

## Раздел III. Морская робототехника

УДК 629.05

**В.Х. Пшихопов, Ю.В. Чернухин, А.А. Федотов, В.Ф. Гузик, М.Ю. Медведев,  
Б.В. Гуренко, А.О. Пьявченко, Р.В. Сапрыкин, В.А. Переверзев, А.А. Приемко**

### **РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА\***

*Представлена интеллектуальная система планирования и управления движением автономного необитаемого подводного аппарата. (АНПА). Предлагается иерархическая структура системы планирования и управления движением. Подсистема планирования строится на базе нейронподобных структур и позволяет обнаруживать и обходить препятствия на пути движения робота. Рассматривается нелинейная взаимосвязанная динамическая модель АНПА, на основе которой методом позиционно-траекторного управления синтезируется система управления движением. Система управления решает задачи движения вдоль заданной траектории с заданной скоростью, движения из точки в точку, позиционирования. Для адаптации системы управления строится робастный наблюдатель возмущений, обеспечивающий асимптотическое оценивание аддитивных возмущений заданного класса. Предлагается метод распределения сил и моментов по исполнительным механизмам АНПА. Приводятся результаты компьютерного моделирования интеллектуальной системы управления и навигации, полученные с использованием разработанного моделирующего комплекса. Макетный образец системы управления реализован на базе автономного надводного катера, испытанного в Азовском море.*

*Автономный необитаемый подводный аппарат; интеллектуальное планирование; нейросеть; управление; оценивание.*

**V.Kh. Pshikhopov, Yu.V. Chernukhin, A.A. Fedotov, V.F. Guzik, M.Yu. Medvedev,  
B.V. Gurenko, A.O. Piyavchenko, R.V. Saprikin, V.A. Pereversev, A.A. Priemko**

### **DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE**

*This paper is devoted to development of intelligent motion control and planning for autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV). Hierarchical structure of the intelligent motion control and planning system is proposed. Based on artificial neural networks planning subsystem allows detect and avoid moving obstacles in front of the AUUV. Motion control system is developed on base of nonlinear multi-linked dynamical mathematical model of AUUV. The method of motion control system design is position-path control method. The motion control system operates for movement along given path with given speed, for movement from point to point, and for positioning task. The motion control system is an indirect adaptive control system. Adaptation is based on asymptotical estimation of additive disturbances by robust nonlinear estimator. Method of distribution of control forces and torques into actuators of AUUV is suggested. Simulation complex is developed. On base of the complex simulation results are presented. Prototype of the intelligent motion control and planning system is developed on base of autonomous boat. The prototyped is tested in Azov sea.*

*Autonomous unmanned underwater vehicle; intelligent motion planning; artificial neural network; motion control; estimation.*

---

\* Работа выполнена при поддержке: РФФИ, грант № 13-08-00315; грант Президента РФ МД-1098.2013.10; гранта НШ-3437.2014.10.

**Введение.** Специфика многих задач, решаемых робототехническими средствами, требует их реализации в автономном режиме. Сегодня развивается большое число проектов по созданию автономных стратосферных воздухоплавательных платформ длительного барражирования, решающих задачи низкоорбитальных спутников [1, 2]. Освоение Мирового океана и охрана водных границ и ресурсов требует создания целого ряда АНПА, функционирующих в пределах от десятков до тысяч километров на интервалах времени от нескольких часов до нескольких лет [3]. В настоящее время широко используются беспилотные летательные аппараты [4]. Однако основное применение БЛА – дистанционные режимы полета. Аналогичные разработки имеются в области создания наземных роботов [5]. Сегодня известны проекты по созданию дистанционно управляемых танков, разрабатываются платформы с электрическими трансмиссиями.

Применение робототехнических комплексов как автономных систем требует не только развитой системы управления движением, но и полноценной системы планирования, включая уровень целеполагания, а также эффективных локальных и глобальных навигационных систем [6–8]. В этой связи требуется решать поставленные проблемы – планирования, навигации и управления – в условиях существенной неопределенности, воздействие которой в обычных условиях компенсируется оператором [9–12].

Решение поставленной проблемы возможно на базе развития теории позиционно-траекторного управления [13–16] посредством использования интеллектуальных (нейросетевых, нечетких и гибридных) технологий управления, позволяющих адаптировать подвижные объекты к возмущениям среды и появлению подвижных и неподвижных препятствий.

**Структура системы управления.** В традиционных интеллектуальных системах управления принято выделять три основных уровня: стратегический, тактический и исполнительный, как показано на рис. 1.

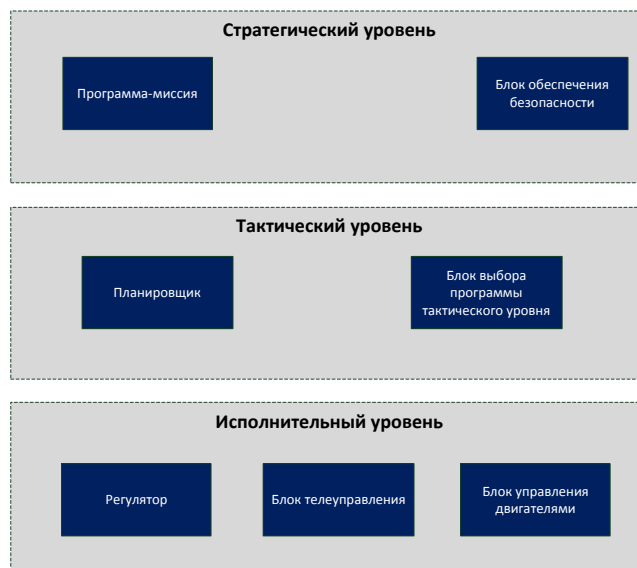


Рис. 1. Традиционная структура системы управления АНПА

Интеллектуальный планировщик перемещений и блок организации стратегии поведения нельзя выделить в отдельный уровень системы управления АНПА, так как их деятельность затрагивает как тактический, так и стратегический уровни (рис. 2).

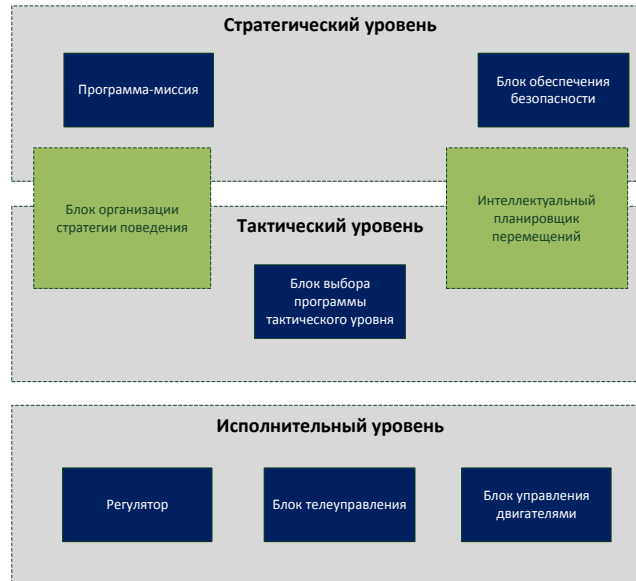


Рис. 2. Система управления АНПА с интеллектуальным планировщиком

Проведенный анализ существующих на данный момент АНПА позволяет утверждать, что значительная часть перспективных технических систем данного вида будет создаваться либо в классе интеллектуальных автономных систем и сообществ таких систем, либо будет содержать в себе интеллектуальные автономные системы в качестве подсистем.

**Интеллектуальное планирование движения АНПА.** Реализующая бионический метод нейросетевого управления [20] интеллектуальная система искусственного интеллекта предназначена для решения задач навигационной безопасности АНПА как в надводном, так и в подводном режимах функционирования путем автоматического синтеза траекторий обхода стационарных и нестационарных препятствий.

Следуя по заранее заданному курсу в заданную точку надводной или подводной среды, АНПА постоянно воспринимает текущую информацию о состоянии среды с помощью бортовой гидроакустической станции (ГАС). На основе этой информации его нейросетевая интеллектуальная система управления (ИСУ) строит трехмерную модель проходимости среды. Если по курсу следования АНПА появляется препятствие, ИСУ отображает его местоположение в состояниях соответствующих элементов трехмерной нейросети. Периодически возникающие волны возбуждения воспроизводят в нейросети возможные варианты обхода этих препятствий, а подключенная к ней сеть Хопфилда принимает решения об оптимальных направлениях обхода препятствия перед каждым актом очередного срабатывания исполнительных систем. После завершения обхода АНПА возвращается на заданный курс.

В качестве структуры интеллектуальной системы управления АНПА использована структура, приведенная на рис. 3.

Сенсорная подсистема реализована в виде бортовой ГАС, осуществляющей съем информации о внешней среде. Преобразование полученных данных во внутреннюю модель осуществляет ПФМВС. Планирующая подсистема представляет собой многоярусную нейросеть, архитектура которой приведена на рис. 4. На этом рисунке справа показаны связи нейроэлементов горизонтального слоя, а слева – связи нейроэлементов разных слоев. Каждый основной нейроэлемент через модель внешней среды поставлен во взаимно-однозначное соответствие топологически соответствующему ему эле-

ментарному участку внешней среды. Если в некоторый момент времени этот участок свободен для перемещения АНПА, то ПФМВС включает соответствующий ему нейроэлемент в режим коммутации с соседними элементами. Если этот участок занят, нейроэлемент блокируется, а если участок является целевым – нейроэлемент включается в режим генерации волны возбуждения. Если целевая точка находится вне зоны восприятия сенсора, в режим генерации включается тот из дополнительных элементов, который указывает на требуемое направление движения АНПА. Нейросеть Хопфилда на рис. 4 условно обозначена кружочками, подключенными ко всем нероэлементам сети. Эта сеть отвечает за принятие решения о направлении движения АНПА на каждом элементарном шаге перемещения.

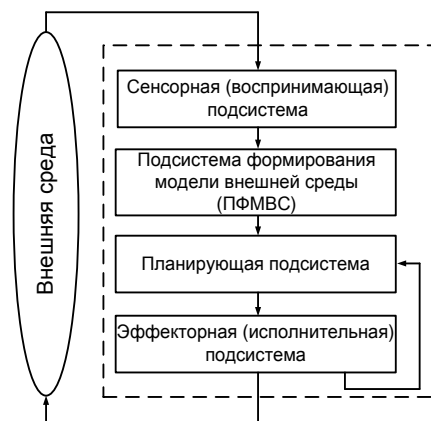


Рис. 3. Структура интеллектуальной системы управления АНПА

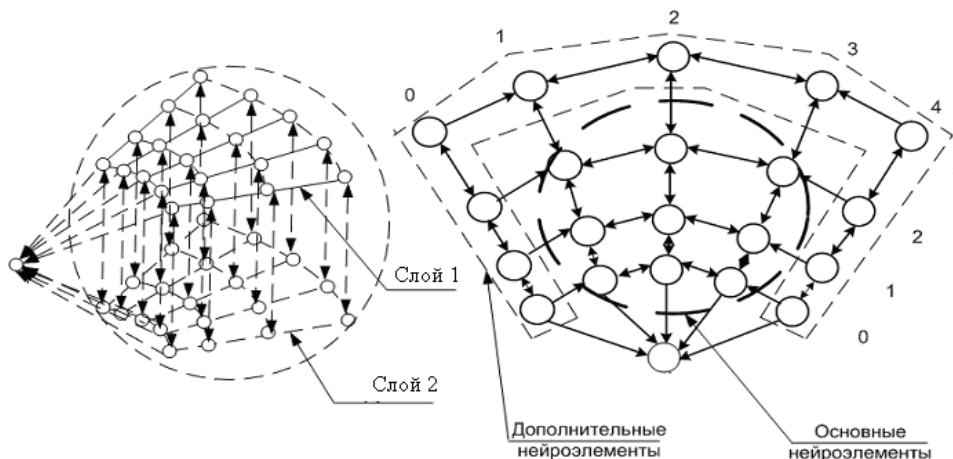


Рис. 4. Структура многослойной управляющей нейронной сети

В общем случае трехмерная нейросеть может быть реализована аппаратно, программно или программно-аппаратно [21, 22]. Суть ее работы состоит в следующем:

1. В массиве цели определяется адрес ячейки, в которой находится целевая единица, которая распространяется влево, вправо, вперед, назад (в слое) и вверх, вниз (между слоями). После этого ведется исключение тех единиц, которые соответствуют занятым участкам в модели среды.

2. Данные действия продолжаютя до тех пор, пока первая единица не появится в ближайшем вертикальном слое, связанном с нейросетью Хопфилда.

3. Эта единица фиксируется нейросетью Хопфилда и определяет углы необходимого отклонения АНПА как по горизонтали, так и по вертикали.

4. После выполнения элементарного шага вновь определяется содержимое массивов цели и препятствий и происходит переход на пункт 1.

Описанные действия продолжаютя до прихода АНПА в целевой участок внешней среды. Алгоритм работы системы интеллектуального управления АНПА показан на рис. 5.

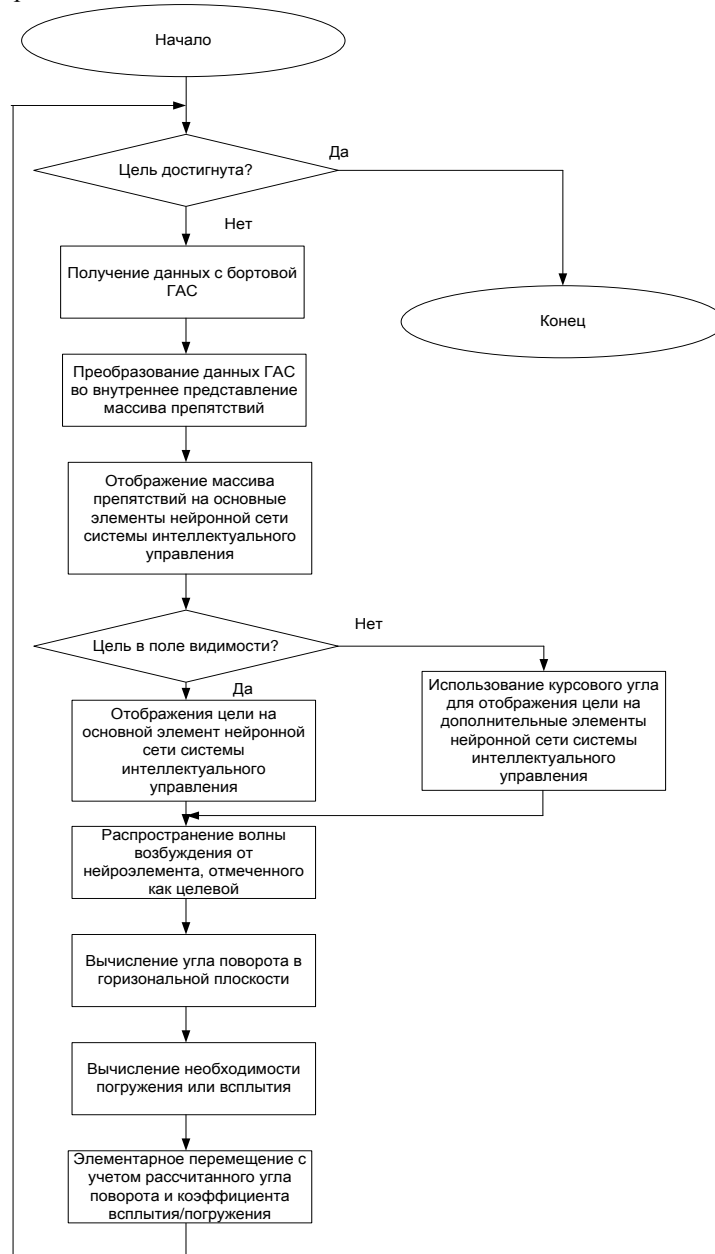


Рис. 5. Алгоритм системы нейросетевого интеллектуального управления

**Уровень управления движением.** Тактический и исполнительный уровни системы управления АНПА строятся на базе позиционно-траекторного метода управления [13].

Для описания математической модели подводного аппарата используются системы координат, представленные на рис. 6 [8]. Базовая система  $O_0X_0Y_0Z_0$  является неподвижной внешней системой координат. Подвижная система  $OXYZ$  привязана к центру приложения силы Архимеда, действующей на подводный аппарат.

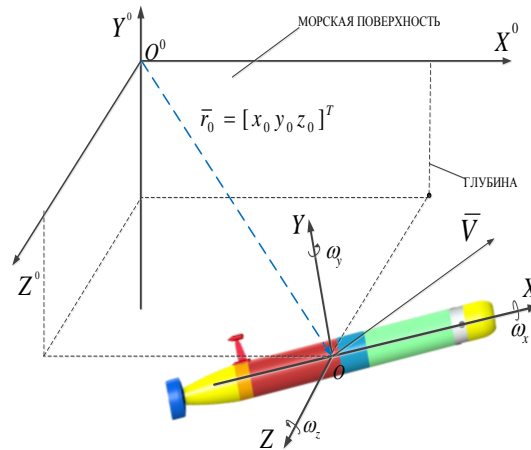


Рис. 6. Системы координат АНПА

Математическая модель кинематики АНПА имеет вид, связывающий его линейные и угловые скорости в базовой и связанной системах координат имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_0 \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $r_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$  – вектор линейных координат АНПА в неподвижной системе координат;  $\Theta = [\psi, \vartheta, \gamma]^T$  – вектор углов Эйлера;  $V = [V_x, V_y, V_z]^T$ ,  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  – векторы линейных и угловых скоростей АНПА в подвижной системе координат;  $A^T$ ,  $A_\omega$  – матрицы кинематических преобразований [7, 13].

Вектор  $Y = [r_0^T \quad \Theta^T]^T$  является вектором внешних переменных, а вектор  $X = [V^T \quad \omega^T]^T$  – вектором внутренних координат.

Уравнения динамики АНПА при постоянной массе имеют вид

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $M$  – матрица массоинерционных характеристик;  $F$ ,  $N$  – результирующие векторы сил и моментов, действующих на АНПА [8, 17]:

$$F = G + A_S + P_D + R_H, \quad (3)$$

$$N = N_G + N_D + N_H, \quad (4)$$

где  $G$  и  $N_G$  – соответственно главный вектор и главный момент сил тяжести;  $A_s$  – главный вектор плавучести (сила Архимеда);  $P_D$  и  $N_D$  – соответственно главный вектор и главный момент силы тяги, создаваемой движителями АНПА;  $R_H$  и  $N_H$  – соответственно главный вектор и главный момент гидродинамических сил, действующих на корпус и оперение АНПА.

Динамика исполнительных механизмов АНПА описывается в виде

$$T_{им} \dot{\delta} + \delta = K_{им} U, \quad (3)$$

где  $\delta$  – вектор тяг и положений винтов и рулей;  $T_{им}$ ,  $K_{им}$  – матрицы постоянных времени и коэффициентов передач;  $U$  – управление.

Двигательно-рулевой комплекс рассматриваемого АНПА включает тяговый движитель с переменным вектором тяги и два подруливающих устройства. Тяговый движитель – это гребной винт заданного диаметра, направления тяги  $P_1$  которого может изменяться в вертикальной плоскости на угол  $\alpha_1$  и горизонтальной плоскости на угол  $\beta_1$ . Сила тяги, создаваемая движителем, зависит от скорости движения АНПА и глубины плавания (плотности воды). Горизонтальное подруливающее устройство (ПУ) установлено в горизонтальном канале в носовой области АНПА. Вертикальное ПУ установлено в вертикальном канале также в носовой части АНПА. Подруливающие устройства позволяют создавать горизонтальную  $P_2$  и вертикальную  $P_3$  тяги.

Координаты и ограничения элементов движительной системы задаются соотношениями:

$$O_{МД} (x_{МД}, 0, 0), O_{ГПУ} (x_{ГПУ}, 0, 0), O_{ВПУ} (x_{ВПУ}, 0, 0), \quad (4)$$

$$P_1 \leq P_1^{\max}, |\alpha_1| \leq \alpha_1^{\max}, |\beta_1| \leq \beta_1^{\max}, |P_2| \leq P_2^{\max}, |P_3| \leq P_3^{\max}, \quad (5)$$

где  $x_{МД}$ ,  $x_{ГПУ}$ ,  $x_{ВПУ}$  – смещения маршевого двигателя, горизонтального и вертикального подруливающих устройств вдоль оси  $Ox$  относительно начала системы координат  $OXYZ$ ;  $P_1^{\max}$ ,  $\alpha_1^{\max}$ ,  $\beta_1^{\max}$ ,  $P_2^{\max}$ ,  $P_3^{\max}$  – положительные числа.

Проекции управляющих сил и моментов, создаваемых исполнительными механизмами в системе координат  $OXYZ$ , равны:

$$F_{ux} = P_1 \cos \alpha_1 \cos \beta_1, F_{uy} = P_1 \sin \alpha_1 + P_3, F_{uz} = P_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 + P_2, \quad (6)$$

$$N_{ux} = 0, N_{uy} = -P_1 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 x_{МД} - P_2 x_{ГПУ}, N_{uz} = P_1 \sin \alpha_1 x_{МД} + P_3 x_{ВПУ}.$$

В ходе идентификации математической модели АНПА определены следующие параметры: масса  $m$ , положение центра масс  $r_T$ , тензор инерции  $\{J_{i,k}\}$ , матрица присоединенных масс  $\{\lambda_{m,n}\}$ ; аэродинамические коэффициенты  $c_x, c_y, c_z, m_x, m_r, m_z$ .

Положение центра тяжести  $r_T(y_0)$  и компоненты тензора инерции  $\{J_{i,k}(y_0)\}$

АНПА вычислены программно в пакете Solid Works. Результаты расчетов помещаются в массивы, используемые в алгоритмах управления АНПА. Расчет присоединенных масс осуществляется по эмпирическим зависимостям в приближении формы АНПА эллипсоидом в соответствии с его габаритными размерами.

Для расчета гидродинамических характеристик АНПА используются программные комплексы FineHexa (NUMECA International), STAR CD. В частности, на рис. 7 и 8 представлены результаты гидродинамических расчетов для рассматриваемого АНПА.

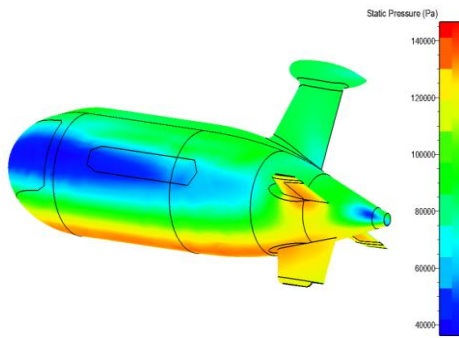


Рис. 7. Распределение давлений по корпусу АНПА

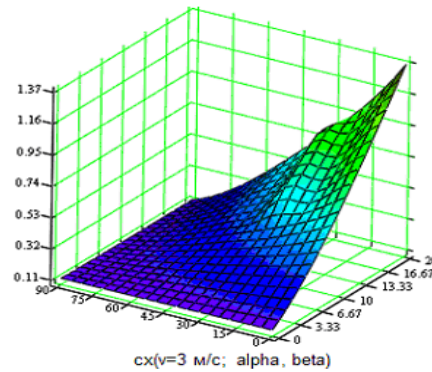


Рис. 8. Зависимость  $c_x$  от углов атаки и скольжения

Гидродинамические силы и моменты вычисляются как функции угла атаки, дрейфа, скорости движения и круговой частоты вращения АНПА.

Плотность морской воды в зависимости от солености, температуры и давления определяется выражением [18]

$$\rho(S, t^\circ, p_B) = \frac{\rho(S, t^\circ, 0)}{1 - p_B K^{-1}(S, t^\circ, p_B)}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность морской воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $S$  – практическая соленость морской воды;  $p_B$  – гидростатическое давление;  $\rho(S, t^\circ, 0)$  – плотность морской воды при давлении, равном одной стандартной атмосфере (101325 Па);  $K(S, t^\circ, p_B)$  – средний модуль упругости морской воды, определяемый выражением приведенным, например, в [18].

Изменение давления  $p_B(H)$  морской воды с изменением глубины погружения  $H$  м, согласно [18], определяется выражением

$$p_B(H) = p_a + \gamma_B H, \quad (8)$$

где  $p_a = 101325$  – атмосферное давление, Па;  $\gamma_B = 9813$  – удельный вес морской воды.

Для практических расчетов можно принять линейный характер зависимости плотности морской воды от глубины погружения и температуры, а влияние изменений солености отнести к внешним возмущениям незначительной интенсивности. Тогда зависимость плотности морской воды от глубины погружения и температуры определяется следующим выражением:

$$\rho(H, t^\circ) = 1039,6 - 0,241t^\circ + 0,00478H, \quad (9)$$

где  $H$  – глубина погружения в м;  $t^\circ$  – температура воды в градусах Цельсия.

Синтез алгоритмов управления движением осуществляется на основе метода позиционно-траекторного управления подвижными объектами [13, 14]. Постоянная времени двигателей существенно меньше постоянных времени АНПА. Это позволяет не включать уравнения двигателей в основной контур управления движением, и система управления синтезируется по уравнениям (1), (2). Алгоритм управления движением АНПА имеет вид:

$$F_u = -M_1^{-1} \left( M_2 (F_v + \hat{F}_e) + \Psi_\Sigma \right), F_v = \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix},$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} M^{-1}(1,1) & M^{-1}(2,1) & M^{-1}(3,1) & M^{-1}(5,1) & M^{-1}(6,1) \\ M^{-1}(2,1) & M^{-1}(2,2) & M^{-1}(2,3) & M^{-1}(2,5) & M^{-1}(2,6) \\ M^{-1}(3,1) & M^{-1}(3,2) & M^{-1}(3,3) & M^{-1}(3,5) & M^{-1}(3,6) \\ M^{-1}(5,1) & M^{-1}(5,2) & M^{-1}(5,3) & M^{-1}(5,5) & M^{-1}(5,6) \\ M^{-1}(6,1) & M^{-1}(6,2) & M^{-1}(6,3) & M^{-1}(6,5) & M^{-1}(6,6) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$M_2 = \left[ M^{-1}(1,1:6); M^{-1}(2,1:6); M^{-1}(3,1:6); M^{-1}(5,1:6); M^{-1}(6,1:6) \right],$$

$$\Psi_\Sigma = \begin{bmatrix} A_4 & 0_{3 \times 2} \\ A_1 A & A_2 A_\omega(1:3, 2:3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_3 \psi_v \\ A_1 \dot{A}V + A_2 \dot{A}_\omega \omega(2:3) + T_2 \Psi_{TR} + T_1 \dot{\Psi}_{TR} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{TR} = A_1 r_0 + A_2 \Theta + A_3, \quad \psi_v = A_4 V + A_5,$$

$$P_{1x} = F_u(1), \quad P_{1y} = \frac{F_u(2)x_{BIV}}{x_{BIV} - x_{MD}} + \frac{F_u(5)}{x_{MD} - x_{BIV}}, \quad P_{1z} = \frac{F_u(3)x_{ГПВ}}{x_{ГПВ} - x_{MD}} - \frac{F_u(4)}{x_{MD} - x_{ГПВ}},$$

$$P_1 = \sqrt{P_{1x}^2 + P_{1y}^2 + P_{1z}^2}, \quad P_2 = \frac{F_u(3)x_{MD}}{x_{MD} - x_{ГПВ}} + \frac{F_u(4)}{x_{MD} - x_{ГПВ}}, \quad P_3 = \frac{F_u(2)x_{MD}}{x_{MD} - x_{BIV}} - \frac{F_u(5)}{x_{MD} - x_{BIV}},$$

$$\beta_1 = \arctan \frac{P_{1z}}{P_{1x}}, \quad \alpha_1 = \arctan \frac{P_{1y} \cos(\beta_1)}{P_{1x}},$$

где  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  – матрицы и векторы, коэффициенты которых определяют траекторию и скорость движения АНПА;  $T_1, T_2, T_3$  – матрицы постоянных коэффициентов;  $\hat{F}_B$  – вектор оценок возмущающих воздействий;  $0_{3 \times 2}$  – нулевая матрица;  $M(l:k, i:j)$  – блок матрицы  $M$  с  $l$ -й по  $k$ -ю строки и с  $i$ -го по  $j$ -ю строки.

Уравнения робастного наблюдателя возмущений имеют вид [9, 11, 19]:

$$-\dot{\hat{z}} = -L\hat{z} - L \begin{bmatrix} F + F_{con} \\ N + N_{con} \end{bmatrix} - L^2 M \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\hat{F}_B = \hat{z} + LM \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (12)$$

**Моделирование системы управления.** Результаты моделирования системы управления движением (1)–(3), (10)–(12) представлены на рис. 9–12. При моделировании заданы следующие параметры системы управления:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} -\psi^0 \\ -k_y y^0 \end{bmatrix}, \quad \psi_0 = \arctan \frac{z^0 - z_0}{x^0 - x_0} - \arctan \frac{V_z}{V_x}, \quad y^0 = -20,$$

$$z^0 = x^0 = 1000, \quad k_y = 0.01,$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 001 \end{bmatrix}, A_5 = \begin{bmatrix} -v_k \\ -V_y^0 \\ -V_z^0 \end{bmatrix}, v_k = 3, V_y^0 = 0, V_z^0 = 0, T_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 \\ 0 & 0.04 \end{bmatrix},$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$x_{MD} = -1,9, x_{ГПУ} = 1,28, x_{БИУ} = 1,18, P_1^{\max} = 300, P_2^{\max} = P_3^{\max} = 50,$$

$$\alpha_1^{\max} = \frac{\pi}{3}, \beta_1^{\max} = \frac{\pi}{3}.$$

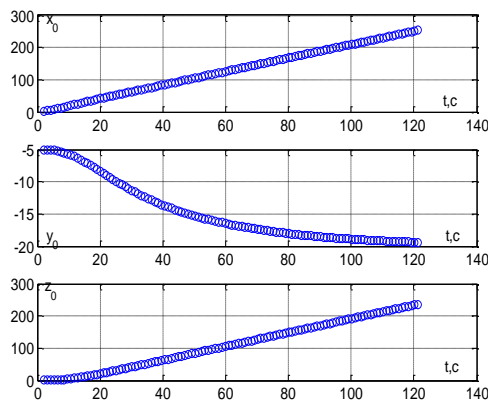


Рис. 9. Координаты АНПА

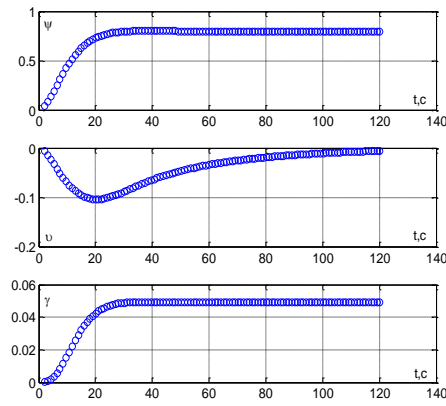


Рис. 10. Углы АНПА

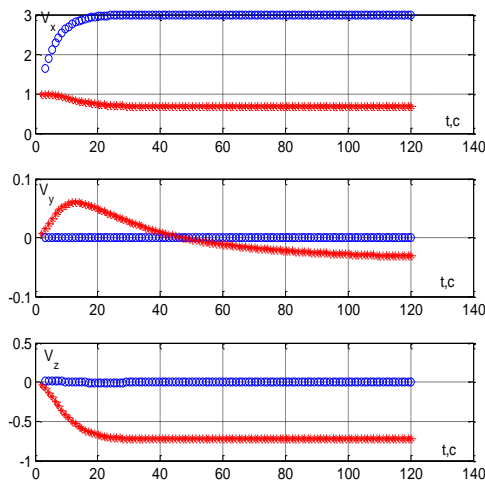


Рис. 11. Скорости АНПА

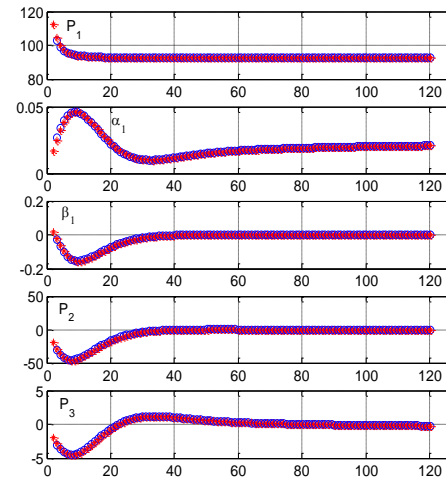


Рис. 12. Тяги и углы ИМ

На рис. 9 представлены координаты АНПА, которые указывают на то, что аппарат выходит на заданную глубину 20 м и движется к заданной целевой точке. На рис. 10 показаны углы ориентации АНПА. В силу того, что АНПА не управляется по крену, наблюдается небольшой угол крена около 2,5°. На рис. 11 представ-

лены проекции собственных скоростей АНПА и проекций скоростей, обусловленных течением. Видно, что аппарат разворачивается таким образом, чтобы обеспечить нулевую вертикальную и боковую скорости. На рис. 12 представлены тяги двигателей и углы поворота маршевого двигателя в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Моделирование системы нейросетевого интеллектуального управления АНПА проводилось на базе программного комплекса, структура которого представлена на рис. 13.

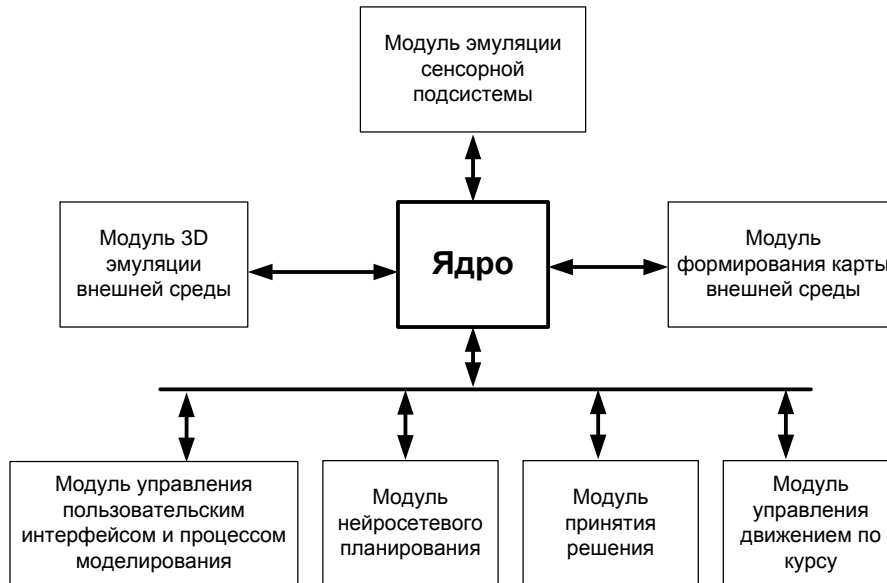


Рис. 13. Структура моделирующего блока ИСУ

Основные блоки комплекса имеют следующее назначение:

- ◆ модуль эмуляции сенсорной подсистемы – программная эмуляция модели ГАС АНПА, отвечает за получение данных о внешней среде;
- ◆ модуль 3D-эмуляции внешней среды – предназначен для отображения внешней среды и взаимодействия АНПА с внешней средой;
- ◆ модуль нейросетевого планирования – реализует описанные алгоритмы и отвечает за выбор направления перемещения АНПА на каждом шаге;
- ◆ модуль формирования модели проходимости внешней среды – отвечает за интерпретацию данных о внешней среде, полученных от модуля эмуляции сенсорной системы, выделяя препятствия и свободные участки для формирования массива препятствий;
- ◆ ядро – отвечает за синхронизацию работы всех модулей и содержит интерфейс для подключения/отключения различных модулей в систему.

Результаты экспериментов приведены на рис. 14. На рис. 14,а показан путь, спланированный ИСУ от исходной позиции АНПА к целевой точке среды. На рис. 14,б показан эпизод преодоления АНПА стационарного препятствия, а на рис. 14,в и г показаны этапы преодоления подвижного препятствия, перемещающегося по встречному курсу. Рассматривались вопросы не только обхода препятствий, но и вопросы выбора эффективной конфигурации гидроакустического сенсора.

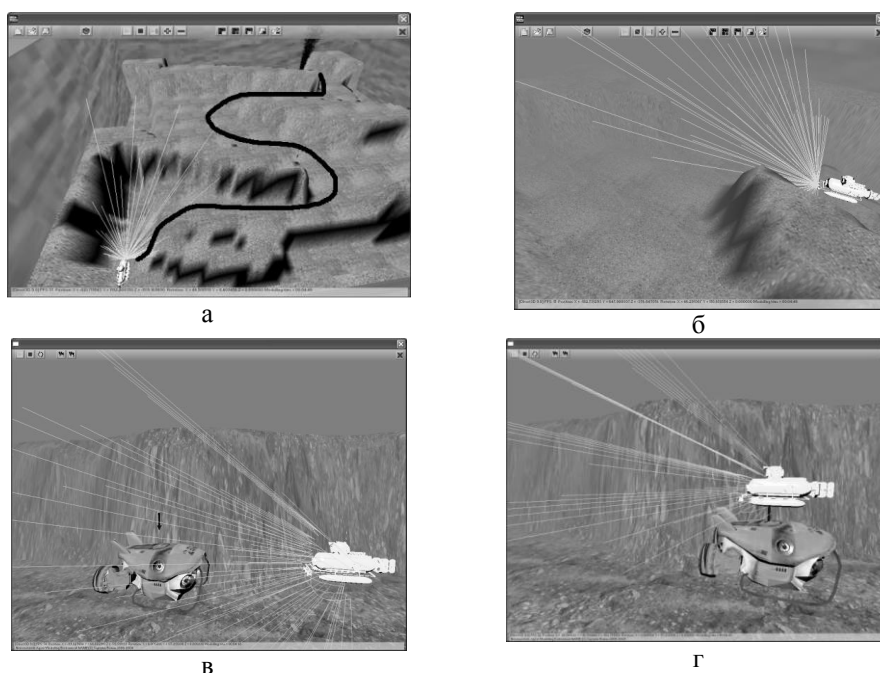


Рис. 14. Результаты экспериментов

Результаты программного моделирования поведения АНПА показали, что рассмотренная нейросетевая система управления позволяет избегать столкновений не только с неподвижными, но и с подвижными препятствиями, что обеспечивает возможность ее применения для коллектива совместно действующих АНПА.

**Аппаратная реализация системы управления.** Макетный образец системы управления реализован на базе надводного катера. Блок-схема макета представлена на рис. 15. MCU – микроконтроллер блока управления, INS – инерциальная навигационная система, USBL – ультракоротковолновая система навигации. В макете использовано оборудование: бортовой компьютер Intel Atom N270 (1.6 GHz, 512 kB L2 cache, FSB 533 MHz); микроконтроллеры исполнительных механизмов AVR-CRUMB2560, ATmega2560; доплеровский лаг RD instruments ExplorerDVL; навигационная система Comranav 2; система связи на базе Evo Logic S2C R 48/78 USBL Acoustic Modem.

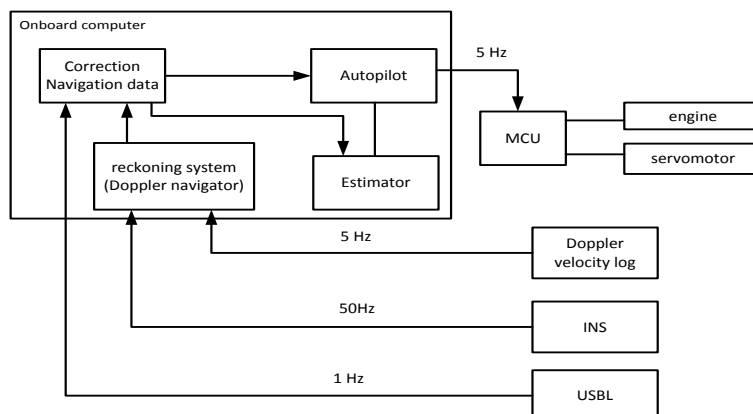


Рис. 15. Блок-схема макета системы управления АНПА

Внешний вид макета представлен на рис. 16 и 17. Программное обеспечение бортового компьютера разработано на операционной системе QNX. Результаты натурального эксперимента показаны на рис. 18–21.



Рис. 16. Внешний вид катера



Рис. 17. Доплеровский лаг

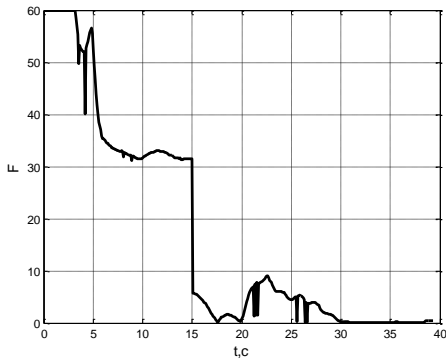


Рис. 18. Тяга двигателя

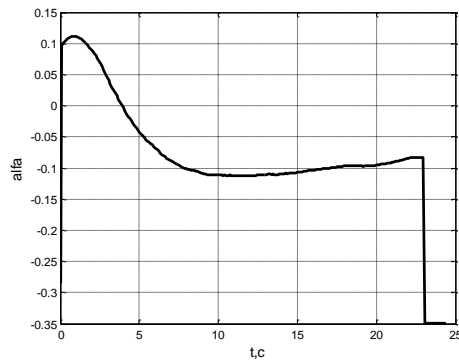


Рис. 19. Угол поворота руля

В процессе испытаний катер переходит из начальной точки (0;5) в конечную точку (-10; -4).

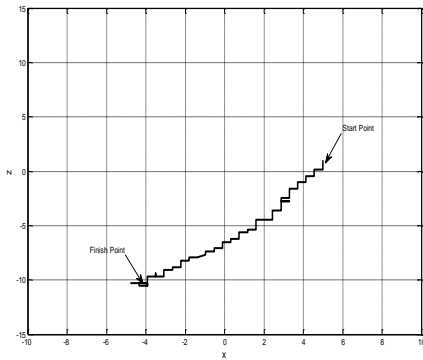


Рис. 20. Траектория катера

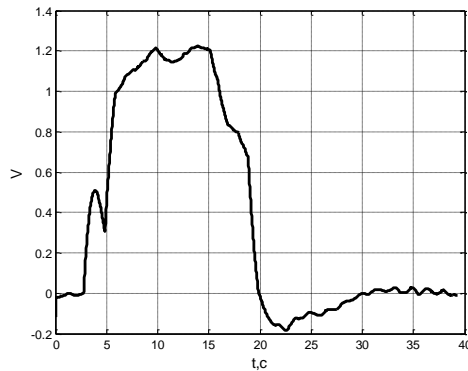


Рис. 21. Скорость катера

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grace D., Mohorcic M., Horwath J., Capstick M.H., Bobbio M. Pallavicini, M. Fitch. Communications from Aerial Platform Networks delivering Broadband for All – An Overview of the CAPANINA Project, Invited Paper for Korean Workshop on HAPs, November 2004.

2. *Верба Г.Е., Голубятников В.Н., Кирилин А.Н., Пишихов В.Х., Старостин И.А., Ступников В.И.* Современное состояние и перспективы использования воздухоплавательных комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3. – С. 40-42.
3. *Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.* Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
4. *Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко Г.* Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Научные записки ПИР-центра. – 2004. – № 2 (26).
5. *Русинов В.* Состояние и планы развития наземных робототехнических комплексов США // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 3. – С. 44-56.
6. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. и др.* Управление воздухоплавательными комплексами: теория и технологии проектирования. – М.: Физматлит, 2010. – 394 с.
7. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Сиротенко М.Ю., Носко О.Э., Юрченко А.С.* Проектирование систем управления роботизированных воздухоплавательных комплексов на базе дирижаблей // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 160-167.
8. *Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Y., and Gurenko B.V.* Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). – P. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM. 490-491.700.
9. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 200-207.
10. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Мазалов А.А.* Адаптивное управление нелинейными объектами одного класса с обеспечением максимальной степени устойчивости // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 145-151.
11. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 2.
12. *Medvedev M. Y., Pshikhov V.Kh.* Robust control of nonlinear dynamic systems // Proc. of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications. September 14 – 17, 2010, Bogota, Colombia.
13. *Пишихов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 183 с.
14. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
15. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
16. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 7. – С. 130-20.
17. *Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V.* Control system design for autonomous underwater vehicle // Proceedings – 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013. – P. 77-82. doi: 10.1109/LARS.2013.61.
18. *Зори А.А., Корнеев В.Д., Хламов М.Г.* Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных средств. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 388 с.
19. *Пишихов В.Х., Суконкин С.Я., Нагучев Д.Ш., Стракович В.В., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Костюков В.А., Волощенко Ю.П.* Автономный подводный аппарат «Скат» для решения задач поиска и обнаружения заиленных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 153-162.
20. *Чернухин Ю.В.* Искусственный интеллект и нейрокомпьютеры. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. – 273 с.
21. *Чернухин Ю.В.* Микропроцессорное и нейрокомпьютерное управление адаптивными мобильными роботами. – Таганрог: ТРТИ, 1993. – 91 с.
22. *Чернухин Ю.В.* Нейропроцессорные сети. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 439 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Павленко.

**Пшихоп Вячеслав Хасанович** – Южный федеральный университет; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

**Федотов Александр Алексеевич** – д.т.н.; директор ИТА ЮФУ.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

**Гуренко Борис Викторович** – e-mail: boris.gurenko@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

**Чернухин Юрий Викторович** – e-mail: chernukhin@dce.tsure.ru; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

**Гузик Вячеслав Филлипович** – e-mail: vfguzik@sfedu.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н.

**Пьявченко Алексей Олегович** – e-mail: aop61@mail.ru; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; к.т.н., доцент.

**Сапрыкин Роман Владимирович** – кафедра вычислительной техники; ведущий инженер.

**Переверзев Владимир Андреевич** – e-mail: pereverzevva@mail.ru; кафедра вычислительной техники; ведущий инженер.

**Приемко Андрей Анатольевич** – e-mail: andrewprmko@mail.ru; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

**Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich** – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

**Fedotov Alexandr Alexeevich** – dr. of eng. sc.; director ITA SFU.

**Medvedev Mixail Yur'evich** – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

**Gurenko Boris Viktorovich** – e-mail: boris.gurenko@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

**Chernukhin Yuriy Viktorovich** – e-mail: chernukhin@dce.tsure.ru; phone: +78634371550; the department of computer engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Guzik Vyacheslav Fillipovich** – e-mail: vfguzik@sfedu.ru; тел.: 88634371656; the department of computer engineering; head the department; dr. of eng. sc.

**Piavchenko Alexey Olegovich** – e-mail: aop61@mail.ru; phone: +78634371550; the department of computer engineering; head the department; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Saprikin Roman Vladimirovich** – the department of computer engineering; leading engineer.

**Pereversev Vladimir Andreevich** – e-mail: pereverzevva@mail.ru; the department of computer engineering; leading engineer.

**Priemko Andrey Anatolievich** – e-mail: andrewprmko@mail.ru; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.