

УДК 551.46.077:629.584

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТОВ И КОНФИГУРАЦИЙ

Л.В. Киселев, А.В. Медведев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

При создании автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) обычно соблюдается принцип преемственности, позволяющий не только сохранять, но и наращивать функциональные свойства аппаратов и их систем управления. При этом аппараты могут иметь различные тактико-технические данные, но общими для них являются динамические требования, распространяющиеся на все многообразие режимов пространственного движения. Оптимизация динамических свойств АНПА предполагает построение адекватной модели движения, идентификацию ее параметров на основе экспериментальных данных, синтез адаптивных регуляторов при изменении сил взаимодействия аппарата со средой. В статье рассматриваются модели динамики АНПА, отличающихся конструкцией и назначением, и примеры осуществления некоторых характерных пространственных движений.

■ Модели движения и гидродинамические характеристики

При описании пространственного движения АНПА будем исходить из предпосылок, принятых в работах [1–5]. В общем случае математическая модель движения АНПА включает вектор локальных координат $X=\{X(t), Y(t), Z(t)\}$, определяющий вид пространственной траектории, и вектор состояния $\tilde{X}=(V, X)$. В последнем V есть скорость относительно водной среды (набегающего потока); $x = (\psi, \varphi, \alpha, \varphi, \dot{\varphi}, \beta)$, φ – курс, ψ – дифферент, а углы атаки α и дрейфа β характеризуют взаимную ориентацию поточной (скоростной) и связанной с аппаратом систем координат.

В принятых обозначениях математическая модель про-

странственного движения имеет вид нелинейной многомерной системы уравнений, параметры которой могут изменяться в широком диапазоне. Поэтому для исследования динамических свойств АНПА производится разделение полной системы уравнений на подсистемы, описывающие движение в плоскостях симметрии с использованием «естественных» переменных состояния. При этом уравнения движения АНПА можно представить в виде двух взаимосвязанных подсистем:

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + \\ &+ T_{x1} \cos \alpha - T_{y1} \sin \alpha + R_{xd}, \\ m_y v \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \psi) + P \cos \vartheta + \\ &+ T_{y1} \cos \alpha + T_{x1} \sin \alpha + R_{yd}, \\ I_z \ddot{\psi} &= M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_{z \text{ ynp}}, \\ \dot{X} &= v \cos \vartheta + v_{Tx}, \dot{Y} = -v \sin \vartheta + v_{Ty}, \\ \varphi &= \vartheta + \alpha; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= R_x(v, \beta) + T_{x1} \cos \beta - \\ &- T_{z1} \sin \beta + R_{xd}, \\ m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \varphi) + T_{z1} \cos \beta + \\ &+ T_{x1} \sin \beta + R_{zd}, \\ I_y \ddot{\varphi} &= M_y(v, \beta, \varphi) + M_{y \text{ ynp}}, \\ \dot{X} &= v \cos \chi + v_{Tx}, \dot{Z} = v \sin \chi + v_{Tz}, \\ \varphi &= \chi + \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (1, 2), описывающих движение в вертикальной (по глубине) и горизонтальной (по курсу) плоскостях, приняты обозначения названных выше работ, в частности: T_{x1} , T_{y1} , T_{z1} , $M_{y \text{ ynp}}$, $M_{z \text{ ynp}}$ – проекции управляющих сил и моментов в системе координат, связанной с корпусом аппарата; ϑ , χ – углы подъема и поворота траектории; R_x , R_y , R_z , M_y , M_z – гидродинамические силы и мо-

¹ 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел./факс: (423) 2432416; e-mail: kiselev@marine.febras.ru; auv@list.ru

менты; M_0 – момент остойчивости; R_{xd}, R_{yd}, R_{zd} – возмущающие силы, имеющие случайный характер; v_{Tx}, v_{Tz} – составляющие вектора течения; P – переменная плавучесть, зависящая, в частности, от глубины Y погружения аппарата.

Взаимосвязь плоских движений, описываемых уравнениями (1) и (2), происходит через канал управления скоростью при суммарном воздействии упоров движителей. Таким образом, даже при определенной идеализации модель движения имеет достаточно сложный вид многомерной нелинейной системы уравнений. В общем случае движение в вертикальной плоскости является более сложным в динамическом отношении, поскольку связано с разрешением противоречивых требований к точности и устойчивости управляемых процессов. При значениях переменных параметров системы, допускающих линеаризацию, уравнения движения в вертикальной плоскости принимают вид:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \hat{C}_x(v) + b_v U_v(v, U_x, U_y), \\ \dot{x}_i &= \sum a_{ij} x_j + b_i U_x + R_{xi}, \quad i, j = 1 \dots 4, \\ \dot{X} &= v \cos(x_2/v) + v_{Tx}, \\ \dot{Y} &= v \sin(x_2/v) + v_{Ty}, \\ U_x &= F_x(x_i, v), \end{aligned} \quad (3)$$

где x_1 – компоненты вектора состояния: x_1 – отклонение по глубине, x_2 – его производная, x_3, x_4 – дифферент и его производная; $a_{ij}, \hat{C}_x(v)$ – величины, зависящие от сил гидродинамического сопротивления и инерционных характеристик аппарата, включая присоединенные массы жидкости, b_v, b_i – параметры, зависящие от максимальных значений управляющих воздействий.

Обычно на стадии проектирования АНПА ставится задача оценить динамические свойства аппарата и его системы управления с учетом основных факторов: конструктивных форм, скорости движения аппарата относительно потока, устройства движительного комплекса. Конкретная цель состоит в определении гидродинамических сил сопротивления, действующих на аппарат, и оценке путем моделирования основных динамических и энергетических свойств аппарата. Для исследования динамических свойств АНПА необходимо знание сил вязкого сопротивления R_x, R_y, R_z, M_y, M_z в различных режимах движения (обтекания корпуса аппарата потоком жидкости). Обычно для приближенной оценки гидродинамических характеристик при проектировании аппарата прибегают к известным расчетно-теоретическим моделям и эмпирическим зависимостям, полученным на основе апробированных методов экспериментальной гидромеханики.

Основное методологическое требование при построении модели динамики заключается в том, чтобы уравнения (1–3) адекватно описывали реальное движение аппарата. Это возможно только в том случае, если входящие в них параметрические зависимости сил гидродинамического сопротивления и управляющие воздействия с достаточной точностью отражают реальные свойства аппарата.

В настоящее время для анализа гидродинамики АНПА широко используется метод виртуальной продувки на основе пакетов прикладных программ Solid Works 2008, COSMOS FloWorks, адаптиро-

ванных к условиям АНПА. Для сравнения и корректировки используются данные прямых измерений и результаты идентификации параметров теоретической модели по реальным данным, полученным в испытаниях аппарата.

В линеаризованной постановке силы вязкого гидродинамического сопротивления представляются обычно в виде суммы позиционных $R_y(v, \alpha), R_z(v, \beta), M_z(v, \alpha), M_y(v, \beta)$ и демпфирующих $R_y(v, \omega), R_z(v, \omega), M_y(v, \omega_y), M_z(v, \omega_z)$ составляющих. При малых значениях угловых величин гидродинамические воздействия характеризуются обычно их позиционными и вращательными производными, зависящими от формы корпуса аппарата и режима обтекания, который характеризуется числом Рейнольдса. В том случае, когда корпус аппарата обладает симметрией относительно продольной оси, соответствующие характеристики по осям вращения одинаковы.

Виртуальная продувка трехмерных моделей аппаратов позволяет в наглядном виде строить диаграммы поля скоростей (давлений) для различных режимов обтекания и графические зависимости сил сопротивления от скорости и углов атаки (дрейфа). Для сравнения и корректировки используются данные прямых измерений и результаты идентификации параметров теоретической модели по реальным данным, полученным в натуральных испытаниях аппарата.

Исследования по ряду проектов АНПА позволяют оценить характеристики гидродинамического сопротивления

Таблица 1. Конструктивные параметры АНПА для 4-х преемственных проектов

Параметр	Значение			
	Клавесин	ММТ-3000	МТ-2010 (Пилигрим)	МТ-2011 (проект)
Длина, м	5,5	2,4	3,0	3,8
Объем, м ³	3,1	0,23	0,41	0,48
Диаметр сечения корпуса, м	0,9	0,45	0,45	0,5
Смоченная поверхность, м ²	22,8	3,8	5,0	6,85
Момент остойчивости, Нм	100	15	40	40
Масса в воздухе, кг	3110	230	300	350
Масса М _х с учетом присоединенной жидкости, кг	3300	185	320	385
Массы М _у , М _z с учетом присоединенной жидкости, кг	6000	366	615	720
Моменты инерции J _у , J _z с учетом присоединенной жидкости, Нмс ²	9650	130	838	916

аппаратов различных конфигураций, выявить элементы внешней формы, влияющие на динамику и энергетику аппаратов.

Одна из особенностей динамической модели аппарата связана с определением присоединенных масс и моментов инерции жидкости, зависящих от геометрических пропорций корпуса и от его ориентации относительно потока. Для аппаратов, имеющих симметричную

форму и совершающих плоские движения, обычно принимается, что влияние присоединенной жидкости проявляется в виде увеличения массы и моментов инерции. При осуществлении пространственных движений с произвольными углами атаки и дрейфа следует рассматривать присоединенные массы $\{m_x, m_y, m_z\}$ как векторы, составляющие которых зависят от углов атаки и дрейфа во всем диапазоне их изменения $\{-\pi \leq \alpha, \beta \leq \pi\}$.

Ниже приведены примеры применения методики «виртуальной продувки» и моделирования динамики для преемственного ряда АНПА: «Клавесин», «ММТ-3000», «МТ-2010» («Пилигрим»), «МТ-2011» (проект) (рис. 1). Для сравнения рассмотрены также особенности динамики АНПА некоторых нетрадиционных проектов, отличающихся размерами и количеством несущих корпусов.

Основные конструктивные параметры аппаратов, изображенных на рис. 1, приведены в табл. 1, а производные коэффициентов для сил вязкого сопротивления – в табл. 2.

■ Динамика и управление

Характер динамических процессов определяется совокупностью параметров, устанавливающих связь режимов движения с требованиями по качеству управления. К основным (типовым) режимам движения можно отнести:

- движение с переменной скоростью, торможение под действием движителей, движение по инерции;
- задний ход, движение лагом, разворот на месте;
- изменение (стабилизация) курса, циркуляция;
- изменение (стабилизация) глубины/высоты, погружение спиралью, зависание.

Динамические требования к системе управления зависят от конкретной задачи, однако в любом случае необходимо обеспечивать:

- устойчивость по отношению к начальным отклонениям (устойчивость «в большом»);
- быстродействие и точность при отработке начальных рассогласований;
- компенсацию внешних возмущений;

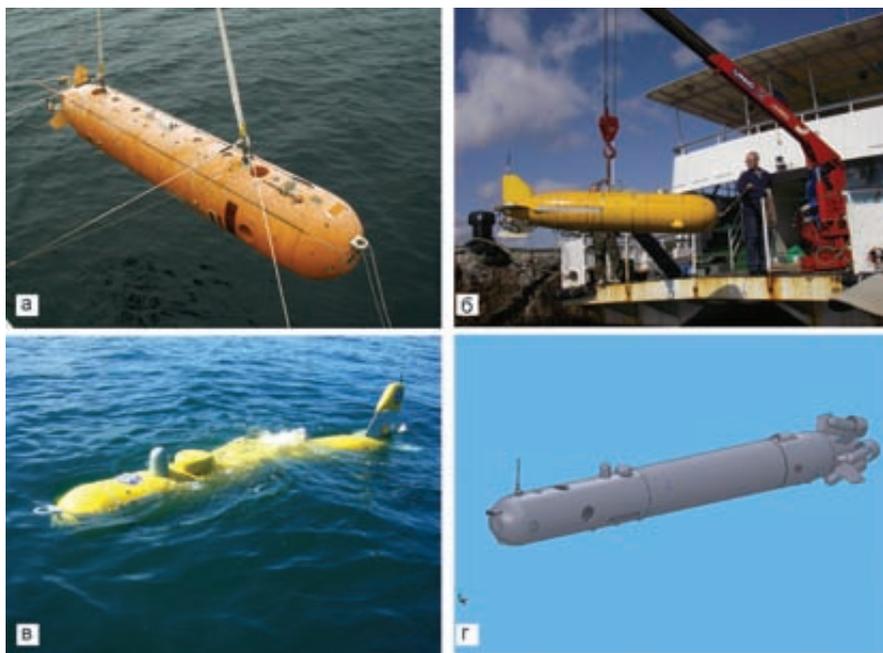


Рис. 1. Преемственный ряд АНПА: а – «Клавесин», б – «ММТ-3000», в – «МТ-2010» («Пилигрим»), г – «МТ-2011» (проект)

Таблица 2. Производные коэффициентов сил вязкого сопротивления

Гидродинамические коэффициенты	Клаведин	ММТ-3000	МТ-2010	МТ-2011
C_x	0,08	0,012	0,02	0,019
C_y^a, C_z^b	1,2	0,31	0,082	0,25
m_z^a, m_y^b	1,4	0,25	0,016	0,028/0,031
C_y^o, C_z^o	1	0,15	0,051	0,141/0,083
m_z^o, m_y^o	0,94	0,18	0,066	0,13/0,07

– минимизацию энергозатрат на движение.

Первые три задачи, характеризующие качество управления, решаются в основном алгоритмическим (программным) путем, а для минимизации энергозатрат на движение необходимо, кроме того, минимизировать сопротивление на корпусе и хвостовом оперении, где обычно размещаются исполнительные органы (двигатели и рули).

Прежде всего необходимо отметить, что найти аналитические оценки устойчивости для всего многообразия режимов движения АНПА – задача практически неразрешимая. Кроме того, в этом и нет необходимости, если ограничиться лишь теми требованиями, от которых в первую очередь зависит качество работы АНПА. В этом отношении стабилизация программных значений скорости и курса серьезных проблем не вызывает, и в большинстве случаев требуемое качество динамики достигается с помощью ПИД-регуляторов с постоянными или настраиваемыми параметрами управления. Иначе обстоит дело с задачей стабилизации движения в вертикальной плоскости при произвольных начальных условиях и действии априорно не известных возмущений. Это обусловлено, в частности, тем, что динамическая связь движения центра масс и угло-

вого движения относительно центра масс оказывается более существенной, чем в горизонтальной плоскости. Кроме того, и сама задача управления, имеющая несколько аспектов, оказывается более сложной. Можно, например, отметить, что речь идет об устойчивости в многомерном параметрическом пространстве, элементами которого являются компоненты вектора состояния, параметры управления и физические ограничения на ресурсы управления. Возникает вопрос определения достаточных условий устойчивости по отношению ко всем этим характеристикам в совокупности, причем из этих условий должны следовать практические алгоритмы для синтеза управления, обеспечивающего компромисс противоречивых динамических требований.

Одна из особенностей системы уравнений (3), описывающих движение в вертикальной плоскости, состоит в том, что в разомкнутом виде ($U_x = 0$) ее правая часть нейтральна по отношению к координате x_1 (рассогласованию по глубине) и, следовательно, характеристическое уравнение для этой системы имеет один нулевой корень. Как известно [2], анализ устойчивости в этом случае связан с преобразованием системы к специальному виду, позволяющему использовать аппарат функций Ляпунова.

Другая особенность связана с гидродинамической неустойчивостью корпуса аппарата по отношению к углу атаки. Квадратичная зависимость сил гидродинамического сопротивления от скорости набегающего потока приводит к тому, что при значительных изменениях скорости возникает проблема с обеспечением устойчивости по отношению к начальным отклонениям системы. При некоторых условиях система вообще может оказаться неустойчивой при любых начальных отклонениях. Как показывают исследования и практический опыт, данная проблема оказывается наиболее актуальной для «больших» АНПА, для которых существенное значение имеет гидродинамическая неустойчивость корпуса при ограниченных ресурсах управления. Для «малых» АНПА гидродинамические и управляющие силы соизмеримы, и для обеспечения устойчивости используются традиционные методы.

Условия устойчивости по первому приближению можно получить, ограничиваясь линеаризованной постановкой при малых значениях угловых величин и постоянной скорости при линейном управлении $U_x = \sum K_i x_i$ с постоянными или изменяющимися параметрами K_i . При отсутствии ограничений на управление можно найти необходимые и достаточные условия устойчивости «в целом» (по отношению к переменным состояниям) в пространстве параметров управления K_i . Задача разрешима и связана с простыми, но трудоемкими вычислениями. При ограничении величины управляющего воздействия ($|U_x| < 1$) возможно решение задачи устойчивости «в целом» (на основе функций

Ляпунова для линейной части системы). Однако построение в пространстве параметров области, дающей достаточные условия устойчивости, весьма проблематично. Геометрически это означает построение области притяжения, являющейся «ловушкой» для фазовых траекторий системы. Вместе с тем реальные отклонения системы от положения равновесия всегда ограничены, и требования устойчивости «в целом» являются не только завышенными, но и по существу излишними. Фактически задача сводится к определению взаимосвязи между выбранными определенным образом параметрами управления и соответствующей им областью допустимых начальных отклонений системы. Установление подобной связи аналитическим путем представляется трудно разрешимой задачей. Если заданы начальные отклонения системы $\{x_i(0)\}$, то численным методом можно определить области устойчивости и оценки качества управления в пространстве параметров управления K_i . Если кроме того определить область допустимых (по устойчивости) начальных отклонений $\{\tilde{x}_i(0)\}$, то необходимо выбрать коэффициенты K_i так, чтобы указанная область принадлежала с запасом по устойчивости области $\{x_i(0)\}$. Выбором параметров управления K_i обеспечивается также компромисс требований к устойчивости и точности (быстродействию) управления. При изменении скорости $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ и соответственно качества динамических процессов требуется коррекция параметров управления. Для этой цели можно ввести определенную логику переключения параметров

управления, в соответствии с которой они будут изменяться скачкообразно или непрерывно $K_{imin} \leq K_i \leq K_{imax}$, адаптируясь к изменениям других параметров, как это принято в системах с переменной структурой. Ситуация поясняется приведенными ниже соотношениями (4), характеризующими связь условий устойчивости в пространстве состояний и в пространстве конструктивных параметров системы управления.

1. $v = const. U_x = \sum K_i x_i \Rightarrow \Rightarrow S_k(K_i, a_{ij}, b_i, v) \Rightarrow$
устойчивость «в целом»;
2. $U_x = \sum K_i x_i, |U_x| \leq 1 \Rightarrow \Rightarrow S_k(K_i, a_{ij}, b_i, v) \Rightarrow S_x(x_i, v) \Rightarrow$
устойчивость «в большом»;
3. $v_{min} \leq v \leq v_{max}, |U_x| \leq 1 \Rightarrow \Rightarrow S_k(K_i(x_i), a_{ij}, b_i, v) \Rightarrow \Rightarrow S_x(x_i, v) \Rightarrow$ адаптивная коррекция управления для обеспечения устойчивости «в большом» и «в малом».

Компромисс условий устойчивости и точности управления можно обеспечить с помощью алгоритма непрерывного изменения параметров линейного управления $K_{i min} < K_i < K_{i max}$ в процессе отработки начальных отклонений [4]. Например, для отработки начальных отклонений по глубине (координата x_1) можно принять:

$$K_1 = K_{10} (\tilde{x}_1 - |x_1|),$$

где K_{10} следует выбрать так, чтобы при заданном значении допустимого рассогласования \tilde{x}_1 обеспечивались устойчивость при всех $|x_1| < \tilde{x}_1$ и высокая точность (быстродействие) в установившемся режиме.

Величина $K_{1 max}$ определяет характер переходных процес-

сов на конечном участке, и, следовательно, ее значение можно задать из условия $K_{1 max} = K_{10} \tilde{x}_1$. Тогда коэффициент $K_{1 min} = K_{1 max} (1 - |x_1(0)| / \tilde{x}_1)$ будет зависеть от начальных условий, не выходящих из области их допустимых значений.

В общем случае компромисс условий устойчивости и точности управления можно обеспечить с помощью «квазилинейного» управления вида:

$$U_x = f(v) \sum K_{i max} x_i (1 - |x_i| / \tilde{x}_i), \tag{4}$$

где $f(v)$ – функция, аппроксимирующая зависимость качества переходных процессов от скорости движения. При управлении вида (4) его параметры автоматически настраиваются на изменение скорости и величины текущего вектора состояния. При этом переходные процессы оказываются близкими к «эталонному» процессу, характер которого не зависит от начальных рассогласований из области их допустимых значений.

Сравним динамические свойства АНПА различных конфигураций при осуществлении «типовых» пространственных движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Динамические свойства АНПА «Клавесин», «ММТ-3000» более детально исследовались в работах [3, 4].

Для иллюстрации приведем пример (рис. 2) переходных процессов и «фазовой» плоскости $(\Delta Y, \psi)$ при жестком задании параметров ПИД-регулятора и «квазилинейном» управлении вида (4) для АНПА «МТ-3000» [3].

Из результатов моделирования видно, что переходные процес-

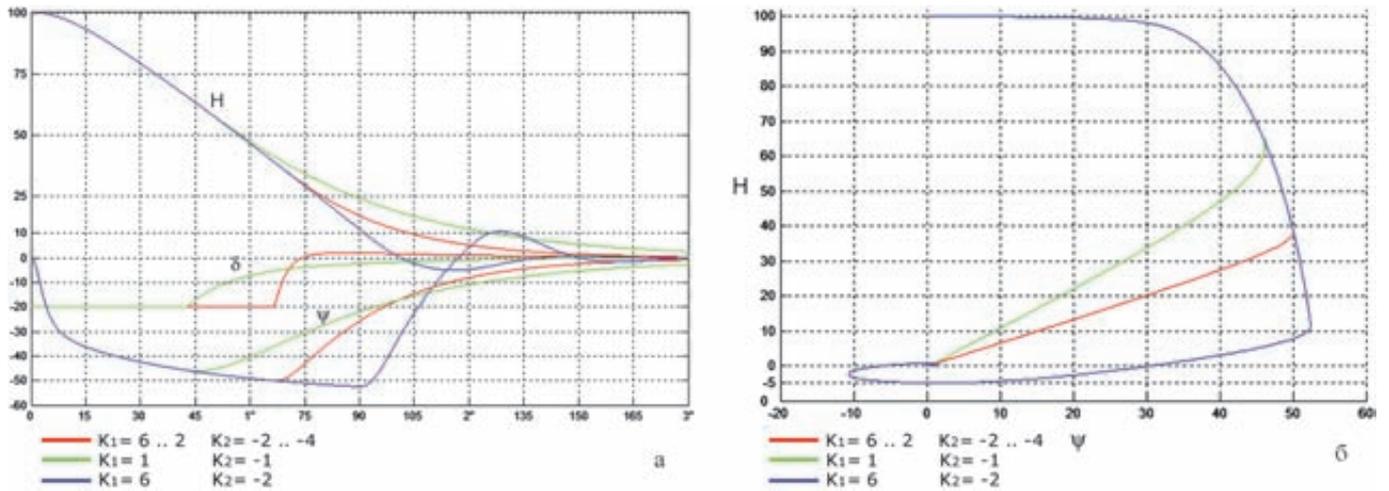


Рис. 2. Примеры переходных процессов (а) и фазовых траекторий движения (б) при линейном (тонкая сплошная линия) и «квазилинейном» (пунктирная линия) управлении при $v = 1,7$ м/с, $\delta_{\max} = 20^\circ$ (δ – угол отклонения руля глубины)

цессы оказываются в данном случае близкими к «эталонному» процессу, характер которого не зависит от начальных рассогласований из области их допустимых значений.

Некоторые особенности динамики АНПА «МТ-2010» [6], «МТ-2011» обусловлены их устройством и физическими ограничениями на управляющие воздействия. В большинстве аппаратов преемственного ряда для управления движением используется движительный комплекс, включающий две пары кормовых движителей, расположенных под некоторым углом к продольной оси. Подобная схема реализована и в АНПА «МТ-2010», «МТ-2011». В этом случае управляющие воздействия в вертикальной плоскости имеют вид:

$$T_{x1} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \cos \delta,$$

$$T_{y1} = (T_1 - T_3) \sin \delta = T_{y1}^{\max} \operatorname{sat} \left(\frac{U_y}{T_{y1}^{\max}} \right),$$

$$M_z^{\text{упр}} = L_k T_{y1}, \quad (5)$$

где T_i ($i = 1 \dots 4$), L_k – упоры и плечо создаваемого суммарного момента, δ – угол наклона осей движителей, T_{y1}^{\max} – максималь-

ная величина вертикальной составляющей суммарного упора, U_y – управляющая функция. Аналогичные выражения справедливы и для составляющих сил в горизонтальной плоскости. Обычно в типовых режимах движения применяется линейный регулятор с управляющими функциями по глубине и курсу:

$$U_y = K_1 \Delta Y + K_2 \psi + K_3 \dot{\psi},$$

$$U_\varphi = K_{1\varphi} \Delta \varphi + K_{2\varphi} \dot{\varphi}, \quad (6)$$

где ΔY , $\Delta \varphi$ – рассогласования по глубине и курсу, $K_1, K_2, K_3, K_{1\varphi}, K_{2\varphi}$ – сквозные коэффициенты усиления в трактах управления – постоянные или настраиваемые в зависимости от задачи.

В большинстве миссий АНПА совершает движение с заданной скоростью, которая может изменяться по программе, а при необходимости он может перейти на другой режим движения или другой тип траектории. Стабилизация скорости осуществляется созданием маршевого упора, соответствующего силе лобового сопротивления при заданной величине скорости и корректирующего

воздействия по цепи обратной связи:

$$T_x = K_v (v_{\text{зад}}^2 + \operatorname{sign}(\Delta v) \Delta v^2). \quad (7)$$

Коэффициент K_v соответствует величине лобового сопротивления R_x при скорости набегающего потока $v = 1$ м/с. В частности, для АНПА «МТ-2010» $K_v = 52,4$ Нс²м⁻², для АНПА «МТ-2011» $K_v = 65,1$ Нс²м⁻².

При моделировании динамических процессов были приняты следующие характеристики движительного комплекса:

- максимальный упор T маршевого движителя в режиме прямого хода – 106 Н;
- максимальный суммарный продольный упор T_x движительного комплекса – 405 Н;
- максимальные вертикальный и поперечный упоры T_y, T_z – 31Н;
- максимальные управляющие моменты $M_{y \text{ упр}}, M_{z \text{ упр}}$: для АНПА «МТ-2010» – 46,5 Нм, для АНПА «МТ-2011» – 55,8 Нм.

Модельный пример, иллюстрирующий характер программного изменения скорости и соответствующее изменение величины маршевого упора, показан на рис. 3.

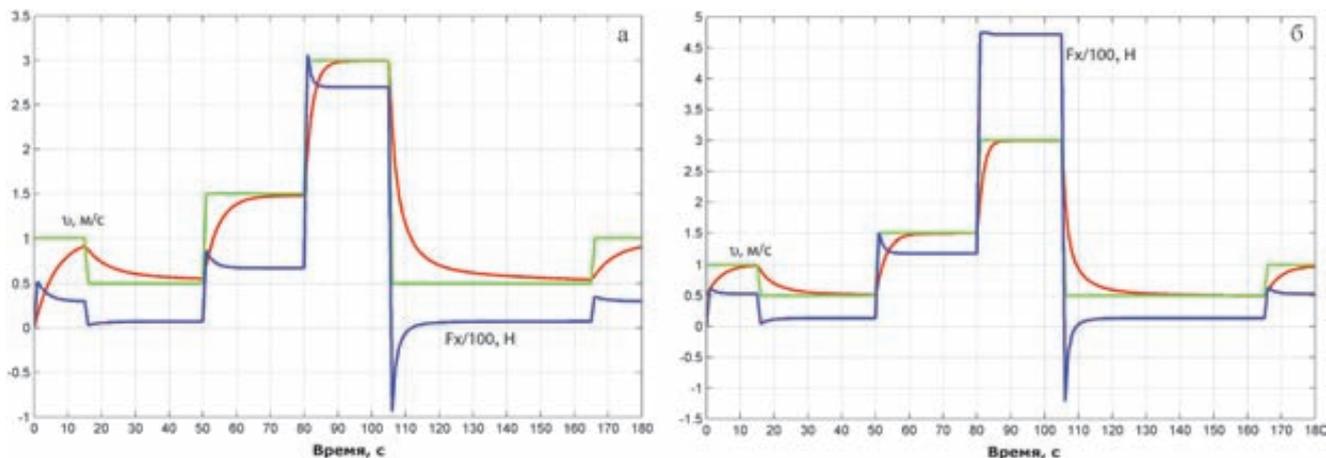


Рис. 3. Скорость и маршевый упор при скачкообразной программе изменения скорости (1.0, 0.5, 1.5, 3.0, 0.5 м/с): а – АНПА «МТ-2010», б – АНПА «МТ-2011»

На отдельных участках программы переход на движение с меньшей скоростью происходит в режиме торможения, причем вследствие большей величины сопротивления у АНПА «МТ-2011» торможение занимает меньше времени. В целом характер процессов у обоих аппаратов идентичен.

Динамика системы курсовой стабилизации

Динамические свойства АНПА при движении в горизонтальной плоскости можно оценить по переходным процессам и статическим характеристикам при отработке рассогласований по курсу и выполнении круговых (циркуляционных) траекторий.

Известно [1, 2], что при управляющих воздействиях T_y , $M_{y\text{ упр}}$ угловая скорость в установившемся движении по кругу определяется выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= [M_y^\beta T_y - (R_x + R_z^\beta) M_{y\text{ упр}}] Q^{-1}, \\ Q &= (m_y v - R_z^\omega) M_y^\beta - M_y^\omega (R_x + R_z^\beta). \end{aligned} \quad (8)$$

Величина

$w = [M_y^\beta T_y - (R_x + R_z^\beta) M_{y\text{ упр}}]^{-1}$ представляет собой радиальное

ускорение v^2/R , возникающее при движении по кругу радиусом R . Заметим также, что условие $Q > 0$ является необходимым условием гидродинамической устойчивости курсового движения аппаратов любой конфигурации. Как правило, его выполнение не вызывает проблем.

На рис. 4 приведены примеры переходных процессов в системе курсовой стабилизации АНПА «МТ-2010», а на рис. 5 – соответствующие траектории в горизонтальной плоскости. Во

всех вариантах осуществляется вначале прямолинейное движение с заданной скоростью, затем отрабатывается программное рассогласование по курсу с движением по кругу, угловая скорость которого определяется соотношениями (8).

Отметим некоторые особенности, характерные для динамических процессов в системе курсовой стабилизации.

1. Вследствие большей инерционности движения центра масс по отношению к угловому

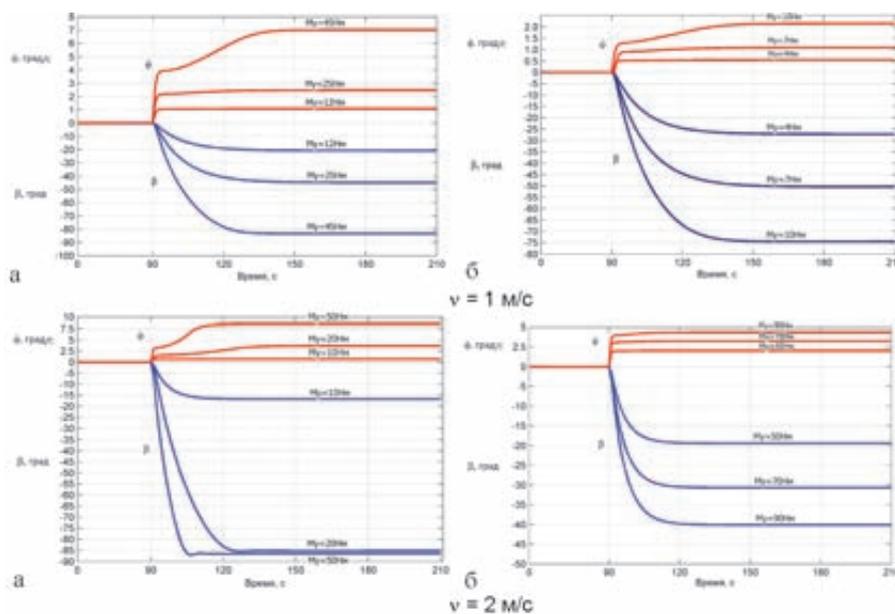


Рис. 4. Изменения угловой скорости и угла дрейфа при циркуляции при $v = 1$ м/с; $v = 2$ м/с: а – АНПА «МТ-2010», б – АНПА «МТ-2011»

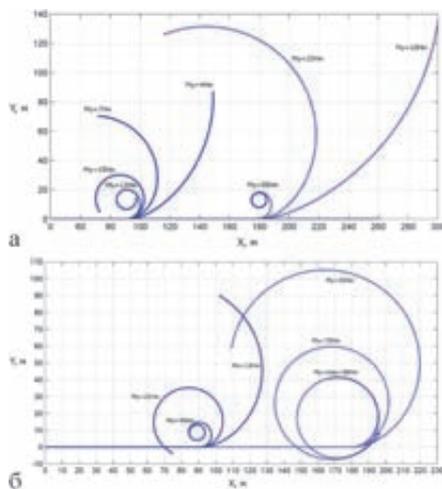


Рис. 5. Траектории при циркуляции: а – АНПА «МТ-2010», б – АНПА «МТ-2011»; сплошные линии – $v = 1$ м/с, пунктирные линии – $v = 2$ м/с

движению процесс отработки программных рассогласований по курсу происходит при больших углах дрейфа. При максимально возможных управляющих моментах и скорости $v > 1$ м/с циркуляция происходит в режиме поперечного обтекания корпуса аппарата с максимальными углами дрейфа.

2. Увеличение скорости кругового движения при неизменном управляющем моменте приводит к увеличению радиуса круга при меньшем времени выхода на установившийся режим. Для уменьшения радиуса круга при заданной скорости необходимо увеличивать управляющий момент вплоть до максимального значения.

3. При одних и тех же управляющих воздействиях АНПА «МТ-2010» обладает более высокими маневренными свойствами по сравнению с АНПА «МТ-2011». Для обеспечения минимального радиуса циркуляции при одинаковой скорости для него требуются меньшие управляющие усилия. Например, при скорости $v = 1$ м/с для движения по кругу с радиусом 5–6 м требуется почти в 4 раза меньший управ-

ляющий момент, а при скорости $v = 2$ м/с минимальный радиус циркуляции у АНПА «МТ-2011» при максимальной величине управляющего момента составляет около 24 м.

■ Динамика системы стабилизации глубины

Оценим динамические свойства АНПА «МТ-2010» и «МТ-2011» при осуществлении переходов по глубине с учетом противоречивых требований к устойчивости и точности управления. Расчет гидродинамических характеристик АНПА по результатам виртуальной продувки показывает, что дестабилизирующий гидродинамический момент у АНПА «МТ-2010» сравнительно невелик во всем диапазоне скоростей движения и углов атаки (дифферента). Это обусловлено тем, что точка приложения гидродинамической равнодействующей (подъемной силы) расположена на расстоянии 0,13 м в нос от центра масс аппарата, что соответствует величине гидродинамической неустойчивости, близкой к нейтральной. В отношении гидродинамики «МТ-2011» имеет некоторые отличия, обусловленные несколько большими размерами аппарата. При этом точка приложения гидродинамической равнодействующей смещена в нос аппарата на величину 0,4 м, и максимальный гидродинамический момент больше, чем у «МТ-2010», в 1,5 раза. Таким образом, задача обеспечения устойчивости по отношению к начальным отклонениям у обоих аппаратов решается достаточно просто на основе линейного регулятора. Точность стабилизации параметров движения определяется формула-

ми статики и зависит от соотношения величин положительной плавучести, момента остойчивости, гидродинамических сил и выбора параметров регулятора [1, 2]. Величина остаточной положительной плавучести для АНПА «МТ-2010» и «МТ-2011» принята 10 Н.

Точность стабилизации глубины в установившемся движении характеризуется статическими ошибками:

$$\Delta Y_{ст} = \frac{(M_z^\alpha + M_0 - K_2 d) P}{[M_z^\alpha + M_0 - (T_x + R_y^\alpha) d] K_1},$$

$$\psi_{ст} = \frac{P d}{M_z^\alpha + M_0 - (T_x + R_y^\alpha) d}, \quad (9)$$

где величина T_x соответствует скорости установившегося движения.

Ошибка стабилизации глубины, обусловленная плавучестью, зависит от выбора параметров регулятора, а угловая ошибка от них не зависит.

При моделировании динамики АНПА рассматривались различные варианты соотношений действующих сил при отработке заданного начального рассогласования по глубине с параметрами управления, обеспечивающими заданное качество переходных процессов. Ниже, на рис. 6, 7, приведены примеры переходных процессов, иллюстрирующие зависимость динамических свойств (линейных и скоростных величин, действующих сил и моментов) от выбора основных параметров управления. Оптимизация качества переходных процессов обеспечивалась выбором параметров регулятора с учетом оценок по точности стабилизации (9).

Как следует из результатов моделирования, динамические свойства АНПА «МТ-2010» и «МТ-2011» достаточно близки,

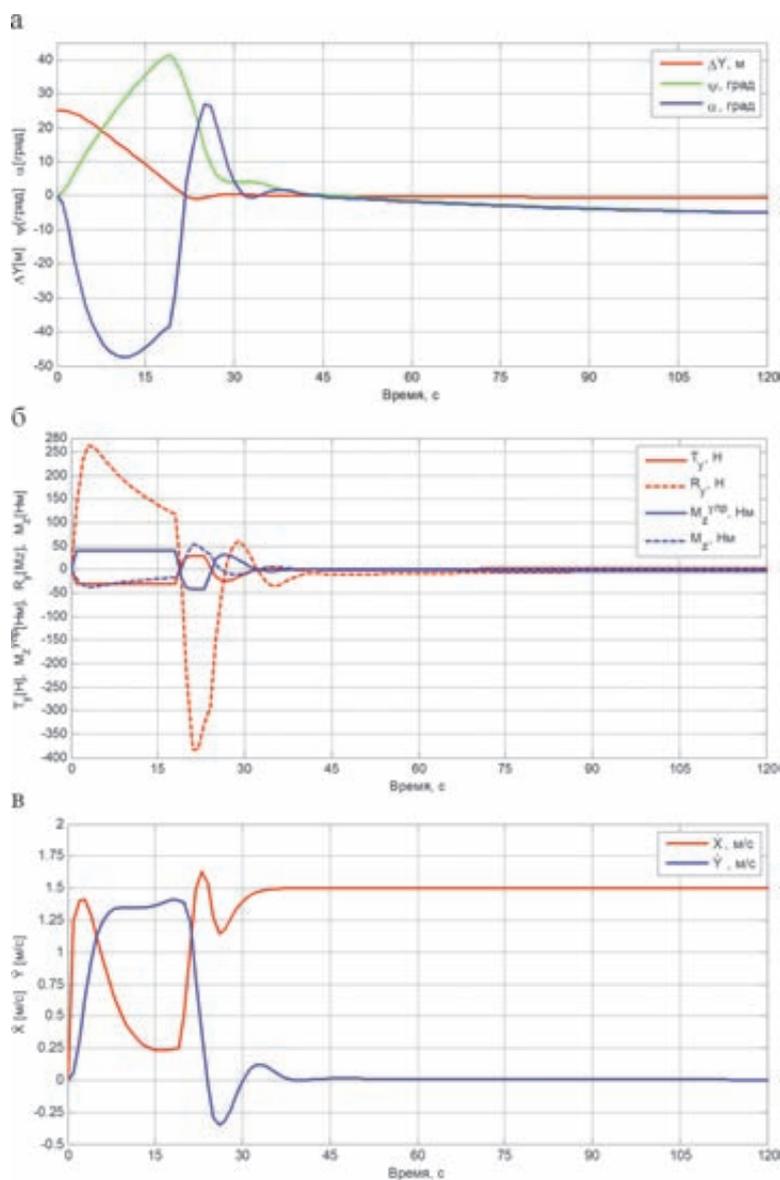


Рис. 6. Переходные процессы в системе стабилизации глубины АНПА «МТ-2010» при скорости 1,5 м/с

что является следствием близости их конструктивных и гидродинамических характеристик. В статике при скорости $v = 1,5$ м/с ошибки стабилизации, обусловленные действием плавучести, составляют: $\Delta Y_{ст} = 0,66$ м, $\psi_{ст} = 6,4^\circ$ («МТ-2010») и $\Delta Y_{ст} = 0,92$ м, $\psi_{ст} = 6,6^\circ$ («МТ-2011»). Статическая ошибка по глубине у «МТ-2011» больше, чем у «МТ-2010», что объясняется существенно меньшей величиной подъемной силы при некоторых отличиях в размерах корпуса и площади хвостового оперения.

При заданных значениях момента остойчивости и управляющих сил максимальный дифферент $\psi_{max} = 41^\circ$ (МТ-2010), $\psi_{max} = 43^\circ$ (МТ-2011), а углы атаки соответственно составляют 48° и 14° . Некоторое различие объясняется, как уже отмечалось, разницей в величинах производной подъемной силы по углу атаки. При больших начальных отклонениях системы адаптивная настройка параметров ПИД-регулятора (4) позволяет повысить как астатизм системы, так и в целом качество переходных процессов.

■ Динамические характеристики АНПА «нетрадиционных» форм

При проектировании АНПА любого типа и назначения предполагается оснащение его сменным оборудованием, для размещения которого могут быть использованы традиционная однокорпусная схема или катамаранная и тримаранная конструкции. Гидродинамические и энергетические характеристики нестандартных конструктивных форм могут отличаться от исследованных ранее свойств однокорпусных конструкций, в особенности при выполнении пространственных движений со сложным режимом взаимодействия корпуса аппарата с набегающим потоком. Но и для аппаратов с одним корпусом также большое значение имеют зависимости гидродинамических и энергетических параметров как от режимов движения, так и от конструктивных (геометрических, весовых и др.) характеристик корпуса.

Рассмотрим некоторые особенности динамики АНПА специализированных проектов, отличающихся размером и числом несущих корпусов (рис. 8)

Основные конструктивные данные трех типов АНПА приведены в табл. 3.

Для оценки гидродинамических характеристик моделей аппаратов осуществлялась «виртуальная продувка» с использованием разработанной компьютерной модели. С использованием известных формул гидромеханики вычислялись гидродинамические коэффициенты в предположении малости угловых величин (линейности характеристик). Данные представлены в табл. 4.

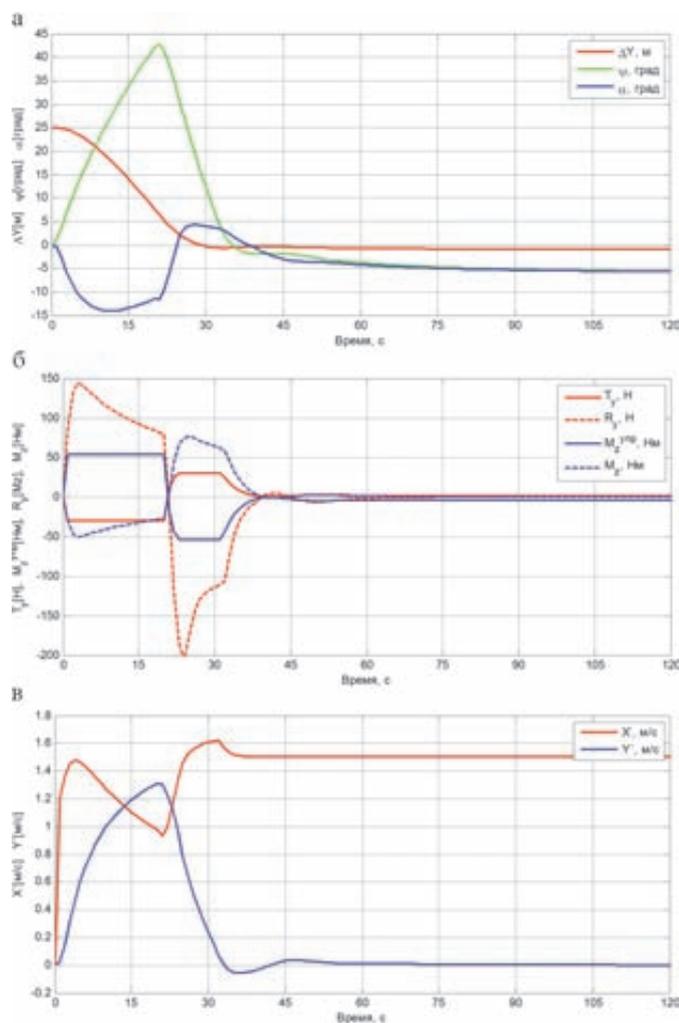


Рис. 7. Переходные процессы в системе стабилизации глубины АНПА «МТ-2011» при скорости 1,5 м/с

Как показывает простой расчет, удельная сила лобового сопротивления для двух-, трехкорпусной конструкции оказывается несколько выше, чем для однокорпусной, несмотря на значительно меньший суммарный объем несущих корпусов. Относительно большой вклад в силу лобового сопротивления вносит хвостовая часть с маршевыми двигателями, ориентированными под углом к набегающему потоку. Следует отметить также, что наличие плоскостей (пилонов) в кормовой части вызывает появление вихревого следа и взаимосвязь колебаний в двух плоскостях.

Сравним динамические свойства АНПА рассматриваемых конфигураций при осуществлении некоторых «типовых» пространственных движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Одна из задач проекта «большой универсальный АНПА» заключалась в оценке динамических свойств аппарата в диапазоне скоростей до 3–4 м/с. При довольно большой длине аппарата (13,3 м) и сравнительно небольшом хвостовом оперении требовалось обеспечить компенсацию статической неустойчивости корпуса за счет выбора структуры и параметров автопилота. В результате

была исследована структура с элементами нечеткой логики и адаптивной настройкой параметров управления. На рис. 9 приведены результаты моделирования движения при осуществлении циркуляции по курсу с различными значениями скорости и переходные процессы при отработке начальных рассогласований по глубине.

Управляющие воздействия в двух плоскостях создавались с помощью гидродинамических сил на рулях глубины и курса. Для отклонения рулей был принят линейный регулятор с ограничением на углы поворота рулей 35°.

Таблица 3. Конструктивные параметры АНПА различных конфигураций

Параметр	Значение		
	«Большой» АНПА	Катамаран	Тримаран
Длина, м	13,3	3,2	3,2
Объем, м ³	11	0,61	0,71
Диаметр сечения корпуса, м	1,1	0,4 (2)*	0,4 (2), 0,3 (1)*
Смоленная поверхность, м ²	9,1	8,83	10,7
Момент остойчивости, Нм	500	100	100
Масса в воздухе, кг	11064	610	708

* В скобках указано количество несущих корпусов

Таблица 4. Гидродинамические коэффициенты для позиционных и демпфирующих составляющих сил сопротивления

Гидродинамические коэффициенты	«Большой» АНПА	Катамаран	Тримаран
C_x	0,0715	0,1654	0,1781
C_y^a	1,71	1,86	2,17
m_z^a	1,58	1,7	1,56
C_z^b	1,71	0,71	0,96
m_y^b	1,58	0,66	0,56
C_y^{ω}	0,051	0,141	0,282/0,317
m_z^{ω}	0,066	0,13	0,187/0,211
C_z^{ω}	0,051	0,083	0,157
m_y^{ω}	0,066	0,07	0,123

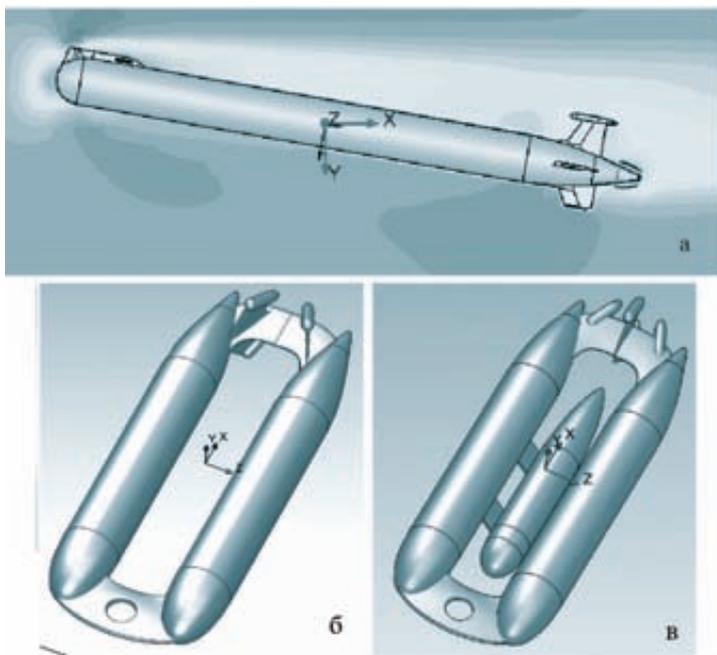


Рис. 8. Эскизные изображения АНПА нетрадиционных форм: а – «большой» универсальный АНПА, б – АНПА с двумя корпусами (катамаран), в – АНПА с тремя корпусами (тримаран)

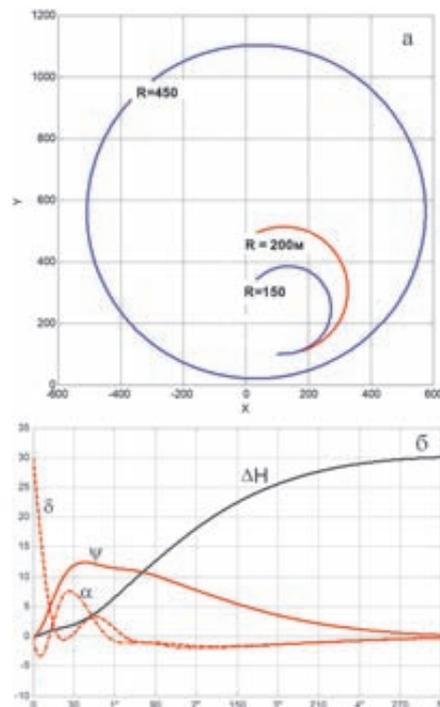


Рис. 9. Циркуляции при различных значениях скорости $v = 1; 2; 3$ м/с (а) и переходные процессы по глубине с установившейся скоростью $v = 1$ м/с (б)

Сложный режим обтекания у двух-, трехкорпусных конструкций при движении с углами атаки (дрейфа) оказывает влияние на динамику АНПА при осуществлении пространственных траекторий. В типовых режимах движения обеспечение устойчивости достигается за счет некоторого снижения маневренности при сравнительно большем удельном сопротивлении (и соответственно –

энергозатратах) по сравнению с однокорпусной конструкцией. В качестве примера на рис. 10 приведены результаты моделирования маневров по глубине и курсу АНПА тримаранного типа при скорости хода 0,85 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидродинамические характеристики АНПА различных

конфигураций, определенные с помощью пакетов прикладных программ Solid Works и CosmosFloWork, позволяют в деталях оценивать характер взаимодействия аппарата с вязкой средой и оптимизировать выбор конструктивных характеристик корпуса и исполнительных органов. Вслед-

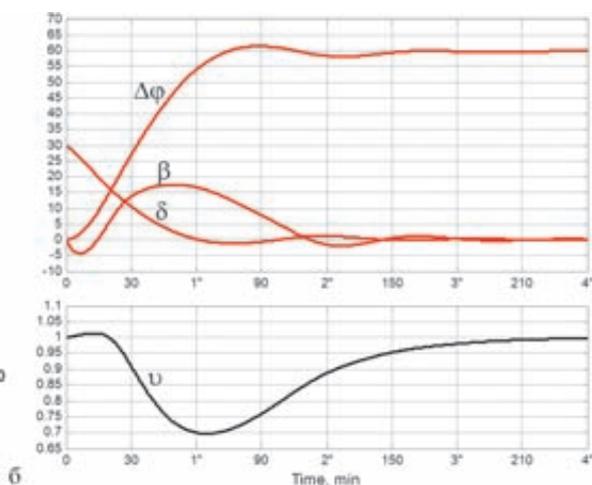
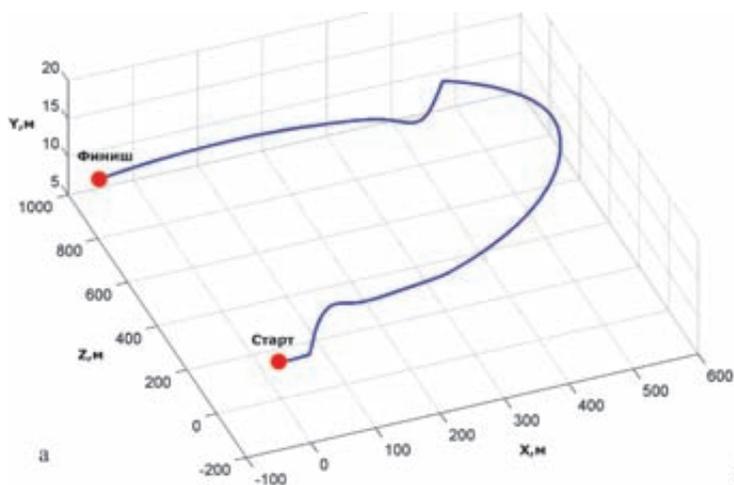


Рис. 10. Пример пространственной траектории с изменением глубины и курса (а) и переходные процессы в системе управления при переходе на обратный галс (б)

стве большого разнообразия форм АНПА и особенностей их гидродинамического сопротивления в сложных режимах движения актуальна задача построения адаптивной системы управления, учитывающей особенности различных проектов. Приведенные в статье результаты дают возможность оценить характер задачи и способы ее решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 223 с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука. 2005. 400 с.
3. 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.
4. Киселев Л.В., Медведев А.В. Исследование динамических свойств авто-

номного подводного робота на основе типологии процессов и моделей нечеткого управления // Подводные исследования и робототехника. 2008. №1(5). С. 16–23.

5. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Medvedev A.V., Pavin A.M. Autonomous Underwater Vehicle Motion Control during Bottom Objects and Hard-to-Reach Areas Investigation // Motion Control. Vienna: InTech, 2010. P. 207–228.

6. Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н. Малогабаритный многофункциональный автономный обитаемый подводный аппарат «МТ-2010» // Подводные исследования и робототехника. 2011. №2(12). С. 37–42.

