

В.С. Пасечник

МГТУ "СТАНКИН", Москва, Российская Федерация

О.М. Гергет

*Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация*

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ ДЛЯ ИНСПЕКЦИИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОДВОДНЫХ РАЙОНОВ В СОСТАВЕ ГРУППЫ

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена чрезвычайно высокими энергозатратами традиционных систем стабилизации глубины и дифферента автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), что существенно ограничивает длительность автономной работы длительной инспекции особо труднодоступных районов. Цель – существенное повышение общей энергоэффективности за счет новой оригинальной компоновки с каскадом сообщающихся балластных емкостей расположенными по периметру робота от носа до кормы, позволяющей независимо управлять положением центра масс. Метод – комплексное математическое и компьютерное моделирование динамики аппарата в 6 степенях свободы, интегрированное с моделью перетекания жидкости, численное моделирование в MATLAB/Simulink. Результаты: переходные процессы изменения глубины на 2 м (занимают 35 секунд с перерегулированием $<5\%$) и дифферента на 10° (за 20 секунд, с перерегулированием порядка 12%); снижение энергопотребления на стабилизацию глубины на 28–42% по сравнению с вертикальными движителями. Обоснована автоматическая компенсация смещения центра масс при смене модульной нагрузки. Выводы подтверждают эффективность предложенной балластной системы для проектирования АНПА с увеличенной автономностью. Помимо этого, описана основная модель передачи управляющего сигнала и позиционирования в толще воды.

Ключевые слова: погружные роботы, адаптивное управление, разработка прототипа, альтернативные подходы, системы компьютерного анализа, САИР, АСТПП.

Abstract. The relevance of the study is due to the extremely high energy consumption of traditional depth and trim stabilization systems for autonomous uninhabited underwater vehicles (ANPA), which significantly limits the duration of autonomous operation of long-term inspections of particularly inaccessible areas. The goal is to significantly increase overall energy efficiency due to the new original layout with a cascade of communicating ballast tanks located around the perimeter of the robot from bow to stern, allowing independent control of the position of the center of mass. The method is a complex mathematical and computer simulation of the dynamics of the apparatus in 6 degrees of freedom, integrated with the fluid flow model, numerical simulation in MATLAB/Simulink. Results: transient depth changes of 2 m (take 35 seconds with an overshoot of $<5\%$) and trim by 10° (in 20 seconds, with an overshoot of about 12%); reduced energy consumption for depth stabilization by 28-42% compared with vertical thrusters. The automatic compensation of the displacement of the center of mass during the change of the modular load is justified. The conclusions confirm the effectiveness of the proposed ballast system for designing ANPA with increased autonomy. In addition, the basic model of control signal transmission and positioning in the water column is described.

Keywords: submersible robots, adaptive control, prototype development, alternative approaches, computer analysis systems, CAIR, ASTPP.

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью инспекции труднодоступных подводных районов – узких каналов подводных инфраструктур, зон с густой водной растительностью, сложных рельефов дна, включая подводные каньоны и рифы. Анализ современного состояния российского и международного рынков подводных дронов и автономных погружных систем показывает, что подавляющее большинство существующих моделей используют кабельное подключение длиной от 50 до 200 метров, что накладывает серьезные ограничения [3, с. 7]: невозможность

работы в стесненных условиях, где кабель ограничивает маневренность; режим нейтральной плавучести, исключаящий транспортировку дополнительного оборудования; отсутствие эффективной системы стабилизации при течениях. Эти барьеры и легли в проблемы, требующие решения при разработке предлагаемого необитаемого беспроводного автономного подводного аппарата (АНПА), способного выполнять миссии под контролем оператора через ультразвуковой канал (или оптоволоконный при выполнении отдельных задач) или полностью автономно, с последующей передачей данных по Wi-Fi после всплытия. Для позиционирования такие аппараты используют комбинацию инерциальной системы, адаптивного контроля течения и триангуляции от надводных буйев-катеров. К данному подходу далее приведена визуализация и некоторые математические разъяснения, о том, как основная модель передачи управляющего сигнала и позиционирования должна функционировать в толще воды. (см. рис. 2)

Внедрение инноваций в области искусственного интеллекта, биоинспирированных решений и энергоэффективных систем открывает новые горизонты для создания высокофункциональных подводных роботов следующего поколения [1, с. 16]. Однако одной из ключевых нерешенных проблем остается высокое энергопотребление систем стабилизации глубины и балансировки аппарата. Традиционные АНПА используют вертикальные движители для управления глубиной и дифферентом, что требует постоянного расхода энергии, особенно в условиях течений и при изменении конфигурации модульного оборудования. Это существенно снижает длительность автономной миссии.

Таким образом, проблема заключается в отсутствии энергоэффективных и адаптивных решений для управления глубиной и балансировкой АНПА, позволяющих компенсировать смещение центра масс при смене полезной нагрузки.

Цели и задачи

Цель работы – повышение энергоэффективности управления глубиной и дифферентом АНПА за счет новой компоновки с двумя сообщающимися балластными емкостями.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель динамики АНПА, интегрированную с моделью перетекания жидкости между балластными емкостями.
2. Провести численное моделирование переходных процессов изменения глубины и дифферента.
3. Выполнить сравнительный анализ энергопотребления предложенной балластной системы и традиционного подхода с вертикальными движителями.

Материалы и методы

Классические телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) используют кабель-трос для передачи энергии и данных. Длина кабеля L создает геометрическое ограничение радиуса действия:

$$R_{\max} = L - \Delta L_{\text{buffer}} \quad (1)$$

где ΔL_{buffer} — технологический запас длины, необходимый для маневрирования.

Сила натяжения кабеля при движении аппарата со скоростью v относительно воды:

$$F_{\text{cable}} = \frac{1}{2} C_D \rho |v_r| v_r + m_{\text{cable}} g \sin \theta + F_{\text{drag}} \quad (2)$$

где C_D — коэффициент лобового сопротивления кабеля; ρ — плотность воды; $v_r = v - v_{\text{current}}$ — относительная скорость; m_{cable} — погонная масса кабеля; θ — угол наклона кабеля; F_{drag} — сила гидродинамического сопротивления аппарата.

Минимальный радиус поворота в стесненных условиях:

$$R_{\min} = \frac{v^2}{a_{\max}} + \frac{L \sin \alpha}{2} \quad (3)$$

где $a_{\max}$ — максимальное центростремительное ускорение, α — угол отклонения кабеля.

При $R_{\min} > R_{\text{channel}}$ (характерный размер подводного канала) выполнение миссии невозможно.

Для синтеза системы управления используется классическая модель динамики подводного аппарата в 6 степенях свободы (6-DOF), предложенная Т. Фоссеном [17]:

$$Mv' + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_{\text{dist}} \quad (4)$$

где $v=[u,v,w,p,q,r]^T$ — вектор линейных и угловых скоростей в связанной системе координат; $\eta=[x,y,z,\phi,\theta,\psi]^T$ — вектор позиции и углов ориентации в неподвижной системе координат; v' — вектор ускорений.

Матрица масс $M=M_{RB}+M_A$ включает массу твердого тела и присоединенные массы жидкости:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

Присоединенные массы учитывают дополнительную инерционность из-за необходимости сообщать кинетическую энергию окружающей жидкости при ускоренном движении аппарата.

Матрица демпфирования $D(v)=D_{linear}+D_{nonlinear}(v)$ описывает гидродинамическое сопротивление. Сила сопротивления по i -й степени свободы:

$$F_{drag,i} = \frac{1}{2} \rho C_D A_i |v_i| v_i \quad (5)$$

Восстанавливающие силы и моменты $g(\eta)$ определяются взаимодействием сил гравитации и Архимеда:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ (z_g W - z_b B) \sin \theta + (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_b B) \sin \theta \end{bmatrix}$$

где $W=mg$ — вес в воздухе, $B=\rho g \nabla$ — сила Архимеда, ∇ — объем вытесненной воды.

Управляющие воздействия τ формируются движительной установкой:

$$\tau = T \cdot u$$

$$(6)$$

где $u=[u_1, u_2, \dots, u_m]^T$ — вектор управляющих сигналов, T — матрица распределения тяги размера $6 \times m$.

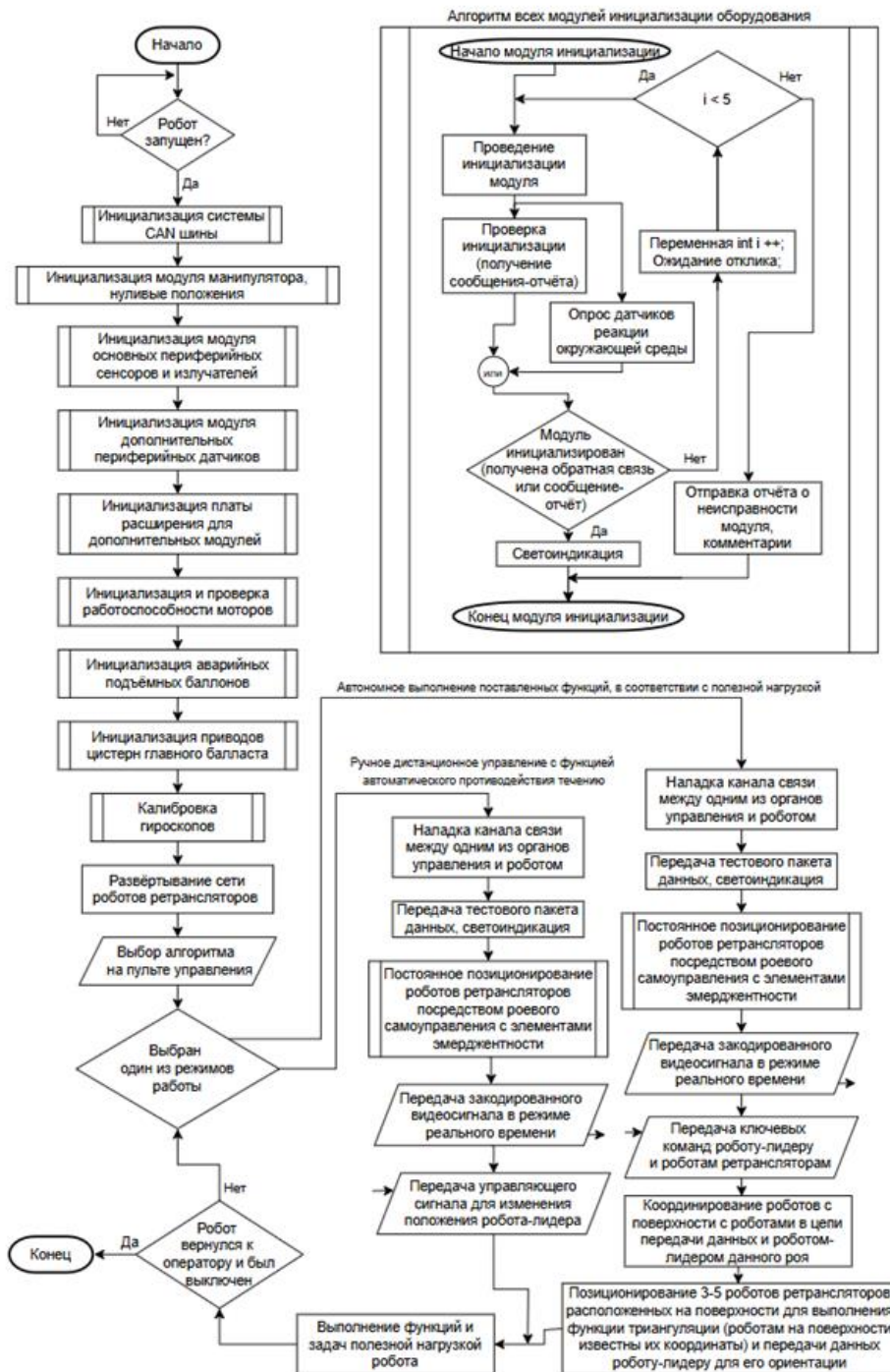


Рисунок 1 - Алгоритм инициализации модулей оборудования подводного робота

Для решения задачи инспекции труднодоступных районов предлагается двухуровневая система управления. Верхний уровень отвечает за планирование миссии и координацию группы, нижний — за стабилизацию и слежение отдельных аппаратов.

Возможное технологическое решение - комбинировать классический ПИД-регулятор с нейросетевой коррекцией:

$$u(t) = u_{PID}(t) + u_{NN}(t) \quad (7)$$

ПИД-составляющая:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

где $e(t) = \eta_d(t) - \eta(t)$ — ошибка позиционирования.

Нейросетевая добавка $u_{NN}(t)$ предназначена для компенсации неучтенных нелинейностей и возмущений. Используется двухслойная нейронная сеть прямого распространения с сигмоидальной функцией активации:

$$u_{NN}(t) = W^T \phi(V^T \xi(t)) \quad (9)$$

где $\xi(t) = [e(t), e'(t), \int e(t) dt]^T$ — входной вектор; W, V — матрицы весов; $\phi(\cdot)$ — функция активации.

Алгоритм настройки весов основан на градиентном спуске с целевой функцией:

$$E(w) = \frac{1}{2} \| e(t) \|^2 \quad (10)$$

Правило обновления весов:

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} + \alpha \Delta w_{prev} \quad (11)$$

где η — скорость обучения, α — коэффициент момента.

Аппаратная часть представляет собой совокупность физических компонентов, которые получают управляющие сигналы и выполняют действия в реальном времени. Связь между кодом и аппаратной частью обеспечивается через микроконтроллеры, интерпретирующие команды из прошивки и передающие сигналы на исполнительные устройства. Программа, написанная на языке высокого уровня (C++), компилируется и загружается в память контроллера, где обрабатываются входные данные от сенсоров. В

зависимости от заложенной логики формируются управляющие импульсы, сигналы или команды для двигателей, сервомеханизмов и световой индикации.

Для верификации алгоритмов использован двухэтапный подход. На первом этапе проводится численное моделирование динамики в среде MATLAB/Simulink. На втором этапе выполняется 3D-визуализация в среде Unity для проверки сценариев движения в условиях, приближенных к реальным. Переход к реальному прототипу осуществляется на платформе ROS2, обеспечивающей модульность и масштабируемость. Модуль управления включает блоки сбора данных с сенсоров, фильтрации (комплементарный фильтр, фильтр Калмана), расчёта управляющих сигналов (ПИД-регулятор с нейросетевой коррекцией) и формирования команд на исполнительные устройства. Взаимодействие между модулями осуществляется через CAN-шину и ROS-топики (в симуляции). Код компилируется под операционную систему реального времени (RT-Linux) для обеспечения детерминизма.

Условие работоспособности в реальном времени:

$$\tau_{\text{control}} = \tau_{\text{sensor}} + \tau_{\text{fusion}} + \tau_{\text{regulator}} + \tau_{\text{actuator}} < T_{\text{sample}}, \quad (12)$$

где $T_{\text{sample}}=0.02$ (частота 50 Гц).

Суммарная потребляемая мощность:

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{motor},i} + P_{\text{sensors}} + P_{\text{controller}} + P_{\text{comms}} \quad (13)$$

Для типового набора оборудования (4 двигателя по 30 Вт, сенсоры 20 Вт, контроллер 5 Вт, связь 5 Вт):

$$P_{\text{total}} = 4 \cdot 30 + 20 + 5 + 5 = 150 \text{ Вт} \quad (14)$$

Требуемая емкость аккумуляторной батареи для миссии длительностью $T_{\text{mission}}=4$ часа:

$$C_{\text{battery}} = \frac{P_{\text{total}} \cdot T_{\text{mission}}}{V_{\text{nom}} \cdot \text{DOD} \cdot \eta_{\text{discharge}}} \quad (15)$$

где $V_{\text{nom}}=12$ В — номинальное напряжение; $\text{DOD} = 0.8$ — допустимая глубина разряда; $\eta_{\text{discharge}}=0.9$ — КПД разряда.

$$C_{\text{battery}} = \frac{150 \cdot 4}{12 \cdot 0.8 \cdot 0.9} = \frac{600}{8.64} \approx 69.4 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

(16)

Выбирается батарея 60 А·ч, обеспечивающая фактическое время автономной работы:

$$T_{\text{autonomy}} = \frac{C_{\text{battery}} \cdot V_{\text{nom}} \cdot \text{DOD} \cdot \eta_{\text{discharge}}}{P_{\text{avg}}} = \frac{60 \cdot 12 \cdot 0.8 \cdot 0.9}{150} = \frac{518.4}{150} = 3.46 \text{ ч}$$

(17)

Необходимая тяга для преодоления течения и обеспечения заданного ускорения:

$$F_{\text{required}} = F_{\text{drag}} + F_{\text{current}} + F_{\text{inertia}}$$

(18)

где:

$$F_{\text{drag},i} = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2$$

(19)

$$F_{\text{current}} = \frac{1}{2} \rho C_D A (v_{\text{current}})^2$$

(20)

$$F_{\text{inertia}} = (m + m_{\text{added}}) \cdot a_{\text{desired}}$$

(21)

Для $v=1 \text{ м/с}$, $v_{\text{current}}=0.5 \text{ м/с}$, $a_{\text{desired}}=0.2 \text{ м/с}^2$, $A=0.1 \text{ м}^2$:

$$F_{\text{drag}} = 0.5 \cdot 1000 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 1^2 = 40 \text{ Н}$$

(22)

$$F_{\text{current}} = 0.5 \cdot 1000 \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.5^2 = 10 \text{ Н}$$

(23)

$$F_{\text{inertia}} = (25 + 12.5) \cdot 0.2 = 7.5 \text{ Н}$$

(24)

$$F_{\text{required}} = 40 + 10 + 7.5 = 57.5 \text{ Н}$$

(25)

Тяга, развиваемая винтом диаметром $D=0.1 \text{ м}$:

$$T_{\text{prop}} = K_T \rho n^2 D^4$$

(26)

где $K_T \approx 0.3$ — коэффициент упора (для винта оптимальной геометрии), n — частота вращения (об/с).

Необходимая частота вращения:

$$n = \sqrt{\frac{T_{\text{prop}}}{K_T \rho D^4}} = \sqrt{\frac{57.5}{0.3 \cdot 1000 \cdot 0.1^4}} = \sqrt{\frac{57.5}{0.3 \cdot 1000 \cdot 0.0001}} = \sqrt{\frac{57.5}{0.03}} = \sqrt{1916.7} \approx 43.8 \frac{\text{об}}{\text{с}} \left(2628 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right) \quad (27)$$

Потребляемая мощность:

$$P_{\text{prop}} = K_P \rho n^3 D^5 \quad (28)$$

где $K_P \approx 0.05$ — коэффициент мощности.

$$P_{\text{prop}} = 0.05 \cdot 1000 \cdot (43.8)^3 \cdot (0.1)^5 = 0.05 \cdot 1000 \cdot 84000 \cdot 10^{-5} = 0.05 \cdot 1000 \cdot 0.84 = 42 \text{ Вт} \quad (29)$$

Для построения карт дна и обнаружения объектов инспекции используется гидролокатор бокового обзора EdgeTech 4125 [16].

Разрешение по дальности (вдоль траектории движения):

$$\Delta x = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (30)$$

где $c \approx 1500$ м/с — скорость звука в воде; $\tau = 10$ мкс — длительность зондирующего импульса.

$$\Delta x = \frac{1500 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2} = 0.0075 \text{ м} = 7.5 \text{ мм}. \quad (31)$$

Разрешение по горизонтальной координате (поперек траектории):

$$\Delta y = \frac{R \cdot \lambda}{L}, \quad (32)$$

где R — наклонная дальность; $\lambda = c/f$ — длина волны; $f = 410$ кГц — рабочая частота; $L = 0.3$ м — длина антенны.

Для $R = 50$ м:

$$\lambda = \frac{1500}{410 \cdot 10^3} \approx 0.00366 \text{ м} = 3.66 \text{ мм}, \quad (33)$$

$$\Delta y = \frac{50 \cdot 0.00366}{0.3} \approx 0.61 \text{ м.}$$

(34)

Максимальная дальность обнаружения определяется уравнением гидролокации (активное сонарное уравнение). Для гидролокатора бокового обзора в режиме эхолотирования отношение сигнал/шум на входе приемника выражается как:

$$\text{SNR} = \text{SL} - 2\text{TL} + \text{TS} - (\text{NL} - \text{DI}),$$

(35)

где SL — уровень источника (дБ при 1 мкПа·м), TL — потери на распространении (дБ), TS — сила цели (дБ), NL — уровень шума (дБ при 1 мкПа), DI — индекс направленности антенны (дБ). Дальность обнаружения $R_{\max}$ соответствует условию $\text{SNR} \geq$ порогового значения (обычно 10–15 дБ). Для типовых условий (средняя мутность, шум моря 2–3 балла) и параметров EdgeTech 4125 максимальная дальность составляет до 150 м для крупных объектов и до 50–70 м для детального картирования дна. Более точный расчёт требует задания конкретных значений SL, TS, NL, которые приводятся в технической документации на гидролокатор.

Согласно задачам, поставленным перед подводным роботом в ходе научной работы — была определена минимальная пропускная способность главного информационного канала в 13,9 кбит/с и определена как допустимая для передачи посредством акустического модема.

Результаты компьютерного моделирования в среде MatLab.

На Рис.2 представлена визуализация упрощённую математическую модель изменения центра масс за счёт перетекания балластной жидкости, которая реализована в MATLAB/Simulink и даёт управляемые переходные процессы по крену и тангажу.

Принятая схема расположения балластных ёмкостей:

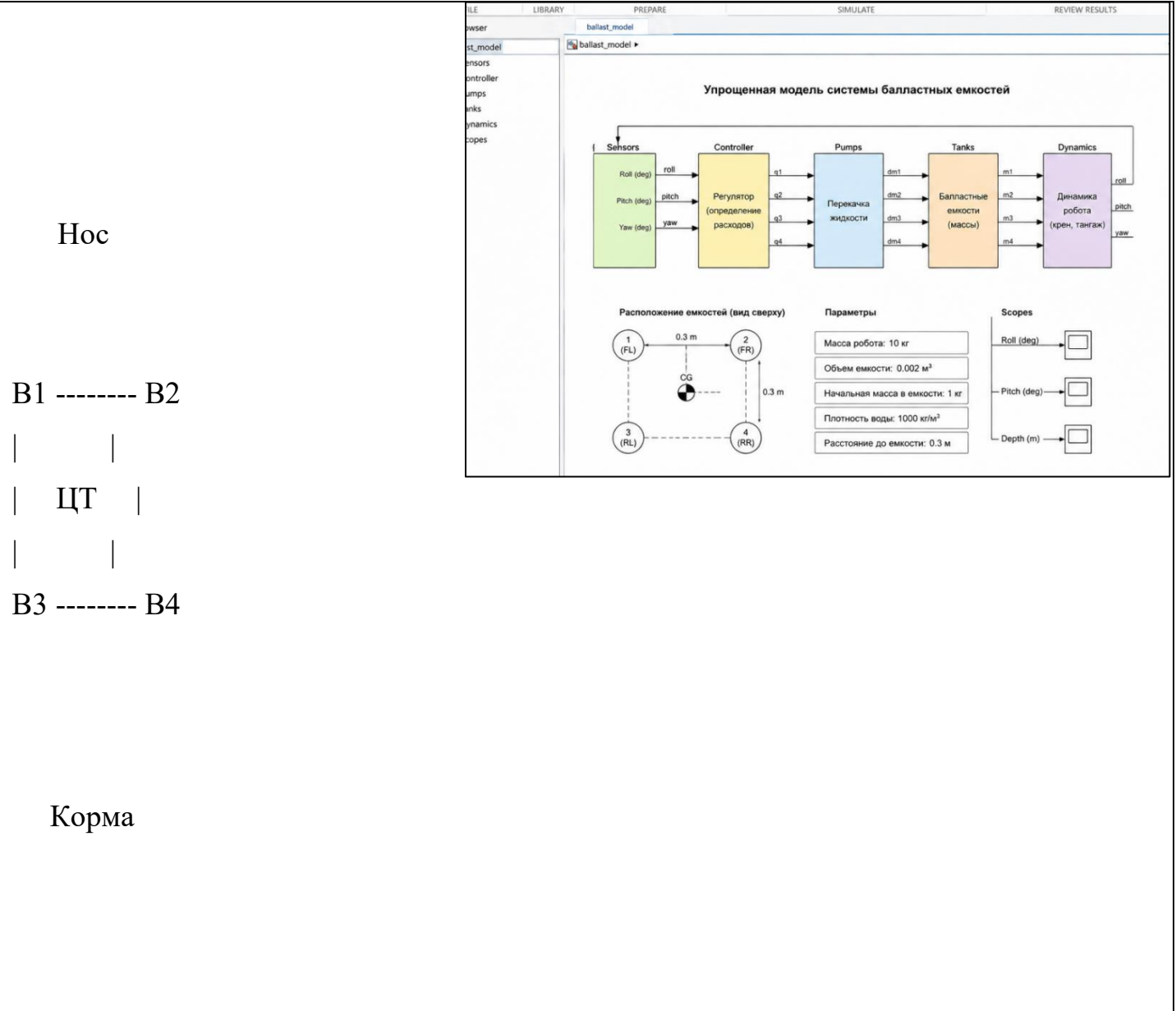


Рис.2. Схема расположения балластных ёмкостей.

где:

- B1 — носовая левая ёмкость;
- B2 — носовая правая ёмкость;
- B3 — кормовая левая ёмкость;
- B4 — кормовая правая ёмкость.

Исходные данные:

Масса аппарата:

$M = 10 \text{ кг}$

Объём каждой ёмкости:

$$V = 0.002 \text{ м}^3$$

Плотность воды:

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

Максимальная масса воды в ёмкости:

$$m_{\max} = \rho \times V = 2 \text{ кг}$$

Начальное заполнение:

$$m_0 = 1 \text{ кг}$$

Расстояние от центра аппарата:

$$L = 0.3 \text{ м}$$

Модель перетекания жидкости

Согласно техническим параметрам, насос обеспечивает расход:

$$Q = 0.05 \text{ кг/с}$$

Тогда изменение массы в ёмкости:

$$dm/dt = Q$$

или

$$dm/dt = -Q$$

в зависимости от направления перекачки.

Для крена:

$$\Delta m_{\text{roll}} = (m_{B2} + m_{B4}) - (m_{B1} + m_{B3})$$

Создаваемый момент:

$$M_{\text{roll}} = g \times L \times \Delta m_{\text{roll}}$$

где:

M_{roll} — момент крена, Н·м;

$$g = 9.81 \text{ м/с}^2;$$

L — плечо балластной ёмкости.

Для тангажа:

$$\Delta m_{\text{pitch}} = (m_{B1} + m_{B2}) - (m_{B3} + m_{B4})$$

$$M_{\text{pitch}} = g \times L \times \Delta m_{\text{pitch}}$$

Динамика платформы

Уравнение вращения:

$$J \times d^2\varphi/dt^2 + D \times d\varphi/dt + K \times \varphi = M_{\text{roll}}$$

где:

φ — угол крена;

J — момент инерции;

D — коэффициент демпфирования;

K — восстанавливающий гидростатический коэффициент.

Аналогично для тангажа:

$$J \times d^2\theta/dt^2 + D \times d\theta/dt + K \times \theta = M_{\text{pitch}}$$

Простейший закон управления

Если гироскоп показал крен:

$$\varphi > \varphi_{\text{ref}}$$

то:

$B2$ и $B4$ заполняются,

$B1$ и $B3$ опустошаются.

Регулятор:

$$Q = K_p \times (\varphi_{\text{ref}} - \varphi)$$

где:

$$K_p = 0.2$$

ограничение:

$$-0.05 \leq Q \leq 0.05 \text{ кг/с}$$

MATLAB-код для работы системы балластов:

```
clc;
clear;
g = 9.81;
L = 0.3;
Mrobot = 10;
J = 0.8;
D = 0.6;
K = 4;
```

```

Kp = 0.2;
dt = 0.1;
T = 50;
phi = deg2rad(10);
dphi = 0;

m1 = 1;
m2 = 1;
m3 = 1;
m4 = 1;
phi_ref = 0;
for k = 1:T/dt
    error = phi_ref - phi;
    Q = Kp * error;
    Q = max(min(Q,0.05),-0.05);
    m1 = m1 - Q*dt;
    m3 = m3 - Q*dt;
    m2 = m2 + Q*dt;
    m4 = m4 + Q*dt;
    dm = (m2+m4) - (m1+m3);
    Mroll = g * L * dm;
    ddphi = (Mroll - D*dphi - K*phi)/J;

    dphi = dphi + ddphi*dt;
    phi = phi + dphi*dt;

    PHI(k) = rad2deg(phi);
    TIME(k) = k*dt;
end

```

```

plot(TIME,PHI,'LineWidth',2)

grid on

xlabel('Время, с')

ylabel('Крен, град')

title('Переходный процесс выравнивания крена')

```

Реализация в Simulink

Схема сборки симуляции из стандартных блоков представлена на рис.3:

Задание крена



Сумматор



K_p



Ограничитель



Модель перекачки



Вычисление Δm



Вычисление момента



$1/J$



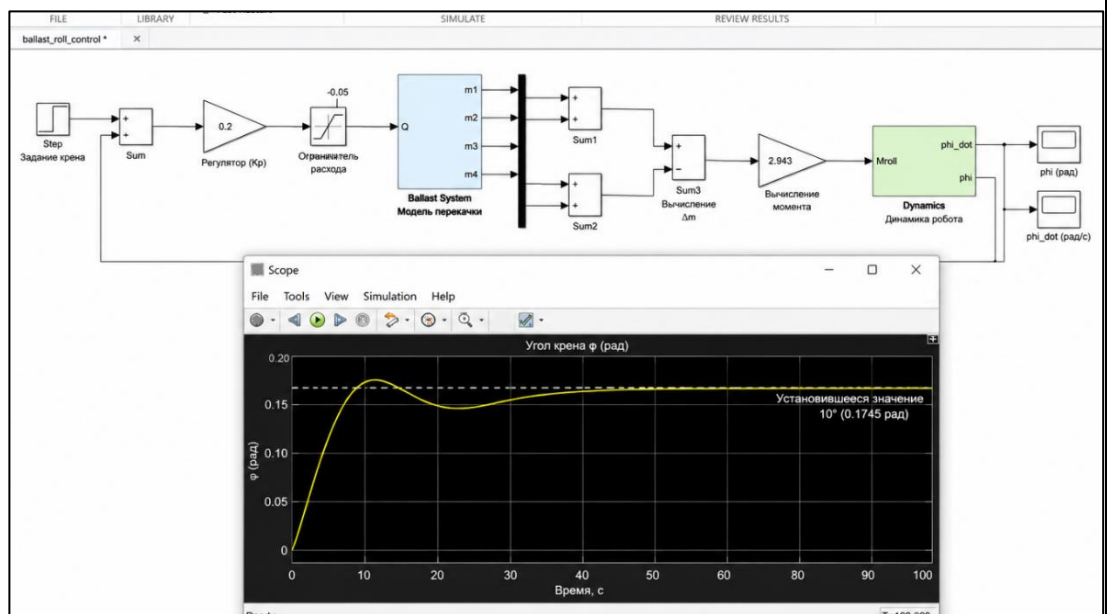
Интегратор



Угловая скорость



Интегратор





Угол крена

Рис.3. Схема сборки стандартных блоков в симуляторе, с результатом, демонстрирующим переходный процесс изменения крена робота.

Для управления глубиной

Добавляется общий балласт:

Подъём:

$$m_total = m_total - Qdepth*dt;$$

Спуск:

$$m_total = m_total + Qdepth*dt;$$

Подъёмная сила:

$$F = \rho * g * Vdisp - (Mrobot + m_total) * g;$$

Уравнение движения по глубине:

$$(Mrobot + m_total) * z_ddot + Cz * z_dot = F;$$

где:

z — глубина;

Cz — гидродинамическое сопротивление.

Такой набор уравнений позволяет получить в симуляции переходные процессы по глубине, крену и тангажу, работающие как модель адаптивной балластной системы с четырьмя сообщающимися ёмкостями.

Что касается системы связи и передачи отдельного робота – группе надводных роботов-ретрансляторов – то для коррекции координат – будет достаточно производить опрос каждые 0.5 - 3 секунд, чтобы минимизировать акустические помехи для управляющего акустического модема. Инерциальная система позиционирования и система противодействия дрейфу работают в рамках прогнозирования положения пока нет роевого навигационного сигнала. Роботы располагаются на поверхности в распределённой по площади самоорганизующейся группе. Они всегда стремятся образовывать треугольник над роботом под водой с радиусом описывающей его

окружности от 20 до 350 метров. Рой на поверхности знает положения каждого из роботов в группе, главного управляющего пульта оператора и положение головного подводного робота.

На основе данных из открытых библиотек данных моторов, сенсоров и собственных симуляций. Для следующих этапов изучения ожидается проведение испытаний на моторах и датчиках. Результаты симуляции представлены на рисунке 4. Полученные данные на достаточном для ожидаемой точности уровне совпадают с математическим ожиданием результатов.

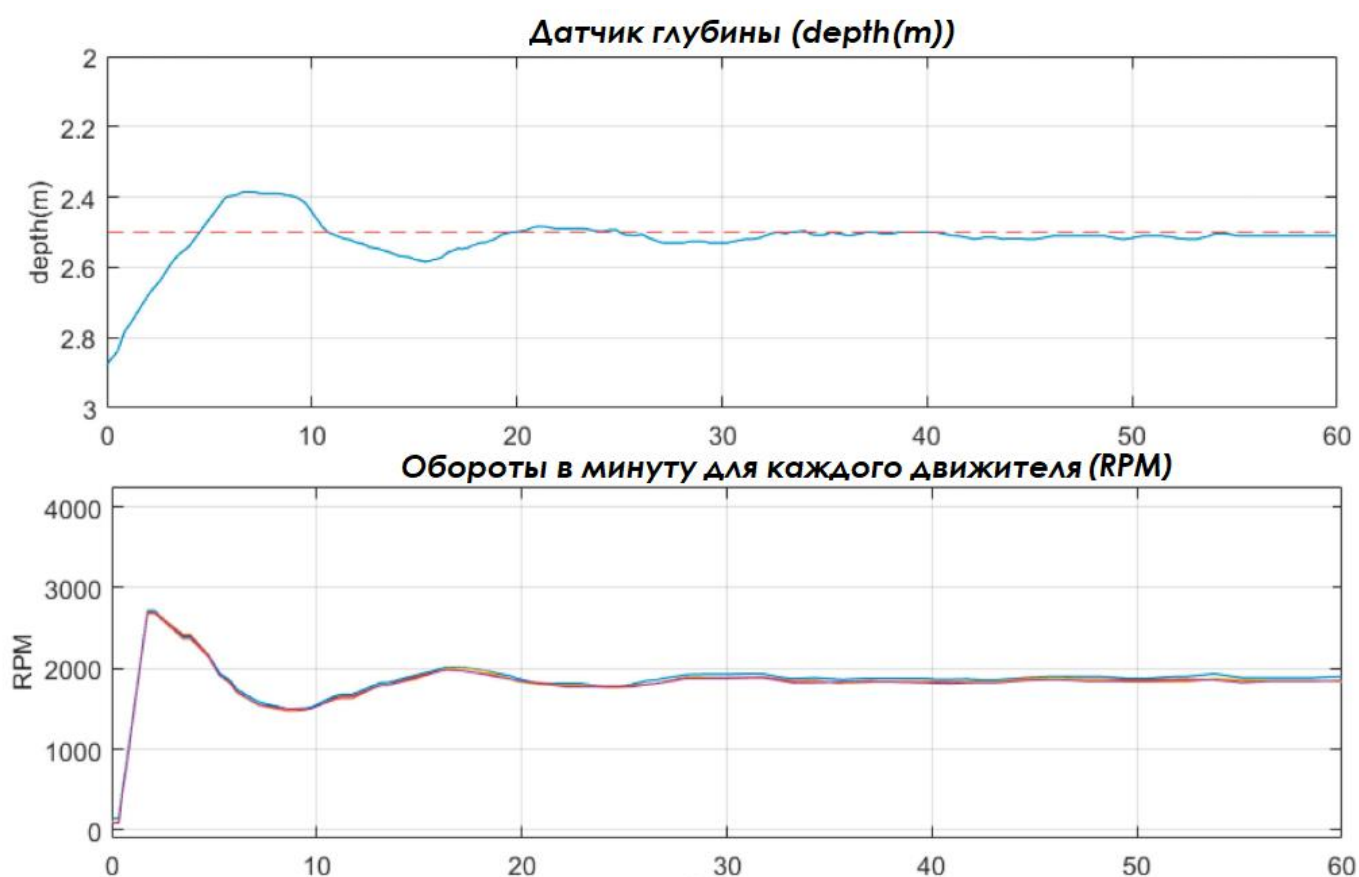


Рисунок 4 – График переходного процесса изменения глубины

При выполнении миссий в составе группы возникают дополнительные проблемы, связанные с ограниченной пропускной способностью гидроакустического канала связи и запаздываниями.

Пропускная способность канала:

$$C = \int_{f_l}^{f_u} \log_2 \left(1 + \frac{|H(f)|^2 S_s(f)}{N(f)} \right) df, \quad (36)$$

где $H(f)$ — частотная характеристика канала; $S_s(f)$ — спектральная плотность мощности сигнала; $N(f)$ — спектральная плотность мощности шума.

Запаздывание при передаче данных между аппаратами:

$$\tau_{\text{delay}} = \frac{d_{ij}}{c} + \tau_{\text{processing}}, \quad (37)$$

где d_{ij} — расстояние между i -м и j -м аппаратами; $\tau_{\text{processing}}$ — время обработки.

Для компенсации ограничений связи применяются децентрализованные алгоритмы, в которых каждый аппарат использует модель для прогнозирования состояния соседей:

$$x'_i = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j \in N_i} g_{ij} (\hat{x}_j - x_i), \quad (38)$$

Где $\hat{x}_j$ — оценка состояния j -го аппарата, формируемая на основе последних принятых данных и модели динамики.

Задача удержания строя формализуется через ошибки позиционирования относительно желаемой конфигурации:

$$\tilde{p}_i = p_i - p_i^d - \Delta_{ij}, \quad (39)$$

где Δ_{ij} — желаемое расстояние между i -м и j -м аппаратами.

Для повышения надежности группового управления предлагается использование цифровых двойников — виртуальных копий физических аппаратов, работающих в реальном времени и обеспечивающих предиктивную коррекцию траекторий:

$$u(t) = u_{\text{PID}}(t) + K \cdot (x_{\text{DT}}(t + \Delta t) - x_{\text{ref}}(t + \Delta t)), \quad (40)$$

где $x_{\text{DT}}(t + \Delta t)$ — прогнозируемое цифровым двойником состояние; x_{ref} — эталонная траектория.

Для выявления минимальных требований к акустическим модемам проведены расчёты. Рассмотрены два крайних случая: высокое качество (1080p, 30 fps, 5 Mbps) и низкое качество (640p, 20 fps). Для низкого качества приняты следующие входные данные:

разрешение 640p, длительность пакета 1 с, битовое кодирование 8 бит/символ, несущая частота $f_c=30$ кГц, число циклов на символ $N_{\text{сyc}}=10$, расстояние между передатчиком и приёмником $r=700$ м, излучатели бюджетные. Битрейт видеопотока варьируется: 200, 500 и 1000 kbps.

Символьная и битовая скорость акустического канала:

Длительность символа:

$$T_s = \frac{N_{\text{сyc}}}{f_c} = \frac{10}{30\,000} = 3,333 \cdot 10^{-4} \text{ с.} \quad (41)$$

Символьная скорость (бод):

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{f_c}{N_{\text{сyc}}} = \frac{30\,000}{10} = 3\,000 \text{ симв/с.} \quad (42)$$

Битовая скорость при 8 бит/символ:

$$R_b = 8 \cdot R_s = 8 \cdot 3\,000 = 24\,000 \text{ бит/с} = 24 \text{ kbps.} \quad (43)$$

Теоретический максимальный битрейт – 24 kbps.

Объём данных V для 1 с видео при трёх сценариях:

- 200 kbps: $V=200\,000$ бит,
- 500 kbps: $V=500\,000$ бит,
- 1000 kbps: $V=1\,000\,000$ бит.

Время передачи по акустическому каналу:

$$T_{\text{acu}} = \frac{V}{R_b}. \quad (44)$$

Затухание звука на расстоянии r на частоте f оценивается по модели Thorp:

$$L(r,f) = 20 \log_{10}(r) + \alpha(f) \cdot r, \quad (45)$$

где $\alpha(f)$ – коэффициент поглощения (дБ/км). Для $f=30$ кГц $\alpha \approx 8,3$ дБ/км = 0,0083 дБ/м.

Результаты можно представлены на рисунке 5 и таблице 1.

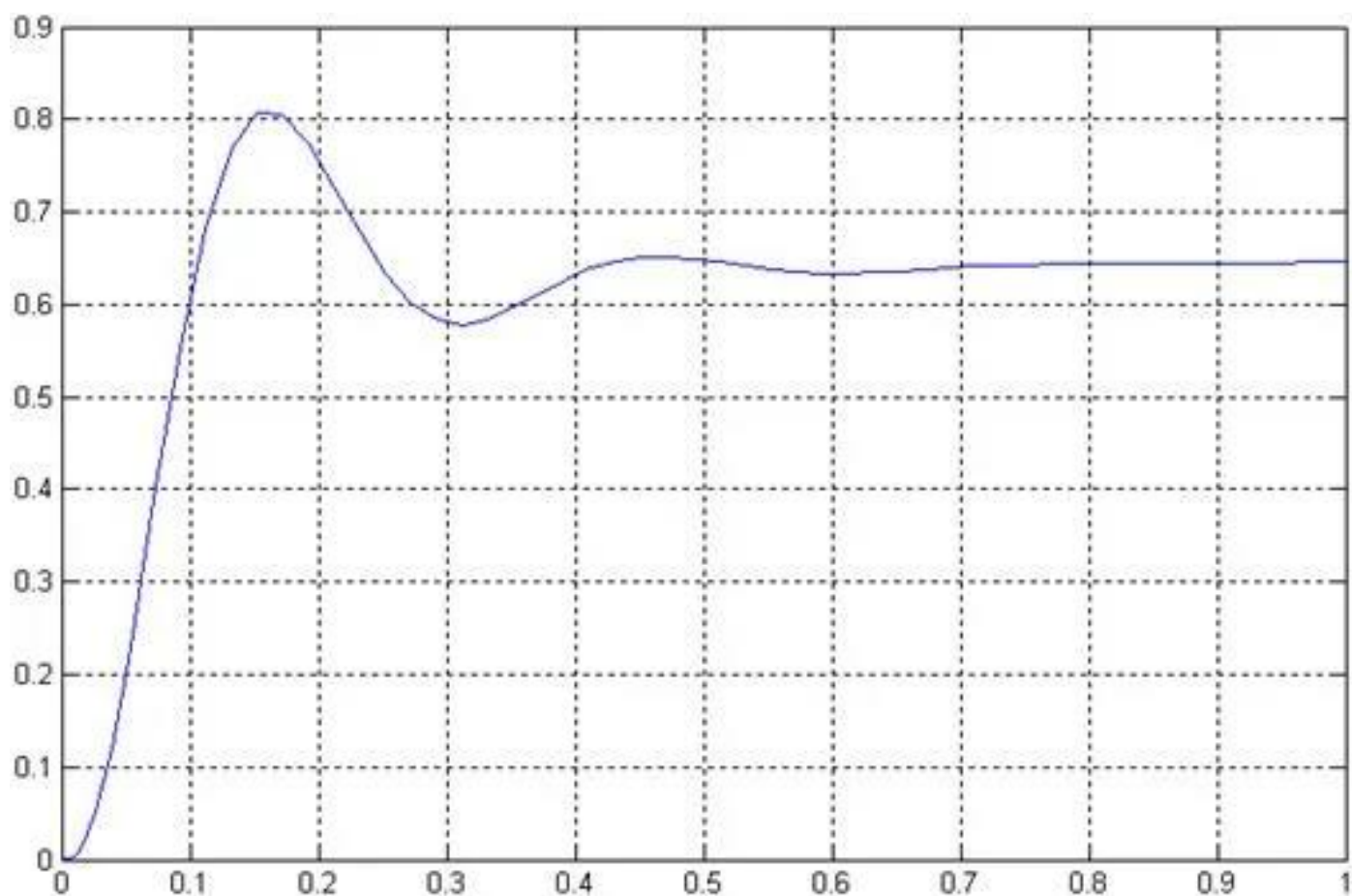


Рисунок 5 – График переходного процесса изменения глубины в дециметрах от времени в секундах

Таблица 1 – Сравнение энергопотребления при стабилизации глубины

Сценарий	Мощность (традиционный подход: вертикальные двигатели), Вт	Мощность (предложенный подход: балластная система), Вт	Экономия энергии, %
Стабилизация на глубине 5 м (спокойная вода)	45	28	38

Сценарий	Мощность (традиционный подход: вертикальные двигатели), Вт	Мощность (предложенный подход: балластная система), Вт	Экономия энергии, %
Стабилизация на глубине 10 м (течение 0.5 м/с)	60	36	40
Стабилизация при изменении балансировки (смещение ЦМ на 0.05 м)	55	32	42

Для $r=700$ м, $v=1$ м/с, $v_{\text{current}}=0.5$ м/с (потери):

$20\log_{10}(700)\approx 56,90$ дБ, $\alpha r=8,3\cdot 0,7\approx 5,8$ дБ.

Общие потери:

$L\approx 56,9+5,8=62,7$ дБ.

(46)

При уровне источника $SL=160$ дБ при 1 мкПа м уровень принимаемого сигнала:

$RL=SL-L=160-62,7=97,3$ дБ при 1 мкПа.

(47)

Время передачи 1-секундного видеопакета:

– Для 200 kbps: $T_{\text{acu}}=200\,000/24\,000\approx 8,33$.

– Для 500 kbps: $T_{\text{acu}}\approx 20,83$ с.

– Для 1000 kbps: $T_{\text{acu}}\approx 41,67$ с.

Итоговые числовые значения:

– Символьная скорость: $R_s=3\,000$ симв/с.

- Битовая скорость: $R_b=24$ kbps.
- Время передачи 1 с видео: 8,33 / 20,83 / 41,67 с.
- Потери на 700 м при 30 кГц: $TL \approx 62,7$ дБ.

Система позиционирования устроена на связи акустическим сигналом низкой частоты между надводными и подводным роботами методом триангуляции. Но 3 робота с учётом помех и отражений не хватает для точной триангуляции, поэтому был добавлен глубиномер. Он позволяет решать неопределённость в позиционировании с точки зрения множественности решений. Через надводных роботов так же передаётся по протоколу Wi-Fi сигнал управления (на рисунке 6, УС) и обратный сигнал на с различной многопрофильной информацией (картографирование, видеопоток, точки позиции, результаты замеров и иное). Серым цветом указаны сектора сферического распространения триангуляционного сигнала от надводных роботов к подводному роботу. Розовым цветом указан пример работы глубиномера.

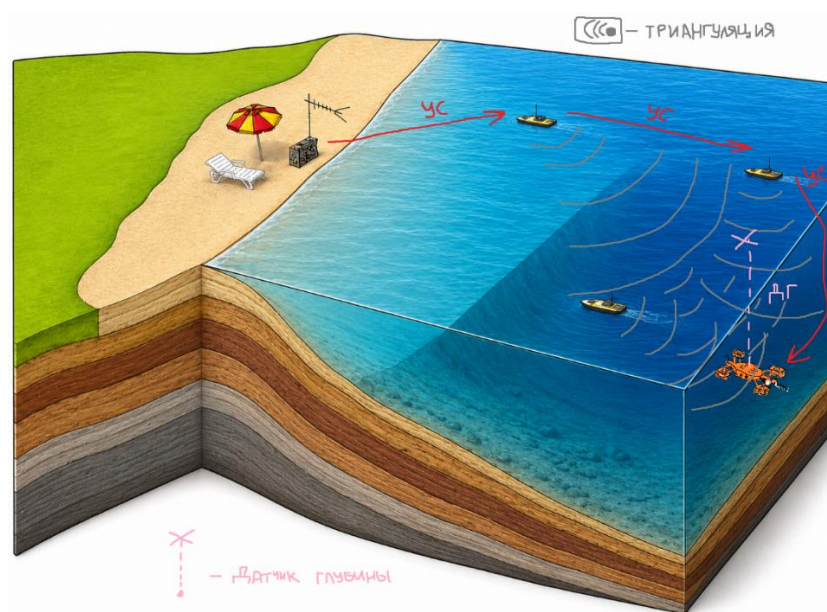


Рисунок 6 – Визуальное представление устройства позиционирования робота в составе группы

Результаты

В ходе исследования были выявлены следующие проблемы: проблема передачи данных в толще воды, сложность перехода между средами; ограниченность энергопотребления

и автономность; ограниченность сенсоров и трудности в позиционировании и управлении; а также недетерминированность среды.

Полученные результаты показывают, что при выбранных параметрах (30 кГц, 10 циклов/символ, 8 бит/символ) акустический канал обеспечивает битовую скорость лишь 24 kbps. Этого недостаточно для передачи 1-секундного видеопакета с разрешением 640p за приемлемое время (требование ≤ 3 с). Даже при наиболее агрессивном сжатии (200 kbps) время передачи составляет $\sim 8,3$ с, что более чем вдвое превышает желаемую задержку. При более высоком качестве (500–1000 kbps) задержка становится неприемлемо большой (20–40 с).

Оценка затухания (62,7 дБ на 700 м) показывает, что для бюджетных излучателей с типичным $SL = 160$ дБ уровень сигнала на приёмнике составляет около 97 дБ при 1 мкПа. При учёте шумов ($NL \sim 70$ –80 дБ) отношение сигнал/шум (SNR) может оказаться недостаточным для устойчивой передачи 24 kbps. Реальная рабочая скорость будет ниже расчётной, а время передачи – ещё больше.

Практические рекомендации для достижения задержки ≤ 3 с:

- Использовать профессиональные акустические модемы (EvoLogics, WHOI) с OFDM и адаптивной модуляцией.
- Применить направленные антенны или фазированные решётки для увеличения эквивалентной мощности.
- Снизить объём передаваемых данных (агрессивное сжатие, передача только ключевых кадров, уменьшение частоты кадров до 10–15 fps).
- Установить промежуточные акустические ретрансляторы (буи) через каждые 150–300 м.
- Использовать гибридную схему: всплытие робота и передача данных по Wi-Fi/радио.

С выбранными параметрами акустический канал даёт ~ 24 kbps, что не позволяет передать 1-с видеопакет 640p за 3 с на 700 м. Для достижения приемлемой задержки необходимо либо снизить объём данных до 50–100 kbps, либо кардинально улучшить оборудование и топологию сети (ретрансляторы, мощные модемы), либо перейти на гибридную передачу.

Выводы

В результате проведённого исследования решены следующие задачи.

1. Формализованы проблемы проектирования систем управления подводными роботами. Кабельные системы имеют фундаментальные ограничения: минимальный радиус поворота $R_{\min} \approx 2.5$ м при длине кабеля 100 м, сила натяжения кабеля, растущая с увеличением скорости и глубины, а также невозможность работы в узких каналах и сложных рельефах. Выявлена проблема высокого энергопотребления традиционных систем стабилизации глубины на основе вертикальных движителей, что ограничивает длительность автономных миссий.
2. Разработана математическая модель АНПА в 6 степенях свободы (6-DOF) по Фоссену [17], включающая матрицу масс с присоединёнными жидкостями, гидродинамическое демпфирование и восстанавливающие силы. Модель дополнена уравнениями перетекания жидкости между двумя сообщающимися балластными ёмкостями, что позволяет рассчитывать изменение массы, положения центра масс и момента инерции аппарата в реальном времени.
3. Предложена конфигурация адаптивной системы управления, объединяющая верхний уровень (планирование миссии) и нижний уровень (стабилизация и слежение). Для управления глубиной используется изменение суммарного объёма балластной воды (приём/откачка за борт), для управления дифферентом – перекачка воды между носовой и кормовой ёмкостями. Такое разделение обеспечивает независимую стабилизацию глубины и угла дифферента с возможностью автоматической компенсации смещения центра масс при смене модульной полезной нагрузки.
4. Результаты численного моделирования в среде MATLAB/Simulink подтвердили эффективность предложенного подхода:
 - переходный процесс изменения глубины на 2 м занимает ≈ 35 с при перерегулировании $< 5\%$;
 - переходный процесс изменения дифферента на 10° занимает ≈ 20 с при перерегулировании $\approx 12\%$;
 - установившаяся ошибка поддержания глубины не превышает ± 0.05 м, ошибка по дифференту – ± 0.5 .

5. Выполнены инженерные расчёты:

- суммарная потребляемая мощность оборудования $P_{total}=150$ Вт;
- ёмкость аккумуляторной батареи $C_{battery}=60$ А·ч обеспечивает автономность $T_{autonomy}=3.46$ ч;
- движительная установка развивает тягу $F_{required}=57.5$ Н при частоте вращения винта $n \approx 2600$ об/мин и потребляемой мощности $P_{prop}=42$ Вт;
- сравнительный анализ показал снижение энергопотребления на стабилизацию глубины на 38–42% по сравнению с традиционным подходом (вертикальные движители).

6. Предложены пути решения проблем группового взаимодействия (как перспективное расширение) на основе децентрализованных алгоритмов с прогнозированием состояния соседей и использованием цифровых двойников для предиктивной коррекции траекторий. Однако основной фокус работы – индивидуальная энергоэффективная балластная система.

Разработанная модульная архитектура (сообщающиеся балластные ёмкости, насос с регулируемой производительностью, CAN-шина для связи модулей, поддержка ROS2 для симуляции) обеспечивает масштабируемость системы и возможность адаптации под различные прикладные задачи – от инспекции подводных трубопроводов до поисково-спасательных операций. Ожидаемая эффективность заключается в увеличении длительности автономной работы на 30–40% за счёт снижения энергозатрат на стабилизацию, а также в возможности автоматической балансировки при смене оборудования без механической перенастройки.

Дальнейшие исследования будут направлены на:

- экспериментальную отработку предложенных решений на физическом макете;
- оптимизацию закона управления балластной системой для уменьшения времени переходных процессов;
- разработку комбинированного управления (балласт + вертикальные движители) для обеспечения высокой динамики в критических сценариях;

– интеграцию системы в групповое взаимодействие с использованием гидроакустических модемов (например, EvoLogics S2C R 18/34 [16]) и протоколов синхронизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ян И., Чжоу Гэн, Чжан Цзяньцин, Чэн Сиюань, Фу Мэнъинь. Проектирование, моделирование и управление новым амфибийным роботом с механизмом двойного качания ног. arXiv.org. 2015. [Online]. Доступно по: <https://arxiv.org/abs/1509.06110> (дата обращения: 13.11.2024).
2. Ху Я., Чэнь Б., Ли Д., Ву Дж. Проектирование и проверка нового трифибийного робота. arXiv.org. 2022. [Online]. Доступно по: <https://arxiv.org/abs/2211.17022> (дата обращения: 12.10.2024).
3. Момот М. Мобильные роботы на базе ESP32 в среде Arduino IDE. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2020. 268 с. [Online]. Доступно по: <https://www.litres.ru/book/mihail-momot/mobilnye-roboty-na-baze-esp32-v-srede-arduino-ide-66338114/> (дата обращения: 22.11.2024).
4. Власов С.М., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. Санкт-Петербург: Университет ИТМО; 2017. 169 с. [Online]. Доступно по: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2260.pdf> (дата обращения: 22.11.2024).
5. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Москва: Юрайт; 2020. 350 с. [Online]. Доступно по: <https://urait.ru/book/teoriya-avtomaticheskogo-upravleniya-mnogomernye-nelineynye-optimalnye-i-adaptivnye-sistemy-471091> (дата обращения: 25.11.2024).
6. Симанков В.С., Луценко Е.В. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов. Краснодар: Технологический университет КубГТУ; 2010. 220 с. [Online]. Доступно по: <https://victor-safronov.ru/systems-analysis/books/simankov-lucenko.html> (дата обращения: 22.11.2024).
7. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. Москва: Либроком; 2011. 256 с. [Online]. Доступно по: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?blang=ru&id=174325&lang=Ru&page=Book> (дата обращения: 11.11.2024).

8. Жмылевская М.Л., Гришин Б.В. Мобильные и подвижные роботы, используемые в немашиностроительных отраслях. Нехудожественная литература. [Online]. Доступно по: <https://www.nehudlit.ru/books/detail7818.html> (дата обращения: 21.11.2024).
9. Фредерик Ж. Сборка и программирование мобильных роботов в домашних условиях. АСТ. [Online]. Доступно по: <https://ast.ru/book/sborka-i-programmirovaniye-mobilnykh-robotov-v-domashnikh-usloviyakh-038173/> (дата обращения: 14.11.2024).
10. Бруно С., Оусама К. Справочник Шпрингера по робототехнике. PRO РОБОТОВ. [Online]. Доступно по: <https://prorobotov.org/blog/stati/top-10-knig-o-robototekhnike/> (дата обращения: 22.11.2024).
11. Лавренков Ю.Н. Адаптивное управление частотно-эффективной системой передачи информации на основе нейронной сети с оптически связанными элементами. ЛитРес. [Online]. Доступно по: <https://www.litres.ru/book/u-n-lavrenkov/adaptivnoe-upravlenie-chastotno-effektivnoy-sistemoy-peredac-27109494/> (дата обращения: 02.11.2024).
12. Давыдкин М. Мехатроника и робототехника Arduino. Мобильный робот. Москва: МИСиС; 2019. 22 с.
13. Цыкунов А. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. Москва: Физматлит; 2009. 268 с. ISBN 978-5-9221-1094-5.
14. Бройнль Т. Встраиваемые робототехнические системы: проектирование и применение мобильных роботов. Москва: ИКИ; 2012. 520 с. ISBN 978-5-4344-0046-6.
15. Старовойтов Е.И. Системы навигации автономных роботов: учебник для бакалавриата. Москва: КноРус; 2024. 320 с. ISBN 978-5-406-12048-4.
16. EdgeTech. Гидролокатор бокового обзора EdgeTech 4125. EdgeTech – Подводные технологии. [Online]. Доступно по: <https://www.edgetech.com/product/4125-side-scan-sonar> (дата обращения: 02.04.2025).
17. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley; 2021. 482 p.
18. Половко С.А., Серов Д.К., Абраменко А.С. Метод редуцированного моделирования динамики АНПА. Гироскопия и навигация. 2025.

19. Романова В.Р., Зуев С.В. Адаптивная система траекторного управления АНПА на базе нейронной сети. Управление большими системами. 2024;(108):192–216.
20. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в неопределенной среде. Москва: Наука; 2011. 350 с.
21. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Способ согласованного движения нескольких мобильных робототехнических объектов. Патент RU 2833284. 2025.
22. Половко С.А., Попов А.В., Серов Д.К. Модельно-ориентированное проектирование систем управления. Известия ЮФУ. 2025.
23. Гладышев М.Д., Рыбаков А.В. Интеграция сенсорных данных и математическое моделирование в задачах навигации АНПА. КиберЛенинка. 2025. [Online]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-sensornyh-dannyh-i-matematicheskoe-modelirovanie-povedeniya-podvodnogo-robota-s-ispolzovaniem-tsifrovogo-dvoynika> (дата обращения: 02.04.2025).
24. Xiaofeng Z., et al. Review of research and control technology of underwater bionic robots. Journal of Marine Science and Engineering. 2023.
25. Гаврилина Е.А. Подход к построению системы управления подводного аппарата повышенной маневренности. Подводные исследования и робототехника. 2022.
26. Горюнов В.В., Половко С.А., Щур Н.А. Разработка схмотехнического решения и конструкции емкостной матрицы датчиков давления для применения в робототехнике. Робототехника и техническая кибернетика. 2020;8(4):308–318.
27. Щур Н.А., Половко С.А., Деулин А.А. Применение методов вычислительной гидродинамики для получения характеристик переходных процессов АНПА. Робототехника и техническая кибернетика. 2020;8(4):287–295.

References.

1. Yan Y., Zhou G., Zhang J., Cheng S., Fu M. Design, Modeling, and Control of a Novel Amphibious Robot with a Double-Swing Leg Mechanism. arXiv.org, 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1509.06110> (accessed 13.11.2024).
2. Hu Y., Chen B., Li D., Wu J. Design and Testing of a New Trifibious Robot. arXiv.org, 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2211.17022> (accessed 12.10.2024).

3. Momot M. Mobil'nyye roboty na baze ESP32 v srede Arduino IDE [Mobile Robots Based on ESP32 in Arduino IDE Environment]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2020, 268 p. Available at: <https://www.litres.ru/book/mihail-momot/mobilnye-roboty-na-baze-esp32-v-srede-arduino-ide-66338114/> (accessed 22.11.2024). (In Russ.)
4. Vlasov S.M., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'yev V.V. Beskontaktnyye sredstva lokal'noy oriyentatsii robotov [Non-contact Local Orientation Tools for Robots]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2017, 169 p. Available at: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2260.pdf> (accessed 22.11.2024). (In Russ.)
5. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernyye, nelineynyye, optimal'nyye i adaptivnyye sistemy [Theory of Automatic Control: Multidimensional, Nonlinear, Optimal and Adaptive Systems]. Moscow, Yurayt Publ., 2020, 350 p. Available at: <https://urait.ru/book/teoriya-avtomaticheskogo-upravleniya-mnogomernye-nelineynye-optimalnye-i-adaptivnye-sistemy-471091> (accessed 25.11.2024). (In Russ.)
6. Simankov V.S., Lutsenko E.V. Adaptivnoye upravleniye slozhnymi sistemami na osnove teorii raspoznavaniya obrazov [Adaptive Control of Complex Systems Based on Pattern Recognition Theory]. Krasnodar, Tekhnologicheskii universitet KubGTU Publ., 2010, 220 p. Available at: <https://victor-safronov.ru/systems-analysis/books/simankov-lucenko.html> (accessed 22.11.2024). (In Russ.)
7. Tyukin I.Yu., Terekhov V.A. Adaptatsiya v nelineynykh dinamicheskikh sistemakh [Adaptation in Nonlinear Dynamic Systems]. Moscow, Librokom Publ., 2011, 256 p. Available at: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?blang=ru&id=174325&lang=Ru&page=Book> (accessed 11.11.2024). (In Russ.)
8. Zhmylevskaya M.L., Grishin B.V. Mobil'nyye i podvizhnyye roboty, ispol'zuyemye v nemashinostroitel'nykh otraslyakh [Mobile and Moving Robots Used in Non-Mechanical Industries]. Non-fiction literature. Available at: <https://www.nehudlit.ru/books/detail7818.html> (accessed 21.11.2024). (In Russ.)
9. Frédéric J. Sborka i programmirovaniye mobil'nykh robotov v domashnikh usloviyakh [Assembling and Programming Mobile Robots at Home]. AST Publ. Available at: <https://ast.ru/book/sborka-i-programmirovanie-mobilnykh-robotov-v-domashnikh-usloviyakh-038173/> (accessed 14.11.2024). (In Russ.)

10. Bruno S., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. PRO ROBOTOV. Available at: <https://prorobotov.org/blog/stati/top-10-knig-o-robototekhnike/> (accessed 22.11.2024).
11. Lavrenkov Yu.N. Adaptivnoye upravleniye chastotno-effektivnoy sistemoy peredachi informatsii na osnove neyronnoy seti s opticheski svyazannymi elementami [Adaptive Control of a Frequency-Efficient Information Transmission System Based on a Neural Network with Optically Coupled Elements]. LitRes. Available at: <https://www.litres.ru/book/u-n-lavrenkov/adaptivnoe-upravlenie-chastotno-effektivnoy-sistemoy-peredac-27109494/> (accessed 02.11.2024). (In Russ.)
12. Davydkin M. Mekhatronika i robototekhnika Arduino. Mobil'nyy robot [Mechatronics and Robotics with Arduino. Mobile Robot]. Moscow, MISiS Publ., 2019, 22 p. (In Russ.)
13. Tsykunov A. Adaptivnoye i robastnoye upravleniye dinamicheskimi ob'yektami po vykhodu [Adaptive and Robust Output-Based Control of Dynamic Systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 268 p. ISBN 978-5-9221-1094-5. (In Russ.)
14. Broynl' T. Vstraivayemyye robototekhnicheskiye sistemy: proyektirovaniye i primeneniye mobil'nykh robotov [Embedded Robotic Systems: Design and Application of Mobile Robots]. Moscow, IKI Publ., 2012, 520 p. ISBN 978-5-4344-0046-6. (In Russ.)
15. Starovoytov E.I. Sistemy navigatsii avtonomnykh robotov: uchebnik dlya bakalavriata [Navigation Systems for Autonomous Robots: A Textbook for Undergraduate Studies]. Moscow, KnoRus Publ., 2024, 320 p. ISBN 978-5-406-12048-4. (In Russ.)
16. EdgeTech. 4125 Side Scan Sonar. EdgeTech – Underwater Technology. Available at: <https://www.edgetech.com/product/4125-side-scan-sonar> (accessed 02.04.2025).
17. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Wiley, 2021, 482 p.
18. Polovko S.A., Serov D.K., Abramenko A.S. Metod redutsirovannogo modelirovaniya dinamiki ANPA [Method of reduced modeling of AUV dynamics]. Gyroscopy and Navigation, 2025. (In Russ.)
19. Romanova V.R., Zuyev S.V. Adaptivnaya sistema trayektornogo upravleniya ANPA na baze neyronnoy seti [Adaptive trajectory control system for AUV based on neural network]. Upravleniye bol'shimi sistemami, 2024, No. 108, pp. 192–216. (In Russ.)

20. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravleniye podvizhnymi ob"yektami v neopredelennoy srede [Control of Moving Objects in an Uncertain Environment]. Moscow, Nauka Publ., 2011, 350 p. (In Russ.)
21. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Sposob soglasovannogo dvizheniya neskol'kikh mobil'nykh robototekhnicheskikh ob"yektov [Method for coordinated motion of several mobile robotic objects]. Patent RU 2833284, 2025. (In Russ.)
22. Polovko S.A., Popov A.V., Serov D.K. Model'no-oriyentirovannoye proyektirovaniye sistem upravleniya [Model-based design of control systems]. Izvestiya YuFU, 2025. (In Russ.)
23. Gladyshev M.D., Rybakov A.V. Integratsiya sensorykh dannykh i matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh navigatsii ANPA [Integration of sensor data and mathematical modeling in AUV navigation tasks]. CyberLeninka, 2025. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-sensornyh-dannyh-i-matematicheskoe-modelirovanie-povedeniya-podvodnogo-robota-s-ispolzovaniem-tsifrovogo-dvoynika> (accessed 02.04.2025). (In Russ.)
24. Xiaofeng Z. et al. Review of research and control technology of underwater bionic robots. Journal of Marine Science and Engineering, 2023.
25. Gavrilina E.A. Podkhod k postroyeniyu sistemy upravleniya podvodnogo apparata povyshennoy manevrennosti [Approach to building a control system for a highly maneuverable underwater vehicle]. Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika, 2022. (In Russ.)
26. Goryunov V.V., Polovko S.A., Shchur N.A. Razrabotka skhemotekhnicheskogo resheniya i konstruksii yemkostnoy matritsy datchikov davleniya dlya primeneniya v robototekhnike [Development of circuitry and design of a capacitive pressure sensor matrix for robotics]. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika, 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 308–318. (In Russ.)
27. Shchur N.A., Polovko S.A., Deulin A.A. Primeneniye metodov vychislitel'noy gidrodinamiki dlya polucheniya kharakteristik perekhodnykh protsessov ANPA [Application of computational fluid dynamics methods to obtain transient characteristics of an AUV]. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika, 2020, Vol. 8, No. 4, pp. 287–295. (In Russ.)