УДК 551.46.077:629.584

10.25808/24094609.2019.29.3.001

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТНПА ПОВЫШЕННОЙ МАНЕВРЕННОСТИ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ОСТОЙЧИВОСТИ

А.Ю. Быканова, В.В. Костенко, В.А. Стороженко, А.Ю. Толстоногов Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Представлены результаты разработки телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с автономным источником питания и оптическим кабелем связи, способного совершать пространственные движения и зависания с произвольными углами крена. Управление углом крена осуществляется не только управляющим моментом движительной системы, но и путем регулирования остойчивости аппарата за счет изменения положения центра объема и центра масс в поперечной плоскости. В алгоритмах управления пространственным движением аппарата с предельными углами крена используется математическая модель с кватернионами состояния. Основные технические решения апробированы в процессе разработки и бассейновых испытаний телеуправляемого подводного аппарата «Сокол тысячелетия» при подготовке его к соревнованиям по подводной робототехнике «Аквароботех-2018».

введение

При создании телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) предусматривается, как правило, такой момент остойчивости, который обеспечивает «естественную» стабилизацию углов крена и дифферента в условиях внешних возмущений среды и кабеля связи. При этом управляющие моменты, создаваемые движительно-рулевым комплексом, служат для качественной стабилизации нулевых отклонений углового положения аппарата от вертикали при динамическом характере возмущений.

Однако существует достаточно широкий круг подводно-технических работ, требующих пространственного маневрирования ТНПА в диапазоне углов крена и дифферента ±90°. К таким работам можно отнести следующее:

• маневрирование в условиях ограниченного пространства при обследовании подводных тоннелей и пещер, прохождение через люки и т.п. [1–3];

 стыковка аппарата с подводными объектами, произвольно ориентированными в пространстве (комингс площадки, донные причальные станции, объекты подводных добычных комплексов и т.п.);

• видеосъемка, лазерное и гидроакустическое сканирование подводных технических сооружений;

 осмотр и дефектоскопия трубопроводов, корпусов судов, а также их винторулевой группы и других механизмов; • проведение противоминных операций на охраняемых акваториях.

Управление движением подводного аппарата на предельных углах ориентации имеет ряд особенностей [2, 3]:

• кинематические уравнения для углов Эйлера вырождаются при углах дифферента ±90°;

• влияние перекрестных связей между каналами управления ориентацией аппарата усиливается с увеличением углов наклона, что влечет появление больших ошибок управления угловым движением.

В статье рассматривается ряд конструктивных вопросов, связанных с разработкой высокоманевренного ТНПА, способного совершать как траекторное движение, так и зависание в пространстве без ограничений углов крена. Далее представлены основные конструктивно-функциональные решения, связанные с проектированием ТНПА:

 конструктивный облик гибридного ТНПА с автономным источником питания и оптоволоконным кабелем связи;

 проект системы регулирования момента остойчивости путем изменения положения центров объема и масс аппарата в связанной системе координат;

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 2432578. E-mail: vkost@marine.febras.ru

• алгоритм управления угловым движением по крену и дифференту, основанный на кватернионах состояния [2, 3];

• результаты бассейновых испытаний аппарата.

Основные результаты разработки ТНПА

При выборе основных технических решений выдвигались следующие требования:

• ТНПА должен иметь минимальные размеры и массу, обеспечивающие его эффективное маневрирование в ограниченном пространстве по траекториям с произвольной угловой ориентацией, а также более простую процедуру спуско-подъема;

• на аппарате должна быть установлена видеокамера с широким углом обзора и светочувствительной матрицей для качественного визуального обзора в условиях ограниченной видимости;

• энергоснабжение аппарата должно осуществляться от бортового источника питания.

Последнее требование обусловлено тем, что при повреждении и/или запутывании кабеля связи аппарат должен вернуться к посту управления [5] или всплыть на поверхность в режиме автономного управления.

Функциональная схема аппарата, поясняющая состав бортового оборудования и характер их взаимодействия, приведена на рис. 1.

Несущая конструкция ТНПА обеспечивает требуемое размещение элементов ДРК, блока электроники с видеокамерой и модулем источника питания, манипулятора и системы регулирования остойчивости. Конструктивный облик ТНПА изображен на рис. 2, а основные характеристики аппарата приведены в таблице.



Рис. 1. Функциональная схема ТНПА



Рис. 2. Внешний вид (а) и состав оборудования (б) ТНПА «Сокол тысячелетия»

Основные характеристики ТНПА

Максимальная глубина погружения, м	20
Масса, кг	12
Длина/ширина/высота, м	0,645/0,640/0,276
Максимальная скорость горизонтального хода, м/с	1,00
Максимальная скорость вертикального хода, м/с	0,40
Максимальная скорость движения лагом, м/с	0,40
Диапазон регулирования угла крена, град	±180
Диапазон регулирования угла дифферента, град	±90
Емкость батарейного модуля, А*ч	18
Автономность в режиме движения/ожидания, ч	5/45
Диаметр кабеля связи, мм	3
Длина кабеля связи не более, м	10000
Тип кабеля связи	Оптический одномодовый
Интерфейс связи ТНПА – пост управления	Ethernet

Несущая рама аппарата представляет собой монолитную полипропиленовую конструкцию в виде скобы, изготовленную с использованием технологии абразивной резки. Блок электроники с датчиком ориентации, компьютером автопилота, поворотной в двух плоскостях видеокамерой и модулем источника питания (аккумуляторной батареей) размещены в общем акриловом герметичном контейнере, оборудованном полусферическим акриловым иллюминатором. Данное конструктивное решение позволило минимизировать количество дополнительных прочных корпусов, а также устройств забортного монтажа и минимизировать вес и размеры аппарата.

Выбранная компоновочная схема ДРК является модификацией известного технического решения [6], которое позволяет обеспечить независимое формирование силовых и моментных воздействий по шести каналам управления движением. Для обеспечения возможности корректного распределения команд управления движением элементами ДРК была определена экспериментальная статическая характеристика используемых движителей, аналогичных модели T-100 фирмы BlueRobotics (рис. 3).





Блок электроники является многофункциональным устройством, состав которого иллюстрирует функциональная схема, приведенная на рис. 4. Конструктивное решение компоновки разработанного блока электроники представлено на рис. 5.

Вычислительным ядром блока является одноплатный компьютер Raspberry Pi 3B+, который решает задачи управления системами аппарата, а также обеспечивает обработку данных цифровой



видеокамеры и информационный обмен с внешним блоком управления. Выбор данной модели компьютера определялся его широкой доступностью и возможностью установки полноценной версии операционной системы Linux Ubuntu 16.04, на которой базируется используемое программное обеспечение разработки ИПМТ ДВО РАН. Важной особенностью этого компьютера является наличие интерфейса CSI-2, который позволяет подключать внешнюю видеокамеру и получать высококачественное изображение в HD разрешении на внешнем видеопроцессоре и передавать его в блок управления, минуя центральный процессор. В данном случае использована широкоугольная видеокамера со светочувствительной матрицей OV5647, разработанной для ночного зрения. Для реализации двухосевого управления углом поворота видеокамеры используются два сервомотора ЕМАХ, обеспечивающие ее вращение в диапазоне ±90 градусов (от продольной оси аппарата) по каждый из осей управления и возможность видеосъемки в передней полусфере.

Измерение угловой ориентации аппарата и его угловых скоростей обеспечивается инерциальным измерительным модулемVN-100 компании VectorNav, реализованным на трехосевой комбинации высокостабильных гироскопов и акселерометров iMEMS технологии и магнитометров. Данное устройство обеспечивает высокоточное определение параметров угловой ориентации аппарата по всем осям управления и передачу данных по интерфейсу RS-232 не



Puc. 5. Компоновка блока электроники ТНПА

только в углах Эйлера, но и в кватернионах, что особенно важно для реализации движения и позиционирования аппарата с произвольными углами крена/ дифферента.

Программное обеспечение системы управления аппаратом представляет собой совокупность функционально обособленных модулей, каждый из которых является отдельным приложением, написанным на языке высокого уровня С++. Для межмодульного взаимодействия была использована специальная библиотека IPC, разработанная в ИПМТ ДВО РАН [7]. Взаимодействие модулей управления показано на рис. 6.



Рис. 6. Схема взаимодействия программных модулей системы управления ТНПА

Разработка программного обеспечения системы управления проводилась в кроссплатформенной свободной среде Qt Creator. При этом все программные модули были разбиты на две группы. В первую группу отнесены модули, не зависящие от платформы, – это те модули, которые могут запускаться и отлаживаться на любом компьютере и операционной системе. Вторую группу составили модули, которые зависят от платформы, – это модули, для работы которых необходимо наличие специализированного оборудования (в нашем случае Raspberry Pi 3 B+) и его периферии. Вторая группа модулей выделена для того, чтобы абстрагировать большую часть модулей с возможностью их независимого запуска и отладки.

В качестве аккумуляторов системы энергообеспечения были выбраны литий-ионные батареи, обладающие наилучшими характеристиками по удельной плотности энергии [8–10]. Для модуля источника питания массой 1,1 кг была определена схема включения аккумуляторов 4S5P, обеспечивающая номинальное напряжение 15 В и общую емкость 18 Ач при 60 А пикового тока. Указанные характеристики источника питания обеспечивают энергоснабжение движителей аппарата без дополнительных преобразователей напряжения.

Важно отметить, что энергоснабжение ТНПА от автономного источника питания позволяет значительно увеличить маневренность аппарата по сравнению с вариантом энергоснабжения через кабель. Во втором случае для обеспечения желаемого пикового тока 40 А, требуемого при максимальной загрузке всех движителей, необходим кабель связи с сечением токоведущих жил не менее 4 мм². При этом для обеспечения нейтральной плавучести необходимо использовать кабель с диаметром 15-20 мм, что, очевидно, приведет к увеличению его гидродинамического сопротивления. В случае автономного энергопитания для связи с постом управления вполне достаточно грузонесущего оптического кабеля, который имеет наружный диаметр 2-3 мм и возможность информационного обмена со скоростью не менее 100 МБ/с, достаточной для управления аппаратом в реальном масштабе времени.

Система регулирования остойчивости

Регулирование остойчивости осуществляется за счет вращения кольца с диаметрально разнесенными дополнительным поплавком объема V_{Π} и балластного груза весом G_{Γ} . При этом зубчатое колесо с балластным грузом и дополнительным поплавком имеет нулевую остаточную плавучесть, а сам аппарат балластируется таким образом, чтобы его собственный момент остойчивости был нулевым при некоторой заданной остаточной плавучести [4]. Работу системы регулирования остойчивости (СРО) поясняет рис. 7.

С учетом принятых выше допущений установившееся значение угла крена аппарата будет зависеть от угла поворота зубчатого колеса, который, в свою очередь, определяет положение центра объема дополнительного поплавка O_v и центра масс балластного груза O_G в поперечной плоскости связанной системы координат аппарата $O_b X_b Z_b$. При этом момент остойчивости аппарата M_{xo} будет соответствовать выражению:

$$M_{xo} = \left[V_n\left(\gamma_{\theta} - \gamma_n\right) + \left(G_{\varepsilon} - V_{\varepsilon}\gamma_{\theta}\right)\right] \cdot R \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi,$$

где V_{Π} , V_{Γ} – объем поплавка и балластного груза соответственно; $\gamma_{B'}$, γ_{Π} – удельный вес воды и материала поплавка соответственно; G_{Γ} – вес балластного



Рис. 7. Управление положением аппарата по крену с изменением остойчивости: а – схема распределения сил при повороте на угол δ (вид на аппарат спереди); б – техническая реализация

груза на воздухе; R – радиус вращения центра объема поплавка и центра масс груза; θ , ψ – углы крена и дифферента аппарата соответственно.

Управление угловым положением аппарата через регулирование его остойчивости позволяет значительно уменьшить затраты бортовой энергии на маневрирование с произвольной ориентацией по крену за счет «разгрузки» движительно-рулевого комплекса (ДРК) и, как следствие, увеличить автономность работы аппарата с бортовым источником питания.

Алгоритм управления ТНПА на предельных углах крена/дифферента

Задачу управления движением ТНПА в пространстве можно свести к формированию такого вектора управляющих сил и моментов $F^{g} = \left[f^{g}, m^{g} \right]^{T} (f^{g})$ вектор силы, *m^g* –вектор момента), приложенного к центру масс аппарата в некоторой инерциальной системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$, при котором невязка управления, выраженная как разница между некоторым целевым и текущим обобщенным пространственном положении аппарата $\Delta_{\xi} = \xi_t - \xi_c$, будет равна нулю. Ориентация осей инерциальной системы координат определена следующим образом: ось O_X направлена по касательной к меридиану на север, ось $O_{g}Z_{g}$ – по касательной к параллели на восток, ось $O_{g}Y_{g}$ соответствует правосторонней системе и направлена вертикально вверх. При этом положение начала координат О "Х "устанавливается на уровне поверхности воды с известными географическими координатами.

Для последующей реализации вектора $F^{g} = [f^{g}, m^{g}]^{T}$ движительно-рулевым комплексом требуется определить управляющий вектор сил и моментов $F^{b} = [f^{b}, m^{b}]^{T}$ в связанной системе координат аппарата $O_{b}X_{b}Y_{b}Z_{b}$, которая ориентирована так, как показано на рис. 8. Ось $O_{b}X_{b}$ направлена вдоль продольной оси аппарата, ось $O_{b}Z_{b}$ – вдоль поперечной оси аппарата с левого борта на правый, ось $O_{b}Y_{b}$ дополняет связанную систему координат до правосторонней и направлена вертикально вверх. Начало координат O_{b} совпадает с центром масс аппарата.

На заключительном этапе управления необходимо получить вектор упоров движителей аппарата t как результат решения задачи декомпозиции управляющего вектора $F^{b} = [f^{b}, m^{b}]^{T}$ с учетом особенностей ДРК.

Обобщенное пространственное положение подводного аппарата ξ в инерциальной системе



Puc. 8. Ориентация осей связанной системы координат аппарата

координат можно описать следующим образом: $\boldsymbol{\xi} = [x, q]^T$, где вектор x задает пространственное положение, а вектор q – пространственную ориентацию.

Управление пространственным положением аппарата *q* в инерциальной системе координат в случае отсутствия взаимовлияния каналов управления можно свести к сепаратному управлению по независимым осям. В случае использования пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора команда управления будет выглядеть следующим образом:

$$f_i^g = K_p^i \cdot (x_t - x_c)_i - K_d^i \cdot v_i, i = 1, 2, 3$$

где f_i^g – элемент вектора силы управления f^e по *i*-й оси системы координат *Oxyz*, $(x_i - x_c)_i$ – невязка управления по соответствующей координате, v_i – линейная скорость по *i*-й оси; K_p^i , K_d^i – пропорциональный и дифференциальный коэффициенты регуляторов по *i*-й оси соответственно.

Конструктивно заложенная малая остойчивость ТНПА обеспечивает возможность управления его пространственной ориентацией по крену/ дифференту в диапазоне (±180...±90) град от вертикали без значительных затрат энергии на компенсацию восстанавливающего момента, действующего на аппарат. Однако использование в управлении углов Эйлера влечет за собой появление точек сингулярности в описании пространственной ориентации при угле дифферента ±90 град [10]. При этом положении величина крена аппарата не определена и совокупное управление аппаратом невозможно. Подход к описанию пространственной ориентации при помощи кватернионов состояния лишен этого недостатка, а также при этом подходе значительно увеличивается скорость расчета алгоритмов управления, поскольку при этом не используются тригонометрические функции [11].

В данном подходе невязка управления угловым положением определяется разностью целевой и текущей ориентацией аппарата, которые могут быть выражены в кватернионах состояния следующим образом [3]:

$$\boldsymbol{q}_{d} = \widetilde{\boldsymbol{q}_{t}} \cdot \boldsymbol{q}_{c} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{\mu}_{0} \\ \boldsymbol{\mu}_{1} \\ \boldsymbol{\mu}_{2} \\ \boldsymbol{\mu}_{3} \end{vmatrix}$$

где q_t , q_c – соответственно кватернионы целевой и текущей пространственной ориентации подводного аппарата в инерциальной системе координат, \tilde{q}_t – кватернион, обратный кватерниону целевого состояния. Далее, получив кватернион разности q_d , необходимо рассчитать необходимые управляющие моменты. В случае использования в угловых каналах управления ПД регулятора и при отсутствии взаимовлияния каналов управления компоненты вектора момента управления в инерциальной системе координат будут иметь следующий вид:

$$m_i^g = -sign(\mu_0) \cdot K_p^i \cdot \mu_i - K_d^i \cdot \omega_i, i = 1, 2, 3;$$

где m_i^g — момент управления по *i*-й оси системы координат *Охуz*, μi — угол поворота вокруг *i*-й оси, ω_i — угловая скорость вокруг *i*-й оси; K_p^i , K_d^i — пропорциональный и дифференциальный коэффициенты регуляторов поворота вокруг *i*-й оси соответственно.

Сформировав обобщенный вектор управляющей силы $F^{g} = [f^{g}, m^{g}]^{T}$ в инерциальной системе координат $O_{g}X_{g}Y_{g}Z_{g}$, необходимо реализовать его в связной с аппаратом системе координат $O_{b}X_{b}Y_{b}Z_{b}$, получив при этом вектор F^{b} . Упомянутые выше вектора связаны между собой следующим образом:

$$\boldsymbol{F}^{b} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}^{b} \\ \boldsymbol{m}^{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{c} \cdot \left(\boldsymbol{f}^{g} + \boldsymbol{f}^{g}_{b}\right) \cdot \boldsymbol{q}_{c}^{-1} \\ \boldsymbol{q}_{c} \cdot \left(\boldsymbol{m}^{g} + \boldsymbol{m}^{g}_{b}\right) \cdot \boldsymbol{q}_{c}^{-1} \end{bmatrix}$$

где $f_b^g = [0, -(G-W), 0]^T$ и $m_b^g = [0, -M, 0]^T$ – соответственно дополнительные сила и момент, необходимые для компенсации влияния восстанавливающей силы и момента, действующих на аппарат, выраженные в инерциальной системе координат; G = mg, G = mpV – скалярные величины силы тяжести и силы Архимеда, действующих на аппарат.

Полученный обобщенный вектор сил и моментов F^b в системе координат $O_b X_b Y_b Z_b$ связан с вектором упоров движителей аппарата t следующим образом:

$$F^b = Bt$$
,

где B – геометрическая матрица ДРК 6 × p, где p – количество движителей. Данная матрица зависит от гео-

10 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2019. № 3 (29)

метрического положения и ориентации движителей относительно центра масс аппарата и в общем случае записывается в следующем виде:

١

$$B = \begin{bmatrix} C_{1x} & C_{2x} & \dots & C_{px} \\ C_{1y} & C_{2y} & \dots & C_{py} \\ C_{1z} & C_{2z} & \dots & C_{pz} \\ [C_1 \times P_1]_x & [C_2 \times P_2]_x & \dots & [C_p \times P_p]_x \\ [C_1 \times P_1]_y & [C_2 \times P_2]_y & \dots & [C_p \times P_p]_y \\ [C_1 \times P_1]_z & [C_2 \times P_2]_z & \dots & [C_p \times P_p]_z \end{bmatrix}$$

Где C_{ix} , C_{iy} , C_{iz} – направляющие косинусы *i*-го движителя; $P_i = [x_i, y_i, z_i]$ – пространственное положение *i*-го движителя в связной системе координат; $[C_i \times P_i]_x$, $[C_i \times P_i]_x$, $[C_i \times P_i]_x$ – проекции векторного произведения соответствующих величин; (i = 1...p – номер движителя). В случае работы в пределах линейного участка статической характеристики движителей (см. рис. 3) вектор *t* может быть определен следующим образом [12]:

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{B}^T \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{B}^T \right)^{-1} \boldsymbol{F}^b.$$

Если геометрическая матрица компоновки ДРК вырождена, например в случае пары параллельно расположенных движителей, следует добавить к ней ε – добавку, обеспечивающую не вырожденность матрицы:

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{B}^{T} \left(\boldsymbol{B} \boldsymbol{B}^{T} + \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{I} \right)^{-1} \boldsymbol{F}^{b} \boldsymbol{\varepsilon}^{T}$$

Результаты бассейновых испытаний ТНПА

Испытания ТНПА проводились в бассейне Дальневосточного федерального университета и состояли из нескольких последовательных процедур. Фрагмент испытаний аппарата иллюстративно представлен на рис. 9. На первом этапе было проведено тестирование системы регулирования остойчивости. Проверка проводилась в следующей последовательности: при отключенных движителях на поверхности бассейна изменялся угол поворота зубчатого колеса СРО с угловой скоростью 3 град/с. Изменению угла поворота от нулевой отметки до 90° и далее до 180° соответствуют на рис. 10 две линии: одна при нулевом положении, соединяющая балластный груз и дополнительный поплавок, перпендикулярна поперечной оси аппарата, другая при угле 90°, соединяющая балластный груз и дополнительный поплавок, параллельна поперечной оси аппарата. На графиках рис. 10 видно, что текущий крен аппарата с ошиб-



Рис. 9. Фрагмент бассейновых испытаний ТНПА

кой не более 20° совпадает с заданным углом СРО. Неточность позиционирования аппарата по крену связана с погрешностями механической реализации планетарной системой передачи вращения, а также пропуском некоторых управляющих импульсов шаговым электродвигателем СРО.

На втором этапе испытаний был проведен эксперимент по определению, создаваемого СРО кренящего момента. Для этого аппарат удерживался движителями на заданной глубине (0,5 м) в режиме стабилизации нулевых углов крена и дифферента. Затем при вращении зубчатого колеса СРО со скоростью 3 град/с в диапазоне углов поворота ±180° измерялось значение управляющего момента по крену, необходимого для компенсации возмущающего воздействия момента СРО. Поскольку эксперимент проводился в режиме зависания аппарата, оценка управляющего момента ДРК проводилась на основании известной швартовной характеристики движителей, представленной на рис. 3. Графики зависимости момента ДРК по крену и синуса угла поворота механизма СРО показаны на рис. 11. В результате эксперимента установлено, что изменение управляющего момента СРО находится в диапазоне ±3,5 Нм.

На заключительном этапе испытаний была проведена серия экспериментов, цель которых состояла в оценке возможности управления угловым положением аппарата в диапазоне углов крена/дифферента $\pm 180^{\circ} / \pm 90^{\circ}$ от вертикали при стабилизации аппарата на заданной глубине погружения. На рис. 12 приведены графики изменения текущего значения угла крена, соответствующего заданным его значениям в диапазоне ($-180^{\circ}...+180^{\circ}$) с шагом 90°. При этом механизм поворота СРО был зафиксирован в нулевом положении.



Рис. 10. Зависимость углового положения ТНПА по крену от угла поворота системы регулирования остойчивости: 1 – угол крена аппарата, град; 2 – угол поворота СРО, град



Рис. 11. Оценка диапазона регулирования момента остойчивости по крену: 1 – момент по крену, Н*м; 2 – sin (угол поворота СРО)



Рис. 12. Управление угловым положением аппарата по крену в диапазоне ±180° средствами ДРК: 1 – текущее значение; 2 – целевое значение.

Графики рис. 13 иллюстрируют переходные процессы при изменении угла дифферента, соответствующие его заданным значениям $\pm 90^{\circ}$. В обоих предельных случаях глубина погружения аппарата отклонялась от заданного значения не более чем на 20 % в переходном процессе и не более чем на 5 % в установившемся режиме ста-





билизации заданного угла. Достаточно большой разброс значений глубины в переходном процессе управления по дифференту связан с тем, что датчик глубины расположен в корме аппарата и удален от его центра масс, что создавало дополнительное изменение глубины, связанное с вращением датчика вокруг центра масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований был разработан, изготовлен и испытан малогабаритный высокоманевренный ТНПА с системой регулирования остойчивости, позволяющей изменять положение центра объема и центра масс аппарата в поперечной плоскости путем создания управляющих воздействий по крену. В процессе разработки и испытаний аппарата были приняты и подтверждены основные технические решения по составу систем аппарата, оборудованного автономным источником питания и системой оптоволоконной связи с постом управления. В результате показаны удовлетворительные характеристики по качеству управления в режиме позиционирования аппарата с произвольными углами крена/дифферента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00324) и программы Президиума РАН № 29 «Актуальные проблемы робототехнических систем».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferreira B.M., Jouffroy J. Control and guidance of a hovering AUV pitching up or down // Proc. of OCEANS 2012 MTS/IEEE. Hampton Roads, USA, 2012. P. 1–7.

2. Лямина Е.А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона // Инженерный журн.: наука и инновации. 2018. Вып. 3. С. 1–19.

3. Лямина Е.А. Подходы к построению системы управления угловым положением необитаемого подводного аппарата без ограничений на углы наклона // Тр. Крыловского гос. науч. центра. Спец. вып. 1. 2018. С. 224–234.

4. Пат. 2421372 РФ, МПК В63G 8/00. Способ обеспечения управляемости подводным аппаратом / Комаров В.С., Комаров П.В.; заявитель и патентообладатель Комаров В.С., Комаров П.В. № 2007141792/11; заявл. 14.11.2007; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17.

5. Πατ. 15462531 CШA. Autonomous ROVs With Offshore Power Source That Can Return To Recharge / Chance T. et al.; 2017.

6. Костенко В.В., Михайлов Д.Н. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС–300» // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1 (13). С. 36–46.

7. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable distributed software platform for a group of UUVs (yet another robot platform // Proc. of OCEANS 2016 MTS/IEEE. Monterey, Monterey, CA, 2016. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANS.2016.7761102.

8. Bradley A.M. et al. Power systems for autonomous underwater vehicles // IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 2001. Vol. 26. No. 4. C. 526–538.

9. Bykanova A.Y., Storozhenko V.A., Tolstonogov A.Y. The Compact Remotely Operated Underwater Vehicle with the Variable Restoring Moment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2019. Vol. 272. No. 2. P. 022199.

10. Stuelphagel J. On the parametrization of the three-dimensional rotation group // SIAM review. 1964. T. 6. No. 4. P. 422-430.

11. Fjellstad O. E., Fossen T. I. Position and attitude tracking of AUV's: a quaternion feedback approach // IEEE J. of Oceanic Engineering. 1994. Vol. 19. No. 4. P. 512–518.

12. Johansen T.A., Fossen T.I. Control allocation - a survey // Automatica. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 1087-1103.