

Нечеткое управление процессом стабилизации телеуправляемого подводного робота

Фам Ван Туан

Кафедра систем управления, Военно-морская академия
г. Нячанг, провинция Кханьхоа, Вьетнам
E-mail: tuanhvhq@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема вертикального управления телеуправляемым подводным роботом. В связи с этим возникает необходимость в построении математической модели движения робота и выборе алгоритмов управления движением, на основе которых может быть реализовано дистанционное управление. В статье обоснован подход к построению математической модели подводных аппаратов малого удлинения, предложена полная модель пространственного движения, соответствующая результатам натуральных испытаний робота. Предложена структура нечеткого контроллера для управления стабилизацией скорости робота, а также способы его настройки. Представлены результаты моделирования и испытания управляемого движения подводного робота в вертикальной плоскости, показывающие эффективность нечеткого управления по сравнению с пропорционально-дифференциальным контроллером. Полученные результаты могут быть использованы для построения систем автоматического управления пространственным движением подводного робота.

Ключевые слова: математическая модель движения; стабилизация; подводный робот; нечеткий регулятор

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время подводная робототехника стала широко распространенной в мире. Совершенствование, миниатюризация и удешевление органов управления и навигационных датчиков позволяют проектировать и производить относительно недорогие подводные аппараты различного назначения. В свою очередь, возникает проблема эффективного дистанционного управления такими устройствами.

Внутренние исследования подводных морских движущихся объектов в основном сосредоточены на изучении подводных лодок или подводных лодок в форме торпеды. Характерными особенностями таких объектов являются значительное удлинение (длина корпуса в несколько раз превышает его диаметр), использование рулей или элеронов для управления движением.

Изученный в данной работе аппарат был разработан и изготовлен во Вьетнаме по заказу кафедры систем управления Военно-морской академии (рис. 1). Объект относится к типу дистанционно управляемых телеуправляемых подводных роботов, оснащенных двумя

парами винтов в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. Параметры пространственного движения измеряются с помощью инерциального модуля на микромеханических элементах, а также датчика гидростатического давления. Как видно из рисунка, робот имеет небольшое удлинение.

Очевидно, что динамические характеристики объекта отличаются от известных математических моделей [1–3], что требует разработки математической модели движения робота в тихоходном диапазоне. Следует отметить, что низкие скорости не позволяют использовать линеаризованные модели для синтеза алгоритмов управления без соответствующего обоснования.

Таким образом, в статье обсуждается построение математической модели, выбор алгоритма управления движением телеуправляемого подводного робота и рассмотрение вопроса практической программной реализации системы управления телеуправляемым подводным роботом.



Рис. 1. Подводный малогабаритный робот

II. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО РОБОТА

Движение телеуправляемого подводного робота (ТПР) в пространстве традиционно описывается шестью степенями свободы и записывается в виде системы нелинейных векторно-матричных дифференциальных уравнений [1–4]. Однако анализ литературы показывает существование различных подходов к построению математических моделей. Различия обусловлены выбором различных систем координат и их центров,

детализирующих представление нелинейных динамических характеристик.

Принципиальной особенностью математических моделей подводных аппаратов является возможность или невозможность деления на отдельные модели движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Эта функция часто зависит от конструкции конкретного ТПР. Априорных данных об отделимости движения исследуемого объекта нет, поэтому разработана полная математическая модель и исследовано влияние работы вертикальных винтов на пространственное движение робота.

Построение модели включает в себя следующие этапы: выбор системы координат, расчет геометрической и инерциальной составляющих, расчет и уточнение гидродинамических характеристик. В этой статье мы приняли связанную систему координат, центр которой совпадает с центром тяжести робота (рис. 2).

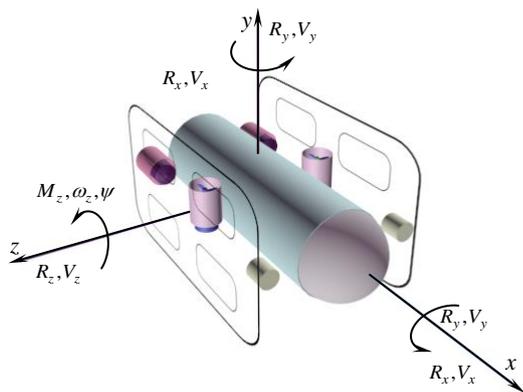


Рис. 2. Связанная система координат ТПР: ϕ, θ, ψ – соответственно углы рыскания, крена и дифферента; $V = [V_x, V_y, V_z]^T$ – вектор линейной скорости ТПР; $\Omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор угловой скорости ТПР; $R = [R_x, R_y, R_z]^T$, $M = [M_x, M_y, M_z]^T$ – соответственно векторы сил и моментов, действующих на ТПР.

Согласно [1, 4] динамика модели может быть описана системой уравнений:

$$\begin{aligned} R_x &= m_x \dot{V}_x + m_z V_z \omega_y - m_y V_y \omega_z - \lambda_{26} \omega_z^2 + \lambda_{35} \omega_y^2 \\ R_y &= m_y \dot{V}_y + m_x V_x \omega_z - m_z V_z \omega_x + \lambda_{26} \dot{\omega}_z - \lambda_{35} \omega_x \omega_y \\ R_z &= m_z \dot{V}_z + m_y V_y \omega_x - m_x V_x \omega_y + \lambda_{26} \omega_x \omega_z + \lambda_{35} \dot{\omega}_y \\ M_x &= J_x \dot{\omega}_x + (m_z - m_y) V_y V_z + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z + (\lambda_{26} + \lambda_{35})(\omega_y V_y - \omega_z V_z) \\ M_y &= J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z + (m_x - m_z) V_x V_z - \lambda_{26} \omega_x V_y + \lambda_{35} (\dot{V}_z - \omega_y V_x) \\ M_z &= J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y + (m_y - m_x) V_x V_y + \lambda_{26} (\dot{V}_y + \omega_z V_x) + \lambda_{35} \omega_x V_z \end{aligned}$$

где m_x, m_y, m_z – составляющие массы с учетом присоединенных масс; J_x, J_y, J_z – моменты инерции с учетом присоединенных моментов; $\lambda_{26}, \lambda_{35}$ – присоединенные массы могут быть вычислены согласно [4].

Гидродинамические силы R_x^f, R_y^f, R_z^f и моменты M_x^f, M_y^f, M_z^f , обусловленные вязкостью жидкости, могут быть аппроксимированы следующими выражениями [1–4]:

$$\begin{aligned} R_x^f &= R_{vx} |V_x| V_x; R_y^f = R_{vy} |V_y| V_y; R_z^f = R_{vz} |V_z| V_z \\ M_x^f &= M_{\omega x} |\omega_x| \omega_x; M_y^f = M_{\omega y} |\omega_y| \omega_y; M_z^f = M_{\omega z} |\omega_z| \omega_z \end{aligned}$$

где R_{vx}, R_{vy}, R_{vz} – гидродинамические коэффициенты сил; $M_{\omega x}, M_{\omega y}, M_{\omega z}$ – гидродинамические коэффициенты моментов.

Управляющие силы R_d и моменты M_d , создаваемые винтами.

$$\begin{aligned} R_{dx} &= T_1 + T_2; R_{dy} = T_3 + T_4; R_{dz} = 0 \\ M_{dx} &= 0.5(T_3 - T_4)l_2; M_{dy} = 0.5(T_1 - T_2)l_1; M_{dz} = 0 \end{aligned}$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 – силы упора винтов ТПР; l_1, l_2 – расстояние между парами горизонтальных и вертикальных винтов.

Составляющие сил и моментов плавучести, входящие в обобщенный вектор сил и моментов, могут быть вычислены согласно [1–4]. Силы и моменты внешних воздействий определяются в соответствии с [1–4].

В табл. 1 приведены расчетные параметры исследуемого аппарата. Коэффициенты гидродинамических сил были подобраны в соответствии с результатами натурных экспериментов.

ТАБЛИЦА 1 ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТПР

Параметры	значия	Параметры	значия
m	9.01 (kg)	m_x	0.9 (kg)
l_1	0.3(m)	m_y	8.59 (kg)
l_2	0.3(m)	m_z	10.0 (kg)
λ_{26}	0.12(kgm)	J_x	0.03(kgm ²)
λ_{35}	-0.51(kgm)	J_y	0.13(kgm ²)
A	84.26 (N)	J_z	0.13(kgm ²)
G	m*9.81 (N)	V_{xmax}	1.5 m/s
ω_{xmax}	10 rad/s	V_{ymax}	0.45 m/s

Исследование математической модели показало сходство с результатами натурных испытаний: предельная продольная скорость – 1.5 м/с; предельная вертикальная скорость – 0.45 м/с; угловая скорость рыскания – 24 град/с; угловая скорость крена – 10 град/с.

III. СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Нелинейности математической модели ограничивают возможности использования классических методов синтеза регуляторов стабилизации [4]. Известно, что ПИД-регулятор – наиболее распространенная структура регулятора в управлении морским подводным объектом в режиме стабилизации курса и глубины. Однако ПИД-регуляторы имеют ряд существенных недостатков: малая эффективность в нелинейных режимах движения; необходимость ручной настройки; низкие адаптивные

способности. В связи с этим более перспективным является применение нечеткого регулятора для управления частным движением ТПР.

Функциональная схема системы автоматического управления на базе нечеткой логики приведена на рис. 3. Схема состоит из устройства сравнения, нечеткого регулятора объекта управления и цепи обратной связи [4].

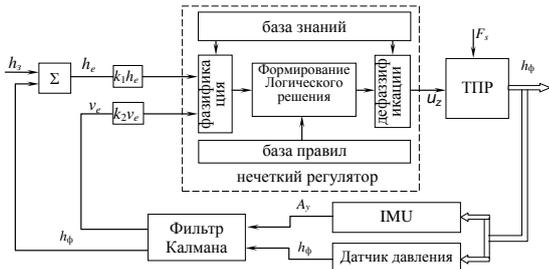


Рис. 3. Структура системы управления с нечетким регулятором

Нечеткий регулятор (fuzzy-controller) включает три основных блока – блок фазификации (fuzzification), блок формирования логического решения (inference) и блок дефазификации (defuzzification). Для управления глубиной погружения входными параметрами нечеткого регулятора являются глубина робота (h) и вертикальная скорость, восстанавливаемая фильтром Калмана по измерениям глубины [4].

Поскольку структура нечеткого регулятора предполагается неизменной, в работе проводился подробный анализ, связанный с выбором параметров нечеткого регулятора: функций принадлежности нечетких переменных, алгоритма обработки правил нечеткого вывода, базы нечетких правил.

При выборе функции принадлежности (ФП) исследовались возможности применения треугольных, трапециевидных и гауссовских функций.

Термы выходных переменных приведены для алгоритма Мамдани. В случае алгоритма Сугено выходная переменная описывается константами, равномерно распределенными на интервале управляющего воздействия. С учетом малых скоростей ТПР, а также малых угловых скоростей в режимах стабилизации, были выбраны следующие градации для нечетких переменных: пять термов для координаты, три – для скорости изменения координаты, семь – для управляющего воздействия. Более сильное дробление приводит к разрастанию базы правил и мало сказывается на качестве управления [5]. Набор правил приведен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2 ПРАВИЛ УПРАВЛЕНИЯ

h	NL	NS	Z	PS	PL
N	NS	Z	PS	P	PL
Z	NL	NS	Z	PS	PL
P	NL	N	NS	Z	PS

Особенностью предлагаемого нечеткого регулятора является введение дополнительных масштабирующих коэффициентов k_1, k_2 , позволяющих проводить адаптацию регулятора без изменения термов и нечетких правил.

Сравнение результатов проведенного моделирования показывает, что система управления с методом Сугено имеет несколько меньшую погрешность (на 4%) и время переходного процесса (на 4,5%) по сравнению с системой с методом Мамдани. При этом контроллер Мамдани обеспечивает более экономичное управление [5]. Результаты моделирования (рис. 4) приведены для коэффициентов $k_1=0.2; k_2=0.4$.

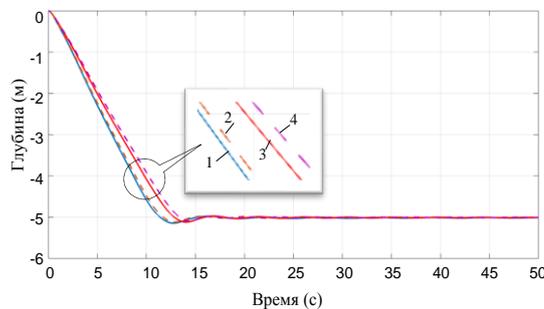


Рис. 4. Сравнение нечетких регуляторов с разными параметрами: 1– алгоритм Сугено, гауссовские ФП; 2– алгоритм Сугено, линейные ФП; 3– алгоритм Мамдани, гауссовские ФП; 4– алгоритм Мамдани, линейные ФП

На рис. 5 представлен график зависимости глубины от времени при управлении ПД-регулятором и при управлении нечетким регулятором.

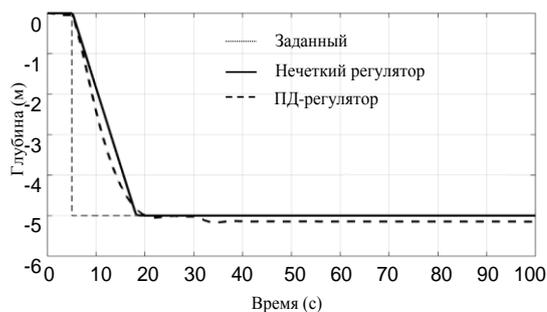


Рис. 5. График зависимости заданной и текущей глубины ТПР от времени с постоянным внешним воздействием при времени 30-ой секунды

Предложен метод синтеза регуляторов стабилизации частных видов движения подводного робота, основанный на применении нечеткого управления с внешней настройкой. Качество стабилизации при корректном выборе параметров и характеристик нечеткой системы не уступает классическим ПД и ПИД-регуляторам, а настройка осуществляется значительно проще. Дополнительным преимуществом является возможность перехода на более экономное управление за счет изменения алгоритма обработки нечетких правил.

IV. КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМ РОБОТОМ

Функциональная схема ТПР приведена на рис. 6. Схема учитывает не только рассмотренные выше задачи навигации и управления, но и эксплуатацию ТПР в целом.

Оператор, в ходе эксплуатации ТПР, может выполнять следующие действия:

- управлять вручную двигателями гребных винтов; осуществлять включение и выключение видеокamеры, освещения ТПР; устанавливать частные режимы стабилизации;
- задавать параметры частных режимов (заданная глубина, боковое смещение, тип алгоритма маневрирования);
- получать изображение от видеокamеры; получать данные по угловому и линейному перемещению ТПР.

Команды и режимы передаются от операторской станции в бортовой контроллер по интерфейсу открытого коммуникационного протокола, основанного на архитектуре ведущий-ведомый (master-slave) (Modbus). В бортовом контроллере реализованы алгоритмы обработки навигационной информации и нечеткие регуляторы. Также контроллер преобразует команды управления двигателями гребных винтов в сигналы для модулей широтно-импульсной модуляции, обеспечивающие установку требуемых оборотов винтов.

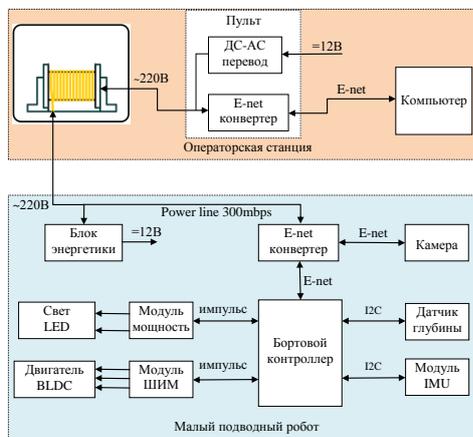


Рис. 6. Функциональная схема ТПР

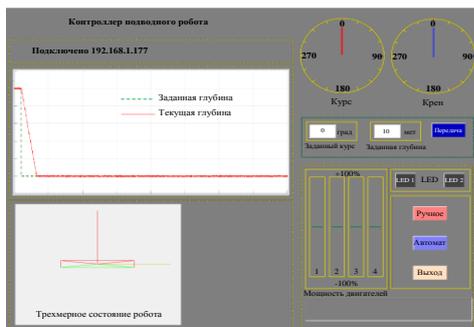


Рис. 7. Экран операторской станции

Кроме реализации алгоритмов для бортового контроллера было также разработано программное обеспечение для операторской станции. Интерфейс приложения обеспечивает полный объем функций управления оператором. Приложение разработано на языке программирования C/C++ [6, 7].

На рис. 7 показан рабочий экран приложения в режиме управления глубиной погружения. На рабочий экран дополнительно выводятся данные по изменению глубины во времени, что позволяет использовать приложение для проверки работы алгоритмов управления при натурных испытаниях. Результаты натурных и испытаний схожи с результатами компьютерного моделирования.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена и успешно решена задача нечеткого управления по глубине телеуправляемым подводным аппаратом малого удлинения поискового типа. Алгоритмы нечеткого управления, предлагаемые в статье, были реализованы в составе программного комплекса для управления подводным аппаратом.

Применение методов нечеткой логики для синтеза законов управления современных автоматических систем контроля, может повысить надёжность функционирования подводных аппаратов и роботов.

Разработанное программное обеспечение позволило провести разнообразные натурные испытания робота. Результаты натурных испытаний подтвердили эффективность предлагаемых в работе подходов: обработки навигационной информации на основе калмановской фильтрации и нечеткого управления частными движениями ТПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
- [2] Randeni P.S.A.T., Forrest A.L., Cossu R., Leong Z.Q. and Ranmuthugala D. (2015). Estimating flow velocities of the water column using the motion response of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) // OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, Washington, DC, pp. 1-6.
- [3] X. Liu, Y.H. Tan, B.Di and B.M. Chen. 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). "Hydrodynamic modelling for a small-scale underwater vehicle using computational fluid dynamics", Ohrid, 2017, pp. 373-378.
- [4] P. Van Tuan, "Maneuvering Algorithms of a Small-sized Underwater Robot," 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 802-806.
- [5] Фам В.Т., Шпекторов А.Г. Конференция молодых ученых-исследователей в области электротехники и электроники (EIConRus), "Сравнительный анализ нечетких регуляторов для управления движением автономного подводного аппарата". Москва, 2018 г., с. 954-957.
- [6] Свидетельство РФ 2018617697 / Ван Туан Фам, А.Г. Шпекторов Программа управления подводным аппаратом на основе нечеткой логики; Опубл. 28.06.2018.
- [7] Свидетельство РФ № 2018660003 / Ван Туан Фам, А.Г. Шпекторов. Программа удаленного управления подводным аппаратом для операторской станции; Опубл. 15.08.2018.