

## О НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ АНПА

Л.В.Киселев, А.В. Инзарцев  
Ю.В. Матвиенко

Институт проблем морских технологий  
ДВО РАН  
Владивосток

### 1. ОБЩИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИ ДИНАМИКИ

Организация пространственного движения АНПА относится к числу проблем, от решения которых зависят функциональные свойства аппаратов, т. е. их способность решать те или иные задачи. Первоначально задачи и методы управления движением АНПА [1–5] рассматривались преимущественно с учетом стандартных требований к динамике аппарата в режимах стабилизации курса и глубины, зависания, движения по эквидистанте от дна при достаточно пологом рельефе. В этом отношении практически во всех известных образцах АНПА реализованы однотипные достаточно простые командно-программные принципы управления. Многообразии режимов работы АНПА (движение с переменной скоростью, позиционирование, зависание в точке, маневрирование при преодолении препятствий и пр.) приводит к необходимости построения системы управления движением (СУД) с оптимизацией динамических свойств аппарата и коррекцией параметров программного управления. Так, например, при изменении скорости поступательного движения изменяется соотношение действующих на аппарат гидродинамических сил (инерционных и сил вязкого сопротивления) и ограниченных по величине управляющих воздействий. При наличии противоречивых требований к устойчивости движения и

точности (быстродействию) управления необходимо оптимизировать выбор параметров управления с учетом реальных ограничений на область допустимых отклонений системы и величину управляющих сил. Очевидно, кроме указанных требований к динамическим свойствам АНПА существует ряд других требований, обусловленных неопределенностью или недостоверностью информации о среде и векторе состояния аппарата. В подобных случаях система управления должна реагировать на возникновение нештатных или опасных ситуаций таким образом, чтобы обеспечить выполнение требуемой задачи, в частности, осуществление заданной траектории движения. Проблема представляется достаточно актуальной, например, при организации движения вблизи дна со сложным рельефом, характер

которого не вполне определен, а данные эхолокационной системы в переднем секторе обзора подвержены сбоям и ошибкам в измерении дистанций [5, 6]. Для правильного выбора структуры и параметров управления используемая модель динамики аппарата должна достаточно адекватно отображать реальные характеристики системы и допускать их идентификацию на основе приближенных вычислений и результатов траекторных измерений в процессе работы аппарата.

Для решения указанных задач функциональная структура моделирующего комплекса должна включать:

- модель движения, отражающую характер динамического воздействия на АНПА вязкой морской среды;
- модель внешней среды, точнее, внешних возмущений, рельефа дна и физических полей;
- математический аппарат для оценки и оптимизации гидродинамики аппаратов с учетом их конструктивных, функциональных и тактико-технических характеристик;
- программные имитаторы для системы управления (автопилота) и исполнительных ор-

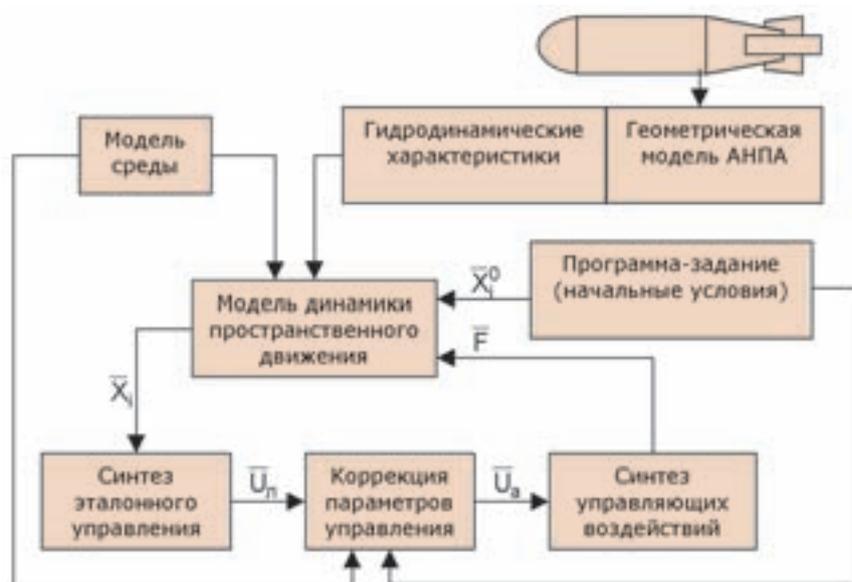


Рис. 1  
Структурная схема динамической модели АНПА

ганов, обеспечивающие осуществление всего заданного многообразия режимов движения;

- алгоритмическую модель для синтеза адаптивного регулятора с идентификацией вектора состояния и коррекцией параметров управления.

В данном представлении модель динамики и управления движением АНПА (рис.1) является частью имитационного моделирующего комплекса, предназначенного для формирования многофункциональной виртуальной среды в миссии аппарата [7].

Рассмотрим далее отдельные вопросы динамики и управления движением АНПА.

Формальная «геометрическая» модель пространственного движения  $\{X(t), Y(t), Z(t)\}$  АНПА в локальной неподвижной системе отсчета представляется в виде совокупности программного, реального и наблюдаемого движений, описываемых уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= v(U) \cos \varphi(U) \cos \psi(U) + v_{Tx}, \\ \dot{Y} &= v(U) \sin \psi(U) + v_{Ty}, \\ \dot{Z} &= v(U) \cos \psi(U) \sin \varphi(U) + v_{Tz}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $v$  – скорость,  $\varphi$  – курс,  $\psi$  – дифференциал,  $U$  – управление, реализующее заданную программу изменения величин  $X, Y, Z, v, \dots, t$ ;  $\{v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz}\}$  – вектор течения. В случае, когда осуществляется привязка траектории движения к местности (карте), декартовым координатам  $\{X, Y, Z\}$  ставятся в соответствие географические координаты – долгота  $\lambda$  и широта  $\varphi$ .

Для построения динамической модели АНПА как тела, движущегося в вязкой среде, используются законы гидромеханики, выраженные в виде уравнений для действующих сил и моментов. Теоретические вопросы построения модели движения подводных аппаратов с учетом сил взаимодействия корпуса с вязкой средой рас-

сматривались в ряде работ, наиболее общие результаты из них получены в [8–10]. Известно, что даже упрощенные уравнения для вектора состояния в виде линейных  $(V_x, V_y, V_z)$  и угловых  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  скоростей с учетом их кинематической взаимосвязи имеют весьма сложный для анализа вид. На практике при построении моделей принято использование «естественных» переменных – поступательной скорости  $v$ , глубины  $H$ , курса  $\varphi$ , дифференциала  $\psi$ , углов атаки и дрейфа  $\alpha, \beta$ ,

пространственных координат  $\{X, Y, Z\}$ . Данный выбор вектора состояния обусловлен характером задач управления и навигации, разделением каналов управления по глубине и курсу при осуществлении большинства программных траекторий и режимов движения [4, 5].

Принятые предпосылки позволяют представить уравнения динамики АНПА в виде двух взаимосвязанных подсистем – в вертикальной плоскости (2) и в горизонтальной (3):

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + T_{x1} \cos \alpha - T_{y1} \sin \alpha + R_{xd}, \\ m_y v \dot{\vartheta} &= R_y(v, \alpha, \psi) + P \cos \vartheta + T_{y1} \cos \alpha + T_{x1} \sin \alpha + R_{yd}, \\ I_z \dot{\psi} &= M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_{z_{ynp}}, \\ \dot{X} &= v \cos \vartheta + v_{Tx}, \quad \dot{Y} = v \sin \vartheta + v_{Ty}, \quad \psi = \vartheta + \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= -R_x(v, \beta) + T_{x1} \cos \beta - T_{z1} \sin \beta + R_{xd}, \\ m_z v \dot{\chi} &= R_z(v, \beta, \phi) + T_{z1} \cos \beta + T_{x1} \sin \beta + R_{zd}, \\ I_y \dot{\phi} &= M_y(v, \beta, \phi) + M_{y_{ynp}}, \\ \dot{X} &= v \cos \chi + v_{Tx}, \quad \dot{Z} = v \sin \chi + v_{Tz}, \quad \phi = \chi + \beta. \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнениях (2), (3) приняты обозначения работ [1–5], в частности:

$$\begin{aligned} m_x &= M + \lambda_{11}, \quad m_y = M + \lambda_{22}, \\ m_z &= M + \lambda_{33}, \quad I_y = I_{yy} + \lambda_{55}, \\ I_z &= I_{zz} + \lambda_{66}, \\ \lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}, \lambda_{55}, \lambda_{66} & - \text{присоединенные массы и моменты инерции жидкости, } T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, \\ M_{y_{ynp}}, M_{z_{ynp}} & - \text{проекция уп-} \end{aligned}$$

равляющих сил и моментов в системе координат, связанной с корпусом аппарата,  $\vartheta, \chi$  – углы подъема и поворота траектории,  $R_x, R_y, R_z, M_y, M_z$  – гидродинамические силы и моменты,  $M_0$  – момент остойчивости,  $R_{xd}, R_{yd}, R_{zd}$  – возмущающие силы, имеющие случайный характер,  $P$  – переменная плавучесть, зависящая, в частности, от глубины погружения аппарата.

### Гидродинамические характеристики

Основное методологическое требование при построении модели динамики заключается в том, чтобы уравнения (2), (3) адекватно описывали реальное движение аппарата. Это возможно только в том случае, если входящие в них параметрические зависимости сил гидродинамического сопротивления и управляющие воздей-

ствия с достаточной точностью отражают реальные свойства аппарата.

Обычно для приближенной оценки гидродинамических характеристик при проектировании аппарата используются расчетно-теоретические модели и эмпирические зависимости, полученные на основе апробированных методов экспери-

ментальной гидромеханики. Как правило, для таких оценок используются:

а) метод геометрического подобия (по аппарату-прототипу);

б) методы теории крыла конечного / малого удлинения [11];

в) «виртуальная технология» с использованием пакета прикладных программ типа CAD/CAE «COSMOS FloWorks» [12];

г) прямые измерения и идентификация параметров теоретической модели по реальным данным, полученным в

процессе натуральных испытаний аппарата.

В линеаризованной постановке силы вязкого гидродинамического сопротивления представляются обычно в виде суммы позиционных

$$R_y(v, \alpha), R_z(v, \beta), M_z(v, \alpha),$$

$$M_y(v, \beta) \text{ и демпфирующих}$$

$$R_y(v, \omega_y), R_z(v, \omega_z),$$

$$M_y(v, \omega_y), M_z(v, \omega_z) \text{ составляющих.}$$

При малых значениях угловых величин эти воздействия характеризуются соответствующими позиционными и враща-

тельными производными, зависящими от формы корпуса аппарата и режима обтекания, который определяется числом Рейнольдса. В том случае, когда корпус аппарата обладает симметрией относительно продольной оси, соответствующие характеристики по осям вращения одинаковы.

Значения производных гидродинамических сил по углам атаки  $\alpha$  и дрейфа  $\beta$  (при  $\alpha, \beta < 10^\circ$ ) для некоторых АНПА приведены в таблице. Обозначения «а-г» поясняется способ определения характеристик.

Производные гидродинамических сил

Характеристика	МТ-98 а, б, г	Тифлонус а, б, г	CR-01 а, г	ОКРО-6000 а, г	ММТ-2000 б, в
$R_x$ , Н	110	16,4	53,5	113	12,4
$R_y^\alpha, R_z^\beta$ , Н/град	9,1	4,1	14,5	11,1	1,34
$M_z^\alpha, M_y^\beta$ , Нм/град	4,3	4,7	4,3	4,1	2,7

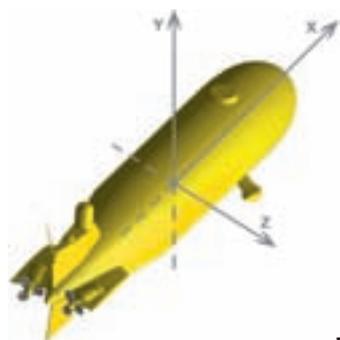
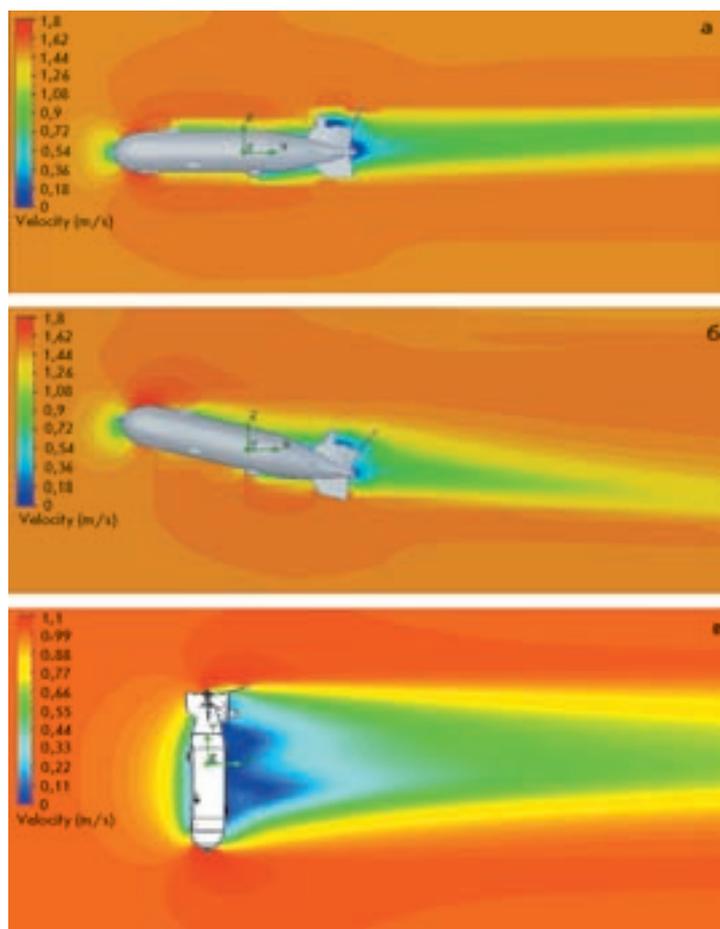


Рис. 2  
Трёхмерная модель аппарата. Длина – 2,32 м, диаметр корпуса – 0,37 м, объём – 0,171 м<sup>3</sup>, масса – 174,8 кг. Расстояние от носа до центра масс – 1,23 м. Площадь хвостового оперения – (0,104)м<sup>2</sup>

Режимы движения с круговым изменением направления вектора тяги порождают большие углы атаки и дрейфа, и вследствие этого необходимо применение нелинейной модели сил вязкого сопротивления. В этом случае результаты виртуальной продувки трёхмерной модели АНПА могут быть использованы для аппроксимации гидродинамических характеристик аналитическими зависи-

Рис. 3  
Диаграммы поля скоростей (давлений) при  $\alpha = 0, 15^\circ, 90^\circ$



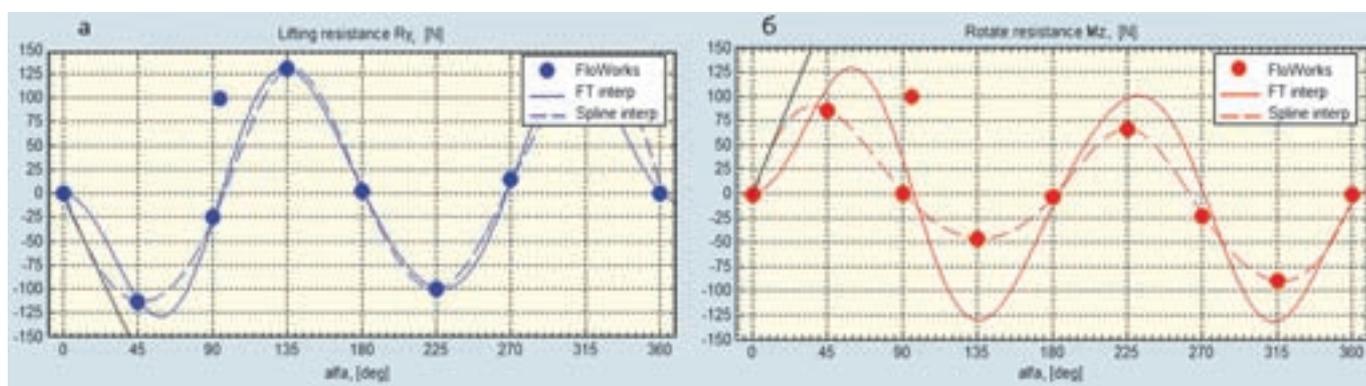


Рис. 4. Графические зависимости  $R_y(\alpha)$ ,  $M_z(\alpha)$  при скорости  $v = 1$  м/с

мостями в диапазоне изменения углов  $-\pi \leq \alpha, \beta \leq \pi$ . Так, для АНПА «ММТ-2000» в результате виртуальной продувки трехмерной модели аппарата (рис. 2) с использованием методики «COSMOS FloWorks» были получены численные данные для гидродинамических сил при круговом изменении угла атаки. На рис. 3 представлены диаграммы поля скоростей (давлений) для трех режимов обтекания, на рис. 4 – графические зависимости  $R_y(\alpha)$ ,  $M_z(\alpha)$ , полученные аппроксимацией дискретных значений с помощью периодической функции и сплайновой интерполяции. Направлениями касательных при  $\alpha = 0$  показаны производные сил по углу атаки.

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 векто-

ры, для которых справедливы преобразования вида:

$$\begin{aligned} m_x &= m_{x0} + (m_{y0} - m_{x0}) \sin \alpha, \\ m_y &= m_{y0} - (m_{y0} - m_{x0}) \sin \alpha, \\ m_x &= m_{x0} + (m_{z0} - m_{x0}) \sin \beta, \\ m_z &= m_{z0} - (m_{z0} - m_{x0}) \sin \beta, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m_{x0}$ ,  $m_{y0}$ ,  $m_{z0}$  – массы при продольном обтекании тела ( $\alpha = \beta = 0$ ).

В частности, для АНПА «ММТ-2000»  $m_{x0} = 184$  кг,  $m_{y0} = m_{z0} = 335$  кг.

#### Управляющие воздействия

Роль исполнительных органов при осуществлении пространственного перемещения АНПА, позиционирования в точке или зависания в толще воды достаточно очевидна. На практике используются различные конструктивные схемы движительно-рулевых комплексов (ДРК), в состав которых могут входить маршевые и подруливающие электродвигатели, гребные винты или движители водометного типа, рулевые устройства и элероны, блоки управления двигателями. Очевидно, что выбор того или иного варианта ДРК определяется назначением аппарата и тем опытом, который имеется в распоряжении разработчика. Конфигурации ДРК у различных аппаратов достаточно разнообразны, однако выбор их элемен-

тов вполне ограничен. Так, в качестве пропульсивных установок используются, главным образом, гребные электродвигатели постоянного тока коллекторного или бесколлекторного типов, а наличие рулевых органов или элеронов является индивидуальным для каждого аппарата.

В большинстве аппаратов ИПМТ ДВО РАН использована хорошо отработанная схема движительного комплекса, состоящего из четырех кормовых маршевых гребных реверсивных двигателей. Двигатели расположены попарно в горизонтальной и вертикальной плоскостях под некоторым углом (20...25 град) к продольной оси аппарата. Такая схема позволяет создать произвольные упор и момент за счет изменения составляющих этих сил. Для маневренного универсального аппарата, способного выполнять различные режимы движения, включая позиционирование, зависание, старт-стопное подруливание и пр., должна применяться более эффективная установка. Оптимальное решение для такой установки может быть получено при использовании двух групп движителей – четырех (трех) кормовых реверсивных и двух носовых реверсивных.

Управляющие воздействия в вертикальной плоскости при использовании кормовой и носовой секций движителей имеют вид:

$$\begin{aligned}
 T_{x1} &= (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \cos \delta, \\
 T_{y1} &= (T_1 - T_3) \sin \delta + T_5 = T_y^k + T_y^h, \\
 M_z^{ypp} &= (T_1 - T_3) \sin \delta \cdot L_k + \\
 &+ T_5 L_h = T_y^k \cdot L_k + T_y^h \cdot L_h, \\
 T_k &= T_k^{\max} \operatorname{sat} \left( \frac{U_k}{T_k^{\max}} \right), \\
 T_h &= T_h^{\max} \operatorname{sat} \left( \frac{U_h}{T_h^{\max}} \right),
 \end{aligned} \tag{5}$$

где  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – упоры кормовых маршевых движителей,  $L_k, L_h$  – плечи сил кормовой и носовой секций,  $T_5 = T_y^h$  – упор вертикального носового движителя,  $T^{\max}$  – максимальный упор,  $\delta$  – угол наклона кормовых движителей,  $U_T^k, U_T^h$  – управляющие функции для кормовой и носовой секций движителей. Аналогичные выражения справедливы и для составляющих сил в горизонтальной плоскости.

С учетом конкретных требований проекта могут быть использованы и несколько другие схемы. Так, например, для аппарата «CR-01» носовая группа состоит из двух поперечных гребных движителей: горизонтального, с туннельным забором и выбросом воды и вертикального неререверсивного. Иная схема ДРК использована в АНПА «Тифлонус». В аппарате имеется один кормовой поворотный двигатель, снабженный электроприводом для поворотов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Такое решение было обусловлено необходимостью минимизации сопротивления и потребления энергии на движение.

Комбинация гребных движителей и рулевых устройств использована в «солнечном» АНПА (САНПА) и в «ММТ-2000». Так, в САНПА, корпус которого имеет форму крыла, управляющие воздействия создаются с помощью кормового маршевого гребного движителя, курсового руля и поворотного

закрылка для управления в вертикальной плоскости. В одной из модификаций АНПА «ММТ-2000» ДРК состоял из двух движителей, ориентированных под углом  $20^\circ$  в плоскости горизонтального крыла, поворачивающегося в вертикальной плоскости на заданный программный угол.

В этом случае управляющие воздействия в вертикальной плоскости, создаваемые упорами  $T_1 = T_2 = T$ , имеют вид:

$$\begin{aligned}
 T_{x1} &= 2T \cos 20 \cos \delta, \\
 T_{y1} &= 2T \cos 20 \sin \delta, \\
 M_z^{ypp} &= 2T (x_T \sin \delta - y_T \cos \delta) \cos 20, \\
 \delta &= \delta_{\max} \operatorname{sat} \left( \frac{U_\delta}{\delta_{\max}} \right),
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $\delta_{\max}$  – максимальный угол отклонения поворотного крыла,  $(x_T, y_T)$  – координаты точки приложения упоров.

## 2. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ЗАДАНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ МИССИЙ АНПА

В общем случае управления  $U_k, U_h, U_\delta$  в выражениях (6), (7) являются функциями параметров программного движения, определенного на множестве всех допустимых значений вектора состояния. Вариацией программных параметров можно сформировать все многообразие траекторий, составленных из сопряженных прямолинейных, круговых и зигзагообразных типовых элементов.

Программное движение задается одним из двух способов:

а) в виде кусочно-постоянных зависимостей скорости  $v(t_k)$ , курса  $\varphi(t_k)$ , угловой скорости  $\dot{\varphi}$ , глубины  $H(t_k)$  или высоты над грунтом  $h(t_k)$  на интервалах времени  $t_k$ ;

б) по координатным заданием точек траектории

$$X_k^{np}, Y_k^{np}, Z_k^{np}$$

с регулярным либо произвольным шагом в зависимости от конкретных условий.

При формировании и коррекции программы движения в алгоритм включаются следующие основные функции управления:

- формирование программной траектории, исходя из априорных навигационных данных или оценки ситуации в процессе движения;
- контроль условий выполнения коррекции курса при движении к заданной точке и при переходах на очередной галс;
- контроль временных интервалов, отведенных на отдельные элементы программы.

Для организации условных переходов используются параметры, вводимые в качестве исходных данных: число заданных точек программной траектории, радиус окрестности точки цели, характеризующий точность функционирования закона коррекции, допустимая величина угла пеленга, временные интервалы.

Аргументами управляющих функций  $(U_x, U_y)$  могут быть:

- скорость  $v$  и ее рассогласование  $\Delta v = v - v_s$  с заданным значением  $v_s$ ;
- рассогласования  $\Delta H = H - H_s$ ,  $\Delta h = h - h_s$  глубины  $H$  или высоты  $h$  от заданных значений  $H_s, h_s$ ;
- рассогласование  $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_s$  текущих  $\varphi$  и программных  $\varphi_s$  значений курсового угла, угловая скорость рысканья  $\dot{\varphi}$ ;
- угловая скорость  $\omega_s$  вращения по кругу заданного радиуса;
- дальномерные параметры  $r_i$ , их производные  $\dot{r}_i$  и рассогласования  $\Delta r_i = r_i - r_{is}$ ;
- координаты точек  $\{X_i, Z_i\}$ , пеленги  $\theta_i$  или курсовые углы  $\varphi_i$ .

Описание задачи, которую должен выполнить АНПА во время запуска (а также как он это должен сделать), называется программой-заданием, или миссией АНПА. Миссия гото-

вится и проверяется на компьютере судового поста оператора перед запуском АНПА. Миссия может быть описана как языковыми, так и графическими средствами.

Непосредственно *языковые средства* для программирования миссии АНПА используются редко, поскольку требуют достаточно высокой программистской квалификации и сложны для конечных пользователей АНПА.

В аппаратах ИПМТ ДВО РАН для программирования миссий используется библиотека функций языка C. Применение языка C позволяет создавать эффективные программы-задания. При этом имеется возможность использовать библиотеку готовых модулей, описывающих наиболее употребительные траектории движения АНПА.

Движение вблизи грунта в режиме стабилизации высоты является одним из основных режимов работы АНПА, поэтому данная функция встроена в исполняющий уровень системы управления. Для осуществления движения исполняющему уровню системы управления робота вполне достаточно указать направление движения и высоту стабилизации. Таким образом, траектория движения АНПА задается как кривая (ломаная) на плане местности. Для решения обзорно-поисковых задач (исследование физических полей, поиск и обследование различных объектов и т. п.) на борту имеется комплекс измерителей физических величин и существует возможность использования их показаний в алгоритмах рабочего задания робота.

Рабочее задание состоит из программы движения и включенной в неё программы работы бортовых устройств. Первая из них определяет параметры элементов, составляющих траекторию. Вторая строится на основе первой и описывает ра-

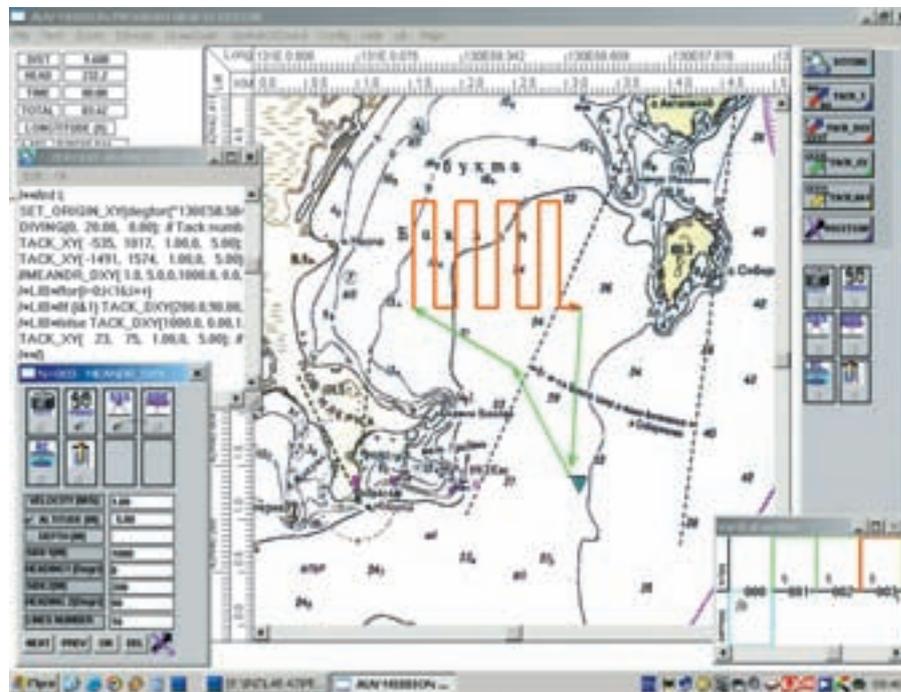


Рис. 5  
Пример использования графического редактора миссии

боту бортовых устройств во время реализации траектории. Эта программа не может осуществляться независимо от программы движения.

*Графические редакторы и графические языки* обеспечивают доступность и наглядность программирования. В таких системах обычно применяются средства имитирования окружающей среды и самого робота. Действия оператора сводятся к выбору объектов из этой среды и выдаче для робота соответствующих инструкций типа «перейди туда-то», «следи за указанным объектом». При этом, формально составленного плана действий и, следовательно, языка программирования для такого робота не существует. В других случаях [13, 14] оператор строит задание из блоков (типа «обследовать площадь», «двигаться на акустический источник»). Блоки связываются условными переходами, определяющими их выполнение. Каждый блок представляет собой конфигурируемую расслоенную структуру (содержит таблицу статической кон-

фигурации), которая сама определяет надлежащее поведение. Понятие поведения включает простую миссию, параметры отслеживания дна и огибания препятствий. В аналогичных системах задание строится из графических объектов, которые соединяются между собой соответствующими связями. При инициализации каждого из объектов на экране компьютера появляется связанная с ним таблица. От оператора требуется заполнить выведенные на экран таблицы.

В аппаратах ИПМТ ДВО РАН применяется графический редактор-надстройка над языком составления миссий. Применение графического редактора, позволяющего «рисовать» желаемую траекторию на экране дисплея, делает программирование АНПА достаточно простой процедурой [2, 5, 15]. Использование графического редактора сводит составление задания к нанесению траектории необходимой формы в желаемом месте карты района работ (рис. 5). Одновременно графическое представление преобра-

зается в текст программы, пригодный к дальнейшей обработке компилятором. Такой подход не требует применения средств симуляции полученной программы-задания, поскольку она заведомо не содержит логических и вычислительных ошибок. Следует отметить, однако, что применение редактора существенно ограничивает использование потенциальных возможностей языка программирования.

## АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

### Управление движением в горизонтальной плоскости

В системах курсовой стабилизации в подавляющем большинстве случаев управляющие воздействия формируются на основе линейного регулятора с ограничением на управление:

$$\begin{aligned} T_z &= d_1 U_\varphi, \quad M_y^{ymp} = d_3 U_\varphi, \\ U_\varphi &= K_{1\varphi} \Delta\varphi + K_{2\varphi} \dot{\varphi}, \quad |U_\varphi| \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $K_{1\varphi}$ ,  $K_{2\varphi}$  – коэффициенты усиления,  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{зад}$ , расогласование по курсу,  $d_1$ ,  $d_3$  – параметры, равные отношениям максимального упора и его момента к моменту инерции аппарата. Обычно при выполнении очевидных условий  $K_{1\varphi} < 0$ ,  $K_{2\varphi} < 0$  проблем с обеспечением устойчивости системы не возникает благодаря надлежащему выбору размеров и формы стабилизаторов. Исключение составляет аппарат «Тифлонус», корпус которого обладает большой гидродинамической неустойчивостью по отношению к углу атаки, а устойчивость движения обеспечивается за счет выбора структуры и параметров управления.

Управляемость аппарата по курсу характеризуется угловой скоростью круговых движений при максимальной величине управления ( $U_\varphi = 1$ ) или минимальным радиусом установив-

шейся циркуляции. Указанные параметры могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от соотношения упоров и моментов, создаваемых кормовыми и поперечными двигателями, и, соответственно, от скорости движения в режимах хода и позиционирования. В большинстве случаев при осуществлении жестких программ-заданий скорость движения постоянна на отдельных временных интервалах, и маневрирование по курсу производится путем изменения управляющего момента при постоянном маршевом упоре.

Использование маневренного аппарата для детального обследования объектов, осмотра сооружений, сближения и стыковки с причальными устройствами или приводными маяками предполагает организацию гибкого и высокоточного управления с траекториями произвольной конфигурации.

Наряду с обычными режимами движения требуется также осуществлять более сложные режимы динамического позиционирования с переменной скоростью и круговым изменением направления вектора тяги (старт-стопные, реверсивные, лаговые и т. п.). К наиболее характерным практическим задачам данного класса относятся:

- маневрирование в заданной области вблизи цели с переменной скоростью и коррекцией курса, наведение на цель (источник сигнала), сближение с целью и позиционирование в точке;
- поиск и обследование протяженных объектов;
- ориентирование на местности с использованием информации системы технического зрения.

Во многих случаях указанные задачи взаимосвязаны и могут соответствовать различным этапам при выполнении той или иной миссии аппара-

та. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать их составляющие одного общего сценария при выполнении достаточно сложных работ.

В соответствии с общей постановкой задачи обследование области осуществляется с помощью кусочно-постоянной программы скорости курса при маневрировании в окрестности цели (объекта) и старт-стопного режима управления при динамическом позиционировании в точке или вдоль контура.

Область движения может быть определена одним из следующих способов:

а) координатами  $\{X_\varphi, Z_\varphi\}$  целевой точки, радиусом окрестности  $r_u$  и расстоянием до цели  $d_u$ ;

б) расстоянием  $d_m$  до источника сигнала (маяка) и пеленгом  $\vartheta_m$ ;

в) произвольным замкнутым контуром  $g(X, Z) = 0$ , относительно которого определяются смещения аппарата  $d_i$  в направлениях, связанных с корпусом аппарата;

г) линейной полосой  $|aX + bZ + c| \leq \Delta_l$  шириной  $\Delta_l$  относительно протяженного объекта и относительными линейными  $\{\Delta X_i, \Delta Z_i\}$  и угловыми  $\Delta\varphi_i$  перемещениями аппарата.

Задача траекторного обследования малой области и наведения на цель может быть решена с помощью управления с кусочно-постоянной программой изменения скорости и курса и старт-стопного режима управления при динамическом позиционировании вблизи цели.

Обозначим  $R_l$  – радиус области, в которой осуществляется наведение на цель,  $R_0$  – радиус области маневрирования,  $R$  – расстояние от аппарата до цели.

Логически вытекает следующий режим сближения аппарата с целью при наличии постоянного течения:

- движение по пеленгу (азимуту) цели с заданной постоянной скоростью  $v_1$  при  $R > R_1$ ;
- уменьшение скорости  $v_2 < v_1$  при вхождении в область  $R_0 \leq R \leq R_1$  и выполнение поворотов в сторону, соответствующую знаку (или величине) пеленга;
- стабилизация положения при  $R < R_0$ .

При движении в заданной малой области логика программного алгоритма формирует режим изменения скорости, курсовые углы и направления поворотов:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + c \Delta \varphi_k \operatorname{sign} \varepsilon_k, \quad (8)$$

$$\varepsilon_k = \varphi_k - \arctg(Z_k - Z_u) / (X_k - X_u),$$

$$c = 0 \text{ при } R \leq R_0, \quad c = 1 \text{ при } R > R_0.$$

На заключительном этапе движения осуществляются сближение с целью и позиционирование в точке. При известном относительном положении аппарата и цели ( $\Delta X = X - X_u$ ,  $\Delta Z = Z - Z_u$ ) управляющие воздействия имеют вид:

$$U_x = K_1 \Delta X + K_2 \dot{X} + K_3 \int_{t_0}^t \Delta X dt,$$

$$U_z = K_1 \Delta Z + K_2 \dot{Z} + K_3 \int_{t_0}^t \Delta Z dt,$$

$$T_{x1} = U_x \cos \varphi + U_z \sin \varphi, \quad (9)$$

$$T_{z1} = -U_x \sin \varphi + U_z \cos \varphi,$$

$$(T_{x1}^2 + T_{z1}^2)^{1/2} < T_{\max}.$$

Отметим некоторые особенности задачи организации движения при поиске и обследовании протяженных объектов.

Если местоположение протяженного объекта определено предварительно с точностью, достаточной для выхода аппарата в точку установления контакта с объектом с помощью средств обнаружения, то в миссию аппарата включаются следующие процедуры:

- выход в точку и поиск контакта с объектом;
- маневрирование вблизи объекта и определение ориентации протяженной линии;
- отслеживание протяженной линии в заданной «полосе», со-

ответствующей области устойчивого контакта;

- возвращение к поисковой программе при эпизодической потере контакта с объектом.

В состав системы обнаружения могут входить различные устройства, позволяющие найти объект по сигналам ближнего действия и идентифицировать его на фоне ложных сигналов. Для решения этой задачи в состав системы технического зрения (СТЗ) должны входить высокоразрешающие обзорные эхолоты, видеосистема (ТВС) и средства магнитометрического или электромагнитного обнаружения.

При поиске аппарат может совершать круговые и сканирующие движения в заданной области с целью «захватить» контакт. При получении первичного контакта аппарат удерживает положение, в котором контакт устойчиво сохраняется. Для уточнения направления протяженности объекта аппарат должен совершать поисковые поступательно-круговые движения «змейкой» с малым радиусом поворотов при получении или потере контакта. При этом определяются линейные  $\Delta d$  и угловые  $\Delta \varphi$  перемещения аппарата относительно протяженной линии. На основе полученных данных формируется генеральный курс  $\varphi_d$ , которым должен следовать аппарат, чтобы удерживаться в «коридоре»  $\Delta$  устойчивого контакта. Управление движением организуется таким образом, чтобы при наличии навигационных и динамических ошибок траектория движения удовлетворяла «в среднем» условиям:  $\varphi_{cp} = \varphi_d$ ,  $\Delta d \leq \Delta$ . Практические примеры решения задачи с помощью поискового комплекса в составе электромагнитной и видеосистем приведены в [5, 7], а возможности использования для этой цели многолучевой эхолокационной сис-

темы рассмотрены в статье А.В. Инзарцева и А.М. Павина в настоящем номере журнала.

### Управление движением в вертикальной плоскости

#### Динамика системы стабилизации глубины

Стабилизация рабочей глубины погружения АНПА является одним из основных режимов движения при выполнении различных измерений в толще воды. Во многих случаях программа движения содержит переходы с одной глубины на другую с погружением или всплытием под действием движителей. Качество переходных процессов и точность стабилизации глубины зависят от соотношения условий управляемости (маневренности) и устойчивости при заданных начальных рассогласованиях и выбранных параметрах управления. В достаточном общем случае структура системы стабилизации глубины имеет вид, представленный на рис. 6, где  $W_H(s)$ ,  $W_Y(s)$ ,  $W_A(s)$ , передаточные функции, соответствующие уравнениям (2),  $U(\vec{H}, \vec{\psi})$  – управляющая вектор-функция,  $f(u)$  – нелинейный регулятор.

Как известно, управляемость (маневренность) аппарата по глубине в режиме «крейсерского» движения зависит от соотношения сил гидродинамического сопротивления, управляющих сил и плавучести аппарата. Характеристиками управляемости могут служить максимальная величина вертикальной составляющей скорости или максимальный дифференциал при погружении (всплытии). Аналитические выражения для этих величин могут быть получены лишь при условиях линеаризации системы уравнений, в частности, при малости угловых величин. Основные соотношения, характеризующие установившиеся

движения аппарата в этих случаях, рассмотрены в [1–5]. Другая важная проблема при выборе структуры и параметров управления заключается в обеспечении компромисса между условиями управляемости и устойчивости (точности) при ограниченных по величине управляющих силах.

Для линеаризованной системы (2) с управлением

$$U_x = K_1(H - H_{np}) + K_2\psi + K_3\dot{\psi}$$

можно получить необходимые и достаточные условия устойчивости при любых начальных отклонениях. Эти условия устанавливают связь между параметрами  $K_1, K_2, K_3$ , зависящую от скорости движения и параметров гидродинамического воздействия. При ограничении на величину управления  $|U_x| \leq 1$  и на параметры исполнительных органов имеются также и ограничения на допустимые отклонения по глубине и угловые величины. В теоретическом отношении возможна постановка задачи выбора управления, обеспечивающего устойчивость системы «в целом», т. е. при любых начальных отклонениях, однако, поскольку реальные

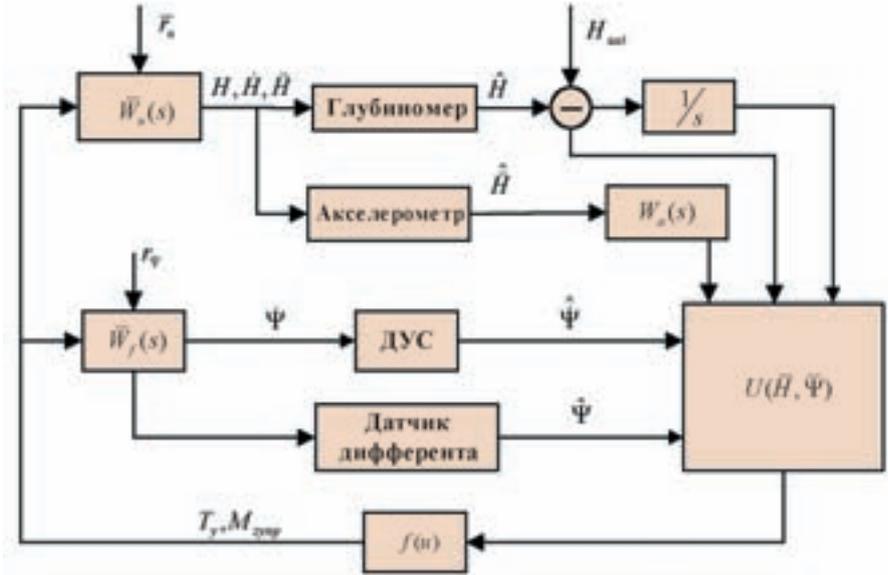


Рис. 6 Структурная операторная схема системы стабилизации глубины

отклонения системы от положения равновесия всегда ограничены, требования устойчивости «в целом» являются завышенными. На практике актуальной представляется задача определения взаимосвязи между выбранными подходящим образом параметрами управления и соответствующей им областью допустимых начальных отклонений. Установление подобной связи аналитическим путем представляется в общем случае весьма трудоемкой задачей. В более

простой постановке требуется численным путем определить границу области допустимых начальных отклонений системы и характер переходных процессов при выбранных параметрах управления. На рис. 7, а, показан в качестве примера для АНПА «ММТ-2000» вид областей в плоскости параметров  $K_1, K_2$ , отличающихся характером переходных процессов (апериодических, колебательных, неустойчивых) при заданных значениях начального рас-

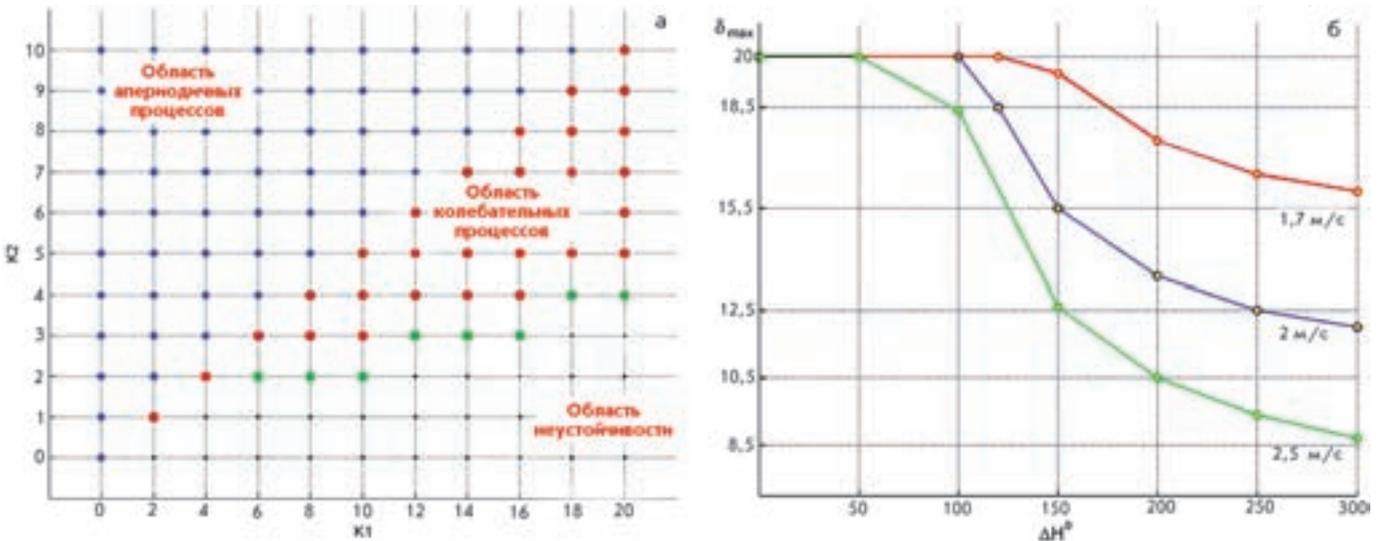


Рис. 7. Зависимость качества переходных процессов от выбора коэффициентов ( $K_1, K_2$ ) линейного управления при обработке начального рассогласования по глубине. а –  $\Delta H = 100\text{ м}$ ,  $v = 3\text{ м/с}$ ; б – зависимость величины  $\delta_{max}$  от начального рассогласования  $\Delta H$  при различных значениях скорости и  $\psi_{max} = 80^\circ$

согласования по глубине и скорости движения. Как критерии оценки качества переходных процессов были взяты величина перерегулирования и время попадания процесса в заданную «трубку» рассогласования по глубине (0,5 м). Последняя величина характеризует быстродействие системы при заданной точности отработки начального рассогласования. Кроме того, для обеспечения устойчивости во всей области допустимых рассогласований по глубине необходимо ввести ограничение на максимальную величину угла  $\delta = \delta_{max}$ , при которой максимальный дифферент также ограничен заданной величиной  $\psi = \psi_{max}$ . Зависимость этого угла от начального рассогласования по глубине для различных значений скорости движения показана на рис. 7, б.

Приведенные примеры являются иллюстрацией следующей более общей задачи. Пусть требуется стабилизировать движение, скорость которого изменяется по программе, принимая разные значения

$$v_{min} \leq v \leq v_{max},$$

а отклонения по глубине и дифференту также изменяются в широком диапазоне. При жестком задании параметров управления трудно обеспечить требуемое качество процессов стабилизации во всех случаях и, в особенности, при большой гидродинамической неустойчивости корпуса аппарата.

Можно обеспечить компромисс устойчивости и точности (быстродействия), введя, например, переключение коэффициента усиления  $K_1$  в зависимости от величины текущего рассогласования по глубине  $\Delta H$  и скорости движения  $v$ :

$$K_1 = 0,5 f(v) [(K_{11} + K_{12}) + (K_{11} - K_{12}) \text{sign}(|\Delta H| - d)], \quad (10)$$

где  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $d$  – варьируемые параметры, с помощью которых можно управлять динамикой

процесса,  $f(v)$  – функция, аппроксимирующая зависимость качества переходных процессов от скорости движения. Можно таким же образом разбить всю область допустимых рассогласований по глубине на подобласти, каждой из которых будет соответствовать свой набор переключаемых параметров управления. При этом весь переходный процесс будет состоять из сопряженных между собой отдельных процессов с колебаниями на границах переключаемых параметров управления.

Перейдем от скачкообразного изменения коэффициентов  $K_{1min} < K_1 < K_{1max}$  и  $K_{2min} < K_2 < K_{2max}$  к алгоритму, позволяющему непрерывно изменять эти параметры в течение всего процесса: где  $K_{10}$ ,  $K_{20}$  следует выбрать так, чтобы при заданном значении допустимого рассогласования  $H$  сохранялась устойчивость при всех  $|\Delta H| < H$ .

Величины  $K_{1max}$ ,  $K_{2max}$  определяют характер переходных процессов на конечном участке, и, следовательно, коэффициенты  $K_{10}$ ,  $K_{20}$  можно задать из условий:

$$K_{1max} = K_{10} \Delta H, \quad K_{2max} = K_{20} \Delta H.$$

Тогда коэффициенты  $K_{1min} = K_{1max} (1 - |\Delta H(0)| / \Delta H)$ ,  $K_{2min} = K_{2max} (1 - |\Delta H(0)| / \Delta H)$  будут зависеть от заданных начальных условий в области их допустимых значений.

Характер переходных процессов и «фазовая» плоскость  $(\Delta H, \psi)$  при жестком задании параметров ПИД-регулятора и «квазилинейном» управлении вида:

$$U = (K_{1max} \Delta H + K_{2max} \psi) [(\dot{\Delta H} - |\Delta H|) / \dot{\Delta H}] \quad (11)$$

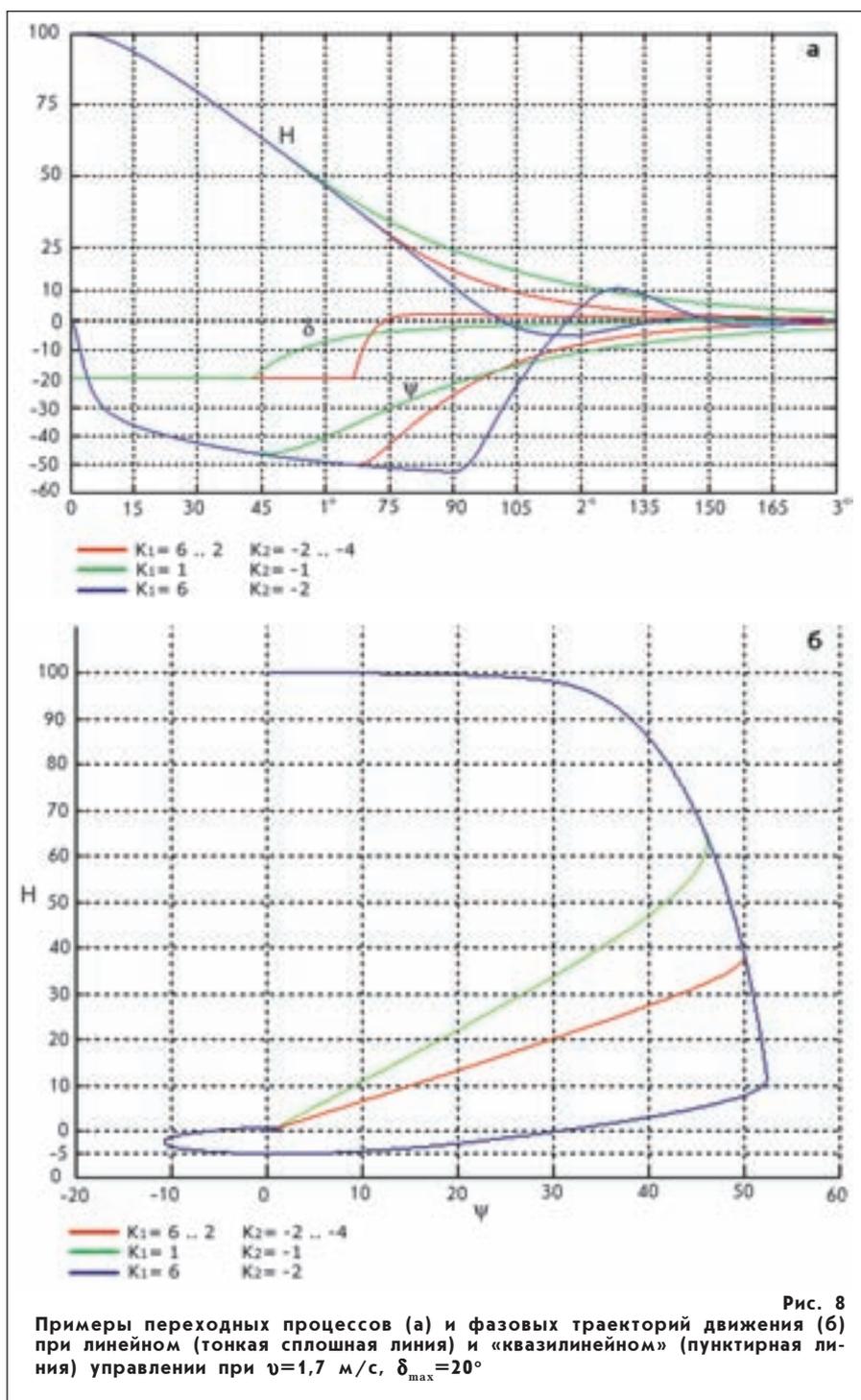
показан на рис. 8, а, б.

Из результатов моделирования следует, что управление вида [11] позволяет выбрать произвольные параметры таким образом, чтобы обеспечить компромисс противоречивых ди-

намических требований при любых начальных рассогласованиях из области их допустимых значений и переменной скорости движения даже в тех случаях, когда система с жестко заданными параметрами линейного управления оказывается неустойчивой. В частности, из графиков, представленных на рис. 4, видно, что переходные процессы оказываются в данном случае близкими к «эталонному» процессу, характер которого не зависит от начальных рассогласований из области их допустимых значений.

### Управление движением вблизи дна

Использование АНПА для обзора и съемки микрорельефа дна, для гидрофизических исследований в придонном слое, для обследования объектов, находящихся на дне, связано с организацией движения по эквидистанте от дна и обходом или огибанием препятствий. Для обнаружения препятствий и определения дистанций до дна в переднем секторе обзора используется многоканальная эхолокационная система высокого разрешения. Управление движением по эквидистанте предполагает, вообще говоря, формирование некоторой модели эквидистанты на основе эхолокационной информации и данных об относительных перемещениях аппарата. В таком случае управление можно организовать в виде корректируемой программы, прогнозирующей пространственную эквидистантную траекторию и ориентирующей аппарат вдоль нее. В плоском случае задача упрощается и сводится к стабилизации позиционных и угловых рассогласований, сформированных с помощью нескольких дальномеров. Подобный способ управления был реализован в различных модификациях в большинстве аппаратов ИПМТ ДВО РАН, а для определения дис-



танций использовалась многоканальная эхолокационная система (5–7 высокочастотных эхолокаторов), дальнометры которой ориентированы в переднем секторе обзора под разными углами к продольной оси аппарата (вперед, вниз, вбок, вверх) для определения соответствующих дистанций до препятствий [2, 5, 16].

Выбор трассы пространственного движения при сложном рельефе дна предполагает активное маневрирование аппарата среди препятствий. В аналогичных примерах, характерных для управления движением мобильных роботов, задача прокладки трассы при неполной информации о местности заключается в достиже-

нии целевой точки при наличии препятствий лабиринтного типа. Движение планируется путем назначения подделей, соответствующих видимым участкам рельефа. При этом на каждом шаге производится сканирование рельефа, разрешается противоречие между двумя управляющими факторами – продвижением к цели и обеспечением более благоприятных условий для обзора местности – и выполняется жесткое планирование протяженных участков трассы. Применимость подобного подхода к управлению движением АНПА оказывается проблематичной из-за сложности построения системы отображения информации о рельефе и, соответственно, большого объема вычислений.

Во многих случаях при сравнительно несложном рельефе дна функции горизонтального и вертикального каналов управления могут быть разделены. При этом горизонтальный канал осуществляет курсовую коррекцию движения к цели, маневрирование при обходе препятствий и возвращение к исходной курсовой программе. Задача вертикального канала состоит в отслеживании эквидистанты и выполнении маневра с упреждением по безопасному обходу препятствий. Такой подход использован в системах управления большинства обзорно-поисковых и исследовательских аппаратов.

При построении алгоритма управления показания эхолокаторов используются для аппроксимации видимой части поверхности рельефа участками плоскостей. Каждому участку поверхности ставятся в соответствие геометрические параметры в системе координат, связанной с корпусом аппарата. Вся траектория представляется в виде отрезков, каждый из которых минимизирует длину

эквилибристы по отношению к сопряженным плоским элементам в текущей точке траектории.

В случае движения в горизонтальной плоскости препятствия представляются в виде границ, образующих запрещенные зоны для движения.

Движение осуществляется в заданном направлении с отклонением от встречающихся препятствий в сторону наименьшего рассогласования. Такое маневрирование реализуется с помощью совместного использования режимов поступательного движения и зависания. Алгоритм работы заключается в следующем:

- при отсутствии препятствий аппарат выполняет программу в обычном режиме;
- если дистанция до препятствия по переднему локатору меньше установленного порога, то аппарат переходит к режиму зависания со стабилизацией дистанции по одному из боковых локаторов. При этом выбирается локатор, показывающий меньшую дистанцию;
- движение с обходом препятствия продолжается до тех пор, пока курс не совпадет с заданным, а передний локатор не будет выделять препятствий.

В общем случае пространственный характер движения обуславливает специфику алгоритма прокладки трассы, определяя, помимо требования достижения целевой точки, ряд требований, которым должна удовлетворять форма траектории. В частности, траектория должна иметь минимальную длину среди других возможных и во многих случаях она должна представлять собой эквидистанту по отношению к рельефу дна, т. е. должна воспроизводить профиль рельефа вдоль по трассе движения. Выполнение такого типа траекторий требует от АНПА одновременного маневра в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Характерные особенности задачи можно проиллюстрировать на примере организации управления при обследовании подводных гор (гайотов), отличающихся резко переменным микрорельефом, наличием разнообразных препятствий по трассе движения [16].

При выборе управления возможны следующие варианты:

- движение вдоль склона с нулевым дифферентом или с дифферентом, соответствующим углу склона;
- огибание препятствия «с ходу» с постоянной или переменной скоростью;
- торможение или задний ход с переходом в зависание при обнаружении препятствия, которое не может быть преодолено «с ходу»;
- сканирование корпусом без поступательного движения для определения высоты препятствия и максимального угла обзора;
- преодоление сложного препятствия (козырька, высокого барьера) с использованием попятного движения при больших углах дифферента и углах атаки.

Из всех возможных вариантов движения практически необходимо выбирать наиболее экономичные по энергетике. В этом отношении предпочтительны, очевидно, режимы с минимальным сопротивлением, что связано с обеспечением некоторого «оптимального» угла атаки, соответствующего заданной текущей скорости. Ясно,

что не все из перечисленных выше режимов удовлетворяют этому условию. Так, движение вдоль склона с нулевым дифферентом нельзя считать приемлемым в качестве основного режима, поскольку в этом случае возможны большие углы атаки, и расход энергии может быть уменьшен лишь за счет снижения скорости. Точно так же при сложном маневрировании вблизи препятствия трудно обеспечить энергетически оптимальный режим, поскольку при этом отдается приоритет безопасности аппарата и, как следствие, возникают дополнительные энергетические затраты на движение. Еще одной особенностью задачи является наличие неполной, не достоверной, размытой информации о рельефе, что приводит к целесообразности построения гибридной структуры управления с элементами нечеткой логики [6]. Приведем в качестве примера результаты моделирования движения в вертикальной плоскости для некоторых характерных режимов управления, таких как огибание препятствия «с ходу» с удержанием эквидистанты относительно дна, огибание высоких и крутых препятствий, маневры по отслеживанию других более сложных форм рельефа.

При огибании препятствия «с ходу» управление формируется в зависимости от крутизны склона  $D$ , которая вычисляется на основе данных от ЭЛС в каждой точке траектории:

$$\Delta = \psi + \max_{i=1}^3 \left( \varphi_1 - \arctg \left( \frac{d_{i+1} \sin \alpha_i}{d_i - d_{i+1} \cos \alpha_i} \right) \right), \quad (12)$$

$$\varphi_i = (90^\circ - \alpha_1) + \sum_{k=1}^i \alpha_k.$$

В приведенных выражениях  $d_i$  ( $i=1...4$ ) – дистанции локаторов, ориентированных соответственно вниз, наклонно, вперед

и наклонно вверх,  $\alpha_i$  – угол между  $i$ -м и  $i+1$  локатором,  $\varphi_1$  – угол между продольной осью аппарата и  $i$ -м локатором,  $\psi$  – дифферент.

Угловое движение осуществляется при управляющем моменте  $M_z$ , для формирования которого определяются позиционное рассогласование

$$dY = Y_3 - \min(d_1, d_2 \cos \alpha_i),$$

программный дифферент, угловая скорость по дифференту и страховочная дистанция по переднему локатору:

$$M_z = K_1 dY + K_2 (\Delta - \psi) + K_3 \dot{\psi} + K_4 (1/d_3). \quad (13)$$

В качестве программного дифферента выбирается рассчитанная крутизна поверхности  $\Delta$ .

При относительно высоком или крутом препятствии в закон управления вводится пороговое значение крутизны склона  $\Delta_1$ , при котором происходит пере-

ключение режима «крейсерского» движения на режим торможения или «форсированного» углового маневрирования. Управляющие упоры и момент формируются следующим образом:

$$T_x = K_{1x} (\min(d_3, d_4) - D) + K_{2x} \dot{x},$$

$$T_y = T_{y\max}, \text{ если } \Delta < \Delta_1$$

$$\text{и } T_y = K_{1y} (d_4 - 2Y_3) + K_{2y} \dot{y}, \text{ если } \Delta \geq \Delta_1, \quad (14)$$

$$M_z = K_{1m} (\psi_3 - \psi) + K_{2m} \dot{\psi},$$

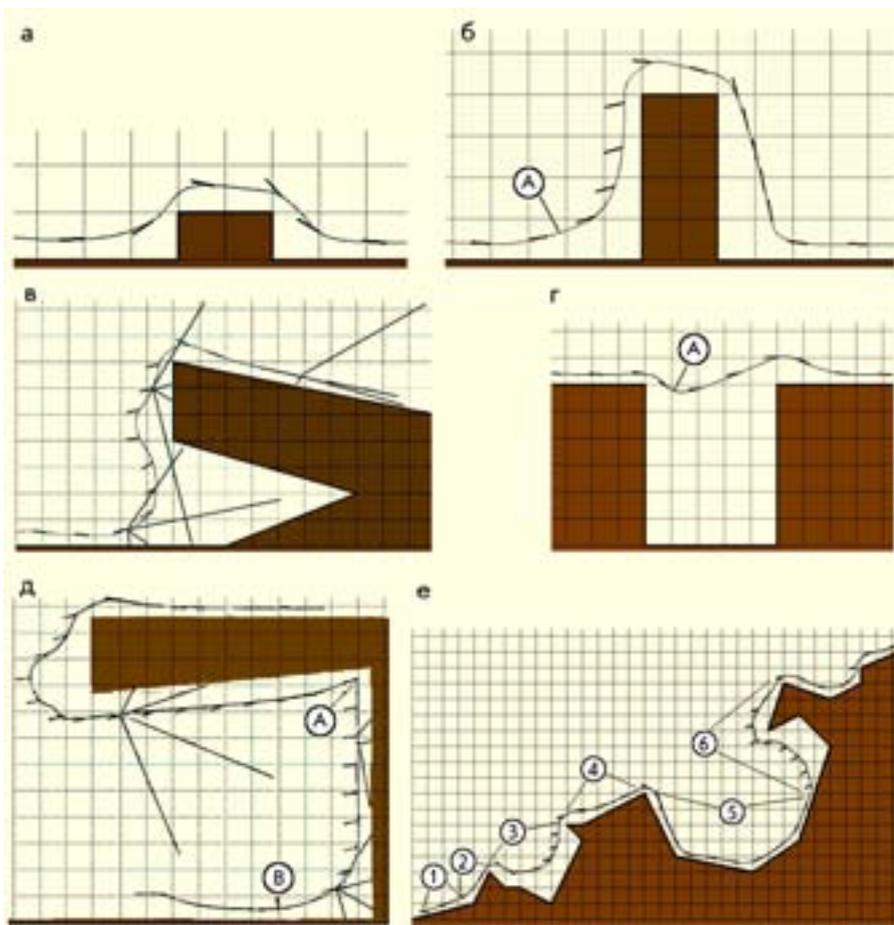
где величина  $D$  определяет заданное расстояние до препятствия при его огибании,  $K_{1x}$ ,  $K_{2x}$ ,  $K_{1y}$ ,  $K_{2y}$ ,  $K_{1m}$ ,  $K_{2m}$  – параметры управления.

На рис. 9(а–е) показаны примеры преодоления характерных одиночных и сложных

препятствий при сочетании различных режимов управления.

Для наглядности на рис. 9 в некоторых точках траектории нанесены лучи эхолотаторов. Длина каждого луча соответствует радиусу действия ЭЛС. В большинстве случаев огибание сложных препятствий происходит с использованием режимов торможения и заднего хода. Во всех рассмотренных вариантах система управления удерживает движение по эквидистанте от дна на заданном расстоянии 3 м, а при обнаружении препятствия организует маневр по его преодолению. Использование в модели управления элементов нечеткой логики при программной имитации сбоев в работе ЭЛС позволяет «сгладить» эквидистантную траекторию движения и собственно динамику аппарата, в особенности в тех случаях, когда интенсивность недостоверной информации возрастает.

Рис. 9. Примеры траекторий движений при огибании препятствий. а – огибание препятствия «с ходу»; б – огибание высокого препятствия типа «барьер», А – обнаружение препятствия и торможение; в – огибание препятствия типа «пещеры»; г – проход над «ущельем»; д – движение под «козырьком», А – начало попятного движения, В – обнаружение препятствия; е) движение в сложном рельефе, 1, 2, 4, 5 – движение вдоль склона, 3 – огибание «козырька», 6 – выход из-под «козырька»



#### 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. Автономные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2000, 272 с.
3. Киселев Л.В. О точности стабилизации автономного подводного аппарата // Подводные роботы и их системы. Владивосток, 1995. Вып. 6. С. 84–93.
4. Киселев Л.В. О некоторых нелинейных алгоритмах коррекции динамики АНПА // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 1996. Вып. 1. С.37–49.
5. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Ю.В.Матвиенко и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М: Наука, 2005. 400 с.

6. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В. О некоторых особенностях динамической модели АНПА с элементами нечеткой логики // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука. 2003. Вып.5. С.18–31.

7. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 6–17.

8. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.

9. Подводные роботы / под ред. В.С. Ястребова. Л.: Судостроение, 1977. 363 с.

10. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов, Л.: Судостроение, 1978.

11. Справочник по теории корабля / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т. 1. С. 153–162.

12. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов К.В. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инже-

нерной практике. СПб.: «БХВ – Петербург», 2005. С.163–373.

13. Mark R. Patterson. A Finite State Machine Approach To Layered Command and Control of Autonomous Underwater Vehicles Implemented in G, A Graphical Programming Language // Proceedings of Ocean Community Conference'98. Baltimore, 1998.

14. Bellingham J.G., Bales J.W., Atwood D.K., Perrier M., Goudey C.A., Consi T.R. and Chryssostomidis C. Performance Characteristics of the ODYSSEY AUV // Proceedings of the 8 International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 1993.

15. Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Сидоренко А.В., Хмельков Д.Б. Архитектурные конфигурации систем управления АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С.18–30.

16. Агеев М.Д., Инзарцев А.В., Киселев Л.В. Некоторые вопросы управления АНПА при обследовании подводных гор // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 3. С. 46–55.

