УДК 551.46.007:629.584

О ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЯХ ГИДРОДИНАМИКИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА

Л.В. Киселев, А.В. Медведев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Рассматриваются динамические свойства автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в зависимости от их конструктивных и функциональных особенностей. Основное внимание уделяется анализу устойчивости движения по отношению к начальному состоянию системы, параметрам управления и скорости движения. Приводятся результаты моделирования динамических процессов для двух видов АНПА, созданных в ИПМТ ДВО РАН в последние годы.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и создании АНПА различного назначения предъявляется ряд противоречивых требований динамическим свойствам к системы управления при осуществлении определенного класса пространственных движений. Вопросы динамики и управления движением АНПА многообразны достаточно и включают в себя построение адекватных математических и вычислительных моделей, анализ устойчивости и управляемости, синтез адаптивного управления с учетом изменчивости условий задачи. Исследования по данным вопросам постоянно находятся в поле внимания, поскольку не только усложняются сами задачи управления, но и остаются актуальными методы решения этих задач с учетом возможностей новых компьютерных технологий. Со ссылкой на предшествующие работы [1-5] можно отметить, что в них даны постановка ряда принципиальных задач динамики и управления движением АНПА, а также примеры их решения и применения в практических разработках.

Наибольший интерес связан с обеспечением требуемого качества динамических процессов в системе стабилизации глубины или эквидистанты от дна, поскольку именно модель движения в вертикальной плоскости имеет ряд особенностей, обусловленных характером сил гидродинамического сопротивления и требованиями к динамике. Влияние данных факторов отмечалось в упомянутых выше работах, и речь шла о построении областей устойчивости в пространстве состояния системы и выборе параметров линейного автопилота при естественных ограничениях на управляющие воздействия. При этом вопросы построения областей устойчивости «в большом» и «в малом» рассматривались с учетом приближенных аналитических и экспериментальных оценок. Данная статья посвящена более детальному рассмотрению вопросов устойчивости движения с учетом особенностей гидродинамики аппаратов при изменении скорости движения и соответственно сил сопротивления вязкой среды.

Далее будем рассматривать данные вопросы применительно к двум аппаратам, созданным в ИПМТ ДВО РАН в последние годы – МТ-2010 и МТ-2012 (рис. 1, 2). Сравнительной оценке динамических свойств АНПА МТ-2010 и предшествующей модификации МТ-2012

¹ 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел /факс: (423) 243-26-74; e-mail: kiselev@marine.febras.ru



Рис. 1. АНПА МТ-2010 («Пилигрим»)



Рис. 2. АНПА МТ-2012

(МТ-2011) был посвящен один из разделов работы [5]. Необходимо отметить, что АНПА МТ-2010 («Пилигрим») - это действующий аппарат, представляющий собой пилотный образец для последующих преемственных разработок. АНПА МТ-2012 – проектный образец, при разработке которого рассматривались различные варианты конструктивной схемы, отличающиеся массой, размерами, кормовым оперением и элементами движительнорулевого комплекса.

Здесь и далее использованы данные для одной из последних модификаций конструктивной схемы, характеристики которой приведены в табл. 1.

Динамическая модель

Следуя работам [1–5], примем модель динамики АНПА в вертикальной плоскости в виде: $m_x \dot{\upsilon} = -R_x(\upsilon, \alpha) + T_x \cos \alpha - T_y \sin \alpha,$ $m_y \upsilon \dot{\vartheta} = R_y(\upsilon, \alpha, \dot{\psi}) + T_y \cos \alpha + T_x \sin \alpha,$ $I_{zz} \ddot{\psi} = M_0 \sin \psi + M_z(\upsilon, \alpha, \dot{\psi}) + M_z^{ynp},$ $\dot{X} = \upsilon \cos \vartheta, \quad \dot{Y} = -\upsilon \sin \vartheta, \quad \psi = \vartheta + \alpha.$ (1)

В уравнениях (1) приняты обозначения названных выше работ, в частности: координаты $X = {X (t), Y (t)}, v - скорость$ относительно водной среды (набегающего потока), ψ – дифферент, *α* – угол атаки, 9 – угол траектории, $R_{x_i} R_{y_i} M_z$ – гидродинамические силы и момент, m_{x} , m_{y} , I_{zz} – массы и момент инерции корпуса с учетом присоединенной жидкости, $T_{\rm w}$ *М*^{упр} – проекции управляющей силы и момента в системе координат, связанной с корпусом аппарата, M_0 – момент остойчивости. Внешними возмущающими воздействиями и остаточной плавучестью, влияющими главным образом на установив-

Таблица 1. Конструктивные параметры АНПА

Паланан	Значение	
параметр	MT-2010	MT-2012*
Длина, м	3,0	4,35
Диаметр корпуса, м	0,45	0,5
Объем, м ³	0,41	0,55
Смоченная поверхность, м ²	5,1	6,33
Площадь стабилизатора, м ²	0,172	0,128
Коэффициент момента остойчивости, Нм/рад	40	80
Масса в воздухе, кг	300	550
Масса M_x с учетом присоединенной жидкости, кг	320	558
Массы М _у , М _z с учетом присоединенной жидкости, кг	615	720
Моменты инерции J _y , J _z с учетом присоединенной жидкости, Нмс ²	838	1360

*В работе [5] были приведены данные для предшествующей модификации аппарата (МТ-2011)

шееся движение, будем в данном случае пренебрегать.

При значениях переменных параметров системы, допускающих линеаризацию, уравнения (1) принимают вид:

$$\dot{v} = \hat{C}_{x}(v) + b_{v} U_{v}(v, U_{x}),$$

$$\dot{x}_{i} = \sum a_{ij} x_{j} + b_{i} U_{x}, i, j = 1...4,$$

$$\dot{X} = v \cos(x_{2}/v), \quad \dot{Y} = v \sin(x_{2}/v),$$

$$U_{x} = f(x_{i}, v),$$
(2)

где $x_i^{}$ – 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, $b_v^{}$, $b_i^{}$ – параметры, зависящие от максимальных значений управляющих воздействий $U_v^{}$, $U_v^{}$.

Далее будем рассматривать установившееся движение с постоянной скоростью, принимающей различные значения (v = 1, 2, 3 м/c) в зависимости от величины суммарного маршевого упора. Вертикальная составляющая упора Т, является функцией линейного управления $U_{x} = \sum K_{i} x_{i}$ с постоянными или адаптивно настраиваемыми коэффициентами усиления K_{i} . Для простоты положим $U_{v} =$ $K_1 x_1 + K_3 x_3$, основываясь на том, что введение сигналов, пропорциональных $K_2 x_2$, $K_4 x_4$, используется обычно лишь для дополнительного демпфирования переходных процессов.

Запишем параметры замкнутой системы в явном виде:

$$a_{11} = a_{13} = a_{14} = 0, a_{11} = 1,$$

$$a_{21} = -K_1/m_y, a_{22} = -\hat{R}_y^a v/m_y,$$

$$a_{23} = -(\hat{R}_y^a v^2 + K_3), a_{24} = -\hat{R}_y^\omega v/m_y;$$

$$a_{31} = a_{32} = a_{33} = 0, a_{34} = 1;$$

$$a_{41} = K_1 d/I_{zz}, a_{42} = \hat{M}_z^a v/I_{zz},$$

$$a_{43} = (M_0 + \hat{M}_z^a v^2 + K_3 d) / I_{zz},$$

$$a_{44} = \hat{M}_z^\omega v/I_{zz},$$

(3)



Рис. 3. Визуализированные модели АНПА МТ-2010 (а) и МТ-2012 (б) в поле давления набегающего потока (v = 1 м/с, α = 5°)

где \hat{R}_{y}^{α} , \hat{R}_{y}^{ω} , \hat{M}_{z}^{α} , \hat{M}_{z}^{ω} – производные гидродинамических воздействий, отнесенные к величине «v²», d – плечо управляющего момента $M_{z}^{\text{ynp}} = T_{y}d$.

Аналитические и вычислительные операции при исследовании динамики АНПА включают следующие основные элементы:

• построение трехмерной визуализированной модели аппарата на основе конструктивной схемы проекта (Solid Work);

• гидродинамический расчет модели методом «виртуальной продувки» (Flow Work);

• определение параметров математической модели движения (Symbol Toolbox Matlab);

 анализ критериев устойчивости «в большом» и «в малом»;

• построение областей устойчивости в пространстве состояний параметров управления (Symbol Toolbox Matlab);

• оптимизация динамических процессов с учетом требований по устойчивости и точности управления.

Далее представлены результаты исследований динамической модели с использованием конструктивных данных АНПА МТ-2010, МТ-2012. Первый этап компьютерного моделирования состоит в построении трехмерной модели аппарата и визуализированной картины взаимодействия ее с набегающим потоком вязкой жидкости при заданных значениях угла атаки. Для примера на рис. 3 показаны компьютерные модели двух аппаратов в поле давления при угле атаки $\alpha = 5^{\circ}$ и скорости потока 1 м/с.

Из приведенных изображений видно, что в районе выступающих частей наблюдается концентрация давления, оказывающая влияние на положение вертикальной составляющей результирующей силы гидродинамического сопротивления (подъемной силы). У АНПА МТ-2010 она смещена в корму относительно центра масс на величину L = 0.45 м, у АПНА МТ-2012 - в нос на величину L = 0,27 м. Из приведенного примера следует, что в гидродинамических свойствах этих аппаратов имеются различия, являющиеся следствием различий в размерах корпуса и кормового оперения. Данные конструктивные особенности должны проявляться в зависимостях действующих сил от угла атаки, причем это должно быть наиболее выражено у АНПА МТ-2012. С этой целью было проведено моделирование гидродинамики этого аппарата во всем диапазоне углов атаки $|\alpha| \leq 180^{\circ}$. Результаты этих вычислений представлены в графическом виде на рис. 4.

Для анализа более детальной картины использовались сравнительные данные для двух аппаратов в диапазоне углов $|\alpha| \leq 10^{\circ}$ (рис. 5).

Гидродинамические характеристики МТ-2010 близки к линейным и знакопостоянны в рассматриваемом диапазоне углов атаки. Гидродинамический момент M₂ (ά) для аппарата МТ-2012 является величиной знакопеременной при $|\alpha| \leq 10^{\circ}$ с двумя экстремумами различных знаков вблизи значений $\alpha = 5^{\circ} - 7^{\circ}$. Наличие гидродинамической неустойчивости при малых углах атаки проявляется в общих требованиях к динамическим свойствам системы управления.

Производные гидродинамических сил, входящие в выражения (3), оцениваются при





Рис. 5. Гидродинамические характеристики АНПА МТ-2010 (а) и МТ-2011 (б) в диапазоне углов атаки |α |≤ 10° при v = 1 м/с

малых значениях углов атаки и угловых скоростей соответствующими производными гидродинамических коэффициентов. Их значения для АНПА МТ-2012 приведены в табл. 2.

Устойчивость «в большом» и «в малом»

Как уже отмечалось выше со ссылкой на предшествующие работы, динамические свойства АНПА, описываемые системой уравнений (3), имеют некоторые особенности, обусловленные гидродинамикой аппарата и физическими ограничениями на управление.

Одна из особенностей связана с гидродинамической неустойчивостью корпуса аппарата по отношению к углу атаки.

Таблица 2. Производные гидродинамических коэффициентов

C_{x}	C_y^{a}	m_z^{α}	C_y^{ω}	m_z^{ω}
0,092	1,7	0,5	4,1	4,7

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 vстойчивости используются традиционные методы

Фактически задача исследования устойчивости разбивается на две взаимосвязанные задачи: • определение области устойчивости «в большом» по отношению к начальным состояниям системы при выбранных определенным образом параметрах управления и ограничениях на управляющие воздействия;

• определение области устойчивости в пространстве параметров управления при заданных начальных состояниях системы, принадлежащих области устойчивости «в большом».

Обе задачи можно представить в формальном виде:

1. $U_x = \Sigma K_i x_i, |U_x| \le 1 \Longrightarrow S_k(K_i) \Longrightarrow S_x(x_i),$ 2. $v_{\min} \le v \le v_{\max},$ $|U_x| \le 1 \Longrightarrow S_k(K_i(x_i)) \Longrightarrow S_x(x_i),$

где $S_k(K_i)$, $S_k(K_i(x_i))$ — области устойчивости по отношению к постоянным или настраиваемым параметрам управления, зависящие от гидродинамических свойств аппарата, $S_x(x_i)$ — соответствующая область допустимых по условиям устойчивости начальных состояний системы.

Первая из задач соответствует обеспечению устойчивости «в большом», вторая – адаптивной коррекции параметров управления для обеспечения компромисса условий устойчивости «в большом» и «в малом». При этом динамика системы определяется только совокупностью параметров K_i , и ее оптимизация с помощью этих параметров имеет смысл только при соответствующей оптимизации начальных условий.

Последнее требование можно обеспечить с помощью «квазилинейного» управления:

$$U_{x} = \sum K_{i \max} x_{i} \left(1 - |x_{i}| / \tilde{x}_{i} \right).$$
 (4)

При управлении вида (4) его параметры настраиваются на изменение 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 \tilde{x}_i .

Рассмотрим более детально вопросы устойчивости, используя линеаризованную модель движения (2) с параметрами (3).

Запишем характеристиче-
ское уравнение системы (2) в
виде:
$$D(\lambda) = \sum_{k=0}^{4} C_k \lambda^{n-k}$$
,
где $C_o = I_{zz} m_y$, $C_1 = (\hat{R}^{\alpha}_y J_{zz} - \hat{M}^{\omega}_z m_y) \upsilon$,
 $C_2 = (\hat{M}^{\alpha}_z \hat{R}^{\omega}_y - \hat{M}^{\omega}_z \hat{R}^{\alpha}_y) \upsilon^2 - (M_0 + \hat{M}^{\alpha}_z \upsilon^2) m_y + K_1 J_{zz} - K_3 m_y d$,
 $C_3 = K_3 (\hat{M}^{\alpha}_z - \hat{R}^{\alpha}_y d) \upsilon - (K_1 - K_1 - K_2 - K_2 - K_2 - K_3 - K_2 - K_3 - K_3 - K_2 - K_3 -$

В формулах (5) производные позиционных составляющих гидродинамических сил отнесены к величине v^2 , вращательных – к величине v.

Необходимые и достаточные условия устойчивости «в малом» (условия Рауса-Гурвица) записываются в виде:

1)
$$C_1 > 0, 2$$
) $C_1 C_2 - C_3 > 0,$
3) $C_1 C_2 C_3 - C_1^2 C_4 - C_3^2 > 0,$ (6)
4) $C_4 > 0.$

Необходимо определить область параметров (K_1 , K_3), удовлетворяющих условиям (6). Первые два и четвертое неравенства не накладывают ограничений на выбор величин $K_1 > 0$, $K_3 < 0$ при очевидных условиях: $\hat{R}_y^{\alpha} J_{zz} - \hat{M}_z^{\omega} m_y > 0$,

$$\left(\hat{M}_{z}^{\alpha}-\hat{R}_{v}^{\alpha}d\right)\upsilon^{2}+M_{0}>0.$$

Из третьего неравенства следует условие, определяющее вид области устойчивости в плоскости параметров (K_1 , K_2):

$$s_1 K_1^2 + 2s_2 K_1 K_3 + s_3 K_3^2 + + 2s_4 K_1 + 2s_5 K_3 + s_6 > 0.$$
(7)

Коэффициенты квадратичной формы (7) определяются преобразованиями третьего из условий (6) и зависят от конструктивных и гидродинамических параметров АНПА при заданной скорости движения.

Вид областей устойчивости для АНПА МТ-2010 и МТ-2012 для трех значений скорости (v = 1, 2, 3 м/с) приведен на рис. 6, 7. Из построений видно, что границы областей устойчивости оказываются близкими к прямым линиям, в особенности при меньших значениях скорости. Для аппроксимации можно использовать уравнения для касательных в заданной точке – полюсе (K_1^*, K_3^*). Тогда уравнение для границы устойчивости (поляры) принимает вид:

$$(s_1K_1^* + s_2K_3^* + s_4)K_1 + (s_2K_1^* + s_3K_3^* + s_5)K_3 + + (s_4K_1^* + s_5K_3^* + s_6) = 0.$$
 (8)

Выражение (8) можно считать приближенным уравнением для границы устойчивости «в малом» в произвольной точке плоскости (K_1^*, K_3^*).

Из сопоставления рис. 6, 7 также видно, что условия устойчивости для АНПА МТ-2012 при различных значениях скорости являются более жесткими, чем соответствующие условия для АНПА МТ-2010, что, очевидно, является следствием существенных различий их гидродинамических характеристик.

Управляющие воздействия и переходные процессы

Движительный комплекс АНПА МТ-2010, МТ-2012 организован по традиционной схеме и включает две пары кормовых движителей, расположенных под некоторым углом к продольной оси, и один вертикальный подруливающий движитель в носовой части аппарата. Вертикальный движитель используется главным образом в режиме погружения с поверх-



Рис. 6. Области устойчивости для АНПА МТ-2010 при V = 1, 2, 3 м/с



Рис. 7. Области устойчивости для АНПА МТ-2012 при V = 1, 2, 3 м/с

ности, а стабилизация глубины осуществляется парой кормовых движителей. В этом случае управляющие воздействия в вертикальной плоскости имеют вид:

$$T_{x} = (T_{1} + T_{2} + T_{3} + T_{4})\cos\delta,$$

$$T_{y} = (T_{1} - T_{3})\sin\delta = T_{y}^{\max}sat\left(\frac{U_{y}}{T_{y}^{\max}}\right),$$

$$M_{z}^{\text{ynp}} = L_{\kappa}T_{y},$$
(9)

где T_i $(i = 1...4), L_{\kappa}$ – упоры и плечо создаваемого суммарного момента, δ – угол наклона осей движителей, T_y^{\max} – максимальная величина вертикальной составляющей суммарного упора, U_v – управляющая функция.

⁹ В большинстве миссий АНПА совершает движение с заданной скоростью, которая может изменяться как по программе, так и при необходимости перейти на другой режим движения или другой тип траектории. Стабилизация скорости осуществляется созданием маршевого упора, соответствующего силе лобового сопротив-



Рис. 8. Примеры переходных процессов при заданном начальном рассогласовании по глубине: а, $6 - K_1 = 6$, $K_3 = -50$, $K_4 = -100$, V = 1 м/с; в, $r - K_1 = 2$, $K_3 = -30$, V = 2 м/с

ления при заданной величине скорости, и корректирующего воздействия по цепи обратной связи. Считается, что это условие выполнено, и алгоритм работы движительного комплекса обеспечивает движение с заданной скоростью.

При моделировании динамических процессов АНПА МТ-2012 были приняты некоторые ограничения на управляющие воздействия в вертикальной плоскости, обеспечивающие компромисс требований πο vстойчивости быстродейи ствию системы стабилизации:

• максимальная составляющая упора $T_{\rm v}$ – 23 H,

• максимальный управляющий момент $M_{\rm z\ ynp}-$ 48 Hм.

На рис. 8, *a*, *б*, *в*, *г* представлены типовые переходные процессы при отработке заданного начального рассогласования по глубине (50 м) для двух значений скорости V = 1; 2 м/с. Параметры управления варьировались, и по их совокупности оценивалось качество динамических процессов.

Анализируя качество переходных процессов при различных сочетаниях параметров управления, можно отметить следующее:

1) оптимизацией динамических свойств АНПА «в малом» обеспечивается также устойчивость «в большом» по отношению к заданным начальным состояниям системы. При этом качество процессов определяется соотношениями гидродинамических характеристик и соответствующих им областей устойчивости в пространстве параметров управления;

2) увеличение быстродействия системы при отработке больших начальных отклонений приводит к некоторому ухудшению динамики установившегося движения. Компромисс достигается путем адаптивной настройки параметров управления или введением дополнительного демпфирующего сигнала по угловой скорости (рис. 8. a, δ);

3) изменение скорости движения в диапазоне V = 1-3 м/c не оказывает существенного влияния на динамику аппарата. При этом начальный участок переходного процесса с большей составляющей вертикальной скорости происходит при меньших значениях угла атаки, что, естественно, приводит к некоторому увеличению быстродействия системы;

4) силовые характеристики движительного комплекса, оптимизация которых зависит от действующих сил вязкого сопротивления, обеспечивают компромисс динамических требований по устойчивости движения и быстродействию при отработке начальных рассогласований с помощью адаптивно настраиваемой системы управления.

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

5. 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.

