

**А. Ахмад**, аспирант, aws.ahmad318@gmail.com, **А. С. Ющенко**, д-р техн. наук, проф., yusch@bmstu.ru, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)

## Метод управления подводным роботом с волнообразным движителем с использованием активного подавления помех и нечеткой логики

*Статья посвящена разработке и анализу алгоритмов управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) с волнообразным движителем. Проводится анализ и краткий обзор работ, в которых рассматриваются динамическая и кинематическая модели подводного робота с волнообразным плавником. Представлена модель робота во взаимодействии с окружающей средой в библиотеке Simscape-MATLAB. Для решения задачи управления движением подводного робота с волнообразным движителем по курсу и по глубине предлагается применить метод активного управления подавлением помех ADRC (Active Disturbance Rejection Control). Это метод управления, основанный на расширении модели системы путем введения дополнительной переменной состояния, представляющей все, что не включается в математическое описание самой системы. Виртуальное состояние объекта управления оценивается в режиме онлайн с помощью наблюдателя состояния и используется при формировании управляющего сигнала, чтобы учесть фактическое возмущение, действующее на систему. Преимущества предлагаемого метода заключаются в том, что он не требует точного аналитического описания динамики АНПА, в частности, аналитического описания связи между управляемыми параметрами движения плавника и соответствующим движением робота. Для решения этой задачи применяются методы нечеткой логики, основанные на законах физики и гидродинамики. Приводятся результаты моделирования движения АНПА при управлении по курсу и по глубине при наличии быстропеременных внешних возмущений с применением полной нелинейной динамической модели с шестью степенями свободы. Проведенные исследования подтверждают работоспособность разработанной модели и предложенного способа управления.*

**Ключевые слова:** волнообразное движение, плавник, гидродинамика, метод ADRC, нечеткая логика, внешние возмущения

### Введение

Сегодня существенно расширилась область применения робототехники, которая в настоящее время включает промышленность, сельское хозяйство, медицину, военную сферу. В связи с этим возросла важность исследований и разработок в области управления и проектирования роботов различного типа, в том числе летающих, наземных и подводных роботов (АНПА) [1–6].

В последние годы особое внимание обращено на морскую среду, в том числе арктического континента, будь то использование ее ресурсов или проведение поисково-спасательных операций. Начались работы по разработке роботов, способных работать в различных условиях и использующих новые способы передвижения, заимствованные у живых организмов, обитающих в этой среде [5–9].

Один из принципов движения, исследуемых в последнее время, — это принцип перемещения за счет волнообразного движения плавников, свойственного скатам и некоторым другим подводным существам [6–9]. Этот способ движения позволяет обеспечить значительную маневренность, а также стабилизацию при наличии течения. Кроме того, такой способ по-

зволяет перемещаться не только в воде, но и по дну моря, а также "выползть" на берег и перемещаться в пределах береговой зоны. Все эти особенности позволяют существенно расширить круг задач, выполняемых подводными роботами как при дистанционном управлении, так и в автономном плавании. Отметим относительную бесшумность их работы, что также является преимуществом при решении ряда задач. Вышеупомянутые преимущества показывают важность разработки и проектирования автономной системы управления этого типа роботов, для того чтобы они могли автономно выполнять свои задачи в труднодоступных или опасных зонах.

В данной статье рассматриваются два аспекта, связанные с построением системы автономного управления подводным роботом с волнообразным плавником. Первый заключается в том, чтобы обеспечить достаточно точное управление роботом по курсу и по глубине на основе технологии Active Disturbance Rejection Control (ADRC). Второй аспект состоит в использовании нечеткой логики для определения взаимосвязи между силами, генерируемыми плавниками, и параметрами распространяющейся волны, что необходимо для организации управления движением робота.

## Модель волнообразного движения

У каждого вида живых существ есть свой уникальный способ перемещения, который адаптирован к среде. Скаты используют принцип волнообразного движения [9–11]. Этот принцип состоит в том, что плавник совершает волнообразное движение, при котором волна движется по направлению от передней кромки плавника к задней кромке или в обратном направлении, создавая гидродинамическую силу, обеспечивающую движение вперед или назад соответственно. Параметры волнообразного движения зависят от соотношения параметров колебательного движения плавника, включая амплитуду, частоту и длину волны [12].

Упрощенная (дискретная) кинематическая схема гибкого плавника показана на рис. 1. Базовая плоскость, относительно которой происходят колебания ребер плавника, отмечена штриховыми линиями. Волнообразное движение  $i$ -го плавника можно определить как его колебание относительно базовой плоскости:

$$\begin{aligned} \theta_i(i, t) &= \Delta\theta_i + \theta_B = \\ &= \theta_{i\max}(x_i) \sin(2\pi t f \pm \phi_i) + \theta_B, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\phi_i = 2\pi \frac{(i-1)L}{(n-1)\lambda} = 2\pi(i-1) \frac{\Delta L}{\lambda} = (i-1)\Delta P$ .

Здесь  $t$  — время;  $\theta_{i\max}$  — амплитуда колебаний  $i$ -го ребра относительно базовой плоскости;  $f$  — частота колебаний;  $\lambda$  — длина волны;  $\theta_B$  — угол отклонения базовой плоскости от плоскости  $XZ$  на рис. 1;  $\phi_i$  — фаза колебаний  $i$ -го ребра;  $\Delta P$  — фазовый сдвиг между двумя

соседними ребрами, который не должен быть больше  $\pi/2$  ( $\Delta P \leq \pi/2$ ). Знак "±" перед сдвигом по фазе в уравнении (1) определяет направление распространения волны по плавнику. Знак "плюс" указывает на то, что генерируемая волна идет от положительного направления к отрицательному направлению по оси  $X$ , а генерируемая осевая сила  $F_P$  имеет противоположное направление. Знак "минус" означает, что волна идет в противоположную сторону. В обоих случаях генерируемая сила  $F_N$  всегда находится в базовой плоскости и направлена вниз, перпендикулярно силе  $F_P$ .

## Модель подводного робота

Модель динамики подводного робота должна описывать движение робота с шестью степенями свободы с учетом действия гидростатических сил, гравитации и плавучести, а также гидродинамических сил, сопротивления воды и подъемной силы, создаваемой корпусом робота, движущегося в воде. Необходимо также учесть дополнительные эффекты, вызванные ускорением воды, вытесненной подводным аппаратом, возмущающими силами от подводных течений и силами тяги от плавников.

Модель робота должна соответствовать принятой в гидромеханике инерциальной системе координат  $O_E X_E Y_E Z_E$  (NED-North-East-Down), которую мы совместим с собственной системой координат робота  $O_b X_b Y_b Z_b$  с центром в центре масс робота, оси которой совпадают с главными осями конструкции робота и со-

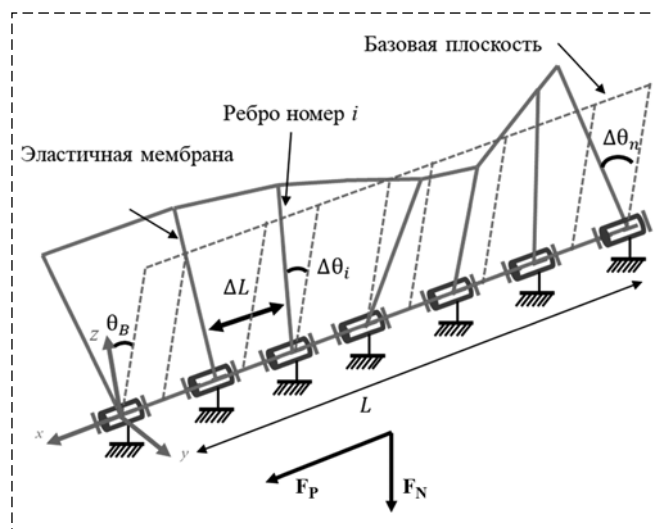


Рис. 1. Дискретная кинематическая схема плавника  
Fig. 1. Discrete kinematic scheme of the fin

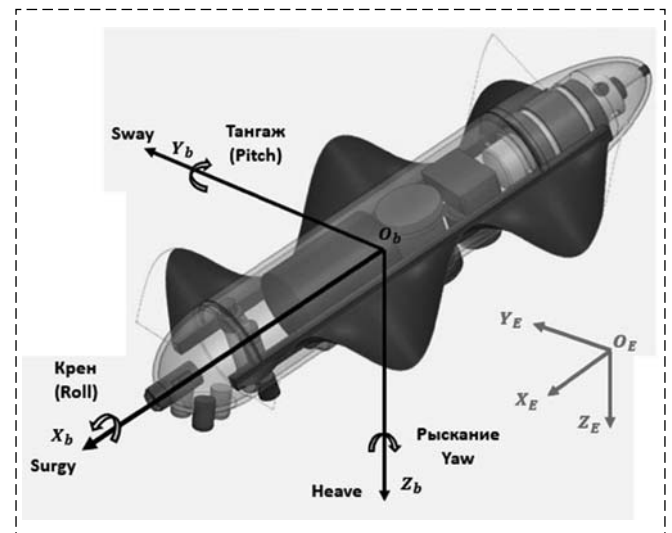


Рис. 2. Системы координат робота  
Fig. 2. The coordinate systems of the robot

Таблица 1  
Table 1

Обозначение SNAME для морских аппаратов [13]

Common notation SNAME for marine vehicle's motion [13]

Описание маневра	Обозначение	Силы	$v_1$	$\eta_1$
Движение в направлении $X$	Surge	$X$	$u$	$x$
Движение в направлении $Y$	Sway	$Y$	$v$	$y$
Движение в направлении $Z$	Heave	$Z$	$w$	$z$
Описание маневра	Обозначение	Моменты	$v_2$	$\eta_2$
Вращение вокруг оси $X$	Roll	$K$	$p$	$\phi$
Вращение вокруг оси $Y$	Pitch	$M$	$q$	$\theta$
Вращение вокруг оси $Z$	Yaw	$N$	$r$	$\psi$

ответствуют углам тангажа, крена и рысканья (surge, sway, heave) (рис. 2). Мы будем использовать также международные обозначения, принятые для морских аппаратов SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers), приведенные в табл. 1 [13].

### Кинематическая модель

В инерциальной системе отсчета  $O_E X_E Y_E Z_E$  обозначим  $\eta_1 = [x, y, z]^T$  — вектор координат центра масс робота,  $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$  — вектор координат углов Эйлера, которые описывают положение и ориентацию робота согласно табл. 1. Векторы линейной и угловой скоростей в системе координат робота  $O_b X_b Y_b Z_b$  равны соответственно  $v_1 = [u, v, w]^T$  и  $v_2 = [p, q, r]^T$ .

Кинематическая модель робота может быть записана следующим образом [14]:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}_e(\mathbf{R}_I^B) \dot{\eta}; \quad (2)$$

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}_e^{-1}(\mathbf{R}_B^I) \mathbf{v}; \quad (3)$$

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{J}_e(\mathbf{R}_I^B)$  — матрица поворота из инерциальной системы координат в систему координат робота;  $\mathbf{J}_e^{-1}(\mathbf{R}_B^I)$  — матрица поворота из системы координат робота в инерциальную систему координат. Эти матрицы можно записать следующим образом:

$$\mathbf{J}_e(\mathbf{R}_I^B) = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_B^I & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}(\eta_2) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_e^{-1}(\mathbf{R}_B^I) = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_B^I & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}^{-1}(\eta_2) \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{J}(\eta_2)$  — матрица Якоби;  $\mathbf{R}_B^I$  — матрица вращения, выражающая преобразование из инерциальной системы отсчета в собственную систему координат робота:

$$\mathbf{J}(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\theta & c\theta c\phi \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\mathbf{J}^{-1}(\eta_2) = \frac{1}{c\theta} \begin{bmatrix} 1 & s\phi s\theta & c\phi s\theta \\ 0 & c\phi c\theta & -c\theta s\phi \\ 0 & -s\theta & c\phi \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_I^B = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & s\phi c\theta \\ s\psi s\phi + c\psi \theta c\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_B^I = (\mathbf{R}_I^B)^{-1} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi \theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta s\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix}.$$

Здесь обозначено:  $c\phi = \cos\phi$ ,  $s\phi = \sin\phi$ ,  $c\psi = \cos\psi$ ,  $s\psi = \sin\psi$ . Отметим, что матрица Якоби  $\mathbf{J}(\eta_2)$  вырождена при  $\theta = \frac{(2l+1)\pi}{2}$ .

### Динамическая модель

Как видно из рис. 2, конструкция робота обладает симметрией относительно продольной и поперечной осей. Для упрощения модели мы сделаем следующие предположения:

- движение по крену не учитывается ввиду значительного расстояния между центром тяжести и центром плавучести и относительно большой площади контакта робота с водой в вертикальном направлении;
- можно пренебречь связью между движением по глубине и по курсу;
- демпфирование можно приближенно считать линейным, т. е. эффектом нелинейного демпфирования можно пренебречь.

С учетом этих предположений основное уравнение динамики подводного аппарата может быть упрощено и записано следующим образом [17]:

$$\mathbf{M}_v \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_v(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E, \quad (8)$$

где  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_\omega, 0, \tau_q, \tau_r]^T$  — вектор управления;  $\tau_u, \tau_\omega$  — силы, развиваемые волной в направлении движения (surge) и подъема (heave), т. е. силы, за счет которых происходит управление роботом;  $\tau_q, \tau_r$  — моменты тангажа и рыскания в связанной с роботом системе координат  $O_b X_b Y_b Z_b$ ;  $\boldsymbol{\tau}_E = [\tau_{uE}, \tau_{vE}, \tau_{\omega E}, 0, 0, \tau_{rE}]^T$  — вектор внешних возмущений,  $\tau_{uE}, \tau_{vE}, \tau_{\omega E}$  — возмущения, вызванные покачиванием и подъемом аппарата,  $\tau_{rE}$  — момент возмущения, возникающий при рыскании аппарата.

Матрица  $\mathbf{M}_v = \mathbf{M}_A + \mathbf{M}_{RB}$  включает матрицу присоединенной массы  $\mathbf{M}_A$  и матрицу инерции  $\mathbf{M}_{RB}$  исследуемого робота [14]:

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{26} \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Присоединенная масса создает дополнительный вклад за счет кориолисова и центробежного ускорений. Можно показать, что матричное выражение для суммарного эффекта от кориолисова ускорения имеет вид [14]:

$$\mathbf{C}_v = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -m_{33}\omega & -m_{22}v \\ 0 & 0 & 0 & -m_{33}\omega & 0 & m_{11}u \\ 0 & 0 & 0 & m_{22}v & -m_{11}u & 0 \\ 0 & -m_{33}\omega & -m_{22}v & 0 & m_{66}r & -m_{55}q \\ m_{33}\omega & 0 & m_{11}u & -m_{66}r & 0 & 0 \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 & m_{55}q & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{C}_{RB}$  — матрица, описывающая эффект Кориолиса, обусловленный движением твердого тела;  $\mathbf{C}_A$  — матрица, описывающая эффект Кориолиса, вызванный добавленной массой.

Матрица демпфирования  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  в уравнении (8) в общем случае определяется как

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D} + \mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|) > 0 \forall \mathbf{v}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{D}$  — матрица линейного демпфирования;  $\mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|)$  — матрица квадратичного демпфирования. Если скорости робота достаточно высоки, то слагаемым  $\mathbf{D}$  можно пренебречь. В противном случае можно, наоборот, пренебречь слагаемым  $\mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|)$ . В нашем случае скорость робо-

та считается малой, и мы пренебрегаем слагаемым  $\mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|)$ . Таким образом, в нашем случае  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  — это матрица демпфирования, включающая все силы дрейфа  $F_{drag}$  и подъемной силы  $F_{lift}$ . Коэффициенты этой матрицы считаются постоянными. Для полностью погруженного тела можно представить эту матрицу в виде [14]

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -diag(X_u, Y_v, Z_\omega, 0, M_q, N_r) - diag(X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{\omega|\omega}|\omega|, 0, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|), \quad (12)$$

где  $X_u, Y_v, Z_\omega, M_q, N_r$  — компоненты линейного гидродинамического демпфирования;  $X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{\omega|\omega}|\omega|, 0, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|$  — компоненты квадратичного гидродинамического демпфирования.

В формуле (8)  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  — гидростатические эффекты, которые включают в себя совместное действие гравитации и плавучести в инерциальной системе координат. В системе координат  $O_b X_b Y_b Z_b$  можно записать:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -z_B B c\theta s\phi \\ -z_B B s\theta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $W = mg$  — сила тяжести, которая действует на центр масс робота, который совпадает с началом системы координат робота  $O_b X_b Y_b Z_b$ , т. е.  $[x_G, y_G, z_G]^T = [0, 0, 0]^T$ ;  $B = -\rho W_0 g$  — архимедова сила, действующая на центр плавучести  $COB$  с координатами в системе координат робота,  $[x_B, y_B, z_B]^T = [0, 0, z_B]^T$ ;  $W_0$  — объем робота;  $\rho$  — плотность среды.

## Стратегия и модель управления

Управление подводным роботом рассматриваемого типа должно быть обеспечено относительно глубины погружения и по углу рыскания  $\psi$ . Это должно быть достигнуто за счет параметров волны, образуемой плавниками. В свою очередь, параметры волны зависят от параметров движения плавника, которыми и достигается управление движением робота. К последним относятся  $F_L, F_R$  — частоты движения левого и правого плавников, соответственно, которые определяют силу воздействия плавников на внешнюю среду. Знак частоты в формуле

(1), как отмечено выше, является условным и зависит от направления их движения, т. е. определяет направление создаваемой силы по оси  $X$ : если частота имеет знак "+", то сила направлена назад, если знак "-", то сила направлена вперед. Основным параметром волны является ее максимальная амплитуда  $\theta_{\max}$ .

Создать гидродинамическую модель, связывающую движение робота с амплитудой волны, довольно сложно, тем более, что во время движения робота под водой система подвержена колебаниям и даже неустойчивости по ряду причин, включая нелинейные и изменяющиеся во времени характеристики турбулентности внешнего потока воды. В связи с этим для разработки контроллера был применен метод нечеткой логики, позволяющий связать управляемые параметры движения с желаемым результатом на основании физических законов.

Вторая проблема, возникающая при проектировании управления АНПА, заключается в том, что во время движения робота под водой система подвержена колебаниям за счет изменяющихся во времени характеристик турбулентности внешнего потока воды. В определенной мере устойчивость к внешним возмущениям может быть обеспечена в системе с обратной связью обычным ПИД регулятором. Однако представляется более эффективным в данном случае использовать для этой цели контроллер с активным подавлением помех ADRC (Active Disturbance Rejection Controller). Схема системы управления с нечетким контроллером приведена на рис. 3. Это система с обратной связью по заданным параметрам движения. Она содержит два последовательно соединенных контроллера. В первом вычисляется ошибка между заданными и реальными, измеренными параметрами движения, т. е. углом рыскания  $\psi$ , ли-

нейной скоростью в системе координат робота  $u$ , а также глубиной робота  $z$ . Для обеспечения устойчивости и качества процесса управления в целом здесь используется ADRC-контроллер, позволяющий также уменьшить влияние внешних возмущений [16, 17]. Во втором контроллере, вырабатывающем управляющие сигналы, используется метод нечеткой логики вместо аналитического описания гидродинамики робота.

Заметим, что настройка первого контроллера уже не может быть выполнена традиционным способом и требует предварительного моделирования полученной системы вместе со вторым контроллером (нечетким), который должен быть настроен предварительно исходя из законов гидродинамики.

### Нечеткий контроллер

Нечеткий контроллер включает в себя три основных блока: фаззификации (приведения к нечеткости) входных переменных, нечеткой логики, обеспечивающий решение задачи, и дефаззификации, т. е. приведения к четкости полученного решения.

В первом блоке формируются значения новых лингвистических переменных, соответствующие как входным, так и выходным переменным нечеткого контроллера. К входным мы выше отнесли  $(\tau_u, \tau_\omega, \tau_r)$ , а к выходным —  $(\theta_{\max}, \theta_B, F_L, F_R, \phi)$ , а соответствующие им лингвистические переменные обозначим  $(T_u, T_\omega, T_r)$  и  $(P_{\theta_{\max}}, P_{\theta_B}, P_\phi, P_{F_L}, P_{F_R})$ . Нечеткие значения выбранных лингвистических переменных приведены в табл. 2.

Заметим, что нечеткий контроллер представляет собой параллельно работающие контроллеры по каждому из требуемых выходов,

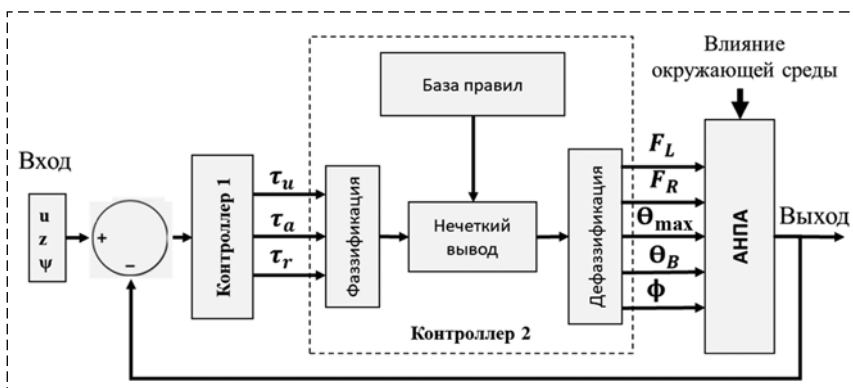


Рис. 3. Схема системы управления

Fig. 3. Control system diagram

т. е. по максимальной амплитуде  $\theta_{\max}$ , по частоте  $F_L, F_R$ , по углу отклонения  $\theta_B$  и по фазовому сдвигу  $\phi$ . Эти значения определяются с помощью функций принадлежности, выбранных на основании естественных соотношений. Предполагается, что для каждого из нечетких значений в табл. 2 выбрана треугольная функция принадлежности. Они задаются в пределах определенных ограничений, которые здесь заданы в условных единицах (табл. 2).

Лингвистические переменные и диапазоны их треугольных функций принадлежности  
*Linguistic variables and ranges of their triangular membership functions*

Лингвистические переменные	Функции принадлежности							
	Negative big	Negative medium	Negative small	Zero	Positive small	Positive medium	Positive big	Positive large
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PL
$T_u, T_\omega, T_r$	-10, -10, -7	-10, -4, -1.5	-4, -1.5, 0	-1.5, 0, 1.5	0, 1.5, 4	1.5, 4, 10	7, 10, 10	-
$P_{FL}, P_{FR}$	-4, -4, -2.7	-4, -2.7, -1	-2.7, -1, 0	-1, 0, 1	0, 1, 2.7	1, 2.7, 4	2.7, 4, 4	-
$P_{\theta B}$	-90, -90, -60	-90, -60, -30	-60, 30, 0	-30, 0, 30	0, 30, 60	30, 60, 90	60, 90, 90	-
$P_{\omega_{max}}$				0, 0, 10	0, 10, 20	10, 20, 30	20, 30, 30	-
$P_\phi$				0, 0, 30	0, 30, 60	30, 60, 90	60, 90, 90	-

В основу выбора продукционных правил, содержащихся в базе правил (рис. 3) положены естественные соотношения, которые следуют из законов физики, а именно:

1. Углы отклонения обоих плавников  $\theta_B$  всегда должны быть одинаковыми и иметь знак, противоположный знаку силы подъема  $\tau_\omega$ .

2. Значение подъемной силы  $\tau_\omega$  увеличивается с увеличением угла отклонения  $\theta_B$ , и наоборот.

3. Значение подъемной силы  $\tau_\omega$  увеличивается с увеличением частоты плавников  $F_L, F_R$ , и наоборот.

4. Приоритет управления по курсу выше приоритета управления по линейной скорости  $u$ .

5. Когда момент рыскания  $\tau_r$  и сила  $\tau_u$  по оси  $X$  достаточно велики, предпочтительно обеспечивается большой момент рыскания.

6. Когда требуемый момент  $\tau_r$  мал, а линейная скорость  $u$  — большая, направление волн вдоль двух плавников должно быть одинаковым, следовательно, условный знак частоты ( $F_L, F_R$ ) должен быть одинаковым, хотя их значения могут быть разными.

Теперь для каждого контроллера можно записать систему продукционных правил. Ниже приводится система продукционных правил для управления по глубине. На вход соответствующего контроллера подается требуемое значение подъемной силы  $\tau_\omega \in [-10, 10]$ , а на выходе получают нечеткие значения частоты  $F_L, F_R \in [-4, 4]$  и угла отклонения плавников  $\theta_B \in [-90, 90]$ . Можно записать эти правила следующим образом:

1. Если ( $\tau_\omega$  есть NB), тогда (FR есть NB), (FL есть NB), ( $\theta_B$  есть PB).

2. Если ( $\tau_\omega$  есть NM), тогда (FR есть NM), (FL есть NM), ( $\theta_B$  есть PB).

3. Если ( $\tau_\omega$  есть NS), тогда (FR есть NM), (FL есть NM), ( $\theta_B$  есть PS).

4. Если ( $\tau_\omega$  есть Z), тогда (FR есть Z), (FL есть Z), ( $\theta_B$  есть ZZ).

Таблица 3  
Table 3

Нечеткие правила для управления по курсу  
*Fuzzy rules for course control*

$T_u$	$T_r$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB, PB, PL, PB	NB, NS, PB, PB	NB, NM, PB, PB	NB, NB, PB, PB	NM, NB, PB, PB	NS, NB, PB, PB	PB, NB, PL, PB
NM	NB, PB, PB, PB	NB, NS, PB, PB	NM, NS, PB, PB	NM, NM, PB, PB	NS, NM, PB, PB	NS, NB, PB, PB	PB, NB, PB, PB
NS	NB, PB, PB, PB	NM, PM, PB, PB	NM, NS, PM, PM	NS, NS, PS, PS	NS, NM, PM, PM	PM, NM, PB, PB	PB, NB, PB, PB
Z	NB, PB, PB, PB	NM, PM, PM, PM	NS, PS, PS, PS	Z, Z, Z, Z	PS, NS, PS, PS	PM, NM, PM, PM	PB, NB, PB, PB
PS	NB, PB, PB, PB	NM, PM, PB, PB	PS, PM, PM, PM	PS, PS, PS, PS	PM, PS, PM, PM	PM, NM, PB, PB	PB, NB, PB, PB
PM	NB, PB, PB, PB	PS, PB, PB, PB	PS, PM, PB, PB	PM, PM, PB, PB	PM, PS, PB, PB	PB, PS, PB, PB	PB, NB, PB, PB
PB	NB, PB, PL, PB	PS, PB, PB, PB	PM, PB, PB, PB	PB, PB, PB, PB	PB, PM, PB, PB	PB, PS, PB, PB	PB, NB, PL, PB

5. Если ( $\tau_\omega$  есть PS), тогда (FR есть PM), (FL есть PM), ( $\theta_B$  есть NS).

6. Если ( $\tau_\omega$  есть PM), тогда (FR есть PM), (FL есть PM), ( $\theta_B$  есть NB).

7. Если ( $\tau_\omega$  есть PB), тогда (FR есть PB), (FL есть PB), ( $\theta_B$  есть NB).

Аналогично можно задать систему правил для управления АНПА по курсу. В этом случае число правил значительно больше, поэтому их удобнее представить в виде таблицы (табл. 3), где указаны значения лингвистических переменных управления ( $P_{FL}, P_{FR}, P_{\theta_{\max}}, P_\phi$ ) для каждого значения  $T_r, T_u$ . На вход этого контроллера курса подается требуемое значение силы по оси  $x$   $\tau_u \in [-10, 10]$  и момент рыскания  $\tau_r \in [-10, 10]$ , а на выходе получают нечеткие значения частоты  $F_L, F_R \in [-4, 4]$ , максимальной амплитуды волны  $\theta_{\max} \in [0, 30]$  и фазовый сдвиг между двумя соседними ребрами  $\phi \in [0, 90]$ .

### Контроллер ADRC

Контроллер ADRC унаследовал принцип действия классического ПИД регулятора и практически не предъявляет требований к математической модели управляемого объекта. Этот метод управления основан на расширении модели системы с использованием дополнительной переменной состояния, учитывающей все то, что пользователь не включает в математическое описание объекта. Структура ADRC контроллера при управлении по глубине показана на рис. 4. Он состоит из четырех основных блоков:

1. Блок вычисления производных по времени входных переменных (TD, the tracking differentiator). Благодаря использованию TD опорный сигнал сглаживается, и генерируются

сигналы для отслеживания опорного сигнала и его производной.

2. Блок нелинейного преобразования ошибки состояния объекта (NLSEF, nonlinear state error feedback)[17].

3. Наблюдатель расширенного состояния (ESO, the extended state observer).

4. Схемы подавления помех (DRS, the disturbance rejection scheme).

Организация процесса управления заключается в отслеживании производных входных переменных, чтобы избежать резких изменений переменных и обеспечить их управление в реальном масштабе времени.

### Контроль глубины на основе ADRC

Рассмотрим более подробно математическую модель управления АНПА по глубине на основе ADRC (рис. 4). С использованием математической модели робота (8)–(13) динамическое уравнение подъема для управления глубиной может быть записано как

$$m_{v33}\dot{\omega} - (Z_\omega + Z_{|\omega|})|\omega| - (W - B)c\theta s\phi = \tau_\omega + \tau_{\omega E}. \quad (14)$$

Путем преобразования матрицы (3) с учетом  $\phi = \theta = 0$  и равенства (14) линейное ускорение робота  $\ddot{z}$  в инерциальной системе координат можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \ddot{z} = \dot{\omega} &= G_\omega(\omega, t, d_\omega) + b_\omega \tau_\omega; \\ G_\omega(\omega, d_\omega, t) &= \\ &= \frac{[(Z_\omega + Z_{|\omega|})|\omega| + (W - B)c\theta s\phi]}{m_{v33}} + d_\omega; \quad (15) \\ b_\omega &= 1/m_{v33}; \\ d_\omega &= \tau_{\omega E}/m_{v33}, \end{aligned}$$

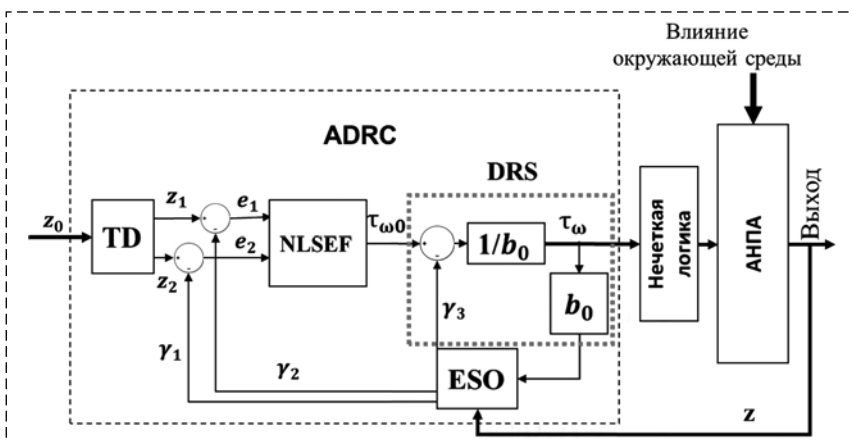


Рис. 4. Структура ADRC для управления по глубине [16, 17]

Fig. 4. ADRC structure for depth control [16, 17]

где  $d_\omega$  — внешнее возмущение;  $G_\omega(\omega, t, d_\omega)$  — обобщенное возмущение, включающее как внешнее возмущение, так и внутреннюю динамику. Рассмотрим математическое описание блока ADRC в дискретном варианте в соответствии с работой [16].

Для установленного значения  $z_0$  блок TD в дискретные моменты времени отслеживает заданное значение и выдает сигналы  $z_1(k), z_2(k)$  в соответствии с уравнениями

$$\begin{aligned} z_1(k+1) &= z_1(k) + hz_2(k); \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + \\ &+ hfhan(z_1(k) - z_0(k), z_2(k), \delta, h_0), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $z_1$  — дискретный сигнал отслеживания заданного значения  $z_0$ ;  $z_2$  — дискретные значения оценки производной сигнала  $z_1$ ;  $h$  — шаг выборки;  $\delta$  — коэффициент, определяющий скорость изменения  $z_1$ ; коэффициент фильтрации  $h_0$  определяет уровень подавления шума, функция  $fhan(z_1, z_0, z_2, \delta, h_0)$  вычисляется как

$$fhan = -\delta \left[ \frac{a}{d} - \operatorname{sgn}(a) \right] s_a - \delta \operatorname{sgn}(a),$$

где обозначено

$$\begin{aligned} d &= h_0 \delta^2; a_0 = h_0 z_2; y = z_1 + a_0; \\ a_1 &= \sqrt{d(d + 8|y|)}; \\ a_2 &= a_0 + \operatorname{sgn}(y)(a_1 - d)/2; \\ s_y &= [\operatorname{sgn}(y + d) - \operatorname{sgn}(y - d)]/2; \\ a &= (a_0 + y - a_2)s_y + a_2; \\ s_a &= [\operatorname{sgn}(a + d) - \operatorname{sgn}(a - d)]/2. \end{aligned} \quad (17)$$

Формула (16) описывает блок ТД для контроллера глубины, причем  $\delta$  и  $h_0$  — это параметры настройки. Увеличение значений  $\delta$  может ускорить переходной процесс за счет увеличения управляющего сигнала. Увеличение значений параметра  $h_0$  усиливает эффект подавления шума. Предположим, что обобщенное возмущение  $G(\omega, t, d_\omega)$  в формуле (15) дифференцируемо. Обозначим  $\gamma_1 = z, \gamma_2 = \dot{z}, \gamma_3 = G(\omega, t, d_\omega), \boldsymbol{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3]^T$ , тогда можно записать следующее уравнение в пространстве состояний в соответствии с (15) следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\gamma}} &= \mathbf{A}\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{B}\tau_\omega + \mathbf{E}g; \\ z &= \mathbf{C}\boldsymbol{\gamma}; \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = [0, b_\omega, 0]^T; \\ \mathbf{E} &= [0, 0, 1]^T; \mathbf{C} = [1, 0, 0]; g = \dot{G}_\omega, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $g$  — определяет скорость изменения обобщенного возмущения. На основании (18) наблюдатель расширенного состояния (ESO) может быть представлен уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\boldsymbol{\gamma}}} &= \mathbf{A}\hat{\boldsymbol{\gamma}} + \mathbf{B}\tau_\omega + \mathbf{L}(z - \hat{z}); \\ \hat{z} &= \mathbf{C}\hat{\boldsymbol{\gamma}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\hat{\boldsymbol{\gamma}} = [\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3]^T$  является оценкой состояний в (18),  $\mathbf{L} = [l_1, l_2, l_3]^T$  — вектор усиления наблюдателя, который необходимо настроить. Чтобы сделать работу наблюдателя ESO устойчивой, вектор усиления наблюдателя должен быть выбран таким, чтобы все корни характеристического полинома линейной системы (19)  $\lambda(s) = s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3$  находились в левой полуплоскости. Можно потребовать, чтобы все корни были равны  $-\omega_0$ , что эквивалентно

$$\lambda(s) = s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3 = (s + \omega_0)^2, \quad (20)$$

где  $\omega_0$  — единственный параметр настройки, который обозначает желаемую собственную частоту системы с замкнутым контуром. Из (20) следует, что в этом случае  $l_1 = 3\omega_0, l_2 = 3\omega_0^2$  и  $l_3 = \omega_0^3$ .

Как только наблюдатель ESO будет настроен, состояния системы (19) будут отслеживать соответствующие состояния системы (18), т. е.  $\boldsymbol{\gamma} \approx \hat{\boldsymbol{\gamma}}$ , и ошибка по глубине определится как разность между  $z_1(k)$  и его оценкой состояния на выходе наблюдателя. Аналогично определяется ошибка по производной:

$$\begin{aligned} e_1 &= z_1(k+1) - \gamma_1(k+1); \\ e_2 &= z_2(k+1) - \gamma_2(k+1). \end{aligned} \quad (21)$$

Теперь управляющий сигнал в уравнении (15) определяется по формуле

$$\tau_\omega = \frac{\tau_{\omega 0} - \hat{\gamma}_3}{b_\omega}, \quad (22)$$

где  $\tau_{\omega 0}$  следует задавать как сигнал управления. Учитывая что  $\hat{\gamma}_3 \approx G_\omega(\omega, t, d_\omega)$ , мы можем переписать уравнение динамики (15) в виде

$$\ddot{z} = G_\omega(\omega, t, d_\omega) + \tau_{\omega 0} - \hat{\gamma}_3 \approx \tau_{\omega 0}. \quad (23)$$

Отметим, что (23) приближенно представляет собой двойной интегратор, которым легко управлять с помощью ПД регулятора и который задается выражением

$$\tau_{\omega 0} = k_{p\omega}e_1 + k_{d\omega}e_2, \quad (24)$$

где  $k_{p\omega}$  и  $k_{d\omega}$  — соответственно коэффициенты пропорциональности по ошибке и по ее производной.

## Контроллер курса на основе ADRC

Управление роботом в горизонтальной плоскости обеспечивается путем управления по углу курса (углу рысканья)  $\psi$  и по линейной скорости  $u$  вдоль продольной оси робота. С использованием математической модели робота (8) соответствующие уравнения его движения могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} m_{v11}\dot{u} + (m_{v22} - m_{v11})\omega u - \\ - ((X_u + X_{u|u}|u|)u = \tau_u + \tau_{uE}; \\ m_{v66}\dot{r} + (m_{v22} - m_{v11})\omega u - \\ - (N_r + N_{r|r}|r|)r = \tau_r + \tau_{rE}. \end{aligned} \quad (25)$$

Путем преобразования матрицы (3) с учетом  $\phi = \theta = 0$  и равенства (25) угловое ускорение робота  $\ddot{\psi}$  в инерциальной системе координат можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} = \dot{r} = G_r(r, d_r, t) + b_r \tau_r; \\ G_r(r, d_r, t) = (N_r + N_{r|r}|r|)r / m_{v66}; \\ b_r = 1 / m_{v66}; \\ d_r = [(m_{v11} - m_{v22})\omega u + \tau_{rE}] / m_{v66}, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $d_r$  — внешнее возмущение;  $G_r(\omega, t, d_r)$  — обобщенное возмущение, включающее внешнее возмущение и внутреннюю динамику. Поскольку динамическое уравнение курса и линейной скорости (26) аналогично (14), то контроллер курса робота можно реализовать на основе ADRC аналогично предыдущему [17].

## Моделирование движения АНПА

Для проверки системы управления роботом и функционирования предлагаемых контроллеров курса и глубины было проведено



Рис. 5. Модель взаимодействия робота с окружающей средой  
Fig. 5. The model of robot interaction with environment

моделирование исследуемого робота в среде MATLAB. Вначале была построена модель взаимодействия робота с окружающей средой в соответствии со схемой, показанной на рис. 5, при этом были использованы результаты гидродинамического моделирования, полученные нами ранее в работе [15]. Как и выше, здесь обозначено:  $M_v = M_{RB} + M_A$ , где  $M_A$  — матрица присоединенной массы;  $M_{RB}$  — матрица инерции;  $D$  — линейная матрица демпфирования;  $W$  — сила тяжести;  $B$  — архимедова сила исследуемого робота. В соответствии с данными работы [15] было принято:

$$M_v = \begin{bmatrix} 32,38 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 64,84 & 0 & 0 & 0 & -1,8412 \\ 0 & 0 & 64,84 & 0 & 1,8412 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,8412 & 0 & 7,83 & 0 \\ 0 & -1,8412 & 0 & 0 & 0 & 7,82 \end{bmatrix}; \quad (27)$$

$$D(v) = \text{diag}([1,57u + 0,5], [39,54\omega + 1,98], [62,3\omega + 5], 0, [3,93q - 0,33], [2,98r - 0,098]); \quad (28)$$

$$W = 290N; B = 288N. \quad (29)$$

Для моделирования предлагаемых контроллеров, включая ADRC [18], глубины и курса робота применялся блок FUZZY LOGIC TOOLBOX в пакете MATLAB. Управляющими сигналами контроллеров курса и глубины являются момент по углу рысканья  $\tau_r$ , сила  $\tau_u$  по оси  $X$  (см. рис. 3) и сила подъема  $\tau_\omega$  по оси  $Z$ . Управляющими параметрами робота являются частота колебаний, направление распространения волны, максимальная амплитуда колебаний, угол отклонения двух плавников  $\theta_B$  и фазовый сдвиг (см. рис. 1). При моделировании были заданы ограничения:  $F_L, F_R \in [-4,4 \text{ Гц}]$ ,  $\theta_{\max} \in [0, 30^\circ]$ ,  $\theta_B \in [-90, 90^\circ]$ ,  $\phi \in [0, 90^\circ]$ . Настройка блока ADRC возможна с использованием всего нескольких основных параметров, которые показаны в табл. 4 [18].

После подстройки параметров регуляторов по глубине и по курсу и выбора правил и функций принадлежности для нечеткого регулятора, рассмотренных выше, были получены результаты, показанные на рис. 6. Результаты показывают, что ADRC-контроллер для различных опорных сигналов управляет глубиной и курсом робота без перерегулирования и имеет время переходного процесса, меньше 10 с.

Параметры настройки контроллера ADRC  
ADRC controller settings

Параметр	Контроллер глубины (z)	Контроллер скорости (u)	Контроллер курса (ψ)
$n$	2	1	2
$\hat{b}$	1,3	0,08	1
$\omega_0$	5	10	10
$\omega_c$	1	2	1
$u_{max}, u_{min}$	10, -10	10, -10	10, -10
$T_d$	0,2	0,5	—

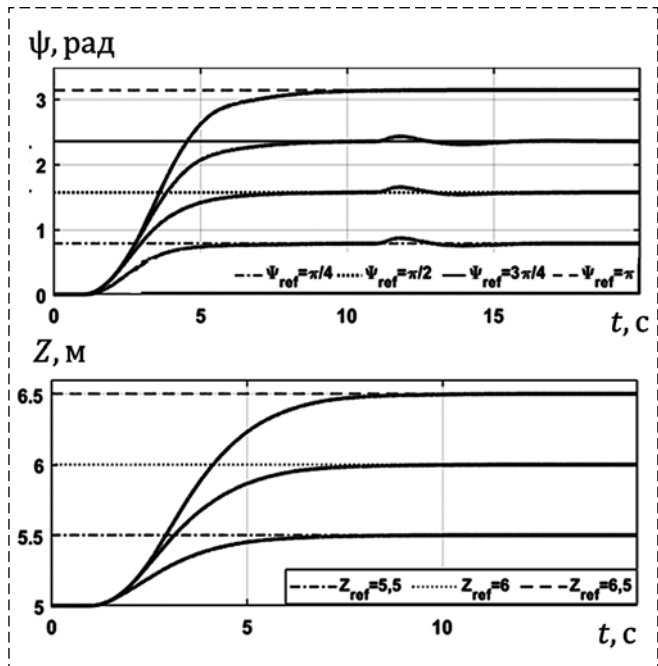


Рис. 6. Результаты моделирования ADRC при управлении по глубине и по курсу  
Fig. 6. Simulated ADRC results in depth and course control

Для проверки помехозащищенности предлагаемого контроллера проводилось моделирование его работы при наличии быстро меняющихся периодических возмущений, определяемых по формуле

$$\tau_{iE} = A_i \sin(\omega_i t + \vartheta_i), \quad (30)$$

где  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\vartheta_i$  — амплитуда, частота и фаза возмущений, соответственно. В данной работе внешние возмущения  $\tau_E$  определяются следующим образом:

$$\tau_{iE} = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{\psi E} \\ \tau_{\omega E} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,5 \sin(t) \\ \sin(t - \pi/3) \\ \sin(t) + 2 \\ 0,5 \sin(0,5t + \pi/6) \end{bmatrix}. \quad (31)$$

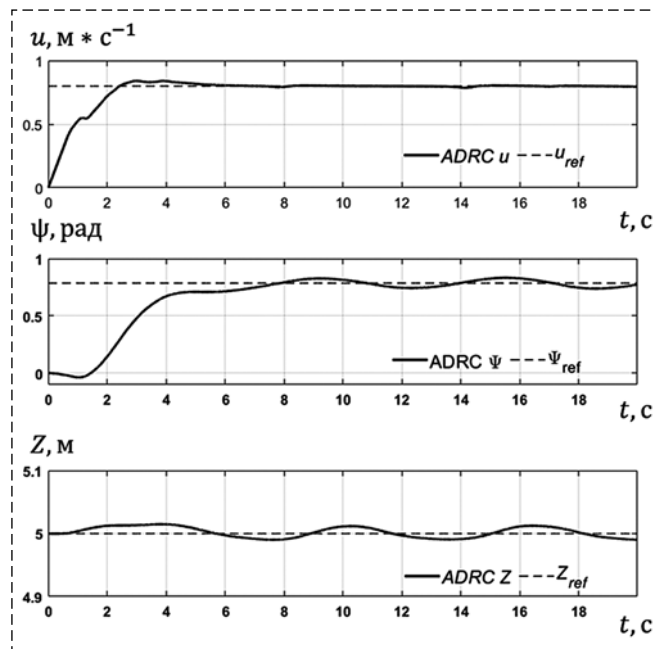


Рис. 7. Результаты моделирования ADRC контроллера при наличии возмущений.  
Fig. 7. Simulated ADRC results in the presence of Fast-Varying periodic disturbances.

Результаты моделирования при наличии возмущений показаны на рис. 7, они показывают, что робот может эффективно следовать желаемым сигналам по курсу 0,8 рад, глубине 5 м, скорости 0,8 м/с при действии выбранных возмущений с высокой точностью. Результаты моделирования подтверждают способность контроллера оценивать внешние возмущения и вырабатывать управляющие сигналы (как показано на рис. 8), позволяющие компенсировать возмущения со стороны внешней среды.

### Заключение

В данной работе для управления роботом с волнообразным плавником был предложен контроллер, включающий в себя контроллер с активным подавлением помех ADRC и контроллер, построенный на базе нечеткой логики. Основная задача контроллера ADRC состоит в том, обеспечивать устойчивость и качество процесса управления в целом, оценить и уменьшить влияние внешних и внутренних возмущений. Нечеткий контроллер использовался для преобразования управляющего сигнала, полученного от ADRC, в управляющий параметр волнообразного плавника. Предварительные результаты моделирования показали эффективность предлагаемого способа управления роботом с волнообразным плавником.

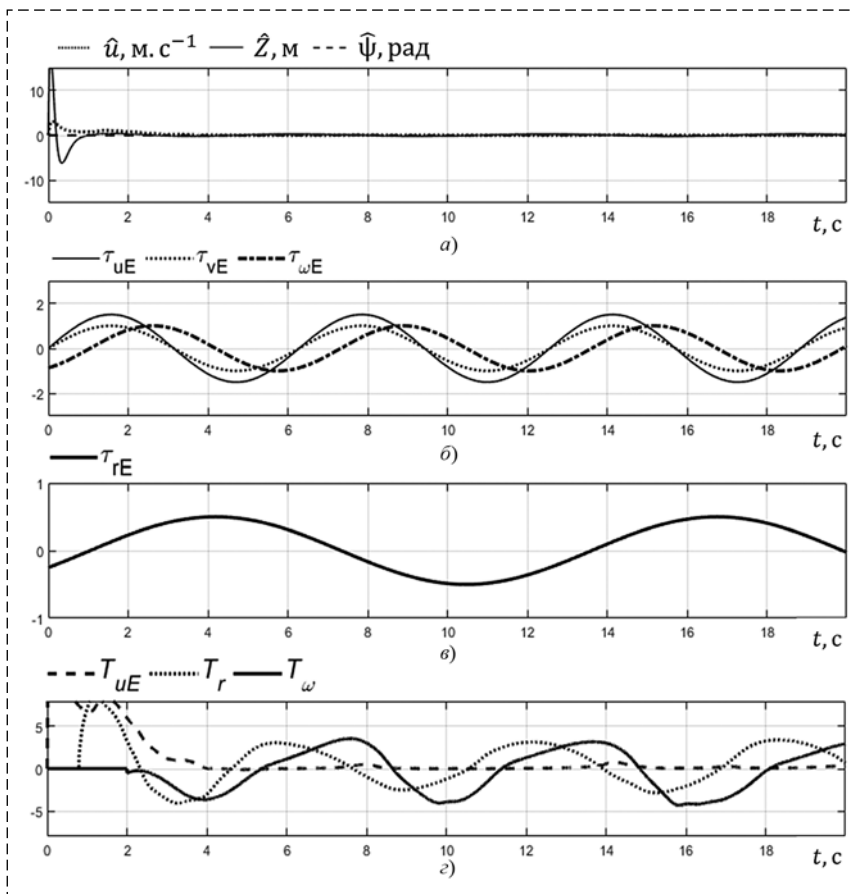


Рис. 8. Оцениваемые возмущения (а), внешние возмущения (б, в), управляющие сигналы (г)

Fig. 8. Estimated disturbances (a), external disturbances (б, в), control signal (г)

Отметим целый ряд допущений, которые были приняты при исследовании. Они касаются как модели динамики робота с гибкими плавниками, так и учета среды, в которой движется этот робот. В дальнейшем предполагается существенно уточнить эти вопросы. Тем не менее, полученные предварительные результаты позволяют сделать вывод о работоспособности системы управления АНПА данного типа. Дальнейшие исследования позволят обосновать возможность применения такого робота при выполнении реальных задач разведки и патрулирования, требующих маневрирования и следования по заранее заданной траектории.

#### Список литературы

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // In International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2018 Sep 18. Springer, Cham. P. 270–279.
2. Марченко К. П., Коновалов К. В., Ершов С. Д., Ахмад А., Вассуф Я. Разработка математической модели кинематики и динамики колесного дифференциального

робота // Научный аспект. 2021. Vol. N. 03(01). P. 277–294.

3. Алексеев В. Л., Горячкин Д. А., Грязнов Н. А., Купренюк В. И., Соснов Е. Н. Перспективы использования строб-лидаров в автономных мобильных роботах // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. № 2 (9). С. 133–141.

4. Андреев В. П. Обеспечение безопасности работы кино- и тележурналистов средствами экстремальной робототехники // Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". 2022. С. 25–34.

5. Чернышев В. В., Арыканцев В. В., Калинин Я. В., Насари Задеган А. Х., Шаронов Н. Г. Отработка методов управления движением шагающих робототехнических систем передвигающихся по дну // Междунар. науч.-техн. Конф. "Экстремальная робототехника". 2022. С. 286–294.

6. Engineers, Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles. URL: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.

7. Pliant, Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot. URL: <https://www.pliantenergy.com/robotics>

8. URL: [https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id\\_45231/](https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id_45231/)

9. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus* // Mechanism and machine theory. 2009 Mar 1. Vol. 44, N. 3. P. 633–45.

10. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion // IEEE Journal of oceanic engineering. 1999 Apr. Vol. 24, N. 2. P. 237–52.

11. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012 Nov 26. Vol. 19, N. 1. P. 191–200.

12. Ахмад А., Вассуф Я., Коновалов К. В., Ющенко А. С. Исследование подводного робота с волнообразным движителем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 11. С. 607–616.

13. SNAME. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid // Technical and Research Bulletin. 1950. P. 1–5.

14. Antonelli G., Antonelli G. Underwater robots. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. Vol. 3. P. 23–48.

15. Ахмад А., Ющенко А. С. Динамическая модель подводного мобильного робота с волнообразными движителями // Труды 33-й Междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". 2022.

16. Huang Y. et al. Active disturbance rejection control: Methodology, practice and analysis // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. IEEE, 2014. P. 1–5.

17. Han J. From PID to active disturbance rejection control // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56, N. 3. P. 900–906.

18. Lakomy K. et al. Active Disturbance Rejection Control (ADRC) Toolbox for MATLAB/Simulink // arXiv preprint arXiv:2112.01614. 2021.

# Undulating Propulsion Underwater Robot Control Method Based on ADRC and Fuzzy Logic

A. Ahmad, aws.ahmad318@gmail.com, A. S. Yuschenko, yusch@bmstu.ru,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Yuschenko Arkady S., Dr. of Sc., Professor,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,  
e-mail: arkadyus@mail.ru

Accepted on May 30, 2023

## Abstract

The article is devoted to the development a closed-loop depth and course control algorithms for underwater robot with pair undulating fin. The controller was proposed based on the Active Disturbance Rejection Control (ADRC) technique and fuzzy logic. A brief review of the underwater robot with pair undulating fin (AUV) is carried out. The dynamic and kinematic robot model is given, and the robot model with the environment is presented in the Simscape-MATLAB library. To solve the problem of controlling course and depth of the robot, a method of Active Disturbance Rejection Control (ADRC) is proposed. This robust control method based on extension of the system model with an additional and fictitious state variable, representing everything that is not included in the mathematical description of the plant. This method allows to treat the considered system with a simpler model, since the negative effects of modeling uncertainty are compensated in real time. The advantage of the proposed method is that an exact analytical description of the system is not required, since it can be assumed that the unknown parts of the dynamics are internal noise in the installation. The fuzzy control method is used to build a non-linear relationship between controller outputs and fin parameters that determine the generated fin forces. The results of modeling of the problem of heading and depth control using a complete nonlinear dynamic model with six degrees of freedom are presented. The conducted studies confirm the operability, adequacy, and anti-disturbance ability of the ADRC controller.

**Keywords:** undulating propulsion, Active Disturbance Rejection Control (ADRC), fuzzy logic, course, depth control, external disturbance

For citation:

Ahmad A., Yuschenko A. S. Undulating Propulsion Underwater Robot Control Method Based on ADRC and Fuzzy Logic, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 469–480.

DOI: 10.17587/mau.24.469-480

## References

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2018 Sep 18, Cham, Springer, pp. 270–279.
2. Marchenko K. P., Konovalov K. V., Ershov S. D., Ahmad A., Wassouf Y. Development of a mathematical model of kinematics and dynamics of a wheeled differential robot, *Scientific Aspect*, 2021, vol. 03, no. 01, pp. 277–294 (in Russian).
3. Alekseev V. L., Goryachkin D. A., Gryaznov N. A., Kuprenyuk V. I., Sosnov E. N. Prospects for the use of strobe lidars in autonomous mobile robots, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2021, vol. 2, no. 9, pp. 133–141 (in Russian).
4. Andreev V. P. Ensuring the safety of film and television journalists by means of extreme robotics, *International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2022, pp. 25–34 (in Russian).
5. Chernyshev V. V., Arykantsev V. V., Kalinin Y. V., Nasari Zadegan A. Kh., Sharonov N. G. development of methods for controlling the movement of walking robotic systems moving along the bottom, *International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2022, pp. 286–294 (in Russian).
6. Engineers, Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles, available at: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.
7. Pliant, Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot, available at <https://www.pliantenergy.com/robotics>
8. Available at: [https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultra-sound-id\\_45231/](https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultra-sound-id_45231/)
9. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*, *Mechanism and machine theory*, 2009 Mar 1, vol. 44, no. 3, pp. 633–45.
10. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999 Apr., vol. 24, no. 2, pp. 237–52.
11. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012 Nov. 26, vol. 19, no. 1, pp. 191–200.
12. Ahmad A., Wassouf Y., Konovalov K. V., Yuschenko A. S. Study of an underwater robot with a wave-like propulsion device, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 607–616 (in Russian).
13. SNAME. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Technical and Research Bulletin*, 1950, pp. 1–5.
14. Antonelli G. Underwater robots, Switzerland, *Springer International Publishing*, 2014, vol. 3, pp. 23–48.
15. Ahmad A., Yuschenko A. S. Dynamic model of an underwater mobile robot with undulating propulsors, *Proceedings of the 33rd International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2022 (in Russian).
16. Huang Y. et al. Active disturbance rejection control: Methodology, practice and analysis, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, IEEE*, 2014, pp. 1–5.
17. Han J. From PID to active disturbance rejection control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009, vol. 56, no. 3, pp. 900–906.
18. Lakomy K. et al. Active Disturbance Rejection Control (ADRC) Toolbox for MATLAB/Simulink, *arXiv preprint arXiv:2112.01614*, 2021.