СЕКЦИЯ 5

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ СИСТЕМАМИ

DOI: 10.25728/mlsd.2023.0531

УПРАВЛЕНИЕ МАЛОСКОРОСТНЫМ ПОДВОДНЫМ РОБОТОМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Антипов А.С., Краснов Д.В.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
scholess18@mail.ru, dim93kr@mail.ru

Аннотация. Объектом управления является малоскоростной полноприводный подводный робот, математическая модель которого содержит неопределенные параметры. На основе приведения системы к каноническому виду разработан закон управления с компенсацией неопределенностей. Предложен наблюдатель состояния и возмущений с кусочно-линейными корректирующими воздействиями, обеспечивший информационную поддержку закона управления.

Ключевые слова: подводный робот, неопределенность, робастное управление, наблюдатель возмущений.

Введение

Подводные роботы применяются для наблюдения за окружающей средой и разными объектами. Кроме того, они служат для исследования водного пространства и проведения инженерных работ на большой глубине, недоступной для человека. Среди подводных роботов есть автономные аппараты и те, которые управляются с помощью оператора [1]. Они отличаются конструктивными особенностями и областью применения.

Общей задачей автоматического управления для подводных роботов является отслеживание требуемого положения и ориентации. Модель объекта управления отличается существенной нелинейностью. Робот функционирует при действии параметрических и внешних возмущений (различных течений, сил гидродинамического демпфирования). Поэтому актуальной проблемой является разработка робастных и высокоточных систем слежения.

Выделяют две группы методов синтеза систем слежения: опирающиеся на математическую модель объекта и не использующие ее. К первой группе относят методы оптимального управления [2]. Они нацелены на максимизацию или минимизацию заданных критериев качества. Однако эти методы чувствительны к неопределенностям, и на практике они становятся квазиоптимальными. Среди методов второй группы можно выделить ПИД-регулирование [3-4], управление на скользящих режимах [5-6], нейросетевой подход [7]. ПИД-регуляторы широко распространены в различных инженерных приложениях в силу простоты своей реализации. Однако настройка их коэффициентов сильно зависит от условий, в которых работает объект. Она может быть трудоемкой. Управление на скользящих режимах способно обеспечить робастность по отношению к согласованным возмущениями. Однако в практических приложениях нельзя формировать разрывные управляющие силы и моменты, они не реализуемы исполнительными устройствами. Для реализации нейросетевого подхода требуется обучающая выборка, которая формируется в условиях, близких к условиям реального функционирования объекта. Поэтому при изменении внешних условий необходимо перенастраивать нейросеть.

В данной работе рассматривается математическая модель малоскоростного и полноприводного подводного робота (имеющего шесть степеней свободы и шесть управлений) в условиях неопределенности и при неполных измерениях. Цель состоит в синтезе робастной системы слежения, реализация которой опирается на границы изменения неопределенностей и не требует перенастройки, когда неизвестные параметры объекта находятся в допустимых пределах. Работа имеет следующую структуру. В разделе 1 описана математическая модель объекта управления. Формализована постановка задачи слежения за заданным положением и ориентацией робота. В разделе 2 в предположении наличия всех измерений разработан базовый закон управления, позволяющий компенсировать неопределенности. В разделе 3 предложен наблюдатель состояния и возмущений, обеспечивающий информационную поддержку системы слежения в случае неполных измерений. В разделе 4 представлены результаты численного моделирования разработанных алгоритмов в системе MATLAB-Simulink.

1. Математическая модель объекта управления. Постановка задачи

В предположении малости линейных скоростей математическая модель объекта управления описывается уравнениями [8]:

$$\dot{\eta} = R(\eta_2)\upsilon, \tag{1}$$

$$\dot{\upsilon} = M^{-1}(F_g(\eta_2) + F_b(\eta_2) + Ju), \tag{2}$$

где $\eta = [x\ y\ z\ \varphi\ \theta\ \psi]^T \in R^{6\times1}$ – вектор положения и ориентации робота, задаваемый в неподвижной системе координат (СК), $\eta_1 = [x\ y\ z]^T$, $\eta_2 = [\varphi\ \theta\ \psi]^T$; $\upsilon = [\dot{x}\ \dot{y}\ \dot{z}\ \dot{\phi}\ \dot{\theta}\ \dot{\psi}]^T \in R^{6\times1}$ – вектор линейных и угловых скоростей робота в подвижной СК, $\upsilon_1 = [\dot{x}\ \dot{y}\ \dot{z}]^T$, $\upsilon_2 = [\dot{\phi}\ \dot{\theta}\ \dot{\psi}]^T$.

Уравнение (1) определяет преобразование скорости из подвижной СК в неподвижную с помощью известной матрицы поворота $R(\eta_2) = \begin{bmatrix} R_1(\eta_2) & 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} & R_2(\eta_2) \end{bmatrix}$:

$$\begin{gathered} R_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\psi\mathrm{c}\theta & -\mathrm{s}\psi\mathrm{c}\varphi + \mathrm{c}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{s}\varphi & \mathrm{s}\psi\mathrm{s}\varphi + \mathrm{c}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{c}\varphi \\ \mathrm{s}\psi\mathrm{c}\theta & \mathrm{c}\psi\mathrm{c}\varphi + \mathrm{s}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{s}\varphi & -\mathrm{c}\psi\mathrm{s}\varphi + \mathrm{s}\psi\mathrm{s}\theta\mathrm{c}\varphi \\ -\mathrm{s}\theta & \mathrm{c}\theta\mathrm{s}\varphi & \mathrm{c}\theta\mathrm{c}\varphi \end{bmatrix}, \\ R_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \mathrm{s}\varphi\mathrm{tg}\theta & \mathrm{c}\varphi\mathrm{tg}\theta \\ 0 & \mathrm{c}\varphi & -\mathrm{s}\varphi \\ 0 & \mathrm{s}\varphi/\mathrm{c}\theta & \mathrm{c}\varphi/\mathrm{c}\theta \end{bmatrix}, \end{gathered} \tag{3}$$

где $\mathrm{s} = \sin(.)$, $\mathrm{c} = \cos(.)$.

Уравнение (2) описывает динамику механической системы, где $M \in R^{6\times6}$ – матрица инерции, $F_g(\eta_2) \in R^{6\times1}$ – вектор гравитационных сил, $F_b(\eta_2) \in R^{6\times1}$ – вектор сил плавучести, $u \in R^{6\times1}$ – вектор управляющих сигналов, которые идут на моторы. Они пересчитываются в силы и моменты с помощью матрицы $J \in R^{6\times6}$.

Отметим, что в модели (1)–(2) не учтены центробежные силы и силы Кориолиса, силы гидродинамического демпфирования. Кроме того, не учитывается динамика моторов.

Пусть $\eta_d(t) = [x_d(t)\ y_d(t)\ z_d(t)\ \varphi_d(t)\ \theta_d(t)\ \psi_d(t)]^T \in R^{6\times1}$ – заданная допустимая траектория, которую должна отслеживать выходная векторная переменная $\eta(t)$. Требуется синтезировать управление $u \in R^{6\times1}$ в форме обратной связи, которое обеспечит это отслеживание с некоторой точностью:

$$|\eta_i(t) - \eta_{di}(t)| \le \delta_{1i}, i = \overline{1,6}. \tag{4}$$

Задача (4) решается в следующих предположениях.

1. Переменные состояния η и υ принадлежат некоторой допустимой рабочей области:

$$|\eta_i(t)| \le H_i,\ |\upsilon_i(t)| \le V_i,\ i = \overline{1,6}, \tag{5}$$

угол θ может изменяться в интервале

$$-\pi/2 < \theta < \pi/2.$$

В этом случае элементы матрицы поворота $R(\eta_2)$ (3) являются ограниченными.

2. Матрицы $M \in R^{6\times6}$ и $J \in R^{6\times6}$ представимы в виде:

$$M = M_0 + \Delta M,\ J = J_0 + \Delta J, \tag{6}$$

где M_0, J_0 – известные номинальные невырожденные матрицы, ΔM, ΔJ – неопределенные матрицы, которые ограничены по норме.

3. Аналитический вид векторов $F_g(\eta_2) \in R^{6\times 1}$ и $F_b(\eta_2) \in R^{6\times 1}$ неизвестен. Эти вектора можно рассматривать как внешние возмущения. Имеются только границы изменения их нормы в рабочей области (5).

4. Измерениям доступны положение и ориентация робота $\eta(t)$, эталонная траектория $\eta_d(t)$, ее производная $\dot{\eta}_d(t)$ и угловые скорости $\upsilon_2(t)$. Датчики линейных скоростей отсутствуют.

В следующих разделах представлен основной результат работы – решение проблемы (4) в указанных предположениях.

2. Синтез базового закона управления

Для достижения целевого условия (4) и обеспечения высокого качества регулирования предлагается скомпенсировать неопределенности за счет комбинированного закона управления. Введем невырожденную замену переменных:

$$\begin{aligned} e_1 &= \eta - \eta_d \in R^{6\times 1}, \\ e_2 &= R(\eta_2)\upsilon - \dot{\eta}_d \in R^{6\times 1}. \end{aligned} \tag{7}$$

Она приводит исходную систему (1)–(2) к каноническому виду

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2, \\ \dot{e}_2 &= B_0(\eta_2)u + e_3(\eta,\upsilon,t), \end{aligned} \tag{8}$$

где $B_0(\eta_2) = R(\eta_2)M_0^{-1}J_0$ – известная номинальная матрица управления, которая определяется известными номинальными матрицами M_0, J_0 (6) и известной матрицей поворота $R(\eta_2)$ (3); $\Delta B(\eta_2) = R(\eta_2)[M^{-1}\Delta J - M_0^{-1}\Delta M M^{-1}J_0]$ – неопределенная матрица управления, $e_3(\eta,\upsilon,t) = \dot{R}(\eta_2)\upsilon + \Delta B(\eta_2)u + R(\eta_2)M^{-1}(F_g(\eta_2) + F_b(\eta_2)) - \ddot{\eta}_d(t)$ – неизвестный векторный сигнал, который будем трактовать как неопределенности. В силу (5) справедливы ограничения на невязку e_2 и сигнал e_3 вместе с его производной:

$$\begin{aligned} &|e_{2i}(t)| \le E_{2i}, \\ &|e_{3i}(t)| \le E_{3i}, |\dot{e}_{3i}(t)| \le E_{4i}, t \ge 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Тогда при наличии сигналов e_1, e_2 и e_3 на основе канонической системы (8) строится базовый закон комбинированного управления:

$$u = -(B_0(\eta_2))^{-1}[e_3 + K_1e_1 + K_2e_2], \tag{10}$$

линеаризующий замкнутую систему [9], где $K_1 = \mathrm{diag}(k_{1i})$ и $K_2 = \mathrm{diag}(k_{2i})$, $k_{1i} > 0$, $k_{2i} > 0$, $i = \overline{1,6}$.

Замкнутая система (8), (10) принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2, \\ \dot{e}_2 &= -K_1e_1 - K_2e_2. \end{aligned} \tag{11}$$

Она устойчива при любых значениях $k_{1i} > 0$, $k_{2i} > 0$, $i = \overline{1,6}$. Кроме того, за счет выбора этих значений в виде коэффициентов полинома Ньютона или Баттерворта можно регулировать качество переходных процессов [10].

В следующем разделе будет разработан наблюдатель состояния и возмущений, который при неполных измерениях позволит восстановить сигналы, необходимые для управления.

3. Синтез наблюдателя состояния и возмущений

Представим векторные переменные e_1 и e_2 (7) в виде

$$e_1=\begin{bmatrix} e_{1p} \\ e_{1o} \end{bmatrix}\in R^{6\times 1},\ e_2=\begin{bmatrix} e_{2p} \\ e_{2o} \end{bmatrix}\in R^{6\times 1}, \tag{12}$$

где $e_{1p}=\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \end{bmatrix}^T$ – ошибки слежения за заданным положением, $e_{1o}=\begin{bmatrix} e_{14} & e_{15} & e_{16} \end{bmatrix}^T$ – ошибки слежения за заданной ориентацией; $e_{2p}=\begin{bmatrix} e_{21} & e_{22} & e_{23} \end{bmatrix}^T$, $e_{2o}=\begin{bmatrix} e_{24} & e_{25} & e_{26} \end{bmatrix}^T$ – соответствующие производные ошибок слежения. Исходя из доступных измерений, известны только сигналы $e_1\in R^{6\times 1}$ и $e_{2o}\in R^{3\times 1}$. Следовательно, для реализации закона управления (10) требуется получить оценки неизвестных сигналов $e_{2p}\in R^{3\times 1}$ и $e_3\in R^{6\times 1}$ с помощью наблюдателя состояния. Учитывая, что векторная переменная e_3 зависит от параметрических и внешних возмущений, задача оценивания может быть решена с некоторой точностью:

$$\left|e_{2pi}(t)-\hat{e}_{2pi}(t)\right|\le\Delta_2,\left|e_{3i}(t)-\hat{e}_{3i}(t)\right|\le\Delta_3,T>0, \tag{13}$$

где $\hat{e}_{2pi}(t)$ и $\hat{e}_{3i}(t)$ – оценки искомых сигналов $e_{2pi}(t)$ и $e_{3i}(t)$ (12) соответственно, Δ_2 и Δ_3 – заданная точность оценивания, T – заданное время оценивания.

Для решения задачи (13) построим наблюдатель на основе системы (8), дополненной динамикой изменения неопределенностей e_3:

$$\begin{aligned} &\dot{z}_1=[z_{21}\ z_{22}\ z_{23}]^T+v_1, \\ &\dot{z}_2=z_3+B_0(\eta_2)u+v_2, \\ &\dot{z}_3=v_3, \end{aligned} \tag{14}$$

где $z_1\in R^{3\times 1}$, $z_2\in R^{6\times 1}$, $z_3\in R^{6\times 1}$ – переменные наблюдателя, $v_1\in R^{3\times 1}$, $v_2\in R^{6\times 1}$, $v_3\in R^{6\times 1}$ – его корректирующие воздействия. С учетом измеряемых сигналов установим следующие начальные условия в наблюдателе:

$$\begin{aligned} &z_1(0)=e_{1p}(0)\in R^{3\times 1}, \\ &z_2(0)=\begin{bmatrix} 0_{3\times 1} \\ e_{2o}(0) \end{bmatrix}\in R^{6\times 1}, \\ &z_3(0)=\vec{0}\in R^{6\times 1}. \end{aligned} \tag{15}$$

Система относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_{1p}=e_{1p}-z_1\in R^{3\times 1}$, $\varepsilon_2=e_2-z_2\in R^{6\times 1}$, $\varepsilon_{2p}=[\varepsilon_{21},\varepsilon_{22},\varepsilon_{23}]^T\in R^{3\times 1}$, $\varepsilon_3=e_3-z_3\in R^{6\times 1}$ имеет вид:

$$\begin{aligned} &\dot{\varepsilon}_{1p}=\varepsilon_{2p}-v_1, \\ &\dot{\varepsilon}_2=\varepsilon_3-v_2, \\ &\dot{\varepsilon}_3=\dot{e}_3-v_3. \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} &\varepsilon_{1p}(0)=0_{3\times 1}, \\ &\varepsilon_2(0)=\begin{bmatrix} e_{2p}(0) \\ 0_{3\times 1} \end{bmatrix}, \\ &\varepsilon_3(0)=e_3(0). \end{aligned}$$

Для стабилизации системы (16) и уменьшения всплесков оценочных сигналов введем ограниченные кусочно-линейные корректирующие воздействия [11-12]:

$$v_1 = M_1 \mathrm{sat}(L_1\varepsilon_1) = \left(m_{11}\mathrm{sat}\left(l_{11}\varepsilon_{11}\right),\dots,m_{13}\mathrm{sat}\left(l_{13}\varepsilon_{13}\right)\right)^{\mathrm{T}},$$

$$\hat{\varepsilon}_2 = \begin{bmatrix} v_1 \\ e_{2o} - \begin{bmatrix} z_{24} \\ z_{25} \\ z_{26} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \in R^{6\times 1},\ v_2 = M_2 \mathrm{sat}(L_2\hat{\varepsilon}_2) = \left(m_{21}\mathrm{sat}\left(l_{21}\hat{\varepsilon}_{21}\right),\dots,m_{26}\mathrm{sat}\left(l_{26}\hat{\varepsilon}_{26}\right)\right)^{\mathrm{T}}, \tag{17}$$

$$\hat{\varepsilon}_3 = v_2,\ v_3 = M_3 \mathrm{sat}(L_3\hat{\varepsilon}_3) = \left(m_{31}\mathrm{sat}\left(l_{31}\hat{\varepsilon}_{31}\right),\dots,m_{36}\mathrm{sat}\left(l_{36}\hat{\varepsilon}_{36}\right)\right)^{\mathrm{T}},$$

$$M_i = \mathrm{diag}(m_{ij}),\ L_i = \mathrm{diag}(l_{ij}),\ m_{ij} = \mathrm{const} > 0,\ l_{ij} = \mathrm{const} > 0,$$

где

$$\mathrm{sat}\left(l_{1j}\varepsilon_{1j}\right) = \begin{bmatrix} +1, \varepsilon_{1j} > 1/l_{1j}, \\ l_{1j}\varepsilon_{1j}, \left|\varepsilon_{1j}\right| \le 1/l_{1j}, \\ -1, \varepsilon_{1j} < -1/l_{1j},\ j = 1,\dots,3. \end{bmatrix}$$
$$\mathrm{sat}\left(l_{ij}\hat{\varepsilon}_{ij}\right) = \begin{bmatrix} +1, \hat{\varepsilon}_{ij} > 1/l_{ij}, \\ l_{ij}\hat{\varepsilon}_{ij}, \left|\hat{\varepsilon}_{ij}\right| \le 1/l_{ij}, \\ -1, \hat{\varepsilon}_{ij} < -1/l_{ij}, i = 2,3,\ j = 1,\dots,6. \end{bmatrix} \tag{18}$$

Амплитуды m_{ij} ограничивают корректирующие воздействия (17)–(18), а также вместе с большими коэффициентами l_{ij} влияют на точность оценивания.

Лемма [11]. Если в системе (16), (17) начальные условия и векторная переменная $\dot{e}_3(t)$ ограничены известными константами (9), то тогда для любых $T > 0,\ \Delta_3 > \Delta_2 > 0$ найдутся такие действительные числа $m_{1i}^*, m_{2j}^*, m_{3j}^*, l_{1i}^*, l_{2j}^*, l_{3j}^* > 0$, что при всех $m_{1i}, m_{2j}, m_{3j}, l_{1i}, l_{2j}, l_{3j}$:

$$\begin{aligned} &m_{1i} \ge m_{1i}^*, m_{2j} \ge m_{2j}^*, m_{3j} \ge m_{3j}^*, \\ &l_{1i} \ge l_{1i}^*, l_{2j} \ge l_{2j}^*, l_{3j} \ge l_{3j}^*, i = 1,2,3;\ j = 1,\dots,6 \end{aligned} \tag{19}$$

неравенства (13) будут выполнены.

При этом искомые оценки сигналов $e_{2pi}(t)$ и $e_{3i}(t)$ предоставят переменные наблюдателя:

$$\hat{e}_2 = \begin{bmatrix} z_{21} \\ z_{22} \\ z_{23} \\ e_{2o} \end{bmatrix} \in R^{6\times 1},\ \hat{e}_3 = z_3 \in R^{6\times 1}. \tag{20}$$

Следовательно, при отсутствии измерений $e_{2p}(t),\ e_3(t)$ и с учетом (20) закон управления (10) будет реализован как

$$u = -(B_0(\eta_2))^{-1}\left[z_3 + K_1(\eta - \eta_d) + K_2 \begin{bmatrix} z_{21} \\ z_{22} \\ z_{23} \\ e_{2o} \end{bmatrix} \right]. \tag{21}$$

Достигаемая точность стабилизации ошибок слежения (4) зависит от точности оценивания (13), которую можно обеспечить сколь угодно малой [11].

Отметим, что получить оценку неопределенностей e_3 также допустимо с помощью построения наблюдателя минимально возможного порядка 9, как описано в [13]. В отличие от [13], в данной работе порядок наблюдателя был увеличен за счет добавления интегратора для переменной z_3 (14), что позволяет отфильтровать оценку e_3. Таким образом, предложенное решение более робастно по отношению к шумам измерений по сравнению с решением из [13].

4. Результаты моделирования

Для проверки эффективности разработанных алгоритмов было проведено численное моделирование в системе MATLAB-Simulink.

Допустимая рабочая область изменения скоростей (5):

$$|\upsilon_i(t)| \le 3 \text{ (м/с)},\ i=\overline{1,3},\ |\upsilon_i(t)| \le 5 \text{ (рад/с)},\ i=\overline{4,6}.$$

Для моделирования использовались следующие матрицы M и J в механической системе (2):

$$M = \mathrm{diag}(9,\ 9,\ 9,\ 0{,}8,\ 0{,}8,\ 1{,}1),$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0{,}8374 & -0{,}8246 & 0 & 0 \\ -0{,}6894 & -0{,}6242 & 0 & 0 & -0{,}6426 & -0{,}6154 \\ 0{,}7009 & -0{,}6018 & 0 & 0 & -0{,}7346 & 0{,}6219 \\ -0{,}1528 & -0{,}1041 & 0 & 0 & 0{,}1701 & 0{,}224 \\ -0{,}1054 & 0{,}1661 & 0{,}1324 & -0{,}1253 & 0{,}1387 & 0{,}1199 \\ -0{,}1156 & -0{,}2222 & 0{,}2759 & 0{,}2130 & 0{,}1570 & 0{,}1851 \end{bmatrix}.$$

Внешние возмущения $F_g(\eta_2)$ и $F_b(\eta_2)$ описывались функциями [8]:

$$F_g(\eta_2) = \begin{bmatrix} G(\eta_2) \\ 0_{3\times1} \end{bmatrix},\ G(\eta_2) = R_1^{-1}(\eta_2)[0, 0, 88, 2]^T,$$

$$F_b(\eta_2) = \begin{bmatrix} B(\eta_2) \\ S_b(\eta_2)b \end{bmatrix},\ B(\eta_2) = R_1^{-1}(\eta_2)[0, 0, -95, 2634]^T,$$

$$S_b(\eta_2) = \begin{bmatrix} 0 & -B_3 & B_2 \\ B_3 & 0 & -B_1 \\ -B_2 & B_1 & 0 \end{bmatrix},\ b = [-0{,}05, 0, -0{,}02]^T.$$

Для демонстрации целесообразности компенсации неопределенностей в системе (2) и для последующего сравнительного анализа были реализованы два закона управления. Первый – разработанный закон (21) с компенсацией неопределенностей e_3 с помощью наблюдателя (14), (17)–(18). Второй – в виде ПД-регулятора без компенсации e_3:

$$u = -(B_0(\eta_2))^{-1}\left[K_1(\eta - \eta_d) + K_2 \begin{bmatrix} z_{21} \\ z_{22} \\ z_{23} \\ e_{2o} \end{bmatrix}\right]. \tag{22}$$

Для синтеза систем наблюдения и управления использовались только номинальные матрицы M_0 и J_0:

$$M_0 = \mathrm{diag}(7,\ 7,\ 7,\ 0{,}35,\ 0{,}35,\ 0{,}35),$$

$$J_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0{,}8 & -0{,}8 & 0 & 0 \\ -0{,}6 & -0{,}6 & 0 & 0 & -0{,}6 & -0{,}6 \\ 0{,}6 & -0{,}6 & 0 & 0 & -0{,}6 & 0{,}6 \\ -0{,}1 & -0{,}1 & 0 & 0 & 0{,}1 & 0{,}1 \\ -0{,}1 & 0{,}1 & 0{,}05 & -0{,}05 & 0{,}1 & 0{,}1 \\ -0{,}1 & -0{,}1 & 0{,}2 & 0{,}2 & 0{,}1 & 0{,}1 \end{bmatrix},$$

а также границы изменения неопределенностей. Исходя из них и точности оценивания $\Delta_{2i} = 0{,}07$ (м/с), $i = \overline{1{,}3}$, $\Delta_{2i} = 0{,}03$ (рад/с), $i = \overline{4{,}6}$ и $\Delta_{3i} = 0{,}2$ (м/с^2), $i = \overline{1{,}3}$, $\Delta_{3i} = 0{,}05$ (рад/с^2), $i = \overline{4{,}6}$, на основе (19) были приняты коэффициенты наблюдателя (14):

$$
\begin{aligned}
&L_1 = \mathrm{diag}(0{,}83,\ 0{,}83,\ 0{,}5),\ M_1 = \mathrm{diag}(30,\ 30,\ 50),\\
&L_2 = \mathrm{diag}(0{,}5,\ 0{,}5,\ 0{,}5,\ 0{,}35,\ 0{,}35,\ 0{,}35),\ M_2 = \mathrm{diag}(30,30,30,100,100,100),\\
&L_3 = \mathrm{diag}(0{,}17,\ 0{,}17,\ 0{,}17,\ 0{,}09,\ 0{,}09,\ 0{,}09),\ M_3 = \mathrm{diag}(30,30,30,400,400,400).
\end{aligned} \tag{23}
$$

На основе анализа замкнутой системы (11) были выбраны коэффициенты регулятора:

$$K_1 = \mathrm{diag}(16,16,16,36,36,36),\ K_2 = \mathrm{diag}(8,8,8,12,12,12). \tag{24}$$

Начальные условия объекта были нулевыми. При этом начальные условия наблюдателя задавались согласно (15). Для интегрирования динамических систем применялся явный метод Эйлера с шагом 10^{-2} (с). Было проведено два эксперимента, цель которых состояла в стабилизации положения и ориентации робота соответственно. Во всех экспериментах коэффициенты наблюдателя и регуляторов были одинаковыми (23)–(24).

В первом эксперименте требовалось стабилизировать заданное значение глубины 1 (м) и нулевые значения остальных переменных: $\eta_d(t) = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$. На рис. 1 приведены графики глубины $z(t)$ и ошибки слежения $e_{13}(t)$ при использовании регулятора (21) с компенсацией неопределенностей и регулятора (22) без компенсации неопределенностей. На рис. 2 представлены графики положений $x(t)$ и $y(t)$, определяющих перемещение робота вперед/назад и влево/вправо. На рис. 3 представлены графики неизвестной производной ошибки слежения $e_{23}(t)$ и ее оценки $z_{23}(t)$ с помощью наблюдателя, а также график ошибки оценивания $e_{23}(t) - z_{23}(t)$. На рис. 4 продемонстрирован график оценки неопределенностей $e_{33}(t)$ с помощью переменной наблюдателя $z_{33}(t)$.

Во втором эксперименте требовалось, чтобы угол рысканья $\psi(t)$ отслеживал заданную траекторию $\psi_d(t) = 0{,}7\cos(t)$ при стабилизации остальных переменных состояния в нулевых значениях. На рис. 5–8 представлены графики, аналогичные графикам на рис. 1–4.

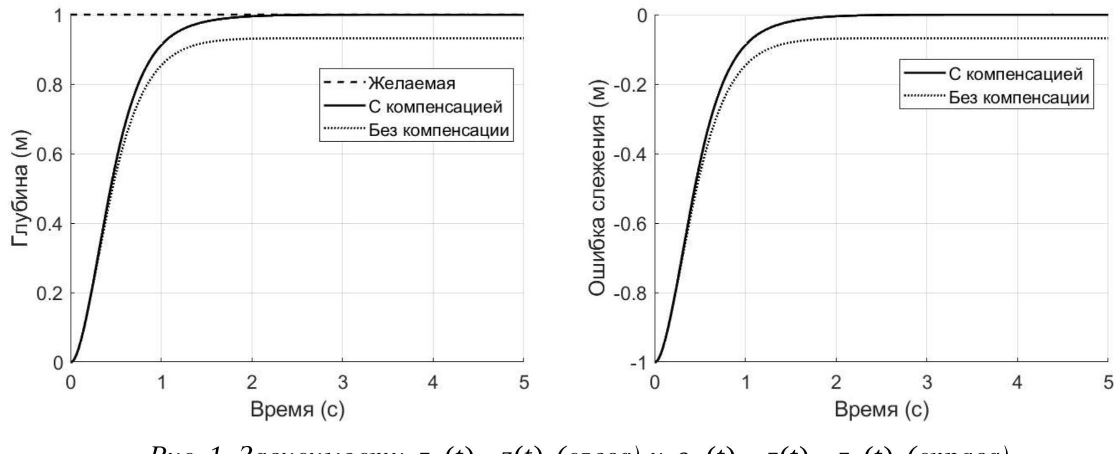

Рис. 1. Зависимости $z_d(t)$, $z(t)$ (слева) и $e_{13}(t) = z(t) - z_d(t)$ (справа)

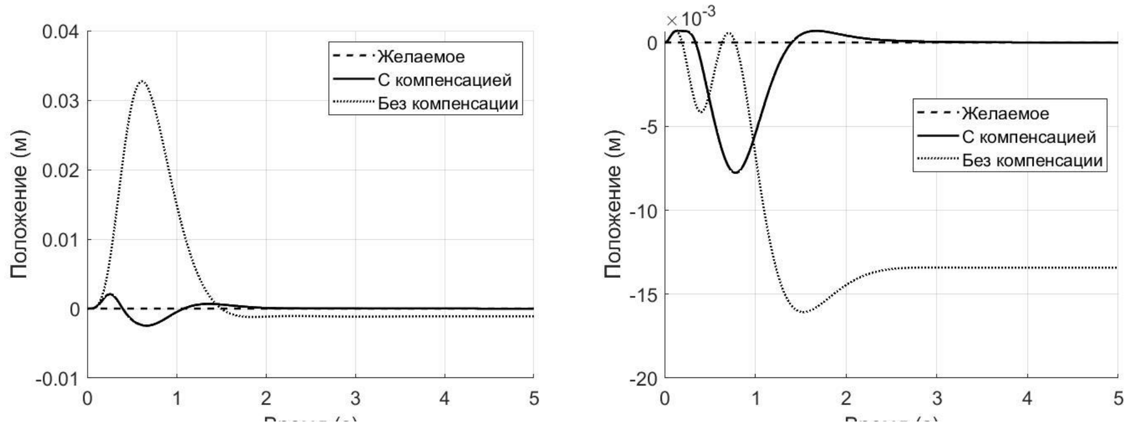

Рис. 2. Зависимости $x(t)$ *(слева) и* $y(t)$ *(справа)*

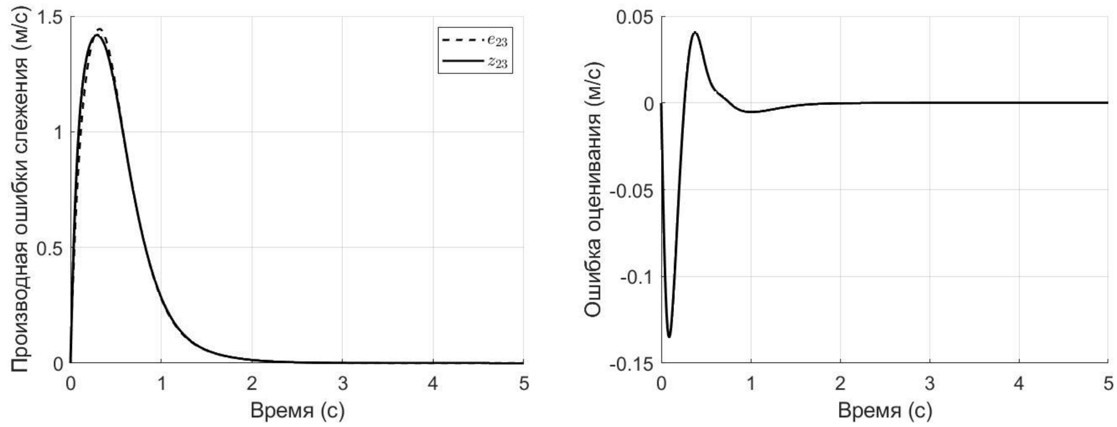

Рис. 3. Зависимости $e_{23}(t)$, $z_{23}(t)$ *(слева) и* $\varepsilon_{23}(t) = e_{23}(t) - z_{23}(t)$ *(справа)*

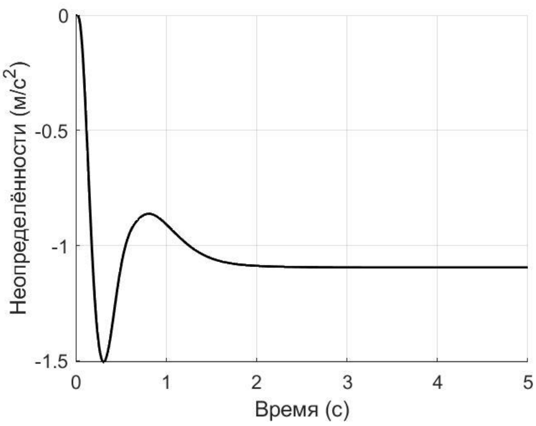

Рис. 4. Зависимость $z_{33}(t)$

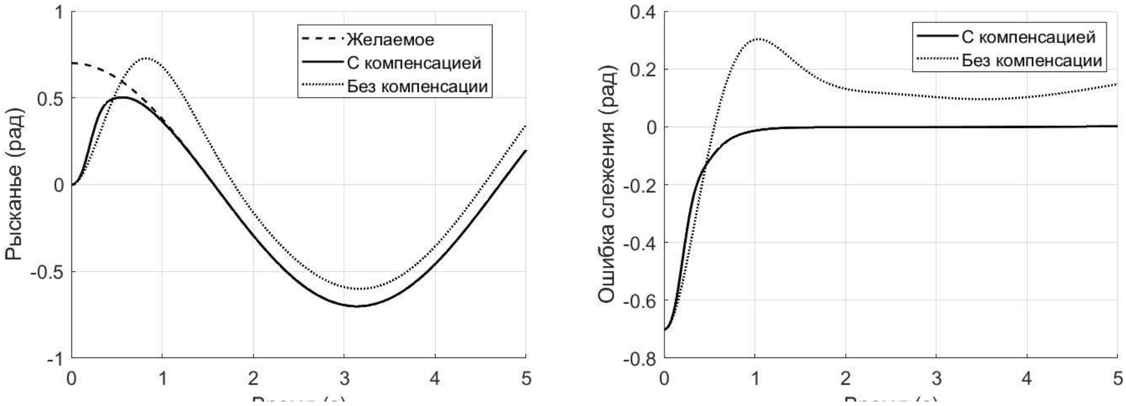

Рис. 5. Зависимости $\psi_d(t)$, $\psi(t)$ *(слева) и* $e_{16}(t)=\psi(t)-\psi_d(t)$ *(справа)*

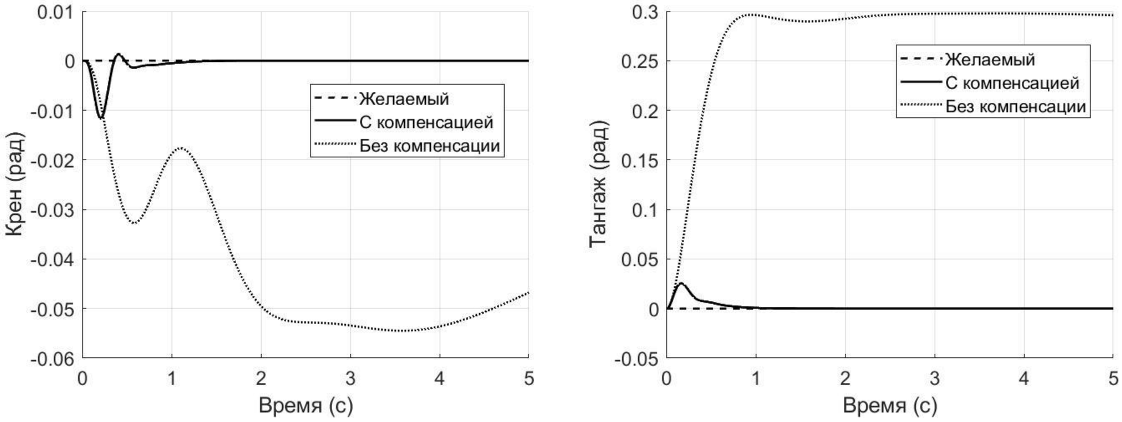

Рис. 6. Зависимости $\varphi(t)$ *(слева) и* $\theta(t)$ *(справа)*

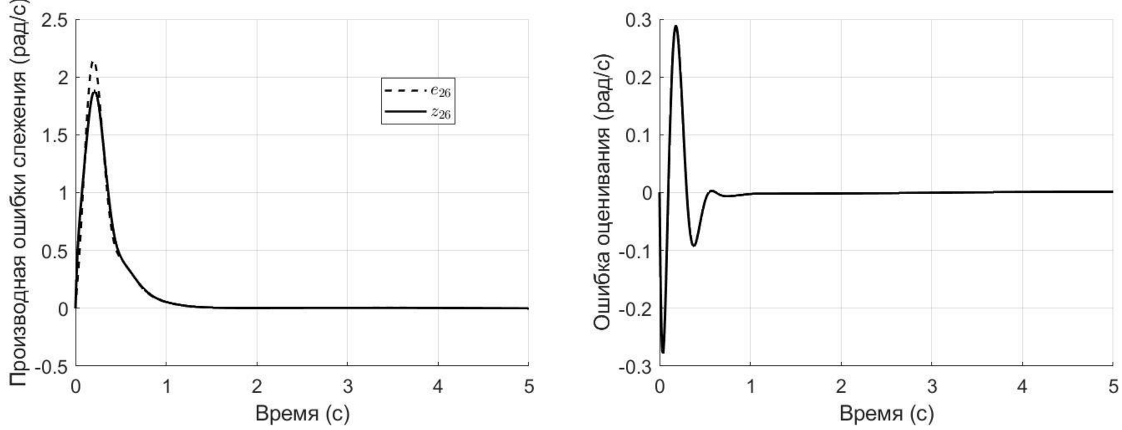

Рис. 7. Зависимости $e_{26}(t)$, $z_{26}(t)$ *(слева) и* $\varepsilon_{26}(t)=e_{26}(t)-z_{26}(t)$ *(справа)*

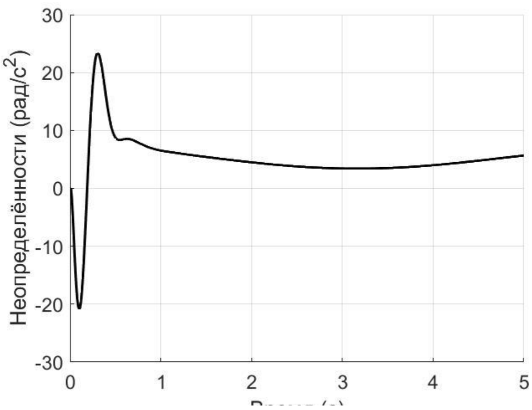

Рис. 8. Зависимость $z_{36}(t)$

В обоих экспериментах была достигнута цель управления – удалось обеспечить стабилизацию заданной глубины (рис. 1) и отслеживание углом рысканья заданной траектории (рис. 5) при стабилизации нулевых значений остальных переменных состояния (рис. 2, 6) в малой окрестности нуля. В данных экспериментах построение наблюдателя обеспечило следующие значения показателей качества оценивания производной ошибки слежения (рис. 3, 7) для замкнутой системы (2), (21):

$$|e_{23}(t) - z_{23}(t)| \le 0{,}0203 \text{ (м/с)}, \ t \ge 0{,}5 \text{ (с)}.$$
$$|e_{26}(t) - z_{26}(t)| \le 0{,}0151 \text{ (рад/с)}, \ t \ge 0{,}5 \text{ (с)}.$$

Данное оценивание вместе с компенсацией неопределенностей $e_3(t)$ (рис. 4, 8) привело к следующим значениям показателей качества регулирования для замкнутой системы (2) с разработанным законом управления (21):

$$\begin{aligned} &|e_{13}(t)| \le 0{,}08 \text{ (м)}, \ t \ge 1{,}03 \text{ (с)}, \ |e_{13}(t)| \le 2{,}60 \cdot 10^{-4} \text{ (м)}, \ t \ge 3 \text{ (с)}. \\ &|e_{16}(t)| \le 0{,}21 \text{ (рад)}, \ t \ge 0{,}35 \text{ (с)}, \ |e_{16}(t)| \le 0{,}0019 \text{ (рад)}, \ t \ge 3 \text{ (с)}. \end{aligned} \tag{25}$$

Для сравнения представлены значения аналогичных показателей качества для замкнутой системы (2) с ПД-регулятором (22) без компенсации неопределенностей $e_3(t)$:

$$\begin{aligned} &|e_{13}(t)| \le 0{,}08 \text{ (м)}, \ t \ge 1{,}49 \text{ (с)}, \ |e_{13}(t)| \le 0{,}068 \text{ (м)}, \ t \ge 3 \text{ (с)}. \\ &|e_{16}(t)| \le 0{,}21 \text{ (рад)}, \ t \ge 1{,}49 \text{ (с)}, \ |e_{16}(t)| \le 0{,}2049 \text{ (рад)}, \ t \ge 3 \text{ (с)}. \end{aligned} \tag{26}$$

Из (25)–(26) следует, что компенсация неопределенностей оказалась целесообразной. Она привела к уменьшению ошибок слежения в установившемся режиме до 261 раза по сравнению с ПД-регулятором без компенсации. Таким образом, результаты моделирования подтвердили эффективность разработанных алгоритмов.

5. Заключение

Цель работы состояла в синтезе робастной системы слежения для малоскоростного полноприводного подводного робота при наличии неопределенностей. Цель была достигнута с помощью разработанного наблюдателя с кусочно-линейными корректирующими воздействиями. Его переменная предоставила оценку неопределенностей, что позволило применить метод линеаризации обратной связью. Результаты численного моделирования показали, что предложенное решение помогает повысить точность регулирования по сравнению с использованием стандартного ПД-регулятора.

В будущем планируется применить разработанные алгоритмы к более полной и адекватной математической модели автономного подводного робота, в том числе с учетом динамики моторов. Кроме того, предполагается провести сравнительный анализ с другими современными методами автоматического управления.

Литература

1. *He Y., Wang D.B., Ali Z.A.* A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle // Measurement and Control. – 2020. – Vol. 53, N 9–10. – P. 1561–1570.
2. *Chin C.S., Lau M., Seet G.* Dynamic Modelling and Cascaded Controller Design Of A Low-Speed Maneuvering ROV // Advanced Technologies: Research, Development and Application Book. – Advanced Robotic Systems International, Vienna, Austria, 2006. – P. 159–186.
3. *Rúa S., Vásquez R.E.* Development of a Low-Level Control System for the ROV Visor3 // International Journal of Navigation and Observation. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1–12.
4. *Kermorgant O.* A Dynamic Simulator for Underwater Vehicle-Manipulators // Proc. of the International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. – Bergamo, 2014. – P. 25–36.
5. *García-Valdovinos L.G., Salgado-Jiménez T., Bandala-Sánchez M., Nava-Balanzar L., Hernández-Alvarado R., Cruz-Ledesma J.A.* Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2014. – Vol. 11, N 1. – P. 1–16.
6. *Salgado-Jiménez T., García-Valdovinos L.G., Delgado-Ramírez G.* Control of ROVs using a Model-free 2nd-Order Sliding Mode Approach // Sliding Mode Control. – IntechOpen, 2011. – P. 347–368.
7. *Свищев Н.Д., Рыбаков А.В.* Интеллектуальное управление подводным роботом на основе искусственной нейронной сети // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – N 4 (44). – С. 103–119.
8. *Abdulov A.V., Abramenkov A.N.* Extra Steering for ROV Control System by Tracking the Gamepad Orientation // Proc. of the 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation: IEEE, 2021. – P. 1041–1045.
9. *Glushchenko A.I., Lastochkin K.A., Petrov V.A.* Development of Two-Wheeled Balancing Robot Optimal Control System based on Its Feedback Linearization // Proc. of the 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 2019. – P. 1–6.
10. *Рублевский В.М., Букреев В.Г., Шандарова Е.Б.* Синтез субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного аппарата // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – N 3(40). – С. 47–54.
11. Краснов Д.В., Антипов А.С. Синтез двухконтурного наблюдателя в задаче управления однозвенным манипулятором в условиях неопределенности // Проблемы управления. – 2021. – N 4. – С. 27-39.
12. *Kokunko J.G, Krasnov D.V., Utkin A.V.* Two Methods for Synthesis of State and Disturbance Observers for an Unmanned Aerial Vehicle // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82, N 8. – P. 1426–1441.
13. *Krasnova S.A., Antipov A.S., Krasnov D.V., Utkin A.V.* Cascade Synthesis of Observers of Mixed Variables for Flexible Joint Manipulators Tracking Systems under Parametric and External Disturbances // Electronics. – 2023. – – Vol. 12, N 8. – P. 1–25.