

УДК 551.46.077:629.584

О ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА

Л.В. Киселев, А.В. БагницкийФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Гидродинамические свойства автономного подводного робота относятся к числу основных факторов, определяющих качество управления при выполнении пространственных движений. Для идентификации этих свойств наряду с теоретическими моделями динамики используются экспериментальные данные, основанные на обработке результатов траекторных измерений при выполнении реальных работ в море. Постановка задачи приводит к анализу установившихся и переходных режимов движения и оценке гидродинамических характеристик подводного робота на основе корректной математической модели движения и достоверных данных о наблюдаемом движении. Вектор состояния подводного робота содержит набор навигационных данных, данных об угловой ориентации корпуса и силовых воздействиях управляющих органов. Разработанная программная процедура идентификации позволяет оценивать динамические свойства системы и проводить сравнительный анализ с результатами компьютерного моделирования в виртуальной среде.

ВВЕДЕНИЕ

При создании экспериментальных и опытных образцов автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) предъявляются высокие требования к динамическим свойствам системы управления движением при осуществлении различных программных движений. Вопросы динамики и управления движением АНПА достаточно многообразны и постоянно находятся в поле внимания, поскольку не только усложняются сами задачи управления, но и остаются актуальными методы решения этих задач с использованием новых компьютерных технологий [1–3]. Одним из элементов имитационной модели движения, используемой при исследовании динамических свойств системы управления движением, является модель идентификации гидродинамических характеристик АНПА. Поста-

новка подобных задач относится к числу обратных задач гидродинамики, которые требуют для корректного решения достаточно точного описания используемой математической модели и полного объема данных наблюдаемого движения. При этом траекторные данные, как и модель движения, содержат методические и инструментальные ошибки. Обычно для решения задачи идентификации параметров систем управления и наблюдения используются методы оценивания, основанные на обработке результатов траекторных измерений. Применительно к адаптивным системам исследования океана данные вопросы были исследованы в работе [4]. При этом предполагалось, что для известной математической модели движения, содержащей методические ошибки, имеется необходимый набор траекторных данных, содержащих инструментальные ошибки измерений. Использо-

ванные в данной работе алгоритмы идентификации параметров модели основаны на векторно-матричной квадратичной оптимизации, что приводит к решению системы алгебраических уравнений относительно искомых величин. Другой аспект проблемы связан с оценкой влияния внешних помех на точность идентификации характеристик объектов, движущихся в возмущенной среде. Пример такого подхода приведен в работе [5], в которой рассматривается модель движения надводного судна в условиях нестационарных возмущений. Теоретическое решение большинства подобных задач оказывается во многих случаях лишь некоторым идеализированным приближением к реальным характеристикам движущегося объекта. К особенностям задачи идентификации ги-

¹ 690091, Владивосток, Суханова ул., 5а.
Тел/факс: (423) 243-24-16. E-mail: kiselev@marine.febras.ru

гидродинамических характеристик АНПА следует отнести:

- возможность использования имитационной модели движения АНПА, позволяющей производить необходимые оценки на основе расчетно-теоретических методов и вычислительных средств «виртуальной гидродинамики»;

- отсутствие или незначительное влияние внешних возмущений при высокоточном управлении движением АНПА в процессе выполнения рабочих миссий на заданной рабочей глубине погружения;

- возможность измерения параметров вектора состояния с достаточной полнотой и точностью в установившихся и переходных режимах выполнения рабочей миссии.

Исходя из этого в настоящей работе используется подход, в котором оценивание гидродинамических характеристик подводного робота производится на основе данных траекторных измерений параметров состояния АНПА в реальном движении по заданной миссии и сравнением полученных оценок с результатами «виртуальной продувки». Далее рассматриваются вопросы точности идентификации применительно к АНПА «МТ-2012», созданном в ИПМТ ДВО РАН в последние годы (рис. 1). Сравнительному анализу динамических свойств АНПА были посвящены исследования работ [6, 7]. В процессе испытаний и опытной эксплуатации АНПА были получены



Рис. 1. АНПА «МТ-2012»

Таблица 1. Характеристики АНПА «МТ-2012»

Параметр	Значение
Размеры, м	4,35×0,5
Объем, м ³	0,55
Масса в воздухе, кг	550
Массы m_x, m_y, m_z с учетом присоединенной жидкости, кг	558, 720
Моменты инерции J_{yy}, J_{zz} с учетом присоединенной жидкости, Нм·с ²	1360
Коэффициент момента остойчивости, Нм	34

экспериментальные данные, которые и были использованы для идентификации гидродинамических характеристик, полученных ранее расчетно-теоретическим путем. Конструктивные характеристики АНПА, связанные с его динамическими свойствами, приведены в табл. 1.

1. Модели и алгоритмы

Как принято в работах [1–3], вектор состояния в пространственном движении АНПА характеризуется: скоростью поступательного движения (относительно потока) v , координатами (X, Y, Z) относительно неподвижной системы отсчета, вектором углового состояния $x=(\psi, \dot{\psi}, \alpha, \varphi, \dot{\varphi}, \beta)$, где φ – курс, ψ – дифферент, а углы атаки α и дрейфа β характеризуют взаимную ориентацию поточной (скоростной) и связанной с аппаратом систем координат.

Согласно [1, 6, 7] примем математическую модель движения АНПА в виде двух подсистем уравнений, описывающих движение в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

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

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

В уравнениях (1, 2) приняты обозначения названных выше работ, в частности: m_x, m_y, I_{zz} – массы и момент инерции корпуса с учетом присоединенной жидкости, $T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, M_{y \text{ ynp}}, M_{z \text{ ynp}}$ – 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 моменты, выраженные через их производные по углам атаки, дрейфа и соответствующим угловым скоростям, M_0 – момент остойчивости, отнесенный к углу дифферента, 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 погружения аппарата, X, Y, Z – координаты в неподвижной системе отсчета.

В том случае, когда корпус аппарата обладает симметрией относительно продольной оси, соответствующие характеристики по осям вращения одинаковы. В настоящее время для анализа гидродинамики АНПА широко

используется метод виртуальной продувки на основе пакетов прикладных программ Solid Works, COSMOS FloWorks, адаптированных к условиям АНПА. Для сравнения и корректировки используются данные прямых измерений и результаты идентификации параметров теоретической модели по реальным данным, полученным в испытаниях аппарата.

При малых значениях угловых величин, допускающих линеаризацию, уравнения (1), (2) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= -\hat{R}_x v^2 + b_v U_v(v, U_x, U_y), \\ \dot{x}_i &= \sum_j a_{ij} x_j + b_i U_x, \quad i, j = 1 \dots 4, \\ \dot{X} &= v \cos(x_2/v), \quad \dot{Y} = v \sin(x_2/v), \quad (3) \\ \dot{y}_i &= \sum_j c_{ij} y_j + d_i U_y, \quad i, j = 1 \dots 3, \\ \dot{X} &= v \cos(y_2 - y_1), \quad \dot{Z} = v \sin(y_2 - y_1). \quad (4) \end{aligned}$$

В формулах (3), (4) приняты обозначения: x_i – компоненты вектора состояния, x_1 – отклонение по глубине, x_2 – его производная, x_3, x_4 – дифферент и его производная; y_1 – угол дрейфа, y_2 – курс, y_3 – угловая скорость по курсу; $a_{ij}, c_{ij}, \hat{R}_x(v)$ – величины, зависящие от сил гидродинамического сопротивления и инерционных характеристик аппарата, включая присоединенные массы жидкости, b_v, b_p, d_j – параметры, зависящие от максимальных значений управляющих воздействий, U_x, U_y, U_v – управляющие функции, удовлетворяющие ограничениям $|U_x| \leq 1, |U_y| \leq 1, |U_v| \leq 1$:

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{13} = a_{14} = 0, \quad a_{12} = 1, \quad a_{21} = 0, \\ a_{22} &= -\hat{R}_y^{\alpha} v / m_y, \quad a_{23} = -\hat{R}_y^{\alpha} v^2 / m_y, \\ a_{24} &= -\hat{R}_y^{\omega} v / m_y, \\ a_{31} &= a_{32} = a_{33} = 0, \quad a_{34} = 1, \quad a_{41} = 0, \\ a_{42} &= \hat{M}_z^{\alpha} v / I_{zz}, \\ a_{43} &= (M_0 + \hat{M}_z^{\alpha} v^2) / I_{zz}, \\ a_{44} &= \hat{M}_z^{\omega} v / I_{zz}, \end{aligned}$$

$$c_{11} = -R_z^{\beta} / m_z v, \quad c_{12} = c_{32} = 0, \quad c_{13} = 1 - R_z^{\omega} / m_z v, \\ c_{31} = M_y^{\beta} / I_{yy}, \quad c_{33} = M_y^{\omega} / I_{yy}. \quad (5)$$

$$b_2 = T_z^{\max} / m_z v, \quad b_4 = M_z^{\max} / I_{zz}, \\ d_1 = T_z^{\max} / I_{yy}, \quad d_3 = M_y^{\max} / I_{yy}.$$

Уравнения относительно величин $\mathbf{x} = \{x_i\}$, $\mathbf{y} = \{y_i\}$ можно записать в стандартном векторно-матричном виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}U_x, \quad \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\mathbf{y} + \mathbf{d}U_y, \quad (6)$$

где матрицы \mathbf{A}, \mathbf{C} – имеют соответствующие размерности, \mathbf{b}, \mathbf{d} – вектор-столбцы управляющих воздействий:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ 0 & 0 & 1 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \\ d_3 \end{bmatrix}.$$

При линейном управлении $U_x = \mathbf{k}_x \mathbf{x}$, $U_y = \mathbf{k}_y \mathbf{y}$, где $\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y$ – соответствующие вектор-строки, уравнения (6) принимают вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{k}_x)\mathbf{x}, \quad \dot{\mathbf{y}} = (\mathbf{C} + \mathbf{d}\mathbf{k}_y)\mathbf{y}.$$

Тогда задача идентификации сводится к определению величины R_x из уравнений (3) и параметров матриц \mathbf{A}, \mathbf{C} при известных $\mathbf{b}, \mathbf{d}, \mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y$ и наблюдениях компонент вектора состояния.

При решении аналогичной задачи в работе [5] предполагается, что на временном интервале идентификации T имеется серия из $s > n$ измерений вектора состояния. Исходя из этого для оценок $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{C}}$ можно определить уравнения невязок:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_k - (\hat{\mathbf{A}} + \mathbf{b}\mathbf{k}_x)\mathbf{x}_k &= \xi_{xk}, \\ \dot{\mathbf{y}}_k - (\hat{\mathbf{C}} + \mathbf{d}\mathbf{k}_y)\mathbf{y}_k &= \xi_{yk}, \end{aligned}$$

которые должны удовлетворять квадратичному критерию:

$$F_x = \sum_k |\xi_{xk}|^2 = \sum_k \xi_{xk}^T \xi_{xk} \rightarrow \min,$$

$$F_y = \sum_k |\xi_{yk}|^2 = \sum_k \xi_{yk}^T \xi_{yk} \rightarrow \min.$$

Минимизация F_x, F_y приводит к системе алгебраических уравнений относительно матриц $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{C}}$:

$$\begin{aligned} \sum_k [\dot{\mathbf{x}}_k - (\hat{\mathbf{A}} + \mathbf{b}\mathbf{k}_x)\mathbf{x}_k] \mathbf{x}_k^T &= 0, \\ \sum_k [\dot{\mathbf{y}}_k - (\hat{\mathbf{C}} + \mathbf{d}\mathbf{k}_y)\mathbf{y}_k] \mathbf{y}_k^T &= 0. \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Если ввести обозначения} \\ \sum_k \dot{\mathbf{x}}_k \mathbf{x}_k^T &= \mathbf{P}_{xk}, \quad \sum_k \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T = \mathbf{Q}_{xk}, \\ \sum_k \dot{\mathbf{y}}_k \mathbf{y}_k^T &= \mathbf{P}_{yk}, \quad \sum_k \mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T = \mathbf{Q}_{yk}, \end{aligned}$$

то выражения (7) можно записать в виде:

$$(\hat{\mathbf{A}} + \mathbf{b}\mathbf{k}_x)\mathbf{P}_{xk} = \mathbf{Q}_{xk}, \quad (\hat{\mathbf{C}} + \mathbf{d}\mathbf{k}_y)\mathbf{P}_{yk} = \mathbf{Q}_{yk}. \quad (8)$$

Представленный способ идентификации хотя и дает теоретическое решение в обобщенном виде, обладает существенными недостатками.

Во-первых, решение задачи векторно-матричной оптимизации на основе уравнений (7) или (8) приводит к системе из n^2 обыкновенных алгебраических уравнений, разрешимой только при линейной независимости этих уравнений, т. е. если ранг соответствующих матриц не меньше, чем n . Таким свойством обладают, как правило, только простейшие системы. Во-вторых, очевидно, что искомое решение существенно зависит от свойств матриц $\mathbf{P}_{xk}, \mathbf{P}_{yk}$ полноты и достоверности измеряемых величин. Особое значение имеют степень обусловленности (невырожденности) матриц $\mathbf{P}_{xk}, \mathbf{P}_{yk}$ и линейная независимость измеряемых величин. Обычно измерения содержат данные, полученные в режиме установившихся (статических) движений, вследствие чего измеряемые параметры являются постоянными величинами. В совокупности это приводит к тому, что

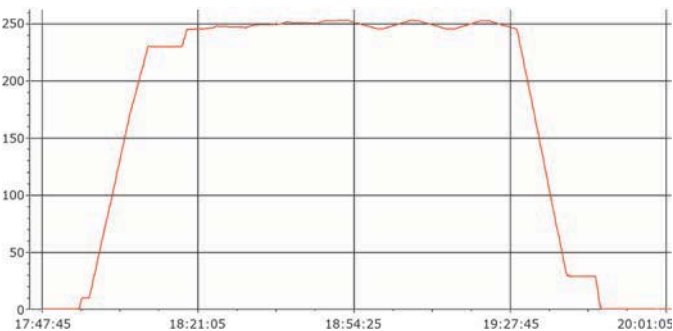
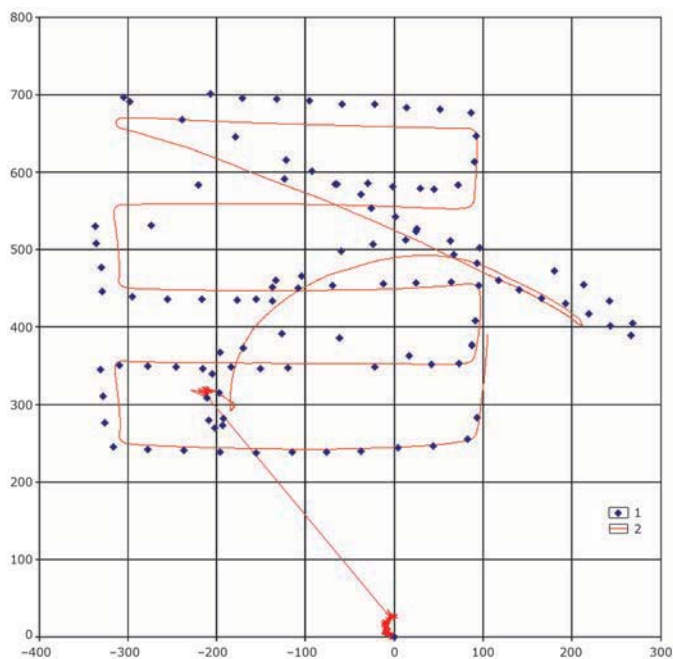


Рис. 3. Изменение глубины в процессе выполнения рабочей миссии

Рис. 2. Траектория АНПА по данным навигационных систем: 1 – ГАНС, 2 – КНС

виях мелкого моря [8]. Характеристики движительного комплекса (управляющие упоры и моменты) определялись на основе измерений параметров энергопотребления с учетом результатов нагрузочных испытаний движителей.

Пример траектории движения, зарегистрированный навигационными средствами АНПА, и запись изменения глубины (высоты от дна) в одном из наиболее длительных и информативных пусков представлены в графическом виде на рис. 2, 3.

В табл. 2 в цифровом виде представлена совокупность данных, соответствующих однотипным режимам движения в ряде рабочих миссий, отличающихся в основном характером курсовой программы. Для анализа экспериментальных данных и проведения вычислений вся программная миссия разбита на временные участки, соответствующие различным установившимся режимам движения в вертикальной плоскости. Эти режимы включают зависание на заданной глубине (режим 1), стабилизацию движения на различных горизонтах (режимы 3, 6) и переходы с одной глубины на другую (режим 2 – погружение, 4, 5 – всплытие). Для представления информации о характере пространственного движения в табл. 2 приведены данные об изменении курса при движении в горизонтальной плоскости для миссии, параметры которой принимались в расчет. Отметим, что наблюдающаяся в процессе про-

однозначное решение имеет недопустимо большую погрешность либо его вообще не существует. Вместе с тем именно установившиеся движения позволяют получить наиболее достоверные измерения.

В этих условиях упрощенное решение задачи сводится к определению параметров модели по минимальному объему измерений (в предельном случае по однократным измерениям) и их сравнению с результатами компьютерного моделирования.

2. Экспериментальные данные и их программная обработка

Весь объем экспериментальных данных представляет собой совокупность оценок параметров состояния в установившихся режимах движения по глубине и при маневрировании в горизонтальной плоскости: поступательная скорость \hat{v} , дифферент $\hat{\psi}$, курс $\hat{\phi}$, угловые скорости $\hat{\dot{\psi}}$, $\hat{\dot{\phi}}$, максимальные и текущие значения управляющих упоров и моментов \hat{T}_x , \hat{T}_y , $\hat{M}_y^{упр}$, $\hat{M}_z^{упр}$. Здесь знаком « $\hat{}$ », который далее будет опущен, обо-

значены оценки параметров, полученные путем прямых измерений при выполнении программы движения. Экспериментальные данные, использованные для вычислений, были получены при осуществлении рабочих миссий АНПА «МТ-2012» в процессе его опытной эксплуатации. Миссии в указанных рабочих пусках АНПА длительностью несколько часов включали в себя программные движения на различных горизонтах и вблизи дна, целенаправленные движения по координатам заданных точек, покрытие определенной области сетью галсов. Для определения местоположения АНПА (координатной привязки) использовалась комплексированная навигационная система (КНС), которая включает гидроакустическую навигационную систему с длинной базой (ГАНС-ДБ) и бортовой навигационно-измерительный комплекс, в состав которого входят навигационно-пилотажные датчики, акустический доплеровский лаг, система счисления пути. Характеристики всех названных устройств обеспечивают высокоточную навигацию АНПА в усло-

странственного движения динамическая взаимосвязь каналов проявляется лишь в незначительных вариациях параметров установившихся движений, главным образом скорости и углов атаки и дрейфа. Это позволяет рассматривать динамику каналов независимо с учетом коррекции в тех случаях, когда их взаимосвязь представляется более существенной. Сравнение данных, полученных для однотипных режимов движения, позволяет получить усредненные оценки для гидродинамических характеристик аппарата. Оцениваемые значения гидродинамических воздействий R_x , R_y , M_z в табл. 2 получены решением уравнений статики, соответствующих уравнениям (1) или (3). Для автоматизации вычислений была разработана программа, позволяющая представлять данные в формате Microsoft Office Excel, выполнять графические построения и аппроксимацию дискретных данных аналитическими выражениями.

Режим зависания на заданной глубине (режим 1) использован для уточнения величины положительной плавучести, определенной предварительно в процессе балластирования аппарата перед пуском. В результате было принято $P = 14,21$ Н.

Для оценки величин гидродинамических коэффициентов C_x , $C_y(\alpha)$, $m_z(\alpha)$ использовались зависимости сил сопротивления

$$R_x = \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} C_x,$$

$$R_y = \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} C_y(\alpha),$$

$$M_z = \frac{\rho v^2}{2} V m_z(\alpha),$$

отнесенных к величине v^2 . При этом из всей совокупности наблюдаемых данных в расчет принимались дискретные значения, прошедшие процедуру селекции с принятым порогом отклонений от средних значений в диапазоне малых углов атаки. На рис. 4, 5 при-

ведены графические зависимости величин $\hat{R}_y = R_y/v^2$, $\hat{M}_z = M_z/v^2$ от угла атаки с учетом данных, прошедших предварительную обработку. Там же для наглядности представлены результаты обработки экспериментальных данных движения в горизонтальной плоскости, о чем будет речь ниже.

Путем усреднения дискретных данных получены аппроксимации искомых величин аналитическими зависимостями:

$$\hat{R}_y = 5,76\alpha, \quad \hat{M}_z = 1,85\alpha^3 + 19,39\alpha^2 + 31,52\alpha, \quad (9)$$

где угол атаки измеряется в градусах.

Из полученных данных следует, что подъемная сила при малых углах атаки является величиной знакопостоянной и линейно зависящей от угла атаки. Гидродинамический момент является величиной знакопеременной и нелинейной, что соответствует характеру гидродинамической устойчивости (неустойчивости)

Таблица 2. Параметры установившихся режимов движения в вертикальной плоскости

Параметр	Установившиеся режимы движения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Процесс								
Время начала	17:56:52	17:58:08	18:07:00	18:11:34	18:18:18	19:29:27	19:38:16	19:41:16
Время окончания	17:57:40	18:06:30	18:10:19	18:17:37	18:18:35	19:37:44	19:39:43	19:42:43
Глубина Н, м	9,87	14 - 170	179 - 227	230,01	238 - 243	240 - 72	62 - 32	28,95
Скорость изменения глубины, м/с	0,00	0,31	0,26	0,00	0,26	-0,34	-0,34	0,00
Абсолютная скорость по ДЛ, м/с	0,00	1,22	1,02	1,01	1,01	1,17	1,17	1,01
Дифферент ψ , град.	0,50	-17,00	-17,42	-2,06	-17,50	15,67	15,70	-2,18
Угол подъёма траектории ϑ , град.	0,00	-14,72	-14,83	0,00	-14,92	16,85	16,85	0,00
Угол атаки α , град.	0,50	-2,28	-2,59	-2,06	-2,58	-1,18	-1,15	-2,18
Курс, град	0,42	5 - 148	296,42	296 - 286	93,02	-15 - 144	204,97	206,24
Упор T_x , Н	-3,00	48,92	35,35	35,34	35,34	34,69	34,66	34,75
Упор T_y , Н	-14,21	3,75	3,13	-1,26	3,00	-5,59	-5,63	-1,44
Момент $M_{z_{упр}}$, Нм	0,97	-5,81	-4,86	1,95	-4,66	8,67	8,73	2,24
Подъемная сила R_y , Н	0,03	-15,54	-15,26	-11,68	-15,14	-7,29	-7,27	-11,45
Момент M_z , Нм	-1,27	15,75	15,04	-0,73	14,88	-17,85	-17,93	-0,95
Соппротивление R_x , Н	-2,88	45,42	31,82	35,27	31,78	38,69	38,66	34,67
Коэффициент C_x	-	0,087	0,089	0,100	0,090	0,081	0,081	0,098

Примечание. Режимы: 1 – зависание на заданной глубине, 2 – погружение с изменением курса, 3 – погружение с постоянным курсом, 4 – движение на заданной глубине с изменением курса, 5 – погружение с постоянным курсом, 6 – всплытие с изменением курса, 7 – всплытие с постоянным курсом, 8 – движение на заданной глубине с постоянным курсом.

корпуса аппарата по отношению к углу атаки. Аналогичный вывод следует из результатов компьютерного моделирования гидродинамики АНПА [7]. Отсюда можно получить оценки для коэффициентов гидродинамических сил:

$$C_x = 0,093, C_y^a = 0,99 [pa\delta^{-1}],$$

$$m_z^a = 1,16\alpha^2 + 8,12\alpha + 7,43 [pa\delta^{-1}]. \quad (10)$$

Для решения аналогичной задачи, относящейся к горизонтальному (курсовому) каналу движения в качестве установившихся движений принимаются циркуляции (переходы с одного галса на другой) с постоянной угловой скоростью. Измерению подлежит вектор состояния $y_k = (v_{kz}, \varphi_k, \dot{\varphi}_k, \beta_k, \chi_{kz}, T_{xk}, T_{zk})$. Из решения уравнений статики, соответствующих уравнениям (2) или (4), определяются величины:

$$R_x = \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} C_x,$$

$$R_z = \frac{\rho v^2}{2} V^{2/3} C_z^a \beta + \frac{\rho v}{2} V C_z^a \dot{\varphi},$$

$$m_y = \frac{\rho v^2}{2} V m_y^a(\beta) + \frac{\rho v}{2} V^{4/3} m_y^a \dot{\varphi}$$

и соответствующие им гидродинамические коэффициенты $C_x, C_z^a, C_z^b, m_y^a, m_y^b$.

Параметры циркуляционных движений в горизонтальной плоскости и осредненные результаты измерений (вычислений) представлены в табл. 3.

Аппроксимирующие зависимости имеют вид:

$$\hat{R}_z = 5,96\beta,$$

$$\hat{M}_y = 0,029\beta^3 - 0,37\beta^2 - 11,68\beta.$$

Производя несложные вычисления с использованием данных табл. 3 и рис. 6, 7, получим:

$$C_x = 0,099, C_z^a = 0,99 [pa\delta^{-1}],$$

$$m_y^a = 0,018\beta^2 - 0,17\beta - 2,44 [pa\delta^{-1}].$$

$$C_z^b = 5,67 [pa\delta^{-1}],$$

$$m_y^b = 5,18 [pa\delta^{-1}]. \quad (11)$$

Приведенные зависимости относятся лишь к наблюдаемым значениям углов атаки и дрейфа, хотя они и допускают некоторую экстраполяцию в диапазоне возможных изменений этих углов. При этом необходимо отметить, что в рассматриваемых миссиях угол атаки принимает только отрицательные значения, и наблюдаемый диапазон его изменения невелик, что, вероятно, обусловлено влия-

нием положительной плавучести и момента остойчивости в установившихся режимах движения. Наблюдаемый угол дрейфа принимает значения в более широком диапазоне, что является следствием более широкой вариации параметров установившихся циркуляций в горизонтальной плоскости.

Позиционные гидродинамические характеристики сил сопротивления (рис. 4) достаточно близки для обоих каналов, что, очевидно, обусловлено наличием пространственной симметрии в конструкции корпуса аппарата. При этом характеристики моментов по отношению к углам атаки и дрейфа (рис. 5) отличаются значительно, и это отличие объясняется наличием гидродинамической неустойчивости корпуса аппарата по отношению к углам атаки и его гидродинамической устойчивостью по отношению к углам дрейфа. Этот экспериментальный факт имеет достаточно очевидные теоретические обоснования и также неоднократно подтверждался исследованиями гидродинамики АНПА различных конфигураций [6].

Таблица 3. Параметры курсовой программы и измеряемые (вычисляемые) параметры вектора состояния

Параметр	Установившиеся режимы движения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Процесс								
Время начала	18:06:36	18:17:40	18:38:14	18:47:46	19:00:33	19:08:01	19:15:38	19:23:07
Время окончания	18:06:51	18:17:59	18:38:23	18:47:53	19:00:40	19:08:08	19:15:45	19:23:14
Курс, град.	159 - 285	-73 - 63	90 - 152	177 - 127	260 - 212	280 - 327	255 - 210	280 - 328
Угловая скорость, град./с	6,56	6,70	6,60	-7,28	-6,66	6,54	-6,52	6,59
Скорость, м/с	0,99	1,04	1,02	1,15	1,08	1,00	1,08	0,98
Угол дрейфа, град.	-7,11	-5,10	-6,67	3,32	3,52	-7,29	4,12	-7,78
Упор T_x , Н	43,94	43,58	40,92	41,29	39,97	40,91	41,06	43,28
Упор T_z , Н	-53,5	-53,58	-52,32	53,85	52,23	-51,74	50,1	-50,86
Момент $M_{y,упр}$, Нм	82,92	83,06	81,1	-83,46	-80,96	80,19	-77,65	78,83
Сила R_y , Н	-38,25	-37,29	-38,16	36,83	35,99	-39,15	35,80	-41,79
Момент M_y , Нм	50,63	53,34	53,27	-64,75	-54,63	52,96	-55,09	55,33
Сила R_x , Н	36,98	38,64	34,57	38,10	36,69	34,01	37,35	36,00

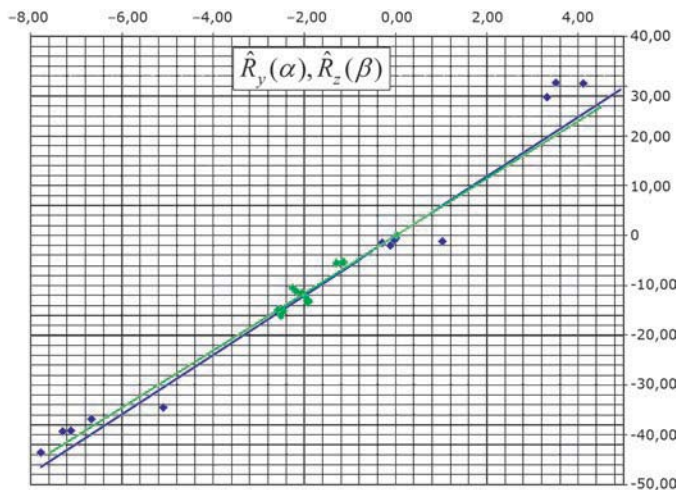


Рис. 4. Дискретные значения величин $\hat{R}_y(\alpha)$ (зеленый цвет), $\hat{R}_z(\beta)$ (синий цвет) и их аппроксимация линейными зависимостями в диапазоне малых углов атаки и дрейфа

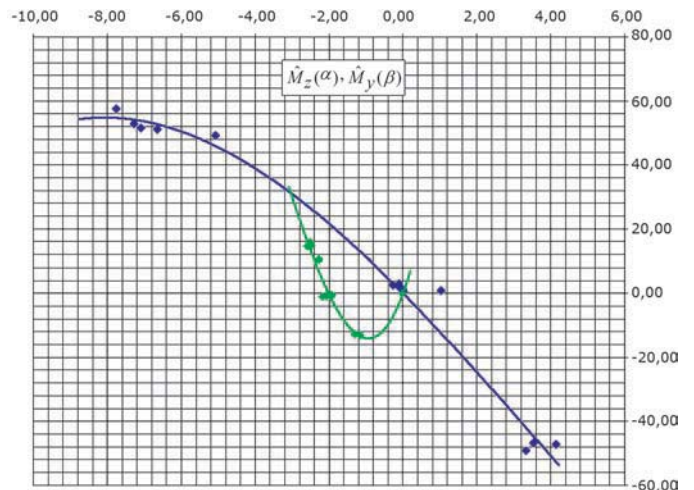


Рис. 5. Дискретные значения величин $\hat{M}_z(\alpha)$ (зеленый цвет), $\hat{M}_y(\beta)$ (синий цвет) и их аппроксимация нелинейными зависимостями в диапазоне малых углов атаки и дрейфа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Идентификация параметров гидродинамической модели движения АНПА на основе данных траекторных измерений в режимах установившегося пространственного движения дает результаты, хорошо согласующиеся с расчетно-теоретическими результатами и оценками, полученными с использованием прикладных программ «виртуальной гидродинамики».

2. Экспериментальные данные, полученные при выполнении рабочих миссий АНПА «МТ-2012», позволяют оценить гидродинамические характеристики аппарата с точностью и достоверностью, достаточными для использова-

ния их в динамической модели АНПА при исследовании синтезируемых алгоритмов управления в различных режимах пространственного движения. Эти данные могут быть экстраполированы на решение других задач, связанных с оценкой динамических свойств АНПА. Вместе с тем для высокоточной идентификации параметров динамической модели необходима постановка специального эксперимента на основе методики, ориентированной на максимально полное и надежное извлечение всей необходимой для этой цели информации о движении.

3. Особенности гидродинамики АНПА «МТ-2012», вытекающие из полученных эксперимен-

тальных данных, обусловлены характером действующих сил сопротивления, зависящих от массогабаритных характеристик корпуса и наличия в нем некоторой асимметрии, устройства движительного комплекса и хвостовых стабилизаторов, частично компенсирующих собственную гидродинамическую неустойчивость корпуса аппарата. В целом устойчивость движения и достаточно высокое качество переходных процессов обеспечиваются с помощью параметрически настраиваемых регуляторов системы управления.

Авторы выражают признательность Ю.В. Ваулину за предоставленные материалы испытаний АНПА «МТ-2012».

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Мельман С.В., Бобков В.А., Инзарцев А.В. и др. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Наст. журн. С. 23–32.
4. Поньрко С.А., Попов О.С., Ястребов В.С. Адаптивные системы для исследования океана. СПб: Судостроение, 1993. 223 с.
5. Пелевин А.Е. Идентификация параметров модели объекта в условиях внешних возмущений // Гидроскопия и навигация. 2015. №1. С. 111–120.
6. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. №1(13). С. 24–35.
7. Киселев Л.В., Медведев А.В. О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2013. №1(15). С. 17–22.
8. Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В. Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Наст. журн. С. 4–15.