

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ БАЛЛАСТНОЙ СИСТЕМОЙ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Н.Н. Тарасов, М.Г. Тахтамышев

Приведен способ формирования алгоритма принятия решений при управлении подводными аппаратами с помощью балластных цистерн. Предложенный подход основан на решении задач фильтрации и восстановления неизмеряемых координат и идентификации параметров объекта.

Ключевые слова: подводный аппарат, управление, фильтрация, система поддержки принятия решений.

ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране и за рубежом проектируются и создаются как обитаемые, так и необитаемые подводные аппараты (ПА) различного назначения и с разной глубиной погружения. Среди отечественных глубоководных обитаемых ПА отметим аппараты «Русь» и «Консул» [1], предназначенные для нужд военно-морского флота и геолого-геофизических исследований и рассчитанные на глубины погружения до 6000 м. Из аппаратов, построенных за рубежом, можно отметить глубоководные обитаемые ПА «Мир» и «Пайсис» с глубиной погружения до 6000 и 2000 м соответственно, предназначенные для проведения научно-исследовательских работ [2, 3].

В конструкции каждого из перечисленных ПА предусмотрены уравнивательные и дифференциальные цистерны, служащие для управления аппаратом: когда аппарат погружается, балластные цистерны заполняются водой, а при подъеме на поверхность вода откачивается с помощью насосов; для управления аппаратом по дифференциалу вода перераспределяется между дифференциальными цистернами также с помощью насосов.

В настоящей статье приводятся результаты разработки алгоритмов системы информационной поддержки оператора в процессе управления подводным аппаратом при переходах по глубине. Управление осуществляется следующими действиями: включение насосов на принятие воды в цистерну; включение насосов на откачивание воды; отключение насосов. Рассматривается так называемая задача управления «без хода», когда отключена двигательная ходовая установка, и переход аппарата по глубине осуществляется только путем

управления балластом уравнивательных цистерн. Стабилизация аппарата по дифференциалу происходит в автоматическом режиме с помощью алгоритмов, приведенных в статье [4].

Основная задача системы информационной поддержки оператора состоит в выработке рекомендаций по выбору моментов переключений T_i в зависимости от текущего состояния и координаты конечной точки перехода.

Современные средства вычислительной техники при разработке бортовых комплексов позволяют существенно расширить функциональные возможности систем управления этими аппаратами. Прежде всего, это относится к применению новых информационных технологий на базе теории экспертных систем и систем поддержки принятия решений.

Внедрение алгоритмов поддержки принятия решений позволяет существенно повысить эффективность и обеспечить безопасность процессов управления благодаря автоматизации процесса подготовки решений на основе использования экспертной информации и оптимизации информационного взаимодействия оператора и управляющей ЭВМ путем реализации информационных моделей, обеспечивающих оптимальные условия восприятия и обработки информации оператором.

Далее рассматривается подход к построению системы информационной поддержки оператора в режимах ручного управления, обеспечивающий реализацию такой системы на бортовых вычислительных комплексах.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА

В качестве объекта управления рассматривается подводный аппарат, движение которого в общем



виде описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x}_0 = f(x_0, a, u),$$

где $x_0 = (V_{x0}, V_{y0}, \omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}, \theta_0, \psi_0, \eta_0)^T$ — вектор координат движения объекта управления, V_{x0} и V_{y0} — компоненты линейной скорости, ω_{x0} , ω_{y0} и ω_{z0} — компоненты угловой скорости; $u = (u_1, u_2, u_3)^T$ — вектор управляющих воздействий по глубине η , дифференту ψ и крену θ ; $a = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)^T$ — вектор гидродинамических коэффициентов, определяемых с различной степенью достоверности. Гидродинамические коэффициенты определяются как параметрами внешней среды, так и геометрическими характеристиками объекта и описываются достаточно сложными выражениями. Учитывая высокую размерность полной модели и недостаточную точность определения некоторых гидродинамических коэффициентов, на практике обычно пользуются упрощенными моделями для исследования отдельных режимов движения. В частности, для описания движения подводного аппарата в вертикальной плоскости в режиме «без хода» и, одновременно, идентификации гидродинамических коэффициентов a_1 и b_1 может быть принята такая модель [5]:

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= a_1 V_y |V_y| + b_1 u_c + \xi_{V_y}, \\ \dot{\eta} &= V_y + \xi_{\eta}, \\ \dot{a}_1 &= \xi_{a_1}, \\ \dot{b}_1 &= \xi_{b_1}, \\ \dot{u}_c &= q, \\ \dot{\omega}_z &= a_{11} V_y + a_{12} \omega_z + a_{13} \psi + b_{11} u_2 + \xi_{\omega_z}, \\ \dot{\psi} &= \omega_z + \xi_{\psi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_y — вертикальная составляющая скорости; η — глубина погружения; ω_z — угловая скорость; ψ — дифферент; a_1 и b_1 — неизвестные медленно меняющиеся гидродинамические коэффициенты; ξ_{V_y} , ξ_{ω_z} , ξ_{η} , ξ_{ψ} , ξ_{a_1} и ξ_{b_1} — случайные помехи с известными статистическими параметрами, характеризующие неточность модели, причем $M[\xi(t)] = 0$, $M[\xi(t)\xi^T(\tau)] = Q(t)\delta(t-\tau)$, где Q — ковариационная матрица [6]; $q = f(\sigma)$ — нелинейная функция, характеризующая работу управляющих органов, вид которой представлен на рис. 1; σ — управляющее воздействие.

Из всей совокупности координат и параметров движения непосредственному измерению, как правило, доступны лишь глубина погружения η и диф-

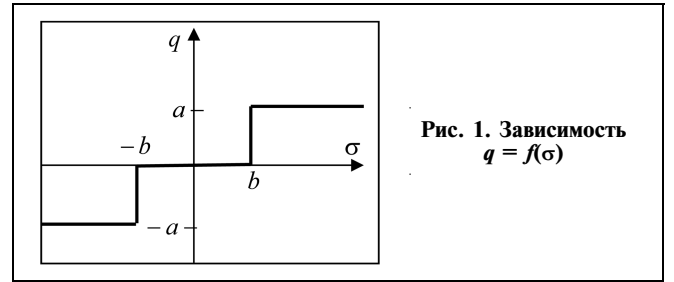


Рис. 1. Зависимость $q = f(\sigma)$

ферент ψ . С достаточной степенью точности математическая модель измерения представляется в виде $y_\eta = \eta_0 + \zeta_\eta$, $y_\psi = \psi_0 + \zeta_\psi$, где ζ_η и ζ_ψ — случайные помехи измерения с известными статистическими характеристиками.

2. АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ

Для восстановления неизмеряемых координат используется структура фильтра Калмана (2), позволяющая не только восстанавливать фазовые координаты, но и идентифицировать неизвестные параметры объекта — гидродинамические коэффициенты a_1 и b_1 , которые, как отмечалось, рассматриваются как медленно меняющиеся. Наибольший интерес представляет определение гидродинамической характеристики a_1 , которая для реального объекта может существенно отличаться от данных модельных испытаний на этапе технического проектирования. Задача определения a_1 решается с помощью алгоритмов идентификации, основанных на теории оценивания процессов [6].

Алгоритм фильтрации, учитывающий расширенную модель движения (1), имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_y &= \hat{a}_1 \hat{V}_y |\hat{V}_y| + K_1(y_\eta - \hat{\eta}) + \hat{b}_1 \hat{u}_c, \\ \dot{\hat{\eta}} &= \hat{V}_y + K_2(y_\eta - \hat{\eta}), \\ \dot{\hat{a}}_1 &= K_3(y_\eta - \hat{\eta}), \\ \dot{\hat{b}}_1 &= K_4(y_\eta - \hat{\eta}), \\ \dot{\hat{u}}_c &= q_1 + K_5(y_\eta - \hat{\eta}), \\ \dot{\hat{\omega}}_z &= a_{11} \hat{V}_y + a_{12} \hat{\omega}_z + a_{13} \hat{\psi} + b_{11} u_{11} + K_6(y_\psi - \hat{\psi}), \\ \dot{\hat{\psi}} &= \hat{\omega}_z + K_7(y_\psi - \hat{\psi}), \end{aligned} \quad (2)$$

где вектор коэффициентов усиления $K = (K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7)^T$ определяется из решения матричного уравнения Риккати [7]:

$$\dot{P} = \frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial \hat{x}} P + P \frac{\partial f^T(\hat{x}, u)}{\partial \hat{x}} - PC^T R^{-1} CP + Q,$$

причем $K = PC^T R^{-1}$, где $f(\hat{x}, u) = \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \hat{V}_y |\hat{V}_y| + \hat{b}_1 u \\ \hat{V}_y \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$,

$$C = (0, 1, 0, 0, 0)^T, Q = \begin{pmatrix} q_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{a_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{b_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_u \end{pmatrix}.$$

Результаты решения этого уравнения подробно представлены в работе [5], в ней же приведены упрощенные алгоритмы определения коэффициентов усиления K .

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Режим ручного управления — один из основных режимов движения при переходах ПА по глубине. Для выработки рекомендаций по выбору моментов переключений управляющих воздействий балластных цистерн формируется база данных, включающая в себя пары чисел $(T_{11}, \hat{\eta}_1)$, $(T_{12}, \hat{\eta}_2)$, $(T_{13}, \hat{\eta}_3)$, ..., $(T_{1n}, \hat{\eta}_n)$, где T_{1i} — время от начала процесса до момента первого переключения органа управления при переходе объекта по глубине $\hat{\eta}_i$. Процесс формирования базы данных может быть разбит на два этапа. На первом этапе приведенные пары чисел находятся в результате моделирования процессов управления в лабораторных условиях. В дальнейшем, в процессе эксплуатации, значения T_{1i} могут корректироваться экспертом с учетом реальных характеристик объекта управления.

На основании полученных данных определяется функциональная зависимость времени первого переключения от значения перехода $T_{1i} = f(\hat{\eta})$. Получение такой зависимости позволяет предсказывать время первого переключения для любого заданного значения перехода $\eta_{зад}$.

На основании исследования результатов, полученных при формировании базы данных, была определена структура аппроксимирующей функции:

$$T_1 = k_1 |\hat{\eta}| + k_2 \sqrt{|\hat{\eta}|} + k_3, \quad (3)$$

где неизвестные коэффициенты k_i , $i = 1, 2, 3$, могут быть определены с помощью метода наименьших квадратов.

Для этого представим уравнение (3) в виде матричного уравнения

$$\bar{T}_1 = Ax,$$

где $T_1 = (T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1n})^T$ — вектор-столбец, определяющий моменты первого переключения,

$$A = \begin{pmatrix} \hat{\eta}_1 & \hat{\eta}_2 & \dots & \hat{\eta}_n \\ \sqrt{\hat{\eta}_1} & \sqrt{\hat{\eta}_2} & \dots & \sqrt{\hat{\eta}_n} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}^T$$
 — матрица переходов и

$x = (k_1, k_2, k_3)^T$ — вектор-столбец неизвестных коэффициентов. Решая систему уравнений $\bar{T}_1 = Ax$, получим, что вектор x определяется в виде

$$x = (A^T A)^{-1} A^T \bar{T}_1.$$

Как показывает анализ системы дифференциальных уравнений (1), момент второго переключения T_2 определяется временем $T_2 = T_1 + \tau$, где τ — момент времени, при котором модуль скорости объекта управления $|\hat{V}_y|$ достигает максимального значения. Этот момент фиксируется в процессе перехода, и, таким образом, определяется момент T_2 .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее приводятся результаты моделирования процессов управления для одного из конкретных объектов с помощью описанного подхода. Модель объекта была представлена полной системой нелинейных дифференциальных уравнений, в то время как для получения оценок координат движения и параметров модели использовалась упрощенная модель (1). На начальном этапе, в результате моделирования процессов управления, была составлена база данных, включающая в себя пары чисел $(T_{1i}, \hat{\eta}_i)$ для переходов в диапазоне от 1 до 100 м.

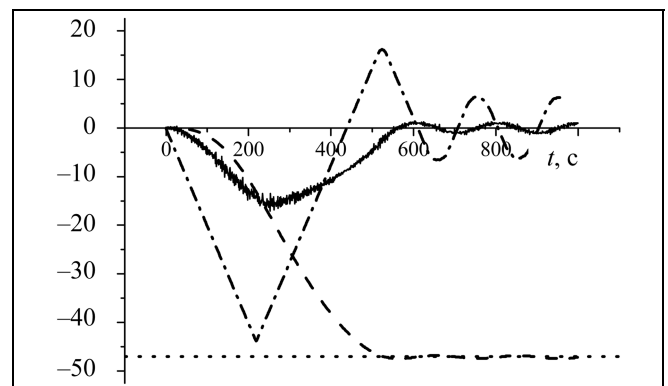


Рис. 2. Оценки $\hat{\eta}$, \hat{V}_y и u при рекомендуемом моменте $T_1 = 219,6$ с: — — $100V_y$, м/с; - - - η , м; - · - · - $5u$, Т; · · · · $\eta_{зад}$, м



Далее, с помощью метода наименьших квадратов были определены коэффициенты аппроксимирующей функции (3):

$$T_1 = 1,560|\hat{\eta}| + 17,630\sqrt{|\hat{\eta}|} + 22,671.$$

Результаты моделирования процессов управления при переходе объекта по глубине на 47 м приведены на рис. 2–4. Процесс перехода, приведенный на рис. 2, соответствует случаю, когда оператор точно выполняет рекомендации по выбору моментов переключений T_1 и T_2 ; качество процесса управления в этом случае вполне удовлетворительное, и время переходного процесса составляет $T_{\text{пер}} \cong 550$ с.

По окончании процесса перехода оператор стабилизирует объект на заданной глубине в режиме ручного управления.

Рис. 3 и 4 показывают, насколько ухудшается качество процессов перехода в случае, когда оператор не выполняет выдаваемые ему рекомендации и моменты первого переключения составляют $T_1 = 210$ с

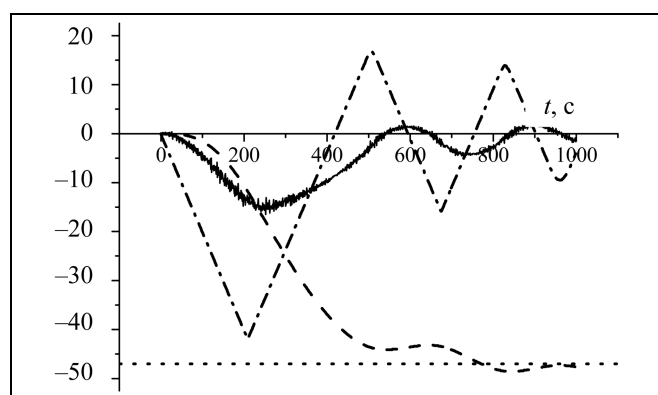


Рис. 3. Оценки $\hat{\eta}$, \hat{V}_y и u_c при $T_1 = 210$ с:
— — $100V_y$, м/с; --- — η , м; - · - · - — $5u$, Т; ···· — $\eta_{\text{зад}}$, м

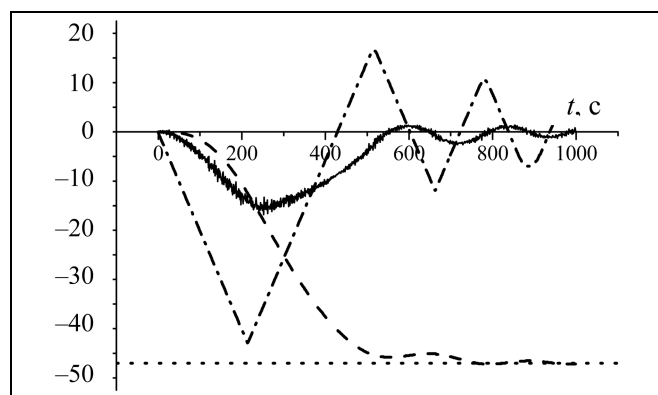


Рис. 4. Оценки $\hat{\eta}$, \hat{V}_y и u_c при $T_1 = 215$ с:
— — $100V_y$, м/с; --- — η , м; - · - · - — $5u$, Т; ···· — $\eta_{\text{зад}}$, м

и $T_1 = 215$ с соответственно. Переход в этом случае происходит в два этапа — выход на глубину, соответствующую реализованному T_1 , и последующий переход с этой глубины на глубину $\eta_{\text{зад}}$; время перехода при этом существенно увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведен способ реализации алгоритма, обеспечивающего поддержку принятия решений оператором, осуществляющим переходы подводного аппарата по глубине. Основная задача состоит в выработке рекомендаций по выбору моментов переключений управляющих воздействий в зависимости от текущего состояния и координаты конечной точки перехода. Для оценки текущего состояния объекта предложено применять структуру фильтра Калмана, с помощью которого решается одновременно задача идентификации гидродинамических характеристик объекта. Предложенный подход к построению алгоритма информационной поддержки оператора в режимах ручного управления обеспечивает его реализацию на бортовых вычислительных комплексах, а также допускает корректировку рекомендуемых значений моментов переключений управляющих воздействий с учетом данных натурных испытаний объекта управления. Результаты моделирования позволяют положительно оценить качество процессов управления, достигаемое с помощью предложенного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самко Ю.Г. Подводные аппараты ВМФ СССР и России // Военно-технический альманах «Тайфун». — 1999. — № 3 (15).
2. Войтов Д.В. Подводные обитаемые аппараты. — М.: АСТ, 2002. — 335 с.
3. Толл Д. Подводные лодки и глубоководные аппараты. — М.: Эксмо, 2004.
4. Евстигнеева Л.В., Тарасов Н.Н., Тахтамышев М.Г. Синтез алгоритма для одной задачи управления морскими подвижными объектами // Проблемы управления. — 2007. — № 4. — С. 84–88.
5. Решение задачи оценивания координат подводных аппаратов / Л.В. Евстигнеева, Г.Э. Острецов, Н.Н. Тарасов, М.Г. Тахтамышев // Судостроение. — 2010. — № 1. — С. 38–40.
6. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — С. 283–290.
7. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К.Т. Леондеса. — М.: Мир, 1980.

Статья представлена к публикации руководителем РРС О.В. Абрамовым.

Тарасов Николай Николаевич — канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, ✉ tarasovnick@yandex.ru,

Тахтамышев Михаил Георгиевич — канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник, ✉ takhnamv@lab49.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-92-20.