УДК 629.127.4-52:62.501.55-531.501 DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_02

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Л.В. Киселев, В.В. Костенко, А.В. Медведев

При создании гибридных автономных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА) одна из основных проблем состоит в обеспечении заданных динамических свойств аппарата с учетом особенностей его конструкции и многообразия режимов пространственного движения. Для решения этой актуальной проблемы разрабатывается динамическая модель, основанная на совмещении функций автономного и телеуправляемого подводных аппаратов (АНПА/ТНПА). Основными элементами в структуре модели являются: математическая модель пространственного движения с шестью степенями свободы, вычислительные средства «виртуальной гидродинамики», адаптивные регуляторы движения, комбинированный движительно-рулевой комплекс, модель внешней среды. Задача исследования состоит в определении параметров математической модели (гидродинамических характеристик, управляющих и возмущающих сил, сил гидродинамического сопротивления, ходовых и маневренных характеристик аппарата) в режимах крейсерского движения и позиционирования. В качестве прототипа ГНПА для выбора геометрической формы и основных конструктивных параметров в работе принят ГНПА «Freedom ROV» (Oceaneering, США). В результате вычислительных экспериментов получены оценки параметров динамической модели ГНПА, свидетельствующие о его работоспособности при осуществлении сложных режимов пространственного движения с взаимодействием элементов всего функционального комплекса. Как следствие это позволяет выработать рекомендации для оптимального выбора структуры и характеристик многозадачной информационно-управляющей системы ГНПА при выполнении широкого класса подводно-технических работ.

Ключевые слова: автономные, телеуправляемые, гибридные необитаемые подводные аппараты (АНПА, ТНПА, ГНПА), динамические и вычислительные модели, управление движением, гидродинамика, движительно-рулевые комплексы .

Введение

Развитие современных подводных робототехнических комплексов связано с разработкой гибридных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА), создание которых основано на расширении функций АНПА путем включения в его информационно-управляющую структуру функций, присущих ТНПА. В работе [1] показано, что такой гибридный аппарат может в режиме АНПА выполнять весь спектр бесконтактных работ, выходить к заданному объекту в соответствии с заданной программой, выполнять действия, связанные с формированием канала информационного обмена с постом управления и далее выполнять контактные операции в супервизорном режиме.

В технологии ГНПА и оценке его функциональных свойств можно отметить два аспекта. Первый касается обоснования облика ГНПА, его конструктивных особенностей, системной организации, эффективности при выполнении рабочих действий. Принципиально важные задачи технологии ГНПА рассмотрены в работе [1]. К их числу относятся:

– интеллектуализация системы бортового управления,

– организация супервизорного управления АНПА,

– расширение инструментального оснащения и оптимизация конструктивных решений,

– развитие средств подводной навигации для поддержки работ ГНПА,

– организация структуры подводного базирования для обеспечения длительных работ.

Другой аспект проблемы связан с построением обобщенной функционально-параметрической модели, адекватно отражающей динамические процессы ГНПА в многозадачных режимах пространственного движения.

В перечень основных задач по оценке функциональных и динамических характеристик системы управления пространственным движением ГНПА входит построение математической модели пространственного движения ГНПА и соответствующих вычислительных программных средств с учетом:

– особенностей решаемых задач по назначению,

– влияния переменного гидродинамического воздействия вязкой среды при осуществлении типовых и специфических режимов пространственных движений ГНПА,

– функциональных и кинематических особенностей движительно-рулевого комплекса (ДРК), обеспечивающего эффективное маневрирование ГНПА в пространстве, в том числе в толще воды и вблизи дна,

– минимизации энергозатрат на движение в условиях повышенной автономности,

– объема и точностных характеристик навигационных данных, необходимых для формирования миссий и управления движением с многообразием программных и самоорганизующихся траекторий.

Для решения указанного класса задач необходима разработка алгоритмов и средств имитационного моделирования, обеспечивающих адекватность используемой математической модели, надежную идентификацию гидродинамических характеристик аппарата, силовых и энергетических характеристик ДРК в режимах автономного и телеуправляемого движения.

Структура управления и режимы движения

Динамические свойства ГНПА, как и АНПА вообще, определяются характеристиками управляемости (маневренности), устойчивости по отношению к начальным условиям вектора состояний и по отношению к параметрам управления, точности и быстродействия в переходных и установившихся режимах.

Перечень основных режимов движения определяется характером выполняемых работ и соответствующих им миссиям. В общем случае в этот перечень включаются:

1) поступательное движение с постоянной или переменной скоростью, торможение, задний ход,

2) движение в вертикальной плоскости с управлением глубиной погружения или расстоянием до дна,

3) зависание, вертикальное погружение/всплытие с постоянной или регулируемой плавучестью,

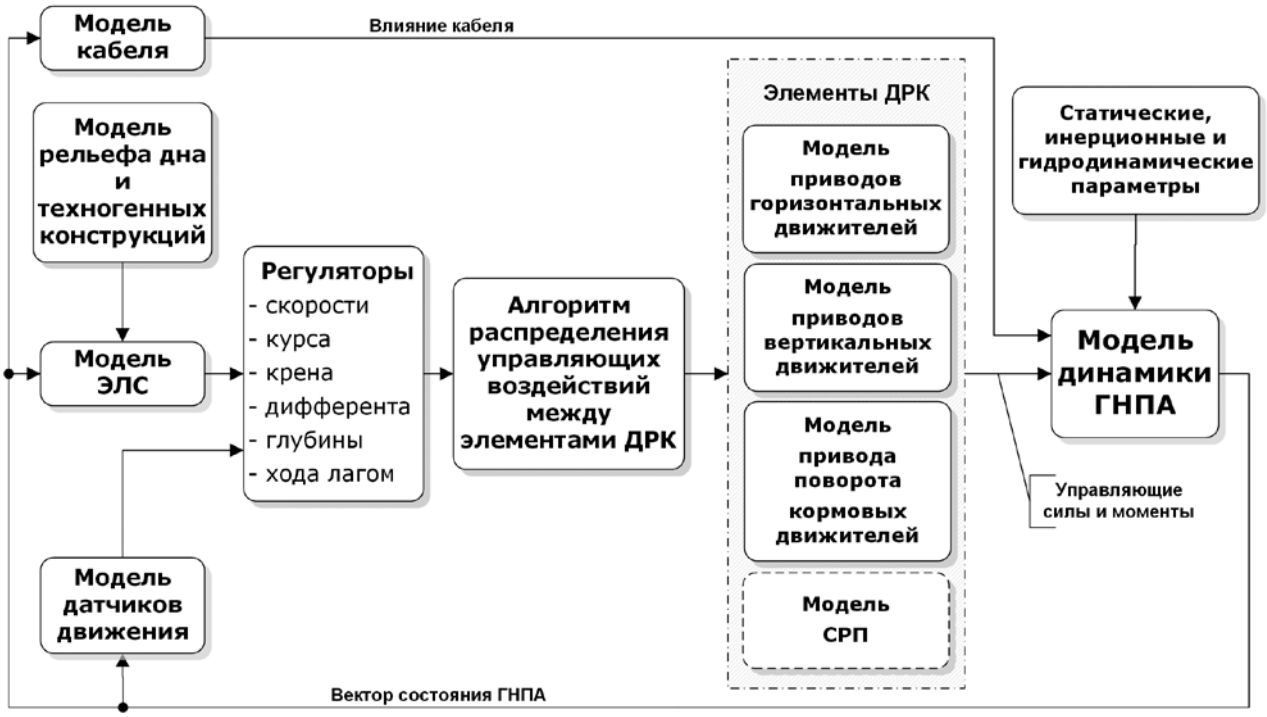

Рис. 1. Структурная схема модели СУ ГНПА

4) круговые или иные вращательные движения в горизонтальной плоскости в режимах «ход» и «на месте» (циркуляция), стабилизация курса или угловой скорости,

5) динамическое позиционирование над точкой (объектом), стабилизация линейного и углового положения в трех плоскостях.

Все перечисленные режимы движения являются, в принципе, типовыми для АНПА и ТНПА. Из них наиболее сложным в отношении динамики является режим позиционирования, который сопровождается стабилизацией положения по линейным и угловым координатам, лаговыми движениями с малой скоростью и стабилизацией углового положения с ориентацией на заданное направление.

Реализация перечисленных режимов движения предполагает использование исполнительных органов, представляющих собой пространственно распределенный избыточный движительно-рулевой комплекс, в состав которого включаются:

– кормовые (маршевые) движители на поворотной платформе,

– два горизонтальных подруливающих движителя, расположенные в носу ГНПА, и четыре вертикальных подруливающих движителя,

– как дополнение могут быть использованы носовые и кормовые рули, выполненные по определенной схеме.

На рис. 1 приведена структура системы управления движением ГНПА, представленная в виде двух уровней, из которых первый составляет полный состав регуляторов по каналам управления, а второй содержит модели динамики аппарата и исполнительных органов.

Математическая модель динамики ГНПА

Пространственное движение ГНПА во всех типовых режимах представляется в виде совокупности плоских движений, кинематическая взаимосвязь которых осуществляется только через управляющие и возмущающие воздействия. Это обстоятельство используется практически в системах управления движением АНПА и ТНПА и дает, кроме того, возможность представить математическую модель движения ГНПА в виде совокупности трех плоских движений, которые могут согласованно осуществляться в соответствии с программной миссией или по команде через канал связи. С учетом принятых допущений представим математическую модель пространственного движения АНПА в виде трех систем уравнений в связанной с аппаратом системе координат с использованием «естественных» переменных состояния [2-7]. Принятые при этом системы координат и схемы действия сил приведены на рис. 2.

$$
\begin{aligned}
&m_x \dot{\upsilon} = -R_x(\upsilon,\alpha) + P\sin\vartheta + (T_{x1} - F_x)\cos\alpha - (T_{y1} - F_y)\sin\alpha,\\
&m_y \upsilon\dot{\vartheta} = R_y(\upsilon,\alpha,\dot{\psi}) + P\cos\vartheta + (T_{y1} - F_y)\cos\alpha + (T_{x1} - F_x)\sin\alpha,\\
&J_{zz}\ddot{\psi} = M_0\sin\psi + M_z(\upsilon,\alpha,\dot{\psi}) + M_{z1},\\
&\dot{X} = \upsilon\cos\vartheta,\ \dot{Y} = -\upsilon\sin\vartheta,\ \psi = \vartheta - \alpha.
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&m_x \dot{\upsilon} = -R_x(\upsilon,\beta) + (T_{x1} - F_x)\cos\beta - (T_{z1} - F_z)\sin\beta,\\
&m_z \upsilon\dot{\chi} = R_z(\upsilon,\beta,\dot{\varphi}) + (T_{z1} - F_z)\cos\beta + (T_{x1} - F_x)\sin\beta,\\
&J_{yy}\ddot{\varphi} = M_y(\upsilon,\beta,\dot{\varphi}) + M_{y1},\\
&\dot{X} = \upsilon\cos\chi,\ \dot{Z} = \upsilon\sin\chi,\ \varphi = \chi + \beta.
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

$$
\begin{aligned}
&m_z \dot{\upsilon} = -R_z(\upsilon,\zeta) + P\sin\varkappa + (T_{z1} - F_z)\cos\zeta - (T_{y1} - F_y)\sin\zeta,\\
&m_y \upsilon\dot{\varkappa} = R_y(\upsilon,\zeta,\dot{\theta}) + P\cos\varkappa + (T_{y1} - F_y)\cos\zeta + (T_{z1} - F_z)\sin\zeta,\\
&J_{xx}\ddot{\theta} = M_0\sin\theta + M_x(\upsilon,\zeta,\dot{\theta}) + M_{x1},\\
&\dot{Z} = \upsilon\cos\varkappa,\ \dot{Y} = -\upsilon\sin\varkappa,\ \theta = \varkappa - \zeta.
\end{aligned}
$$

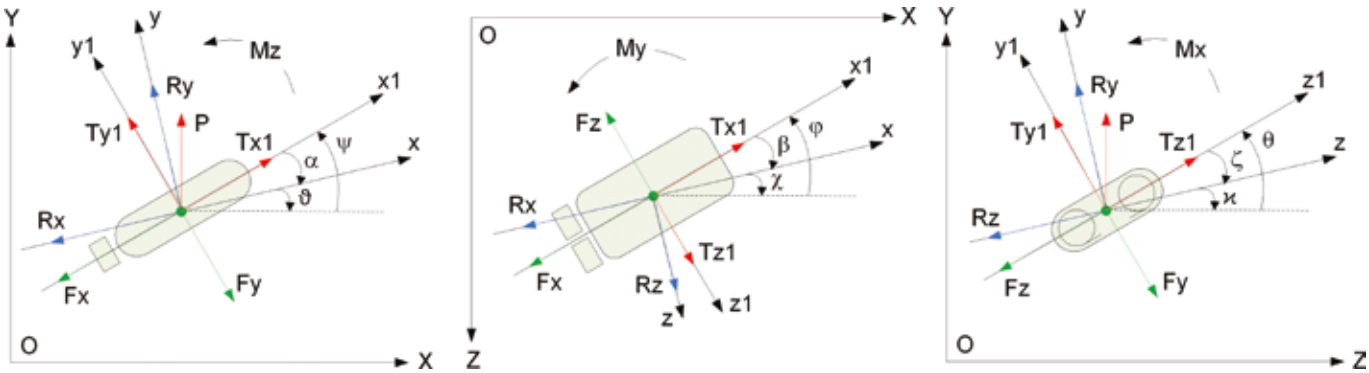

Рис. 2. Схема действия сил в связанной системе координат для модели ГНПА

В уравнениях (1) используются обозначения, принятые в работах [1–4], в частности: OXYZ – инерциальная (полигонная система координат); $Ax_1y_1z_1$ – система координат, связанная с аппаратом; $Axyz$ – скоростная (поточная) система координат, помещенная в центре масс аппарата и ориентированная осью Ax по вектору скорости υ; m_x, m_y, m_z, J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – массы и моменты инерции аппарата с учетом присоединенных масс и моментов инерции жидкости; T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} – управляющие силы и моменты движительно-рулевого комплекса в связанной системе координат; ϑ, χ, $\varkappa$ – углы подъема, поворота и наклона траектории; φ, ψ, θ – углы курса, дифферента и крена аппарата; α, β, ζ – углы атаки, дрейфа и скольжения; R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z – гидродинамические силы и моменты; F_x, F_y, F_z – проекции результирующей силового воздействия кабеля связи на оси связанной системы координат; $M_0 = \gamma V_a h_o$ – момент остойчивости; γ – удельный вес жидкости; V_a – объемное водоизмещение аппарата; h_o – метацентрическая высота; $P = \gamma V_a - G_a$ – остаточная плавучесть аппарата, где G_a – вес аппарата на воздухе.

Гидродинамические силы и моменты, обусловленные вязкостью жидкости, принято представлять в виде суммы позиционных и демпфирующих составляющих [2, 3]:

$$
\begin{aligned}
&R_x(\upsilon,\alpha) = C_x(\alpha)\frac{\rho\upsilon^2}{2}V^{2/3} = R_x(1,\alpha)\upsilon^2;\\
&R_y(\upsilon,\alpha,\dot\psi) = C_y(\alpha)\frac{\rho\upsilon^2}{2}V^{2/3} + C_y^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V\dot\psi = R_y(1,\alpha)\upsilon^2 + C_y^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V\dot\psi;\\
&R_z(\upsilon,\beta,\dot\varphi) = C_z(\beta)\frac{\rho\upsilon^2}{2}V^{2/3} + C_z^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V\dot\varphi = R_z(1,\beta)\upsilon^2 + C_z^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V\dot\varphi;\\
&M_x(\upsilon,\zeta,\dot\theta) = m_x(\zeta)\frac{\rho\upsilon^2}{2}V + C_x^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V^{4/3}\dot\theta = M_x(1,\zeta)\upsilon^2 + m_x^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V^{4/3}\dot\theta;\\
&M_y(\upsilon,\beta,\dot\varphi) = m_y(\beta)\frac{\rho\upsilon^2}{2}V + C_y^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V^{4/3}\dot\varphi = M_y(1,\beta)\upsilon^2 + m_y^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V^{4/3}\dot\varphi;\\
&M_z(\upsilon,\alpha,\dot\psi) = m_z(\alpha)\frac{\rho\upsilon^2}{2}V + C_z^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V^{4/3}\dot\psi = M_z(1,\alpha)\upsilon^2 + m_z^{\omega}\frac{\rho\upsilon}{2}V^{4/3}\dot\psi;
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

где $R_x(1, \alpha)$, $R_y(1, \alpha)$, $R_z(1, \beta)$, $M_x(1, \zeta)$, $M_y(1, \beta)$, $M_z(1, \alpha)$, – зависимости позиционной составляющей гидродинамических сил и моментов от углов атаки, дрейфа и скольжения при скорости набегающего потока υ = 1 м/с; C_x^{ω}, C_y^{ω}, C_z^{ω}, m_x^{ω}, m_y^{ω}, m_z^{ω} – демпфирующие коэффициенты.

Для конкретного примера ГНПА в качестве аналога для дальнейших вычислительных экспериментов был принят ГНПА «Freedom ROV» (Oceaneering, США), внешний вид которого и 3D-изображение модели показаны на рис. 3.

Параметры модели, представленной в виде трехосного эллипсоида, приведены в табл. 1, причем составляющие масс и моментов инерции с учетом присоединенной жидкости вычислялись по известным формулам гидродинамики [4].

Для определения гидродинамических характеристик модели использовались прикладные программные средства «виртуальной продувки», позволяющие строить визуализированные картины обтекания тела в поле набегающего потока [5,6]. На рис. 4 приведены зависимости позиционных сил и моментов гидродинамического сопротивления от углов атаки и дрейфа в диапазоне их изменения ± 180º. Для определения демпфирующих сил и моментов модель аппарата вращалась относительно центра масс со скоростью 0,1 рад/с. В результате вычислений с использованием САПР «Solid Works» были получены следующие абсолютные значения для производных этих величин:

$R_y^{\omega} = 19$ Н; $R_z^{\omega} = 1{,}8$ Н; $M_x^{\omega} = 1{,}3$ Нм;

$M_y^{\omega} = 30{,}3$ Нм; $M_z^{\omega} = 87$ Нм.

Рис. 3. Внешний вид ГНПА «Freedom ROV» и 3D-изображение его модели

Таблица 1. Параметры модели ГНПА

Параметры	Значение
Размеры: длина; ширина; высота, м	4,0; 0,5; 0,8
Объём,	1,79
Площадь поверхности,	21,05
Метацентрическая высота, мм	5
Момент остойчивости, Нм	92
Масса: m_x, m_y, m_z кг	2402 , 4144, 4144
Моменты инерции: J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} кг·м^2	405, 4691, 4691

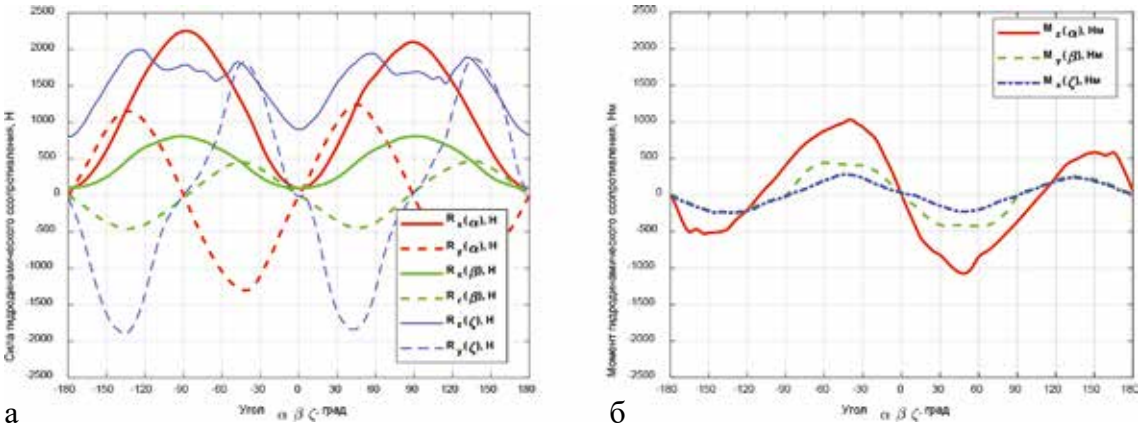

Рис. 4. Зависимости позиционных сил (а) и моментов (б) гидродинамического сопротивления

Следует отметить, что составляющие гидродинамического момента являются знакопеременными величинами и меняют знак при углах атаки, крена и дрейфа вблизи 0º, ±120º. Из графиков следует, что аппарат статически устойчив по углам атаки, крена и курса во всем диапазоне их изменения. Это соответствует положению центра гидродинамического давления в корму аппарата относительно его центра масс. В противном случае это может повлечь за собой статическую неустойчивость аппарата, главным образом по углу атаки, и необходимость использования эффективных алгоритмов управления движением в вертикальной плоскости для обеспечения устойчивости движения «в большом» и «в малом».

Вычислительная модель

Разработанный стенд моделирования в *Matlab/Simulink*-диаграмме позволяет в ручном и автоматическом режимах управлять моделью ГНПА. Ручной режим предполагает использование контроллера *gamepad* для задания целевых значений управления в бесконечном по времени запуске моделирования. При этом используется модуль «*RealTime Sync*» для синхронизации с реальным временем. Автоматический режим предполагает отработку заданных алгоритмов движения при ограниченном времени на симуляцию, при этом не требуется синхронизация с реальными часами. Данный режим позволяет также управлять

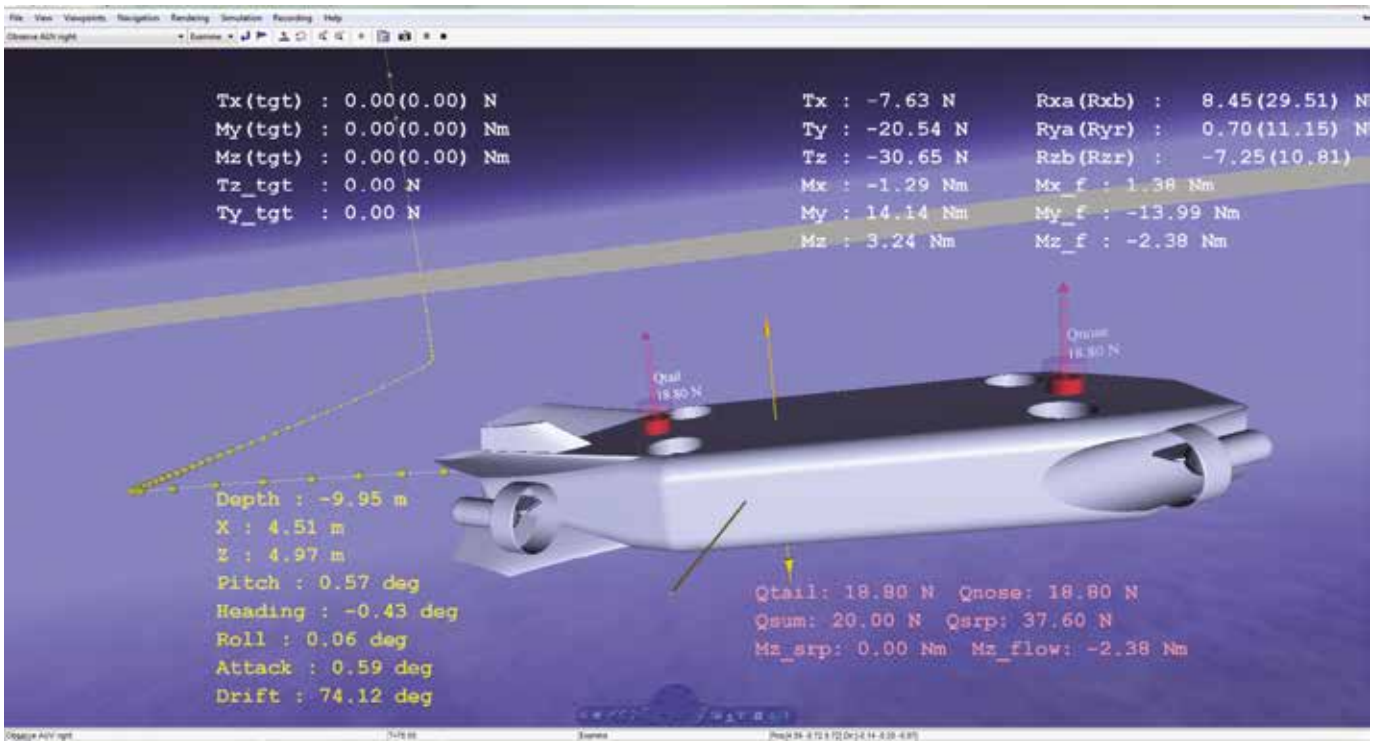

Рис. 5. Окно для визуального отображения поведения модели ГНПА в среде с числовыми параметрами движения. В процессе ручного управления моделью через это окно возможно контролировать целевые параметры

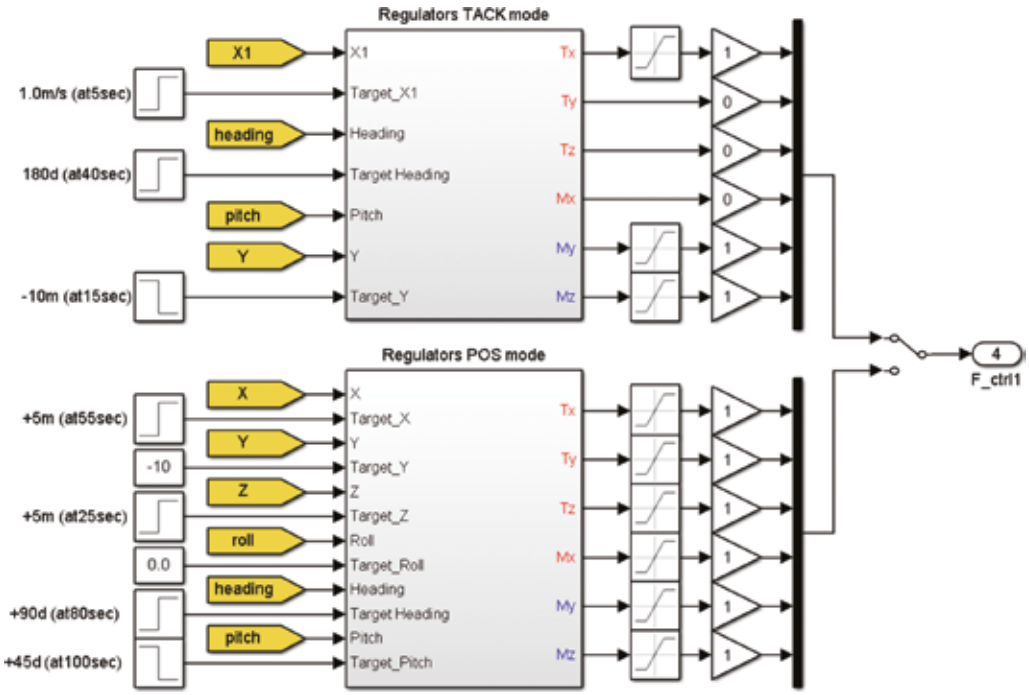

Рис. 6. Модули Simulink. Блоки регуляторов для режимов крейсерского движения и позиционирования

системой регулирования плавучести (СРП) с алгоритмом поведения на основе блока StateFlow.

На рис. 5 приведено окно *VR-инструментария Simulink* для визуализированного представления процессов управления движением. Стенд моделирования состоит из модулей разной степени вложенности, из которых основным является блок динамики с решателями уравнений движения, с моделью гидродинамики и моделью поведения ГНПА на поверхности.

На рис. 6 представлены модули Simulink с блоками регуляторов для режимов крейсерского движения и динамического позиционирования. Дополнительные модули *Simulink* включают регуляторы управления посредством СРП и модуль контроллера для ручного управления. В каждом канале управления используются PD/PID-регуляторы с ограничениями на управляющие воздействия и параметры 6-мерного вектора состояния.

Модель динамики движительно-рулевого комплекса (ДРК)

ДРК обеспечивает работу ГНПА как в автономном режиме при выполнении обзорно-поисковых работ, так и в режиме супервизорного управления через кабель связи при динамическом позиционировании над объектом. Рулевые устройства, использующие гидродинамические крылья в качестве исполнительных органов, как известно, имеют низкую

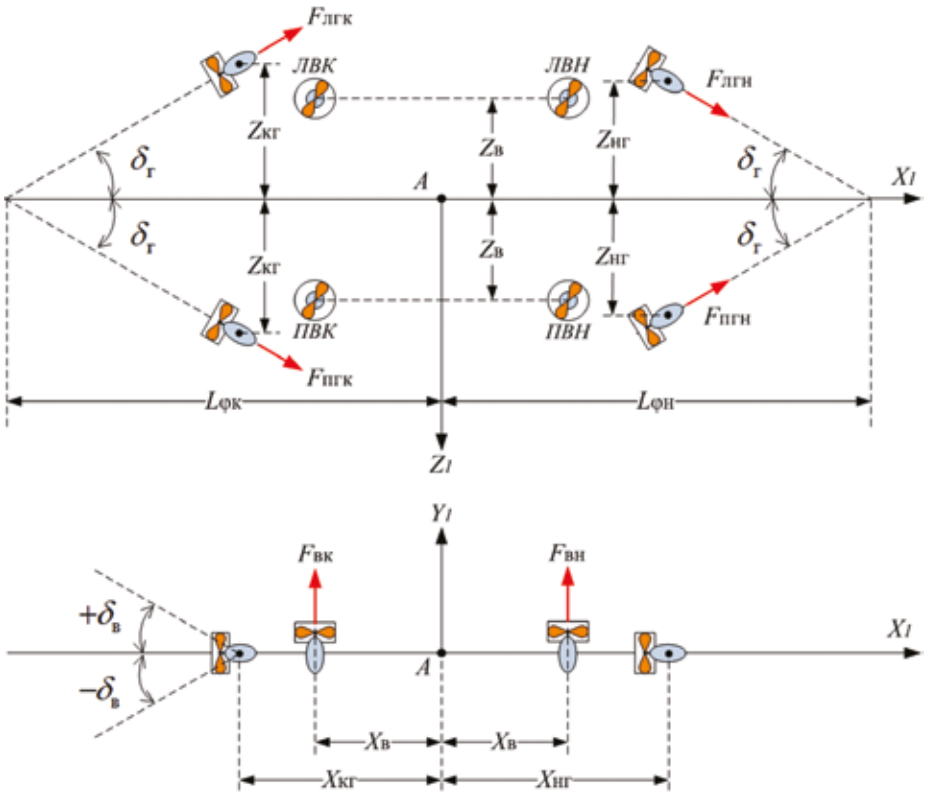

Рис. 7. Компоновочная схема ДРК

эффективность при малых скоростях набегающего потока [8]. Эффективность вертикальных подруливающих движителей также может быть недостаточной из-за влияния поперечного набегающего потока [9]. При этом компромиссным решением является использование кормовых маршевых движителей с приводом поворота в вертикальной плоскости, обеспечивающим управление по дифференту во всем диапазоне скоростей хода [10]. На рис. 7 представлена компоновочная схема ДРК, создающего управляющие воздействия по всем степеням свободы аппарата.

Управляющие силы и моменты, соответствующие приведенной схеме, определяются следующими соотношениями:

$$T_x = [(F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \cos\delta_{\text{в}} + F_{\text{лгн}} + F_{\text{пгн}}] \cdot \cos\delta_{\text{г}},$$
$$T_y = (F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \sin\delta_{\text{в}} \cdot \cos\delta_{\text{г}} + F_{\text{пвк}} + F_{\text{лвк}} + F_{\text{лвн}} + F_{\text{пвн}},$$
$$T_z = (F_{\text{пгк}} - F_{\text{лгк}} + F_{\text{лгн}} - F_{\text{пгн}}) \cdot \sin\delta_{\text{г}},$$
$$M_x = (-F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \sin\delta_{\text{в}} \cdot \cos\delta_{\text{г}} \cdot Z_{\text{кг}} + (-F_{\text{пвк}} + F_{\text{лвк}} + F_{\text{лвн}} - F_{\text{пвн}}) \cdot Z_{\text{в}},$$
$$M_y = (F_{\text{пгк}} - F_{\text{лгк}}) \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{к}} + (-F_{\text{лгн}} + F_{\text{пгн}}) \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{н}},$$
$$M_z = (F_{\text{пгк}} + F_{\text{лгк}}) \cdot \sin\delta_{\text{в}} \cdot \cos\delta_{\text{г}} \cdot X_{\text{кг}} + (-F_{\text{пвк}} - F_{\text{лвк}} + F_{\text{лвн}} + F_{\text{пвн}}) \cdot X_{\text{в}},$$
$$L_{\varphi\text{к}} = X_{\text{кг}} + Z_{\text{кг}} \cdot \text{ctg}\delta_{\text{г}},\ L_{\varphi\text{н}} = X_{\text{кн}} + Z_{\text{кн}} \cdot \text{ctg}\delta_{\text{г}},$$

где T_x, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z – проекции векторов управляющих сил и моментов на оси связанной с аппаратом системы координат (ССК) $AX_1Y_1Y_1$; $F_{\text{пгк}}$, $F_{\text{лгк}}$, $F_{\text{лгн}}$, $F_{\text{пгн}}$ – тяги горизонтальной группы движителей; $F_{\text{пвк}}$, $F_{\text{лвк}}$, $F_{\text{лвн}}$, $F_{\text{пвн}}$ – тяги вертикальной группы движителей; $\delta_{\text{г}}$ – угол установки горизонтальных движителей к продольной оси аппарата AX_1; $|\delta_{\text{в}}| \le \delta_{\text{в}}^{\max} = 30^0$ – регулируемый угол поворота кормовой пары горизонтальных движителей; $X_{\text{гк}}$, $Z_{\text{кг}}$, $X_{\text{кн}}$, $Z_{\text{кн}}$ – координаты расстановки горизонтальных движителей в ССК; $X_{\text{в}}$, $Z_{\text{в}}$ – координаты расстановки вертикальных движителей в ССК; $L_{\varphi\text{к}}$, $L_{\varphi\text{н}}$ – плечо курсового момента кормовых и носовых горизонтальных движителей, соответственно.

Численные значения линейных параметров ДРК в связанной системе координат приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры расстановки движителей ГНПА

$X_{\text{кг}}$, м	$X_{\text{нг}}$, м	$X_{\text{в}}$, м	$Z_{\text{кг}}$, м	$Z_{\text{нг}}$, м	$Z_{\text{в}}$, м	$L_{\varphi\text{к}}$, м	$L_{\varphi\text{н}}$, м	$\delta_{\text{г}}$, град
2,00	1,64	0,93	0,40	0,43	0,36	2,97	2,68	22,5

Декомпозиция управляющих воздействий T_x, M_y, M_z между элементами ДРК в режиме движения с крейсерским ходом (без использования вертикальной группы движителей) соответствует следующим выражениям:

$$F_{\text{пгк}} = T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}} \cdot \cos\delta_{\text{в}})^{-1} + M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{к}}),$$
$$F_{\text{лгк}} = T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}} \cdot \cos\delta_{\text{в}})^{-1} - M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{к}}),$$
$$F_{\text{лгн}} = T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}})^{-1} - M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{н}}),$$
$$F_{\text{пгн}} = T_{x1}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}})^{-1} + M_{y1}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{н}}),$$

$$T_{x1}^o = \begin{cases} T_{x1}^{рег}, \text{ при } |T_{x1}^{рег}| \le T_{x1}^{\max} \\ T_{x1}^{\max} \cdot \text{sign}T_{x1}^{рег}, \text{ при } |T_{x1}^{рег}| > T_{x1}^{\max} \end{cases};$$

$$M_{y1}^o = \begin{cases} M_{y1}^{рег}, \text{ при } |M_{y1}^{рег}| \le M_{y1}^{\max} \\ M_{y1}^{\max} \cdot \text{sign}M_{y1}^{рег}, \text{ при } |M_{y1}^{рег}| > M_{y1}^{\max} \end{cases};$$

$$M_{z1}^o = \begin{cases} M_{z1}^{рег}, \text{ при } |M_{z1}^{рег}| \le M_{z1}^{\max} \\ M_{z1}^{\max} \cdot \text{sign}M_{z1}^{рег}, \text{ при } |M_{z1}^{рег}| > M_{z1}^{\max} \end{cases};$$

$$\delta_{\text{в}} = \begin{cases} \arcsin \dfrac{M_{z1}^o}{0{,}5 \cdot T_{x1}^o \cdot \cos\delta_{\text{г}} \cdot X_{\text{кг}}}, \\ \text{при } |\delta_{\text{в}}| \le \delta_{\text{в}}^{\max} \\ \delta_{\text{в}}^{\max} \cdot \text{sign}\delta_{\text{в}}, \text{ при } |\delta_{\text{в}}| > \delta_{\text{в}}^{\max} \end{cases},$$

где $T_{x1}^{рег}, M_{y1}^{рег}, M_{z1}^{рег}$ – целевые значения управляющих воздействий, сформированные регуляторами движения в режиме крейсерского хода; $T_{x1}^{\max}, M_{y1}^{\max}, M_{z1}^{\max}$ – максимальные значения управляющих воздействий, реализуемые ДРК в режиме крейсерского хода.

Декомпозиция управляющих воздействий T_{x2}, T_{y2}, T_{z2}, M_{x2}, M_{y2}, M_{z2} между элементами ДРК в режиме динамического позиционирования и движения с малым ходом (без использования привода поворота кормовой пары горизонтальных движителей и с использованием вертикальной группы движителей) определяется соотношениями:

$$F_{\text{пгк}} = T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}})^{-1} + T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}})^{-1} + \\ + M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{к}})^{-1},$$
$$F_{\text{лгк}} = T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}})^{-1} - T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}})^{-1} - \\ - M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{к}})^{-1},$$
$$F_{\text{лгн}} = T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}})^{-1} + T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}})^{-1} - \\ - M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{н}})^{-1},$$
$$F_{\text{пгн}} = T_{x2}^o \cdot (4 \cdot \cos\delta_{\text{г}})^{-1} - T_{z2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}})^{-1} + \\ + M_{y2}^o \cdot (4 \cdot \sin\delta_{\text{г}} \cdot L_{\varphi\text{н}})^{-1},$$
$$F_{\text{пвк}} = T_{y2}^o / 4 - M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_{\text{в}})^{-1} - M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_{\text{в}})^{-1},$$
$$F_{\text{лвк}} = T_{y2}^o / 4 + M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_{\text{в}})^{-1} - M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_{\text{в}})^{-1},$$
$$F_{\text{лвн}} = T_y^o / 4 + M_x^o \cdot (4 \cdot Z_{\text{в}})^{-1} + M_z^o \cdot (4 \cdot X_{\text{в}})^{-1},$$
$$F_{\text{пвн}} = T_{y2}^o / 4 - M_{x2}^o \cdot (4 \cdot Z_{\text{в}})^{-1} + M_{z2}^o \cdot (4 \cdot X_{\text{в}})^{-1},$$

$$T_{x2}^{o}=\begin{cases}T_{x2}^{рег}, \text{ при } \left|T_{x2}^{рег}\right|\le T_{x2}^{\max}\\ T_{x2}^{\max}\cdot \operatorname{sign}T_{x2}^{рег}, \text{ при } \left|T_{x2}^{рег}\right|> T_{x2}^{\max}\end{cases},$$

$$M_{x2}^{o}=\begin{cases}M_{x2}^{рег}, \text{ при } \left|M_{x2}^{рег}\right|\le M_{x2}^{\max}\\ M_{x2}^{\max}\cdot \operatorname{sign}M_{x2}^{рег}, \text{ при } \left|M_{x2}^{рег}\right|> M_{x2}^{\max}\end{cases},$$

$$T_{y2}^{o}=\begin{cases}T_{y2}^{рег}, \text{ при } \left|T_{y2}^{рег}\right|\le T_{y2}^{\max}\\ T_{y2}^{\max}\cdot \operatorname{sign}T_{y2}^{рег}, \text{ при } \left|T_{y2}^{рег}\right|> T_{y2}^{\max}\end{cases},$$

$$M_{y2}^{o}=\begin{cases}M_{x2}^{рег}, \text{ при } \left|M_{x2}^{рег}\right|\le M_{x2}^{\max}\\ M_{x2}^{\max}\cdot \operatorname{sign}M_{x2}^{рег}, \text{ при } \left|M_{x2}^{рег}\right|> M_{x2}^{\max}\end{cases},$$

$$T_{z2}^{o}=\begin{cases}T_{z2}^{рег}, \text{ при } \left|T_{y2}^{рег}\right|\le T_{y2}^{\max}\\ T_{z2}^{\max}\cdot \operatorname{sign}T_{z2}^{рег}, \text{ при } \left|T_{z2}^{рег}\right|> T_{z2}^{\max}\end{cases},$$

$$M_{z2}^{o}=\begin{cases}M_{z2}^{рег}, \text{ при } \left|M_{z2}^{рег}\right|\le M_{z2}^{\max}\\ M_{z2}^{\max}\cdot \operatorname{sign}M_{z2}^{рег}, \text{ при } \left|M_{z2}^{рег}\right|> M_{z2}^{\max}\end{cases},$$

где $T_{x2}^{рег}, T_{y2}^{рег}, T_{z2}^{рег}, M_{x2}^{рег}, M_{y2}^{рег}, M_{z2}^{рег}$ – целевые значения управляющих воздействий, сформированные регуляторами движения в режиме динамического позиционирования; $T_{x2}^{\max}, T_{y2}^{\max}, T_{z2}^{\max}, M_{x2}^{\max}, M_{y2}^{\max}, M_{z2}^{\max}$ – максимальные значения управляющих воздействий, реализуемые ДРК в режиме динамического позиционирования. Максимальные значения управляющих воздействий ДРК для двух режимов движения аппарата, соответствующие максимальной тяге каждого из движителей $F_{гд}^{мах}=F_{вд}^{мах}=500$ Н с фиксированным ее распределением между конкурирующими каналами управления, сведены в табл. 3.

Ресурс движителей ДРК распределен между каналами управления следующим образом:

- ресурс горизонтальных движителей между каналами управления в режиме крейсерского хода – $F_{Tx}^{ГД}=280$ Н, $F_{My}^{ГД}=220$ Н;
- ресурс горизонтальных движителей между каналами управления в режиме динамического позиционирования – $F_{Tx}^{ГД}=200$ Н, $F_{Tz}^{ГД}=200$ Н, $F_{My}^{ГД}=100$ Н;
- ресурс вертикальных движителей между каналами управления в режиме динамического позиционирования – $F_{Ty}^{ВД}=200$ Н, $F_{Mx}^{ВД}=200$ Н, $F_{Mz}^{ВД}=100$ Н.

Результаты моделирования динамики ГНПА в крейсерском режиме движения и в режиме динамического позиционирования

1. *Крейсерский режим* является стандартным для АНПА при осуществлении типовых программных миссий со стабилизацией глубины и курса с постоянной или переменной скоростью. При этом управляющие воздействия создаются только кормовой парой горизонтальных движителей и их поворотом в вертикальной плоскости. Для примера задавалось движение, включающее следующие элементы: старт с заданным курсовым углом с начальной скоростью 0,2 м/с и увеличением скорости до 1,0 м/с, отработку рассогласования по глубине 8 м, переход на обратный

Таблица 3. Максимальные значения управляющих воздействий ДРК

Режим движения	Управляющие воздействия ДРК					
	$T_x^{\max}$, Н	$T_y^{\max}$, Н	$T_z^{\max}$, Н	$M_x^{\max}$, Нм	$M_y^{\max}$, Нм	$M_z^{\max}$, Нм
Крейсерский ход (АНПА)	900	0	0	0	950	416
Позиционирование (ТНПА)	740	800	300	288	430	372

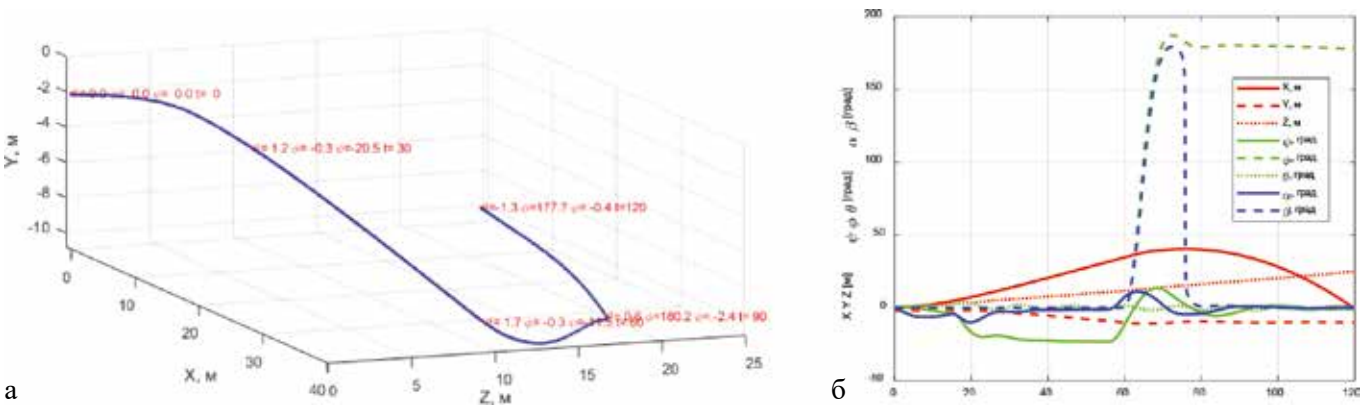

Рис. 8. Крейсерский режим движения: пример пространственной траектории (а), линейные и угловые параметры движения (б)

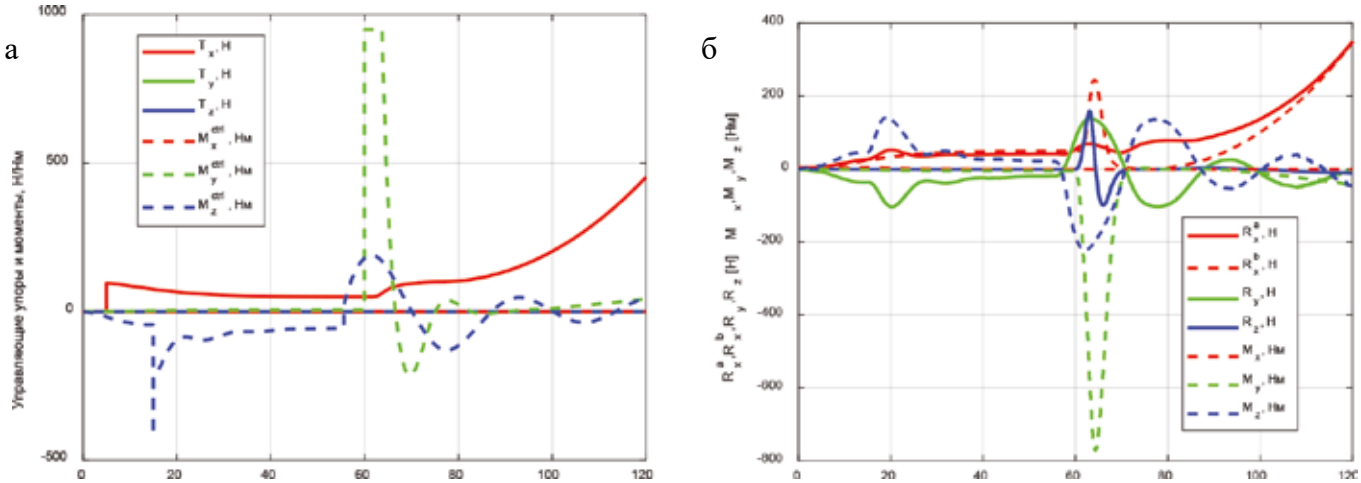

Рис. 9. Крейсерский режим движения: управляющие силы и моменты (а), силы гидродинамического сопротивления (б)

галс. Из внешних возмущений учитывались положительная плавучесть 10 Н и постоянно действующее боковое течение 0,2 м/с. Результаты моделирования движения представлены на рис. 8, 9.

Можно отметить, что динамика ГНПА в режиме крейсерского движения отвечает тем условиям, которые заданы программой движения. Устойчивость движения при отработке заданных рассогласований по курсу и глубине обеспечивается выбором параметров регуляторов, а характеристики маневренности определяются максимальными значениями управляющих усилий.

2. *Режим динамического позиционирования* является стандартным для ТНПА при осуществлении рабочих операций в окрестностях объекта донной инфраструктуры со стабилизацией углового и линейного положения в условиях действия возмущений от течения и кабеля связи. При этом задействованы все движители ДРК, а кормовая пара горизонтальных движителей фиксируется с нулевым углом поворота. При моделировании динамики аппарата была задана программа движения, включающая последовательно: вертикальное погружение на 8 м, боковое смещение на 5 м, продольное перемещение на 5 м, поворот на

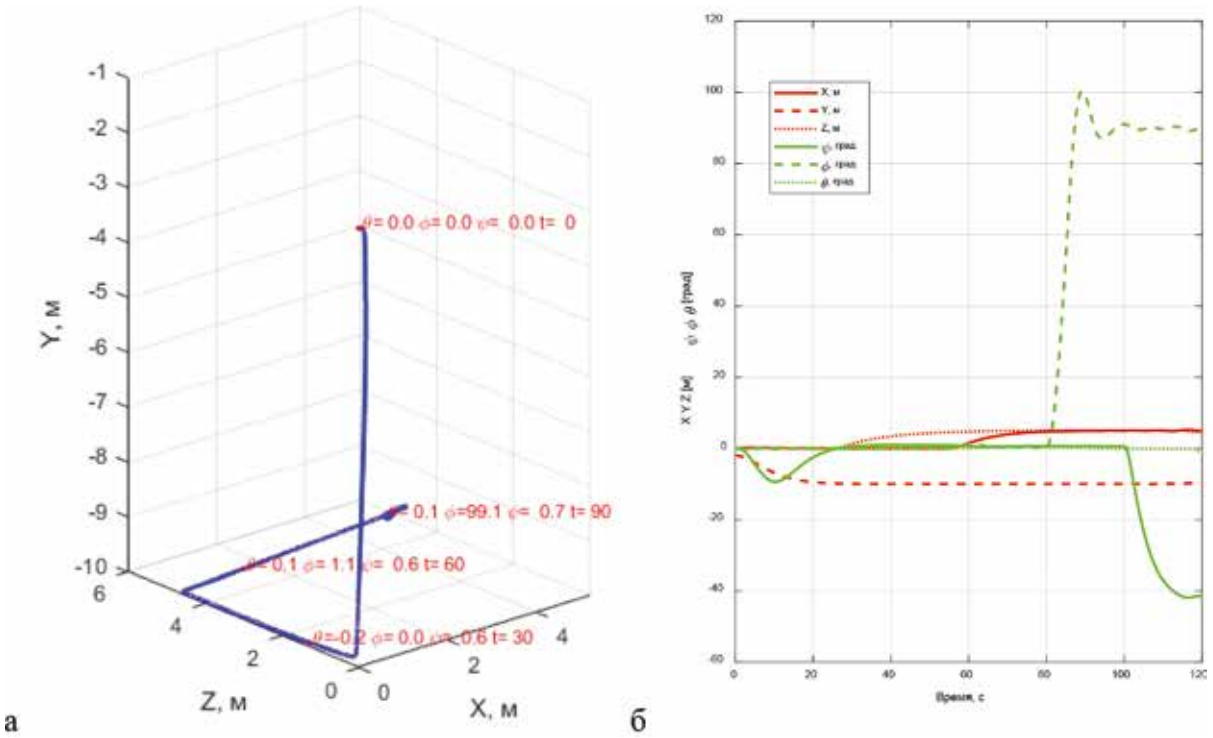

Рис. 10. Режим позиционирования: траектория движения в режиме позиционирования (а), пространственные и угловые параметры движения (б)

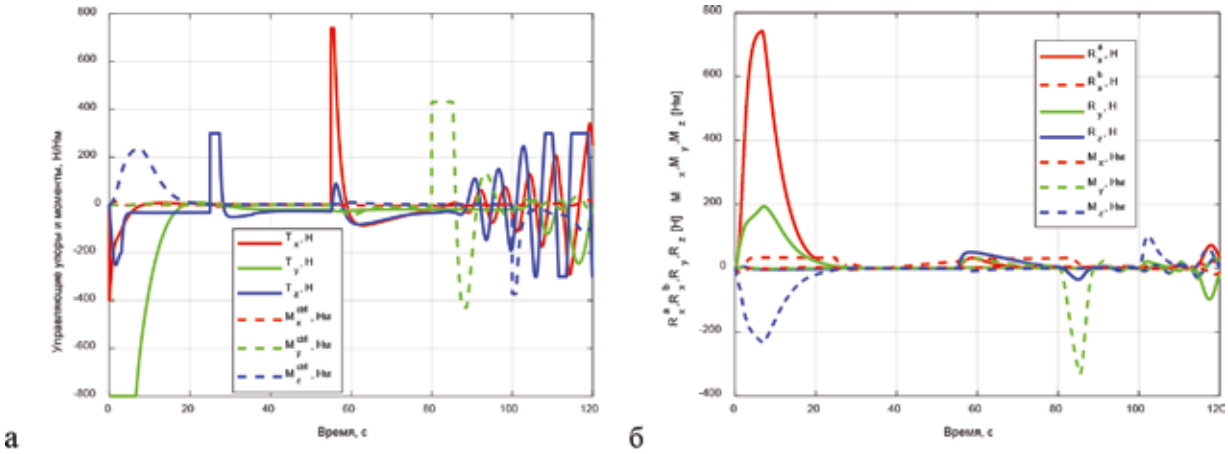

Рис.11. Режим позиционирования: управляющие силы и моменты (а), силы гидродинамического сопротивления (б)

месте по курсу на 90º, отработка заданного рассогласования по дифференту 45º.

На рис. 10, 11 представлены траектория, параметры движения и возмущающие силы.

Динамические характеристики в режиме позиционирования обусловлены взаимодействием управляющих и возмущающих сил в 3-мерном движении. С учетом переходных процессов по курсу, крену и глубине и действия внешних сил (плавучести и бокового течения) происходит динамическое взаимодействие по всем каналам управления. Так, разворот на месте на 90º и стабилизация дифферента 45º при наличии течения сопровождаются изменением поперечной тяги в виде колебаний с выходом на ограничение. Параметрами регуляторов обеспечивается достаточно быстрое затухание (15–20 с) переходных процессов при отработке начальных рассогласований.

Заключение

Отметим основные положения и результаты работы.

1. Создание ГНПА как нового объекта подводной робототехники приводит к постановке актуальной задачи, связанной с разработкой динамической модели, в которой должны быть отражены функциональные особенности АНПА и ТНПА и их динамические свойства. Перечень основных вопросов разработки включает:

- построение корректной математической модели пространственного движения в типовых обзорно-поисковых режимах и специальных режимах динамического позиционирования при обследовании объектов;
- адаптацию прикладных вычислительных средств комплекса *Simulink* для исследования динамических свойств системы управления ГНПА, применение технологии «виртуальной продувки» для идентификации гидродинамических характеристик ГНПА;
- разработку структуры и математической модели движительно-рулевого комплекса ГНПА, обеспечивающего все многообразие пространственных движений с учетом функциональных особенностей ГНПА;
- оценку динамических свойств ГНПА по результатам вычислительных экспериментов.

2. Результаты исследований и модельных вычислений по перечисленным выше вопросам свидетельствуют о том, что динамика пространственного движения ГНПА, совмещающего в себе функции АНПА и ТНПА, удовлетворяет общим требованиям по маневренности (управляемости), устойчивости по отношению к параметрам вектора состояния и внешним возмущениям. Принятые в динамической модели ГНПА структуры и алгоритмы могут быть взяты за основу при разработке системы управления движением с учетом всех факторов, влияющих на динамику ГНПА. В частности, одним из таких существенных факторов является влияние оптоволоконного кабеля связи при использовании супервизорного режима управления. Исследование этого и других аналогичных вопросов является темой дальнейших исследований.

Работа выполнена по теме госзадания ИПМТ ДВО РАН «Научные исследования и разработки в области новых технологий создания перспективных морских робототехнических комплексов …», № госрегистрации АААА-А17-117013010055-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Щербатюк А.Ф.,Ремезков А.В. Развитие технологического потенциала автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 4–14.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М: Наука, 2005. 400 с.
3. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение [отв.ред.Л.В.Киселев], Владивосток: Дальнаука, 2018. 367 с.
4. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение, 1973. 511 с.
5. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 13–26.
6. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 24–35.
7. Киселев Л.В., Багницкий А.В., Медведев А.В. Идентификация гидродинамических характеристик автономного подводного робота с использованием модельных и экспериментальных данных // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25, № 1 (96). С.78–92.
8. Kiselev L.V., Bagnitckii A.V., Medvedev A.V.. Identification of AUV Hydrodynamic Characteristics Using Model and Experimental Data // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8, No. 3. P. 217–225.
9. An Autonomous Underwater Vehicle using Remote Piloting Technology via 4G Internet. – URL: https://www.sut.org/wp-content/uploads/2018/06/Aaron-Leather-v2-AUT-Freedom-Rev3-Final-Submission-draft-2-21.10.2019.pdf (дата обращения: 03.02.2021).
10. Вельтищев В. В. Анализ влияния скошенного потока на рабочие характеристики движителей необитаемых подводных аппаратов // Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2010. №. S. С. 97–106.
11. Пат. 2290338 РФ МПК B63G 8/16, B63H 20/08. Подводный аппарат повышенной маневренности / Горнак В.Е., Мальцева С.В. – № 2004136450/11, заявл.: 14.12.2004; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

Об авторах

Киселев Лев Владимирович, д.т.н., главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: подводная робототехника, автономные и гибридные подводные роботы, системы управления и навигации, динамические модели, траекторное обследование геофизических полей.
Тел.: +7(902)506-16-77
E-mail: levkiselev1@yandex.ru, kiselev@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0001-9312-9708

Костенко Владимир Владимирович, к.т.н., заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления, ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а
Научные интересы: Подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы.
Тел.: +7 (984) 145-43-85
E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru
SPIN-код: 2310-3141
ORCID ID: 0000-0002-3821-3787
Resercher ID: AAF-6399-2021
Scopus ID: 57189036440

Медведев Андрей Владимирович – старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: подводная робототехника, вычислительные системы и модели, динамика систем управления, гидродинамика подводных роботов.
Тел.: +7(914)708-10-14
E-mail: auv@list.ru
ORCID ID: 0000-0001-5678-8966

Для цитирования:

Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА // Подводные исследования и робототехника. 2021. No. 1(35). С. 18–30. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_02