

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., filaret@iacp.dvo.ru,

Д. А. Юхимец, д-р техн. наук, доц., undim@iacp.dvo.ru,

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

## Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата<sup>1</sup>

*В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) все активнее используются для решения задач, связанных с обслуживанием подводных коммуникаций и различных подводных производственных комплексов, а также при выполнении подводных технологических операций. Для эффективного выполнения указанных операций АНПА должны иметь высококачественные системы управления, которые обеспечат их точное движение как по протяженным пространственным траекториям, формируемым в процессе их передвижения к объектам работ, так и при выполнении сложных маневров вблизи объектов подводной инфраструктуры. При этом основной сложностью, возникающей в процессе синтеза систем управления АНПА, является существенная нелинейность указанных объектов управления, наличие перекрестных связей между их степенями свободы, а также неопределенность и переменность их параметров. В работе предложен метод синтеза системы управления пространственным движением АНПА, позволяющей учесть указанные негативные эффекты. Эта система имеет два контура. Первый включает в себя комбинированную систему, содержащую нелинейный регулятор для достижения желаемых динамических характеристик АНПА, когда его параметры равны номинальным значениям, и регулятор с самонастройкой по эталонной модели, обеспечивающей компенсацию неопределенной или переменной части параметров. При этом параметры регулятора с эталонной моделью выбираются так, чтобы уменьшить возможную амплитуду разрывного сигнала управления скоростью движения АНПА. Вторым контуром представляет собой нелинейный регулятор положения, позволяющий учесть динамические свойства контура управления скоростью и кинематические свойства АНПА. Преимуществом предложенной системы управления по сравнению с традиционными, построенными на основе ПИД регуляторов, является более высокая точность управления при движении по сложным пространственным траекториям независимо от изменения параметров АНПА. Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность синтезированной двухконтурной системы управления.*

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, нелинейное управление, самонастройка, эталонная модель, параметрическая неопределенность

### Введение

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) кроме традиционных задач картографирования, поиска и мониторинга подводной среды все активнее используются для решения задач, связанных с обслуживанием подводных коммуникаций и различных подводных производственных комплексов [1, 2], а также с выполнением подводных технологических операций. Особенностью указанных операций является существенная переменность и неопределенность параметров АНПА, которая возникает в том числе и при транспортировке грузов с заранее неизвестной массой и габаритными размерами, а также при выполнении работ с использованием различных рабочих инструментов.

Для эффективного выполнения технологических и транспортных операций АНПА должны иметь высококачественные системы

управления, которые обеспечат их точное движение как по протяженным пространственным траекториям, формируемым в процессе их передвижения к объектам работ (в том числе в составе группы), так и при выполнении сложных маневров вблизи объектов подводной инфраструктуры с изменением всех линейных и угловых координат для точного перемещения вблизи различных подводных объектов. При этом основной сложностью, возникающей в процессе синтеза систем управления АНПА, является существенная нелинейность указанных систем, наличие перекрестных связей между их степенями свободы, а также неопределенность и переменность их параметров.

Решению проблемы синтеза систем управления АНПА посвящено большое число работ, содержащих различные методы. Эти методы могут использовать упрощенные или линеаризованные математические модели динамики АНПА, описывающие их движения по отдельным степеням свободы, [3, 4] и позволяют обеспечивать достаточно эффективное управление

<sup>1</sup>Работа поддержана РФФИ (грант 19-08-00347).

АНПА по отдельным степеням свободы при их движениях по протяженным траекториям, расположенным в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Недостатком подобных систем управления, отмечаемым многими исследователями [5, 6], является существенное ухудшение показателей качества их управления при изменении скоростей движения АНПА в процессе перемещения по пространственным траекториям с одновременным изменением нескольких линейных и угловых координат или параметров АНПА. Это обусловлено наличием перекрестных связей между степенями свободы, а также нелинейными характеристиками АНПА, которые не позволяют обеспечить с помощью типовых линейных регуляторов быструю компенсацию этих негативных эффектов.

Для устранения указанных недостатков используются более сложные нелинейные, адаптивные и робастные системы управления, построенные на основе нейронных сетей и нечеткой логики [7, 8]. Достоинством таких систем является то, что для их синтеза не требуются знания о параметрах АНПА, однако обычно они имеют сложную практическую реализацию. Кроме того, их анализ с помощью известных методов теории автоматического управления значительно затруднен, что не позволяет гарантировать их работоспособность во всех возможных режимах работы АНПА.

Другой подход предполагает создание адаптивных систем управления [9, 10], позволяющих подстраивать их параметры в зависимости от изменения параметров АНПА и внешних воздействий. Но эти адаптивные системы обычно имеют сложную реализацию, которая предполагает использование алгоритмов идентификации неизвестных параметров АНПА и внешних воздействий в реальном масштабе времени, что часто невозможно реализовать на бортовом вычислительном оборудовании с типовым набором бортовых датчиков.

Одними из наиболее эффективных типов систем управления сложными нелинейными динамическими объектами с неизвестными или переменными параметрами являются системы с разрывным управлением, к которым относятся системы с переменной структурой [11, 12] и самонастройкой по эталонной модели [13, 14]. Системы этого типа часто используются для высокоточного управления пространственным движением АНПА различных типов. В работах [15, 16] предложен подход к синтезу децентра-

лизованных систем управления пространственными движениями АНПА, в которых используются шесть отдельных каналов управления для каждой степени свободы с использованием адаптивных систем с переменной структурой. Недостатком этих систем является невозможность компенсации ими быстроменяющихся взаимовлияний между каналами управления, которые возникают при движении АНПА с высокими скоростями. В работе [13] предложена система централизованного управления, основанная на самонастройке по эталонной модели, которая позволяет формировать сигналы управления, компенсирующие быстро изменяющиеся параметры АНПА и взаимовлияния каналов управления.

Однако недостатком этих систем является большая амплитуда разрывных сигналов управления, которая негативно воздействует на механические части движителей АНПА. Кроме того, в таких системах сигнал управления формируется в виде сил и моментов, развиваемых движительным комплексом по различным степеням свободы. Но модель движителей АНПА может быть составлена только приближенно, что может привести к формированию некорректных управляющих воздействий, а в результате — к снижению качества управления. Кроме того, при синтезе систем управления массоинерционные, гидростатические и гидродинамические параметры АНПА (его масса, моменты инерции, присоединенные массы жидкости, вязкие трения и др.) считаются постоянными. Но для грузовых АНПА эти параметры существенно меняются, что приводит к значительному ухудшению качества управления.

Для устранения указанных недостатков, возникающих в процессе реализации разрывных законов управления, необходимо снижать амплитуду разрывного сигнала, не уменьшая робастные свойства системы управления, а также учитывать возможные неопределенности в модели движителей АНПА. Для этого целесообразно использовать комбинированные системы управления [16, 17], где основной сигнал управления будет формироваться непрерывным нелинейным регулятором, а неопределенность или переменность параметров АНПА будет компенсироваться с помощью разрывного сигнала управления. При этом выбор параметров закона формирования дополнительного разрывного сигнала управления должен обеспечить его минимальную амплитуду.

## Описание объекта управления и постановка задачи

В работе исследуется АНПА, описываемый матричными уравнениями [18]:

$$\begin{aligned} M\dot{v} + (C(M, v) + D(d_1, d_2, v))v + g(\eta) &= \tau, \\ \dot{\eta} &= J(\eta)v, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M = M_R + M_A \in R^{6 \times 6}$ ;  $M_R$  — матрица инерции;  $M_A$  — матрица присоединенных масс и моментов инерции жидкости;  $C(M, v) \in R^{6 \times 6}$  — матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов;  $D(d_1, d_2, v) \in R^{6 \times 6}$  — матрица гидродинамических сил и моментов;  $g(\eta) \in R^6$  — вектор гидростатических сил и моментов;  $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$  — вектор положения и ориентации АНПА в абсолютной системе координат (СК);  $\tau = [\tau_x, \tau_y, \tau_z, M_x, M_y, M_z]^T$  — вектор сил тяг и моментов, развиваемых движителем комплексом АНПА в связанной СК;  $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  — вектор линейных и угловых скоростей в связанной СК.

В системе (1) динамика движителей не учитывается, так как постоянные времени самого АНПА намного больше постоянных времени его движителей. При этом полагается, что движительный комплекс может создавать силы тяги и моменты по всем степеням свободы АНПА. Это необходимо для выполнения точных маневров вблизи объектов работ.

Матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов, входящая в уравнения (1), описывается выражениями [18]

$$C(M, v) = C_{RB}(M_R, v) + C_A(M_A, v), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} C_{RB}(M_R, v) &= \\ &= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix}, \\ M_R &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \\ C_A(M_A, v) &= \\ &= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix}, \\ M_A &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \\ v_1 &= [v_x \ v_y \ v_z]^T; v_2 = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T, \end{aligned}$$

а оператор  $S(\cdot)$  имеет вид

$$S(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix}, \lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T.$$

Элементы диагональной матрицы  $D(d_1, d_2, v)$  в (1) описываются суммой [18]

$$D_{ii} = d_{1i} + d_{2i}|v_i|, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (3)$$

где  $d_{1i}, d_{2i}, i = \overline{1, 6}$ , — гидродинамические коэффициенты, определяющие квадратичную и линейную зависимости сил и моментов гидродинамического сопротивления от скоростей движения АНПА по всем его степеням свободы.

Вектор гидростатических сил и моментов имеет вид [18]

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\varphi \\ -B_y\cos\theta\cos\varphi + B_z\cos\theta\sin\varphi \\ B_z\sin\theta + B_x\cos\theta\cos\varphi \\ -B_x\cos\theta\sin\varphi - B_y\sin\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $W$  — сила тяжести;  $B$  — Архимедова сила;  $B_x = Wx_G - Bx_B$ ,  $B_y = Wy_G - By_B$ ,  $B_z = Wz_G - Bz_B$ ;  $x_G, y_G, z_G$  и  $x_B, y_B, z_B$  — соответственно, координаты центров тяжести и плавучести АНПА в связанной СК.

Параметры АНПА и движительного комплекса точно не известны и могут меняться при транспортировке заранее неизвестного груза. Поэтому, учитывая, что параметры  $M, d_1$  и  $d_2$  в уравнения (1)—(3) входят линейно, динамику движения АНПА можно описать в виде

$$\begin{aligned} (M_n + M_\Delta)\dot{v} + (C_n(M_n, v) + C_\Delta(M_\Delta, v))v + \\ + (D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) + D_\Delta(d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}, v))v + \\ + g_n(\eta) + g_\Delta(\eta) = \tau_n + \tau_\Delta, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $C_n \in R^{6 \times 6}$ ,  $D_n \in R^{6 \times 6}$ ,  $g_n \in R^6$  — силы и моменты, возникающие при движении АНПА и зависящие от номинальных значений параметров АНПА;  $C_\Delta \in R^{6 \times 6}$ ,  $D_\Delta \in R^{6 \times 6}$ ,  $g_\Delta \in R^6$  — дополнительные силы и моменты, зависящие от неопределенной или изменяющейся части значений параметров АНПА;  $M_n \in R^{6 \times 6}$ ,  $d_{n1} \in R^6$ ,  $d_{n2} \in R^6$  — номинальные значения параметров АНПА;  $M_\Delta \in R^{6 \times 6}$ ,  $d_{\Delta 1} \in R^6$ ,  $d_{\Delta 2} \in R^6$  — неопределенные или изменяющиеся части параметров АНПА;  $\tau_n \in R^6$  — вектор сил тяг и

моментов, формируемых двигателями АНПА с учетом их номинальных параметров;  $\tau_{\Delta} \in R^6$  — дополнительный вектор сил тяг и моментов, зависящий от неопределенных параметров двигателей АНПА. Матрицы  $C_{\Delta}$  и  $D_{\Delta}$  вычисляются по выражениям (2), (3) при использовании  $M_{\Delta}$ ,  $d_{\Delta 1}$  и  $d_{\Delta 2}$ , соответственно.

Для элементов матриц  $M_{\Delta}$ ,  $C_{\Delta}$  и векторов  $d_{\Delta 1}$ ,  $d_{\Delta 2}$ ,  $g_{\Delta}$ ,  $\tau_{\Delta}$  выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} M &= M_n + M_{\Delta} > 0, \\ |m_{\Delta,ij}| &\leq \bar{m}_{\Delta,ij}, m_{n,ij} + m_{\Delta,ij} > 0, |c_{\Delta,ij}| \leq \bar{c}_{\Delta,ij}, \\ |d_{\Delta 1,j}| &\leq \bar{d}_{\Delta 1,j}, d_{n1,j} + d_{\Delta 1,j} > 0, \\ |d_{\Delta 2,j}| &\leq \bar{d}_{\Delta 2,j}, d_{n2,j} + d_{\Delta 2,j} > 0, \\ |g_{\Delta,i}| &\leq \bar{g}_{\Delta,i}, |\tau_{\Delta,i}| \leq \bar{\tau}_{\Delta,i}, i = \overline{1,6}, j = \overline{1,6}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\bar{m}_{ij}$ ,  $\bar{d}_{\Delta 1j}$ ,  $\bar{d}_{\Delta 2j}$ ,  $\bar{c}_{\Delta ij}$ ,  $\bar{g}_{\Delta i}$ ,  $\bar{\tau}_{\Delta i}$  — оценки максимальных отклонений соответствующих параметров АНПА, элементов матриц кориолисовых и гидродинамических сил и моментов, гидростатических сил и моментов, а также сил тяг и моментов, развиваемых двигателями, от их номинальных значений.

Для точного выполнения подводных операций и маневрирования вблизи подводных объектов движение АНПА всегда должно происходить с заданными показателями качества независимо от возможного изменения их параметров. С помощью типовых линейных систем управления этого достичь не удастся. Поэтому в работе ставится задача разработки нового подхода к синтезу системы управления пространственным движением АНПА, обеспечивающей заданное качество управления при любом изменении параметров АНПА и их двигателей в указанных диапазонах (6). Для поддержания требуемой точности работы указанной системы будет использована самонастройка по эталонной модели с уменьшенной амплитудой разрывных сигналов, обеспечивающих снижение влияния неопределенных и переменных параметров АНПА на точность их работы. Невысокая сложность создаваемой системы позволит обеспечить ее практическую реализацию на бортовом компьютере аппарата.

### Синтез самонастраивающейся системы управления АНПА

Для решения поставленной задачи будет использован подход, описанный в работах [13–15]. Этот подход предполагает создание си-

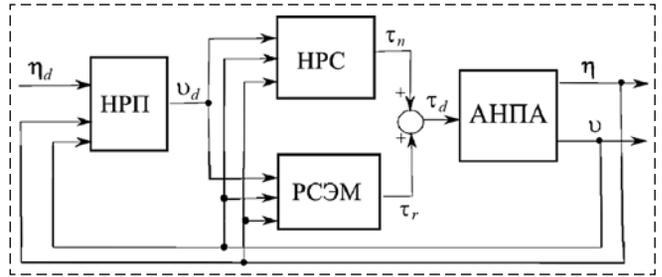


Рис. 1. Обобщенная схема системы управления АНПА:

НРП — нелинейный регулятор положения, НРС — нелинейный регулятор скорости, РСЭМ — регулятор с самонастройкой по эталонной модели

Fig. 1. Diagram of AUV control system:

НРП (NCP) — nonlinear position controller, НРС (NSC) — nonlinear velocity controller, РСЭМ (CSRM) — self-tuning controller with reference model

стемы управления, содержащей контур управления скоростью и контур управления положением АНПА (рис. 1).

Система внутреннего контура управления скоростью движения АНПА обеспечивает развязку каналов управления всеми его степенями свободы, компенсацию неопределенных и переменных параметров аппарата и придание ему желаемых динамических свойств. Внешний контур положения обеспечивает независимое управление линейными и угловыми координатами АНПА по всем его степеням свободы. Это разделение системы управления на два контура позволяет упростить учет динамических свойств АНПА и использовать только первое уравнение системы (1) в отличие от одноконтурной системы, в которой необходимо одновременно учитывать динамические и кинематические свойства аппарата.

В свою очередь, контур управления скоростью состоит из нелинейного регулятора скорости (НРС), обеспечивающего желаемые динамические свойства АНПА, когда их параметры имеют номинальные значения, и дополнительного регулятора скорости с эталонной моделью (РСЭМ), компенсирующего неопределенные или изменяющиеся параметра аппарата. Ниже детально рассмотрена процедура синтеза каждого из указанных контуров управления.

### 2.1. Синтез контура управления скоростью движения АНПА

Сигнал управления скоростью движения АНПА формируется из двух независимых сигналов:

$$\tau_d = \tau_n + \tau_r. \quad (7)$$

Главная его часть  $\tau_n \in R^6$  — сигнал на выходе нелинейного регулятора, обеспечивающий АНПА желаемые динамические характеристики при номинальных значениях его параметров, а вспомогательная  $\tau_r \in R^6$  — дополнительный сигнал управления, компенсирующий возможные отклонения параметров АНПА от заданных номинальных значений. Такое разделение позволяет формировать главную часть в виде непрерывного сигнала, а дополнительную — в виде разрывного сигнала с уменьшенной амплитудой.

При формировании сигнала  $\tau_n$  используется метод линеаризации обратной связью [17, 19]. Этот сигнал можно описать в виде

$$\begin{aligned} \tau_n &= M_n \alpha + C_n(M_n, v) v + \\ &+ D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) v + g_n(\eta), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\alpha = \dot{v}_d - \Lambda e, e = v - v_d,$$

где  $v_d \in R^6$  — желаемое значение вектора скорости движения АНПА в связанной СК;  $\Lambda \in R^{6 \times 6}$  — диагональная матрица положительных коэффициентов.

После подстановки выражения (8) в уравнение (1) при номинальных значениях параметров АНПА получается уравнение, которым будет описываться динамика АНПА с учетом сигнала  $\tau_n$ :

$$M_n (\dot{e} + \Lambda e) = 0. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), использование закона управления (8) позволяет обеспечить развязку каналов управления АНПА и придать им требуемые динамические свойства, описываемые дифференциальными уравнениями с постоянными желаемыми коэффициентами, задаваемые элементами матрицы  $\Lambda$ , в случае, когда параметры АНПА являются номинальными.

Компенсация неопределенных или переменных параметров АНПА обеспечивается с помощью разрывного сигнала управления, формирующегося на основе системы с эталонной моделью [13, 14]. Для синтеза этой системы сначала зададим эталонную модель, которая будет описывать желаемые динамические свойства АНПА. Указанная модель формируется на основе выражения (9) и имеет следующий вид:

$$\dot{v}_m + \Lambda v_m = \dot{v}_d + \Lambda v_d, \quad (10)$$

где  $v_m \in R^6$  — выходной сигнал эталонной модели.

Дополнительный сигнал управления на основе эталонной модели будет формироваться в виде [13, 14]

$$\tau_r = h \text{sign}(e_m), \quad (11)$$

где  $e_m = v_m - v$ ;  $h \in R^{6 \times 6}$  — диагональная матрица коэффициентов.

Для определения значений элементов матрицы  $h$  [18] зададим функцию Ляпунова  $V = \frac{1}{2} e_m^T M e_m$ , где  $M \in R^{6 \times 6}$  — положительно определенная матрица.

Производная функции Ляпунова равна

$$\dot{V} = e_m^T M \dot{e}_m. \quad (12)$$

С учетом равенства  $\dot{e}_m = \dot{v}_m - \dot{v}$  выражение (12) можно переписать в виде

$$\dot{V} = e_m^T (M \dot{v}_m - M \dot{v}). \quad (13)$$

С учетом выражений (5), (7) и (8) выражение (13) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_m^T (M \dot{v}_m + ((C_n(M_n, v) + C_\Delta(M_\Delta v))) v + \\ &+ (D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) + D_\Delta(d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}, v)) v + \\ &+ g_n(\eta) + g_\Delta(\eta) - M_n \alpha - C_n(M_n, v) v - \\ &- D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) v - g_n(\eta) - \tau_\Delta - \tau_r). \end{aligned} \quad (14)$$

Приведя в выражении (14) подобные члены, с учетом (11) получим

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_m^T (M_\Delta \dot{v}_m + M_n (\dot{v}_m - \alpha) + \\ &+ (C_\Delta(M_\Delta v) + D_\Delta(d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}, v)) v + \\ &+ g_\Delta(\eta) - \tau_\Delta - h \text{sign}(e_m)). \end{aligned} \quad (15)$$

Для выполнения условия  $e_m \rightarrow 0$  необходимо, чтобы  $\dot{V}$  была отрицательно определенной. Для этого требуется, чтобы в выражении (15) элементы матрицы  $h$  выбирались с учетом неравенств

$$h_{ii} > \max |H_i|, i = \overline{1, 6}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} H &= M_\Delta \dot{v}_m + M_n (\dot{v}_m - \alpha) + \\ &+ (C_\Delta(v) + D_\Delta(v)) v + g_\Delta(\eta) - \tau_\Delta. \end{aligned}$$

Однако использование неравенств (16) потребует введения разрывных сигналов с максимально возможной амплитудой. А это приведет к большим затратам энергии и негативно скажется на механических частях движителей

при использовании закона управления (7), (11) в бортовых системах АНПА.

Для уменьшения амплитуды разрывной сигнал следует формировать с учетом текущей величины  $v$ :

$$\begin{aligned} h_{ij} &= H_{v,i}, i = \overline{1,6}; \\ H_v &= V_{dm} + M_n(\dot{v}_m - \alpha) + C_{\Delta}^{pm} + \\ &+ D_{\Delta}^p + g_{\Delta}^{\max}(\eta) + k_{\tau}\tau_{np}; \\ V_{dm} &= M_{\Delta}^{\max} v_m^p, \\ v_m^p &= (|\dot{v}_{mx}|, |\dot{v}_{my}|, |\dot{v}_{mz}|, |\dot{\omega}_{mx}|, |\dot{\omega}_{my}|, |\dot{\omega}_{mz}|)^T; \\ C_{\Delta,ij}^{pm} &= |C_{\Delta,ij}^p|, C_{\Delta}^p = C_{\Delta}(M_{\Delta}^{\max}, v_p) v_p, \\ i &= \overline{1,6}, j = \overline{1,6}; \\ D_{\Delta}^p &= D_{\Delta}(d_{\Delta 1}^{\max}, d_{\Delta 2}^{\max}, v_p) v_p, \\ v_p &= (|v_x|, |v_y|, |v_z|, |\omega_x|, |\omega_y|, |\omega_z|)^T; \\ \tau_{np} &= (|\tau_{nx}|, |\tau_{ny}|, |\tau_{nz}|, |M_{nx}|, |M_{ny}|, |M_{nz}|)^T, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $M_{\Delta}^{\max} = \begin{bmatrix} \bar{m}_{11} & \dots & \bar{m}_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{m}_{61} & \dots & \bar{m}_{66} \end{bmatrix}$ ;  $d_{\Delta 1}^{\max} = (\bar{d}_{\Delta 11}, \dots, \bar{d}_{\Delta 16})$ ;

$d_{\Delta 2}^{\max} = (\bar{d}_{\Delta 21}, \dots, \bar{d}_{\Delta 26})$  — максимальные значения отклонений параметров АНПА от их номинальных значений;  $k_{\tau} = \bar{\tau}_{\Delta}/|\tau_n^{\max}|$ ,  $\tau_n^{\max}$  — максимальные значения силы тяги или момента, создаваемые движителями с номинальными параметрами. Для расчета величины  $g_{\Delta}^{\max}(\eta)$  представим вектор  $g(\eta)$  в виде

$$g(\eta, P) \approx g(\eta, P_n) + \frac{\partial g(\eta, P)}{\partial P} P_{\Delta}, \quad (18)$$

где

$$P = (W, B, x_g, y_g, z_g, x_B, y_B, z_B)^T, P = P_n + P_{\Delta}.$$

Используя выражение (18), можно записать:

$$g_{\Delta}^{\max}(\eta) = G_{\Delta p} P_{\Delta}^{\max}, G_{\Delta p, ik} = \left| \left( \frac{\partial g(\eta, P)}{\partial P} \right)_{ik} \right|, \quad (19)$$

$$i = \overline{1,6}, k = \overline{1,8},$$

где  $P_{\Delta}^{\max} = (\bar{W}_{\Delta}, \bar{B}_{\Delta}, \bar{x}_{\Delta g}, \bar{y}_{\Delta g}, \bar{z}_{\Delta g}, \bar{x}_{\Delta B}, \bar{y}_{\Delta B}, \bar{z}_{\Delta B})^T$  — вектор максимальных по модулю отклонений параметров гидростатических сил и моментов от их номинальных значений.

Если в процессе движения АНПА величина  $|e_m|$  часто становится меньше некоторой допустимой положительной величины  $e_d$ , то разрывной сигнал (11) эффективнее заменить сигналом

$$\text{sat}(e_m) = \begin{cases} \text{sign}(e_m), & \text{если } |e_m| \geq e_d; \\ k_s e_m, & \text{если } |e_m| < e_d, \end{cases} \quad (20)$$

где  $k_s = 1/e_d$ .

Полученный закон управления скоростями движения АНПА (7), (8), (11), (17), (19) позволяет придать желаемые динамические свойства модели (10) при любых изменениях их параметров в диапазонах (6).

## Синтез контура управления положением АНПА

После синтеза контура управления скоростью движения АНПА выполняется синтез контура управления его положением и ориентацией. При этом пространственное движение АНПА при использовании закона управления (7), (8), (11), (17), (19) описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{v} + \Lambda v &= \dot{v}_d + \Lambda v_d, \\ \dot{\eta} &= J(\eta) v. \end{aligned} \quad (21)$$

Для синтеза системы управления положением АНПА систему (21) сведем к одному уравнению [14, 15]:

$$\ddot{\eta} = J(\dot{v}_d + \Lambda v_d) + (\dot{J} - J\Lambda)J^{-1}\dot{\eta}. \quad (22)$$

Уравнение, которое будет описывать желаемую динамическую модель движения АНПА в абсолютной СК, зададим в виде

$$\ddot{\eta} + \Lambda \dot{\eta} + \delta \eta = \Lambda \dot{\eta}_d + \delta \eta_d, \quad (23)$$

где  $\eta_d \in R^6$  — вектор желаемого положения и ориентации АНПА в абсолютной СК;  $\delta \in R^{6 \times 6}$  — диагональная матрица положительных коэффициентов, которую целесообразно выбрать в виде  $\delta = \Lambda^2/4$  [14], позволяющем перемещать АНПА в заданное положение с заданной ориентацией без перерегулирования.

Выразив в (23) переменную  $\dot{\eta}$  и приравняв полученное выражение к правой части уравнения (22), получим

$$\begin{aligned} J(\dot{v}_d + \Lambda v_d) + (\dot{J} - J\Lambda)J^{-1}\dot{\eta} &= \\ &= \Lambda(\dot{\eta}_d - \dot{\eta}) + \delta(\eta_d - \eta). \end{aligned} \quad (24)$$

Из уравнения (24) с учетом второго уравнения (21) можно получить

$$\begin{aligned} \dot{v}_d &= J^{-1}\delta(\eta_d - \eta) + \Lambda(v - v_d + J^{-1}\dot{\eta}_d) - \\ &- J^{-1}(\Lambda J + \dot{J})v. \end{aligned} \quad (25)$$

Очевидно, что выражение (25), учитывающее кинематику АНПА, обеспечивает его пространственное движение в абсолютной СК в соответствии с желаемой моделью движения, описываемой уравнением (23).

Для реализации системы управления, описываемой выражениями (7), (8), (11), (17), (19), (25), необходимо знать номинальные параметры АНПА и возможные диапазоны их изменения, а также задать матрицу  $\Lambda$ , описывающую его желаемые динамические свойства. Вход в насыщения движителей АНПА можно исключить с помощью дополнительных систем автоматического формирования программных скоростей движения АНПА [20, 21].

### Результаты моделирования

Для проверки эффективности предложенного подхода было проведено математическое моделирование в среде MATLAB. В процессе моделирования рассматривался АНПА, имеющий следующие параметры:

$$\begin{aligned}
 m_a &= 170 \text{ кг}, \\
 \text{моменты инерции } J_{xx} &= 10,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\
 J_{yy} &= 23,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, J_{zz} = 23,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\
 d_1 &= (18 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, 105 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, 105 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, \\
 &20 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, 80 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, 80 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}), \\
 d_2 &= (18 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, \\
 &20 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2, 80 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2, 80 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2), \\
 x_G &= 0,0 \text{ м}, y_G = 0,0 \text{ м}, z_G = -0,05 \text{ м}, \\
 x_B &= 0,0 \text{ м}, y_B = 0,0 \text{ м}, z_B = 0,0 \text{ м}, \\
 MA &= \text{diag}(15 \text{ кг}, 185 \text{ кг}, 185 \text{ кг}, 5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\
 &19,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, 19,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2).
 \end{aligned}$$

В процессе моделирования полагалось, что динамика движителей АНПА по каждой степени свободы описывается уравнениями вида  $\tau = 10(\tau_d - \tau)$ , где  $\tau_d$  — сигнал, формируемый системой управления.

Изменения параметров АНПА во время его движения:

$$\begin{aligned}
 m_\Delta &= 140 \text{ кг}, J_{\Delta xx} = 4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\
 J_{\Delta yy} &= 7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, J_{\Delta zz} = 7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\
 d_{\Delta 1}^{\max} &= (9 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, 50 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, \\
 &50 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}, 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, \\
 &30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, 30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}), \\
 d_{\Delta 2}^{\max} &= (9 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, 50 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, \\
 &50 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2, \\
 &30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2, 30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2), \\
 x_{\Delta B} &= 0,05 \text{ м}, y_{\Delta B} = 0,0 \text{ м}, \\
 z_{\Delta B} &= 0,1 \text{ м}, k_\tau = 0,1.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Диагональная матрица  $\Lambda$ , задающая желаемые динамические свойства АНПА, имела вид  $\Lambda = (0.4, 0.4, 0.4, 2, 2, 2)$ .

В процессе моделирования исследовалось движение АНПА в двух режимах. В первом режиме АНПА выходил из начальной точки с координатами (0 м, 0 м, 0 м, 0 рад, 0 рад, 0 рад) абсолютной СК в точку (10 м, 10 м, 5 м, 0 рад, 1,0 рад, 1,0 рад), а во втором выходил из той же точки, но двигался вдоль программной траектории  $(1.0t, 10 \cos(0.002t) - 10, 5)$ .

Результаты моделирования движения АНПА (законы изменения элементов вектора динамических ошибок  $\varepsilon_\eta = \eta_d - \eta = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\psi)^T$ ) при использовании системы управления, содержащей нелинейные регуляторы скорости (8) и положения (25), при номинальных значениях параметров АНПА показаны на рис. 2. Из представленных рисунков видно, что, если АНПА имеет номинальные параметры, то его выход в заданное положение осуществляется в соответствии с желаемым законом изменения координат, а динамические ошибки при его движении по траектории после затухания переходных процессов не превышают 0,2 м.

После изменения параметров АНПА (26) во время транспортировки груза возникает статическая ошибка по углу дифферента (рис. 3) за счет появления гидростатических моментов. Это недопустимо при маневрировании вблизи подводных объектов. А в процессе движения АНПА по траектории динамические ошибки по некоторым координатам возрастают до 3 м.

Введение дополнительного сигнала самонастройки по эталонной модели позволяет компенсировать негативные последствия от изме-

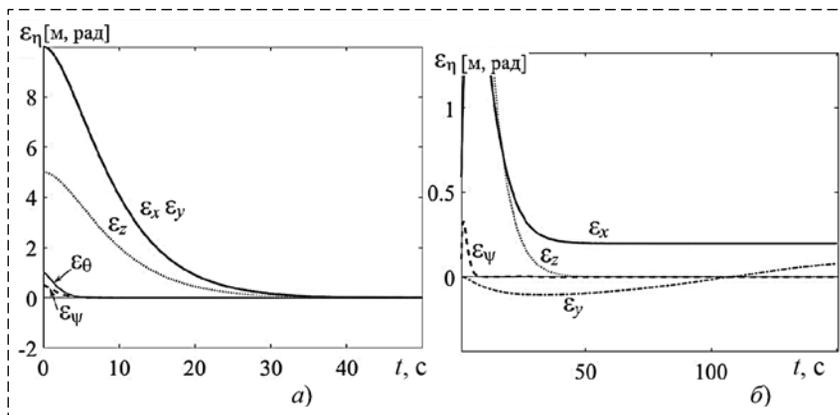


Рис. 2. Процесс изменения элементов вектора динамической ошибки АНПА при позиционном перемещении к заданной точке с заданной ориентацией (а) и при контурном управлении по заданной траектории (б)

Fig. 2. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at movement to target point with desired orientation (a) and tracking control along desired trajectory (b)

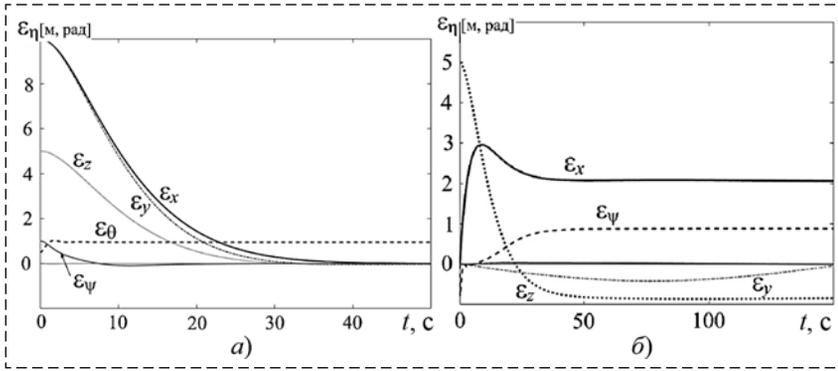


Рис. 3. Процесс изменения элементов вектора динамической ошибки при позиционном перемещении АНПА к заданной точке с заданной ориентацией (а) и при контурном управлении по заданной траектории (б) после отклонения его параметров от номинальных значений в соответствии с (26)

Fig. 3. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at movement to target point with desired orientation (a) and tracking control along desired trajectory (b) when AUV parameters deviate from its nominal values according with (26)

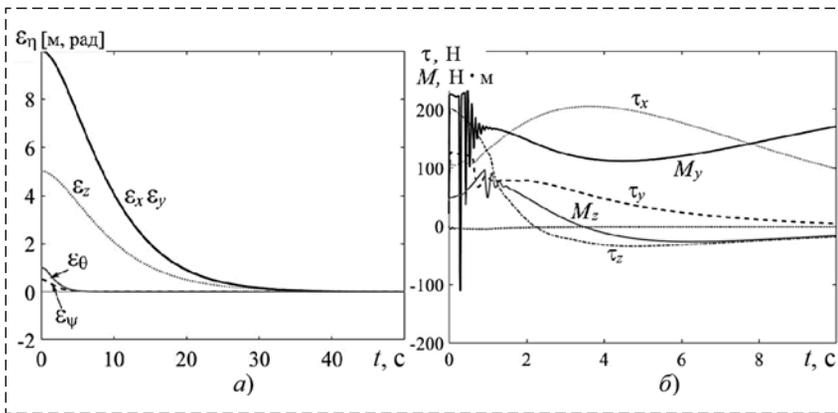


Рис. 4. Процесс изменения динамических ошибок АНПА (а), а также управляющих сил и моментов тяги движителей (б) при перемещении АНПА в заданную точку пространства

Fig. 4. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector (a) and control forces and torques (b) at movement to target point with desired orientation

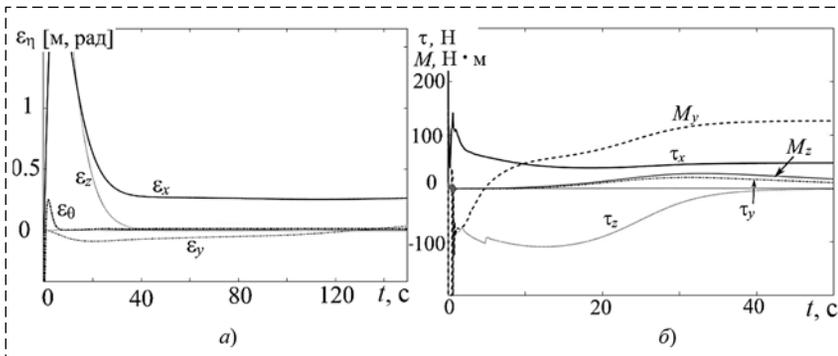


Рис. 5. Процесс изменения динамических ошибок АНПА (а), управляющих сил и моментов (б) при его движении по заданной траектории

Fig. 5. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector (a) and control forces and torques (b) at movement along desired trajectory

нений параметров АНПА. Из рис. 4, а видно, что при подходе АНПА к заданному положению с использованием системы управления (8), (11), (17), (25) статические ошибки не возникают, а разрывная составляющая сигнала

эти же процессы, когда параметры АНПА отличались от номинальных на величины (26). Из рис. 6 видно, что изменение параметров АНПА приводит к появлению перерегулирования и затягиванию переходных процессов по отдель-

этого управления с уменьшающейся амплитудой сигнала самонастройки присутствует только на начальном этапе его движения (рис. 4, б), когда производная выходного сигнала эталонной модели имеет максимальное значение, и действует всего в течение 1,5 с. После того, как ошибка  $e_m$  становится по модулю меньше  $e_d$ , сигнал управления (20) обеспечивает плавное изменение сил и моментов тяги всех движителей АНПА.

При движении АНПА вдоль заданной траектории (рис. 5) введение сигнала (20) при использовании системы управления (8), (11), (17), (25) позволяет ограничить значение динамической ошибки до 0,3 м. Это особо важно для обеспечения согласованного движения группы АНПА. При этом после окончания переходных процессов синтезированные системы, легко реализуемые на бортовых ЦВМ, во время контурного управления не используют разрывные сигналы.

Для сравнения на рис. 6, 7 показан процесс изменения координат АНПА при использовании в каждом его канале управления типовых ПИД регуляторов, параметры которых настраивались так, чтобы переходные процессы во всех каналах управления его линейными координатами завершались через 30 с, а вращательными — через 5 с и не имели перерегулирования.

На рис. 6, а показан процесс изменения ошибок АНПА с номинальными параметрами при его переходе из точки с координатами (0 м, 0 м, 0 м, 0 рад, 0 рад, 0 рад) абсолютной СК в точку с координатами  $\eta_d = (10 \text{ м}, 10 \text{ м}, 5 \text{ м}, 0 \text{ рад}, 1,0 \text{ рад}, 1,0 \text{ рад})$ , когда его параметры имели номинальные значения, а на рис. 6, б показаны

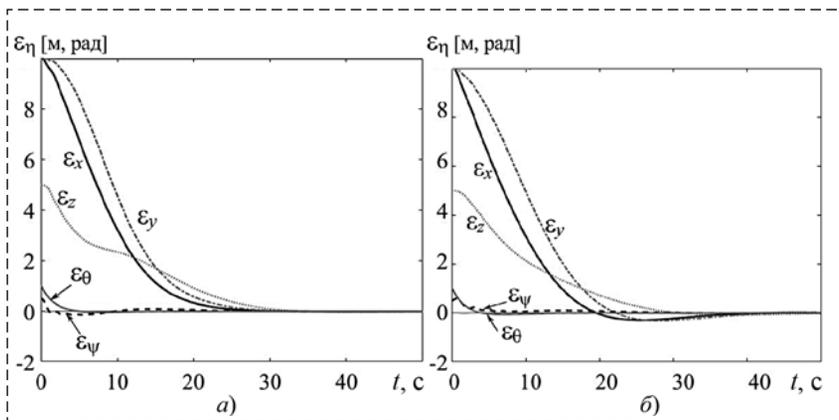


Рис. 6. Процесс изменения ошибок АНПА, использующих ПИД регуляторы при позиционном управлении

Fig. 6. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at position control when PID-controllers are used

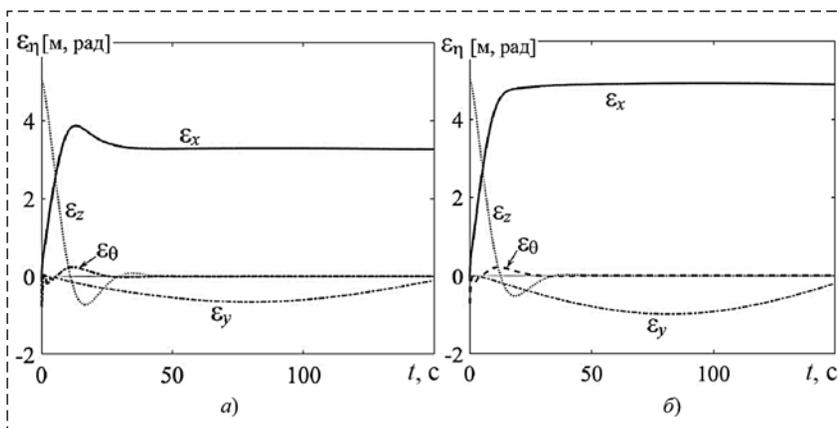


Рис. 7. Процесс изменения ошибок АНПА, использующих ПИД регуляторы при контурном управлении

Fig. 7. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at tracking control when PID-controllers are used

ным степеням свободы. Это может быть неприемлемо при необходимости маневрирования вблизи подводных сооружений.

На рис. 7 показана динамическая ошибка слежения по отдельным степеням свободы при использовании ПИД регуляторов для управления движением АНПА по траектории  $\eta_d = (1.0t, 10 \cos(0.002t) - 10, 5)$ . Из рис. 7, а видно, что значение динамической ошибки по координате  $x$  может превышать 3,2 м, а по координате  $y$  — 0,6 м при номинальных параметрах АНПА и, соответственно, 5 м по координате  $x$  и 1 м по координате  $y$  (рис. 7, б) при их отклонении на величины (26). При выполнении операций группой АНПА такие динамические ошибки неприемлемы.

Таким образом, результаты математического моделирования показали, что предложенная двухконтурная система управления с эталон-

ной моделью позволяет обеспечить высокоточное управление движением АНПА в различных режимах их работы и при больших изменениях параметров. Реализация этой системы не вызывает затруднений, а сигнал управления не содержит разрывных составляющих с большой амплитудой и не приводит к негативным воздействиям на механическую часть движительного комплекса АНПА.

## Заключение

В работе предложен метод синтеза системы управления пространственным движением АНПА, позволяющей учесть перекрестные связи между его степенями свободы, а также переменные или неопределенные параметры. Эта система содержит два контура. Первый включает в себя комбинированную систему, содержащую нелинейный регулятор для достижения желаемых динамических характеристик АНПА, когда его параметры равны номинальным значениям, и регулятор с самонастройкой по эталонной модели, обеспечивающей компенсацию неопре-

деленной или переменной части параметров. При этом параметры регулятора с эталонной моделью выбираются так, чтобы уменьшить возможную амплитуду разрывного сигнала управления скоростью движения АНПА. Второй контур представляет собой нелинейный регулятор положения, позволяющий учесть динамические свойства контура управления скоростью и кинематические свойства АНПА. Преимуществом предложенной системы управления по сравнению с традиционными, построенными на основе ПИД регуляторов, является более высокая точность управления при движении по сложным пространственным траекториям независимо от изменения параметров АНПА.

Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность синтезированной двухконтурной системы с эталонной моделью.

## Список литературы

1. **Yuh J., Marani G., Blidberg R.** Applications of marine robotic vehicles // *Intelligent Service Robotics*. 2011. N. 2. P. 221–231.
2. **Yu L. et al.** Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends // *Proc. of the 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Lancaster, United Kingdom. 2019. P. 1–6.
3. **Lei M.** Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 197, N. 1. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106824
4. **Juul D. L., McDermott M., Nelson E. L., Barnett D. M., Williams G. N.** Submersible control using the linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery method // *Proc. of IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (AUV'94)*, Cambridge, MA, USA. 1994. P. 417–425.
5. **Lakhwani D. A., Adhyaru D. M.** Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle // *Proc. of the 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, Ahmedabad. 2013. P. 1–6.
6. **Gonzalez J., Benezra A., Gomariz S., Sarriá D.** Limitations of linear control for Cormoran-AUV // *Proc. of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, 2012. P. 1726–1729.
7. **Wu H., Song S., You K., Wu C.** Depth control of model-free AUVs via reinforcement learning // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Vol. 49, N. 12. P. 2499–2510.
8. **Liu X., Zhang M., Rogers E.** Trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles based on fuzzy re-planning of a local desired trajectory // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, N. 12. P. 11657–11667.
9. **Narasimhan M., Singh S. N.** Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins // *Ocean Engineering*. 2006. Vol. 33. P. 404–416.
10. **Kooffigar H. R.** Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties // *Proc. of the 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, Akita, 2012. P. 192–196.
11. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** The synthesis of multi-channel adaptive variable structure system for the control of AUV // *Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2008. P. 2834–2839.
12. **Xu J., Wang M., Qiao L.** Dynamical sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 105. P. 54–63.
12. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2015. Vol. 51, N. 5. P. 462–470.
14. **Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.** Системы и устройства управления подводных роботов, М.: Наука, 2005, 270 с.
15. **Filaretov V., Yukhimets D.** Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle // *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJEM)*. 2012. Vol. 3, N. 3. P. 133–141.
16. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.** Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве / Под ред. В. Ф. Филаретова, Владивосток: Дальнаука, 2016, 400 с.
17. **Филаретов В. Ф.** Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов, Владивосток: ДВГТУ, 2000, 304 с.
18. **Slotine J.** Applied nonlinear control. Prentice-Hall, 1991, 461 p.
19. **Fossen T.** Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.
20. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Щербатюк А. Ф., Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е.** Новый метод контурного управления АНПА // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 8. С. 46–56.
21. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** The new strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018. Т. 19, № 7. С. 435–442.

## Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle

V. F. Filaretov, filaret@iacp.dvo.ru, D. A. Yukhimets, undim@iacp.dvo.ru,

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

*Corresponding author: Yukhimets Dmitry*, Dr.Sc., Associate Professor, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Accepted on July 30, 2020

### Abstract

*Currently, autonomous underwater vehicles (AUV) are increasingly used to perform tasks related to the maintenance of underwater communications and various underwater production complexes, as well as performing underwater technological operations. To effectively perform these operations, AUV must have high-quality control systems that will ensure their accurate movement both along long spatial trajectories formed during their movement to the objects of work, and when performing complex maneuvers near underwater infrastructure objects. At the same time, the main difficulty that arises in the process of synthesis of AUV control systems is the significant non-linearity of the dynamic models of these control objects, the presence of interactions between their degrees of freedom, as well as the uncertainty and variability of their parameters. In this paper, we propose a method for synthesizing the spatial motion control system of the AUV, which allows us to take into account these negative effects. This system contains two loops. The first loop includes a combined system containing a nonlinear controller to achieve the desired dynamic characteristics of the AUV, when its parameters are equal to the nominal values, and a controller with self-tuning according to the reference model, which provides compensation for an unknown or variable part of the parameters. In this case, the parameters of the controller with the reference model are selected to reduce the possible amplitude of the discontinuous signal for controlling the AUV velocity. The second loop is a non-linear position controller that allows to take into account the dynamic properties of the velocity control loop and the*

kinematic properties of the AUV. The advantage of the proposed control system in comparison with traditional ones based on PID controllers is a higher control accuracy when moving along complex spatial trajectories, regardless of changes in the AUV parameters. The simulation results confirmed the high efficiency of the synthesized two-loop control system.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle, control system, nonlinear control, self-tuning, reference model, parametric uncertainty

**Acknowledgements:** This work was supported by Russian Foundation for Basic Researches (grants No 19-08-00347).

For citation:

**Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 134–144.

DOI: 10.17587/mau.22.134-144

## References

1. **Yuh J., Marani G., Blidberg R.** Applications of marine robotic vehicles, *Intelligent Service Robotics*, 2011, no. 2, pp. 221–231.
2. **Yu L. et al.** Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends, *Proc. of the 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Lancaster, United Kingdom, 2019, pp. 1–6.
3. **Lei M.** Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation, *Ocean Engineering*, 2020, vol. 197, no. 1, doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106824.
4. **Juul D. L., McDermott M., Nelson E. L., Barnett D. M., Williams G. N.** Submersible control using the linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery method, *Proc. of IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (AUV'94)*, Cambridge, MA, USA, 1994, pp. 417–425.
5. **Lakhwani D. A., Adhyaru D. M.** Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle, *Proc. of the 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, Ahmedabad, 2013, pp. 1–6.
6. **Gonzalez J., Benezra A., Gomariz S., Sarriá D.** Limitations of linear control for Cormoran-AUV, *Proc. of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Graz*, 2012, pp. 1726–1729.
7. **Wu H., Song S., You K., Wu C.** Depth control of model-free AUVs via reinforcement learning, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 2499–2510.
8. **Liu X., Zhang M., Rogers E.** Trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles based on fuzzy re-planning of a local desired trajectory, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, vol. 68, no. 12, pp. 11657–11667.
9. **Narasimhan M., Singh S. N.** Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins, *Ocean Engineering*, 2006, vol.33, pp. 404–416.
10. **Koofigar H. R.** Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties, *Proc. of the 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, Akita, 2012, pp. 192–196.
11. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** The synthesis of multi-channel adaptive variable structure system for the control of AUV, *Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2008, pp. 2834–2839.
12. **Xu J., Wang M., Qiao L.** Dynamical sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles, *Ocean Engineering*, 2015, vol. 105, pp. 54–63.
13. **Lebedev A. V., Filaretov V. F.** Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 462–470.
14. **Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yukhimets D. A.** Systems and devices for control of underwater robots, Moscow, Nauka, 2005, 270 p (in Russian).
15. **Filaretov V., Yukhimets D.** Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle, *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, 2012, vol. 3, no 3, pp. 133–141.
16. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** Features of Synthesis of High-Accuracy Control System of Movement and Spatial Stabilization of Underwater Vehicles, Vladivostok, Dalnauka, 2016, 400 p. (in Russian).
17. **Filaretov V. F.** Self-tuning systems for control of manipulator actuators, Vladivostok, Publishing house of DVG TU, 2000, 304 p (in Russian).
18. **Fossen T.** Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.
19. **Slotine J.** Applied nonlinear control, Prentice-Hall, 1991, 461 p.
20. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** The new strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 435–442.
21. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Scherbatyuk A. F., Mursalimov E. Sh., Tuphanov I. E.** The Method of Tracking Control of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 46–56 (in Russian).