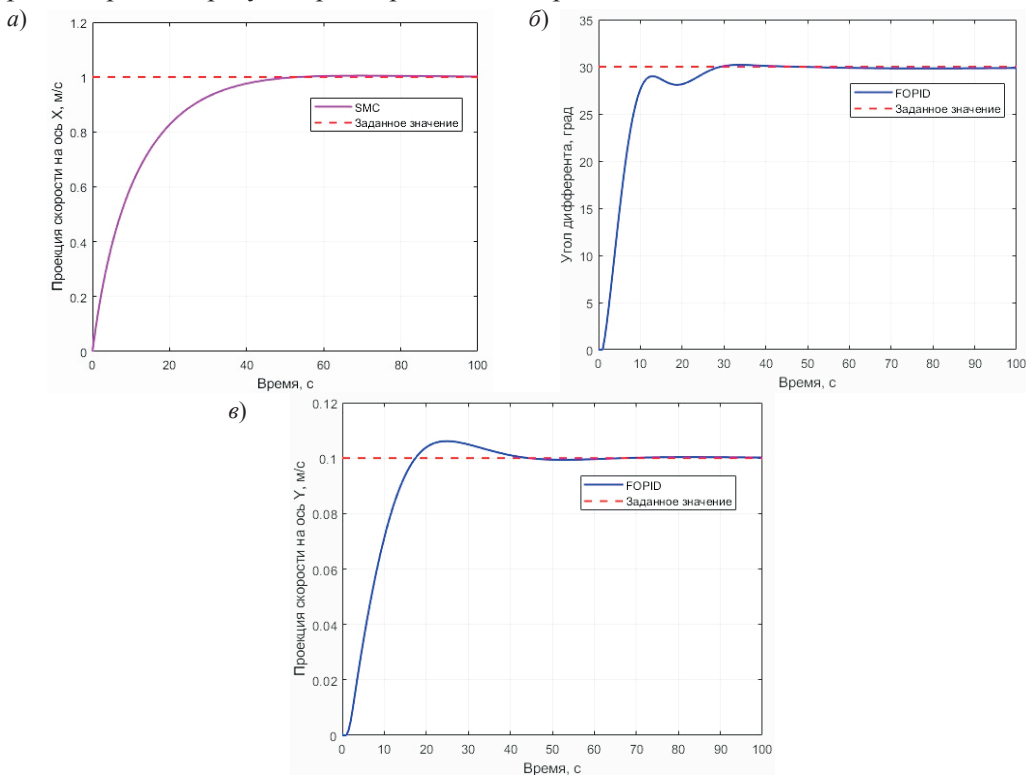


Рис. 6. Переходные процессы при управлении продольной составляющей скорости (а), углом дифферента (б) и вертикальной составляющей скорости (в)

С привлечением упрощенной модели был также разработан верхнеуровневый алгоритм принятия решений, обеспечивающий переключение между различными режимами движения АНПА. Рассмотрим 2 режима движения: штатный и вспомогательный. В штатном режиме управление скоростью при движении в продольном

направлении осуществлялось с помощью МД, а перемещение по вертикали – за счет изменения угла дифферента ψ . Вспомогательный режим необходим для быстрого набора вертикальной составляющей скорости при возникновении опасности столкновения с препятствием.

Как можно увидеть из рис. 1, для определения расстояния до препятствия по вертикали (d_1) и по горизонтали (d_2) были использованы два датчика. Соответственно было предусмотрено переключение режима движения из штатного во вспомогательный по достижении порогового расстояния до препятствия (l_1) по горизонтали. Во вспомогательном режиме аппарат сбрасывает скорость движения в продольном направлении до сравнительно небольших величин, при которых, с одной стороны, обеспечивается более безопасное перемещение вблизи препятствий, а с другой – не наблюдается значительной корреляции между продольным и вертикальным контурами управления. Заданный угол дифферента во вспомогательном режиме равен нулю, чтобы избежать создаваемой ВПУ возмущающей проекции скорости при движении в продольном направлении.

Переход обратно в штатный режим работы осуществляется по достижении пороговой дистанции до препятствия l_2 по горизонтали, на которой движение на штатной скорости в продольном направлении может считаться достаточно безопасным.

Схематически предложенный алгоритм управления представлен на рис. 7.

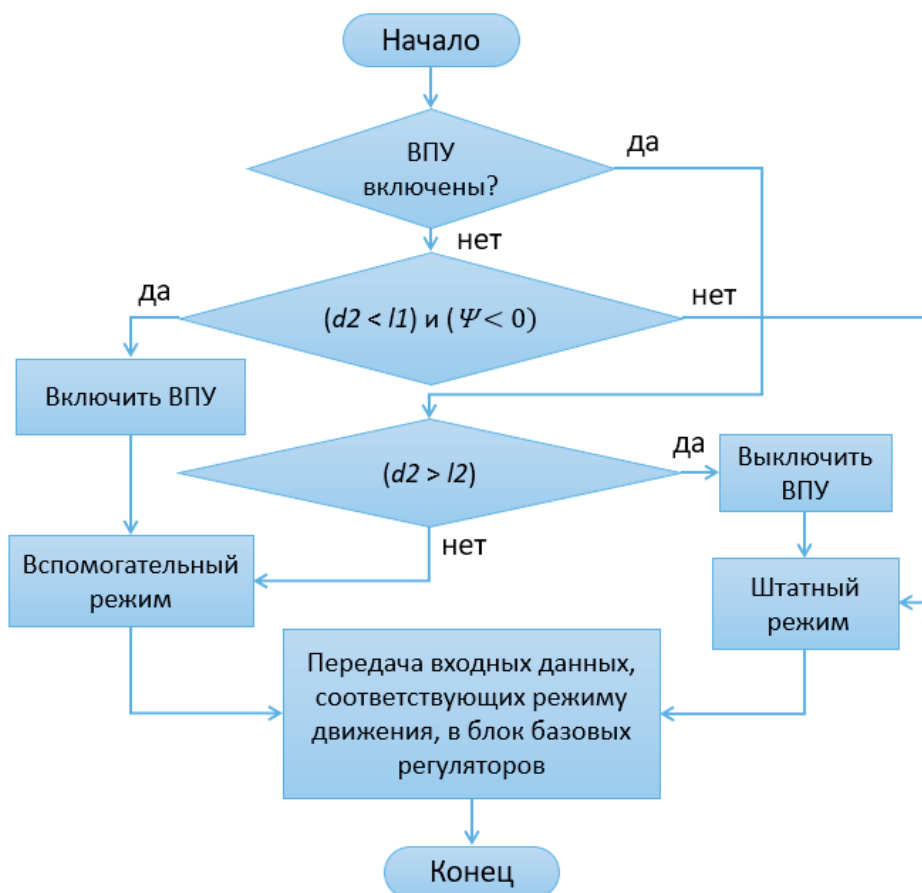


Рис. 7. Схема предложенного алгоритма управления

Алгоритм проверялся методом математического моделирования с использованием редуцированных и CFD-моделей. Рельеф морского дна моделировался на основе доступной информации из открытых источников, при этом известные дискретные данные были соединены сплайном, а работа датчиков расстояния моделировалась путем поиска точки пересечения луча, выходящего из предполагаемого места расположения датчика, и кривой, характеризующей поверхность морского дна.

Результаты смоделированного движения АНПА на заданном отстоянии от поверхности морского дна, полученные с помощью редуцированной и CFD-моделей, представлены на рис. 8.

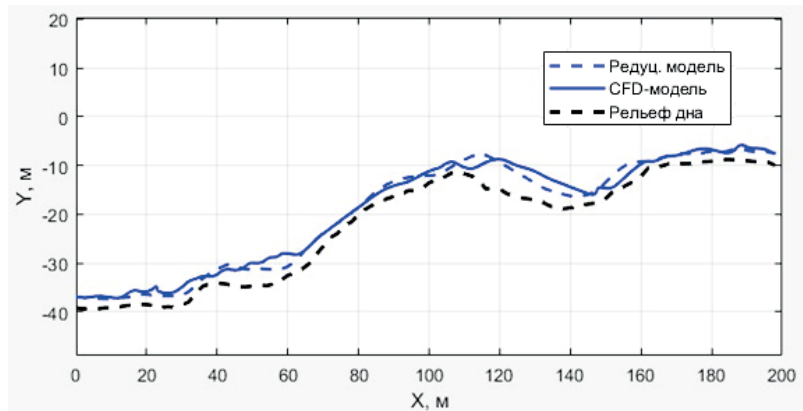


Рис. 8. Результат моделирования движения АНПА на заданном отстоянии от поверхности морского дна

Результаты количественной оценки качества работы алгоритма по заданным критериям приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Количественная оценка качества работы алгоритма управления

Критерий оценки	Результаты математического моделирования	
	с использованием редуцированной модели	с использованием CFD-модели
Среднее квадратическое отклонение от заданного маршрута, м	1,37	1,44
Время прохождения маршрута, с	1034	1145
Минимальное отстояние от дна, м	1,14	0,88

З а к л ю ч е н и е

В настоящей статье предложен подход к построению алгоритма управления движением АНПА на базе редуцированных моделей. Эффективность алгоритма продемонстрирована на примере упрощенной модельной задачи – движения АНПА в вертикальной плоскости на заданном отстоянии от поверхности морского дна.

Описывается поэтапная реализация алгоритма, приводятся примеры редуцированных моделей для каждого из контуров управления, рассматриваются взаимное влияние контуров управления и способы его учета в рамках редуцированного моделирования.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что редуцированные модели не могут служить полноценной заменой численных моделей по причине своей упрощенности, однако они описывают гидродинамические эффекты с достаточной точностью, чтобы ими можно было воспользоваться для синтеза алгоритмов управления.

В частности, алгоритм позволяет АНПА избегать столкновений с поверхностью дна во время движения, в том числе в условиях неровного рельефа, при использовании как редуцированной, так и более точной CFD-модели.

Дальнейшие исследования предполагают доработку предложенного алгоритма с учетом непрогнозируемых внешних возмущающих воздействий, таких как турбулентные течения, а также проверку его применимости для плохообтекаемых АНПА и аппаратов биоморфного типа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Развитие теории модельно-ориентированного проектирования для задач создания трансформных робототехнических систем с использованием методов вычислительной механики и гидрогазодинамики» (FNRG-2025-0005 1024042600099-7-2.2.2;1.2.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fossen, I., *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Chichester: John Wiley & Sons, 2020, 582 p.
2. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основные теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 211 с.
3. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
4. Sun, H., Wang, L., Li, D., et al., AUV Plane Track Tracking Control Algorithm Based on Three Closed Loops, *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, vol. 3004, pp. 1–10, doi: 10.1088/1742-6596/3004/1/012089.
5. Liu Zh., Chen, Ch., Huang, Y., et al., TD3 compensated control for uncertain AUV trajectory tracking, *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, vol. 2999, pp. 1–8, doi: 10.1088/1742-6596/2999/1/012016.
6. Kadri, F.Z., Hadiby, R.G., Boumediene, K., et al., Model Reference Adaptive Control based on Neural Network for Depth of an AUV, *Journal of Maritime Research*, 2024, pp. 2–10, doi: 10.13140/RG.2.2.27078.89924.
7. Guo, N., Yu, C., Xiang, X., et al., Path following control of an underactuated AUV: a prescribed performance and tunable prescribed time-based approach, *Nonlinear Dynamics*, 2025, vol. 113, pp. 7013–7028, doi: 10.1007/s11071-024-10717-5.
8. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия. 1975. 416 с.
9. Balasubramaniam, S., Umashankar, S., Ramanujam, M., et al., Performance Evaluation of Different Control Algorithms for Torpedo-shaped AUVs, *Proceedings of the ASME 43rd International Conference on Ocean*, 2024, pp.1–8, doi: 10.1115/OMAE2024-124617.
10. 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.
11. 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.
12. Юрканский А.В., Ремизов И.И., Половко С.А., Щур Н.А. Исследование эффективности подруливающих устройств автономных необитаемых подводных аппаратов // Робототехника и техническая кибернетика. 2024. № 4. (12). С. 305–314. DOI: 10.31776/RTCJ.12408.
13. Ламб Г. Гидродинамика. М: ОГИЗ, 1947. 929 с.
14. Bao, H., Zhu, H., Modeling and Trajectory Tracking Model Predictive Control Novel Method of AUV Based on CFD Data, *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 4234, pp. 1–29, doi: 10.3390/s22114234.
15. Lin, L., Chen, Y., Xiong, H., et al., Hydrodynamics Model Identification and Model-Based Control Application of a New Type of AUV, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, vol. 13, no. 310, pp. 1–27, doi: 10.3390/jmse13020310.

16. Lu, Y., Yuan, J., Si, Q., et al., Study on the Optimal Design of a Shark-like Shape AUV Based on the CFD Method, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 1869, pp. 1–18, doi: 10.3390/jmse11101869.
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. 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.
19. Борисов А.Н., Борисова А.М., Снек Ю.Л. Структурный и параметрический синтез нейросетевого эмулятора динамики автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2025. Т. 68. № 1. С. 5–12. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-5-12.
20. Борисов А.Н., Снек Ю.Л. Оценивание параметров движения автономного необитаемого подводного аппарата на основе полумарковского процесса // Материалы XXII конференции с международным участием «Навигация и управление движением». 2020. С. 295–297.
21. Tepljakov, A., Alagoz, B., Yeroglu, C., et al., FOPID Controllers and Their Industrial Applications: A Survey of Recent Results, *Proceedings of the 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional Integral Derivative Control*, 2018, pp. 25–30, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.014.
22. Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A., *Sliding Mode Control and Observation: Control Engineering*, NY: Springer New York, 2014, 369 p.
23. Gad, A., Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, vol. 29, pp. 2531–2561, doi: 10.1007/s11831-021-09694-4.

Polovko, S.A., Serov, D.K., Abramenko, A.S. (Russian Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, (St. Petersburg)

Surrogate Modeling for the Development of AUV Motion Control Algorithms, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 3 (130), pp. 88–102.

Abstract. Currently, the field of underwater robotics is actively developing. The scope of tasks performed by autonomous underwater vehicles (AUVs) is expanding, and hence, the requirements for their autonomy are growing. These factors inevitably increase the time and cost of designing control and navigation systems for AUVs; in this connection, mathematical simulation begins to play an increasingly important role. This paper proposes a method for synthesizing a control system for AUVs on the basis of surrogate models formed as a result of numerical simulation. The novelty of the work is that the AUV motion dynamics is represented as modified nonlinear transfer functions with nonlinear time-varying parameters, which are supposed to be determined from the results of numerical simulation. The proposed approach makes it possible to decompose the problem of control algorithm synthesis, reducing it to an optimization problem, taking into consideration the cross-effect of the control loops. This can cause difficulties in the cases that traditional analytical models are used. The implementation of the proposed approach is described on the example of the synthesis of the algorithm for AUV control in the vertical plane when it moves at a specified distance from the seabed. The effectiveness of the method is confirmed in the course of similar mathematical experiments conducted on numerical models.

Key words: AUV, control system, surrogate model, numerical model, CFD-model.

Материал поступил 23.07.2025