

УДК 681.52: 629.5

В.С. БЛИНЦОВ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И АВТОМАТИКИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Сформулированы основные проблемы создания современных средств автоматизации и электрооборудования подводных аппаратов, предназначенных для реализации государственных и отраслевых программ Украины. Описаны особенности математического моделирования движения подводных аппаратов и возможности применения элементов искусственного интеллекта в системах управления их движением. Описаны задачи и особенности создания высоковольтных элементов для рабочих подводных аппаратов.

государственная программа, подводный аппарат, система управления движением, математическая модель, нечеткий регулятор, инверсная нейросетевая модель, высоковольтное электрооборудование.

Введение

Украинские предприятия ведут активную работу на шельфе Азовского и Черного морей, на реках и озерах страны. В том числе большие объемы работы выполняют под водой – на дне морей и водоемов и в водной толще. Анализ показывает, что к основным видам подводных работ на украинском шельфе Азово-Черноморского бассейна на глубинах до 500...600 метров относятся:

- исследование донной поверхности, водной среды и ихтиофауны;
- природоохранные подводные исследования;
- археологические исследования;
- поиск и обследование затонувших объектов;
- подъем подводных потенциально опасных объектов (суда и корабли, старые кабели связи, морское оружие и оружие с обычными и боевыми отравляющими веществами);
- строительство новых и инспекция существующих подводных инженерных объектов (морских нефтегазовых платформ, трубопроводов);
- дноуглубительные работы на скальных подводных грунтах;
- подводный туризм.

На реках и озерах страны проводят подводные работы в интересах предприятий энергетического

комплекса:

- инспекция плотин и гидроагрегатов гидроэлектростанций (каскад Днепровских ГЭС);
- обследование гидротехнических сооружений водоемов-охладителей атомных электростанций;
- инспекция подводных переходов нефтегазовых трубопроводов и аммиакопроводов через водные преграды.

Большой объем работ выполняют также на судоходных каналах, на акваториях портов, судостроительных и судоремонтных заводах. Проводят обследование и дноуглубление судоходных путей, строительство и ремонт причалов, очистку корпусов судов на плаву и др.

Работы производятся в рамках ряда государственных, отраслевых и целевых программ. К основным программам относятся:

Международная программа спасения Черного моря и экологического оздоровления бассейнов рек Днепра и Днестра;

Международная программа “BLACK SEA”;

Национальная программа исследований и использования ресурсов Азово-Черноморского бассейна, иных районов Мирового океана на период до 2006 года;

Государственная программа поиска и обезвреживания остатков химического оружия,

затопленного в исключительной (морской) экономической зоне Украины на 2003–2005 годы;

Государственная программа «Освоение углеводородных ресурсов в украинском секторе Черного и Азовского морей».

1. Постановка проблемы

Для успешного выполнения научно-исследовательских и производственных работ под водой предприятия Украины нуждаются в современных подводных аппаратах, применение которых позволит повысить производительность и качество поисковых, инспекционных, аварийно-спасательных и природоохранных операций в государственных территориальных водах. Производство подводных аппаратов как наукоемкой продукции может также служить источником валютных поступлений при их поставках в страны Причерноморья и Балтии.

Рассмотрим основные требования к современным подводным аппаратам (ПА) и основные научные задачи их создания.

1.1. Требования к подводным аппаратам для решения поставленных задач

Анализ показывает, что для успешного выполнения перечисленных выше подводных работ в территориальных водах Украины необходимо наличие следующих видов ПА:

буксируемых аппаратов (БПА) – поисково-инспекционных, аппаратов связи, гидролокаторов бокового обзора (ГБО) с рабочей глубиной погружения до 500 м – для проведения поисковых работ на больших площадях донной поверхности;

поисковых необитаемых привязных самоходных подводных аппаратов (НПА) с глубиной погружения до 500...600 м – для допоиска и обследования затонувших объектов, проведения подводных измерений и простых технических работ;

рабочих привязных необитаемых привязных самоходных подводных аппаратов (РНПА) с рабочей глубиной погружения до 500...600 м – для

выполнения сложных подводно-технических работ с применением подводных манипуляторов;

обитаемых самоходных ПА (ОПА) с рабочей глубиной погружения до 500...600 м – для выполнения особо ответственных подводных работ инспекционного и технологического характера;

специализированных опускаемых необитаемых рабочих подводных аппаратов (ОРПА) с рабочей глубиной до 100 м – для выполнения сложных подводно-технических работ на грунте. Основная задача таких ПА – дробление твердых донных грунтов при проведении дноуглубительных работ.

1.2. Характеристика существующего парка подводных аппаратов в Украине

Современный парк ПА Украины образуют аппараты, которые находятся в эксплуатации или вводятся в эксплуатацию в ближайшие годы. Характеристики основных ПА, в том числе спроектированные и построенные в Национальном университете кораблестроения (НУК), представлены в таблице.

Характеристики подводных аппаратов Украины

Тип, название	Год постройки, страна	Масса, кг	Рабочая глубина, м/автономность, час.	Экипаж, чел.
Обитаемые ПА				
«РИФ»	1985, СССР	2800	100/72	2
«Лангуст»	1987, СССР	9700	540/72	3
«Север-2»	1970, СССР	20000	2000/72	5
Необитаемые ПА				
«Агент-1»	2002, НУК, Украина	65	550/-	2
РНПА «МТК-200»	2005, НУК, Украина	2500	550/-	4
Буксируемые ПА				
ГБО «СМ-800»	1998, Англия	22	350/-	2
БПА «Арго-Буй»	2005, НУК, Украина	150	600/-	1
Обитаемый БПА «Тетис»	1988, СССР	3000	200/24	2
Опускаемые ПА				
ОРПА «ЭГИР»	2004, НУК, Украина	150	25/-	2

Внешний вид некоторых подводных аппаратов показан на рис. 1.



Обитаемый ПА "Риф"



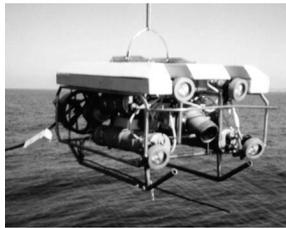
Обитаемый ПА "Лангуст"



БПА "Арго-Буй"



БПА "Тетис"



НПА "Агент-1"



Рабочий НПА "МТК-200"

Рис. 1. Подводные аппараты Украины

Анализ украинской подводной техники показывает, что ее современное состояние обеспечивает выполнение подводных работ на глубинах до 540...550 м. Однако общее количество подводных аппаратов недостаточно для проведения работ в рамках существующих программ изучения и освоения шельфа Азово-Черноморского бассейна. По предварительным оценкам, на сегодня требуется около 20 поисковых и инспекционных подводных аппаратов (НПА), около 10 рабочих самоходных аппаратов (РНПА) и три-пять специализированных опускаемых ПА для дноуглубительных работ [1].

1.3. Основные научные задачи электрооборудования и автоматики подводных аппаратов

Современные ПА являются подводными электромеханическими роботами, управление которыми осуществляется человеком-оператором или автоматически бортовым компьютером. Создание ПА требует решения комплекса научно-технических задач в области электротехники, электромеханики и автоматики. К основным задачам относятся:

- создание высокоэффективных систем

управления движением ПА и его полезным грузом – внешними приборами и инструментами, освобождающими человека-оператора от ряда сложных и утомительных управленческих операций и придающих ПА свойства интеллектуального подводного робота;

- создание типоразмерного ряда электромеханических и силовых транзисторных модулей ПА (мотор-редукторов, интегрированных блоков механотроники), исполнительных механизмов ПА с минимальными удельными массогабаритными и энергетическими характеристиками;

- создание специальных электротехнических материалов и конструкций, устойчивых к воздействию морской воды и высокого гидростатического давления.

В настоящее время при проектировании новых и модернизации существующих ПА наиболее актуальными являются следующие направления развития их электрооборудования и автоматики:

- применение элементов искусственного интеллекта – нечеткой логики и искусственных нейронных сетей в системах управления движением ПА;

- создание бортовых навигационных систем высокой точности, основанных на интеграции спутниковых и инерциальных навигационных приборов;

- применение высоковольтного электрооборудования для энергоснабжения глубоководных привязных ПА по кабель-тросу и для создания подводного инструмента ПА, необходимого для реализации новых подводных технологий.

2. Принципы построения высокоэффективных систем управления подводными аппаратами

Ниже рассмотрим основные теоретические

подходы к построению систем автоматического управления движением ПА на основе применения элементов искусственного интеллекта – теории нечеткой логики и теории искусственных нейронных сетей.

2.1. Структура системы управления интеллектуальным подводным роботом

В теории управления мобильными роботами с использованием элементов искусственного интеллекта используют принцип иерархического построения систем управления [2]. Для ПА как интеллектуального робота имеет смысл рассматривать пять уровней иерархии системы управления: стратегический, тактический, адаптивный, программный и исполнительный [3].

Структура системы управления ПА как подводного робота с элементами искусственного интеллекта показана на рис. 2.

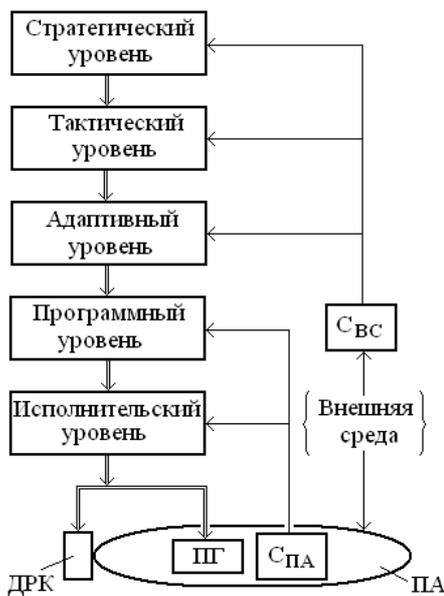


Рис. 2. Структура системы управления подводным роботом с элементами искусственного интеллекта

Первые три верхних уровня принимают и обрабатывают задания от оператора ПА, опираясь на систему оцувствления C_{BC} , генерирующую информацию о «внешних» характеристиках и параметрах внешней среды. Два нижних уровня генерируют управляющие команды для исполнительных механизмов ПА – его

двигательно-рулевых комплексов (ДРК) и полезного груза (ПГ). Для них источниками команд являются сигналы от верхних уровней управления, а также сигналы системы $C_{ПА}$ контроля за «внутренними» переменными – состоянием исполнительных механизмов ПА.

При этом на стратегическом уровне анализируют поступившее задание и планируют общее функционирование ПА для его выполнения с учетом параметров внешней среды. На тактическом уровне управляют реализацией стратегического плана – разрабатывают траекторию пространственного перемещения, формируют очередность операций (движений) в соответствии со стратегией поведения ПА и с учетом внешних возмущений. На адаптивном уровне корректируют решения тактического уровня с учетом фактического состояния внешней среды, осуществляют поиск оптимальных управленческих решений в рамках выбранной тактики выполнения поступившего задания.

На программном уровне рассматриваемой системы управления реализуют отдельные типовые операции – элементарные движения ПА и ПГ в плоскости и в пространстве. Это достигается применением заранее инсталлированных управляющих программ, которые осуществляют в общем случае групповое управление исполнительными механизмами ПА и ПГ.

На исполнительском уровне управляют работой отдельных исполнительных механизмов в режимах стабилизации, слежения и др.

2.2. Особенности математического моделирования подводного аппарата как объекта управления

С позиций теории автоматического управления ПА представляет собой твердое тело, совершающее управляемое движение в потоке жидкости. К основным особенностям ПА как объекта управления относятся:

– существенная нелинейность математической модели динамики ПА, обусловленная наличием гидродинамических коэффициентов и нелинейностями исполнительных механизмов аппарата;

– неопределенность внешних возмущающих воздействий на корпус ПА при его движении;

– неопределенность ряда собственных параметров ПА вследствие их изменений в соответствии с выполняемой подводной технологией;

– наличие (а в некоторых случаях преобладание) акселеративного движения ПА, вызванного особенностями технологий их применения.

Векторная форма уравнений динамики ПА в связанной системе координат имеет вид [4]

$$\frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{K} = \bar{R}, \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{L} + \bar{V} \times \bar{K} = \bar{M}, \quad (2)$$

где \bar{K} – главный вектор количества движения ПА; $\bar{\Omega}$ – угловая скорость поворота осей системы координат, жестко связанной с корпусом ПА, относительно базовой системы координат; \bar{L} – главный вектор момента количества движения ПА относительно начала координат; \bar{R} – главный вектор внешних сил, действующих на ПА; \bar{M} – главный вектор момента внешних сил, действующих на ПА, относительно начала координат.

Компьютерное моделирование уравнений (1)-(2), как правило, выполняется в скалярной форме и трудностей не вызывает. Однако нелинейность сил сопротивления движению ПА гидродинамической природы, а также существенная нелинейность уравнений функционирования ДРК требуют разработки специальных математических зависимостей, пригодных для использования в

задачах синтеза систем управления движением ПА.

Верификация ряда математических моделей ПА и их ДРК показывает, что удовлетворительные результаты дает применение следующих зависимостей:

$$R_i = 0,5C_i\rho S|v_i|v_i, \quad (3)$$

где C_i – коэффициент гидродинамического сопротивления голого корпуса ПА по i -й оси; ρ – удельная плотность воды; S – характерная площадь голого корпуса ПА; v_i – составляющая скорости движения ПА по i -й оси; $i=x,y,z$ – оси связанной системы координат.

Коэффициенты C_i определяют как суммы составляющих гидродинамического сопротивления по осям ПА:

$$C_i = C_{Vi} + C_{Ai} + C_{APi} + C_{Hi} + C_{Li} + C_{KTi}, \quad (4)$$

где C_{Vi} – коэффициент вязкостного сопротивления корпуса ПА; C_{Ai} – коэффициент сопротивления шероховатостей корпуса ПА; C_{APi} – коэффициент сопротивления выступающих частей корпуса ПА; C_{Hi} – коэффициент сопротивления ниш и вырезов корпуса ПА; C_{Li} – коэффициент импульсного сопротивления; C_{KTi} – коэффициент сопротивления кабель-троса (для привязных ПА).

Сила тяги T типового движителя ПА – гребного винта (ГВ), входящая в правую часть уравнения (1), и момент Q на его валу определяют по формулам [5]:

$$T = K_T \rho D^4 \frac{\omega^2}{4\pi^2}, \quad (5)$$

$$Q = K_M \rho D^5 \frac{\omega^2}{4\pi^2}, \quad (6)$$

где K_T , K_M – коэффициенты упора и момента ГВ, соответственно; ω , D – угловая частота вращения и диаметр ГВ, соответственно.

Коэффициенты K_T и K_M представляют собой нелинейные зависимости от относительной поступи ГВ $J = 2\pi v / \omega D$ и зависят от модуля и направления скорости набегающего потока воды v . Практика

моделирования показывает, что при исследовании переходных режимов движения ПА (включая реверс движителей) целесообразно использовать аппроксиматоры зависимостей $K_T=f(J)$ и $K_M=f(J)$ на основе искусственных нейронных сетей [6].

Моделирование электроприводов движителей ПА может выполняться по одной из традиционных методик [7] и трудностей не вызывает.

Внешние возмущения, действующие на ПА, в первую очередь, проявляются в виде составляющих морского течения v по соответствующим осям ПА и учитываются в уравнениях типа (3).

Нестабильность собственных параметров ПА, обусловленная работой его внешнего полезного груза, может быть учтена в уравнениях типа (4).

2.3. Система автоматического нечеткого управления траекторным движением ПА

Ниже рассмотрим современные направления в области применения нечеткой логики и искусственных нейронных сетей в системах управления движением ПА на программном и исполнительском уровнях. В большинстве случаев здесь проводится стабилизация отдельных параметров движения ПА – курса, траектории, скорости, глубины и др.

На рис. 3 показана система автоматического управления (САУ) движением ПА на основе спутниковых и инерциальных навигационных приборов. САУ обеспечивает стабилизацию ПА на траектории при движении по поверхности воды и под водой.

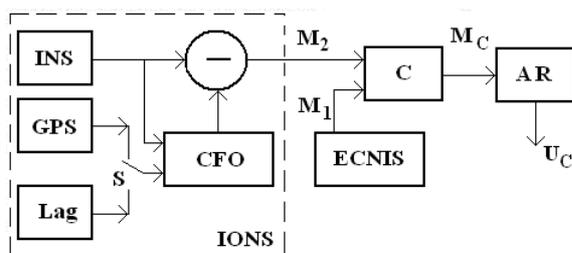


Рис. 3. Структура системы управления движением ПА: IONS – интегрированная система ориентации и навигации; INS – бесплатформенная инерциальная

навигационная система; GPS – приемник спутниковой навигационной системы; ECNIS – электронно-картографическая навигационно-информационная система; С – вычислительное устройство; AR – авторулевой; Lag – датчик скорости и пройденного пути; S - переключатель; CFO – оптимальный фильтр Калмана.

Основным источником навигационной информации является бесплатформенная инерциальная навигационная система [8]. Для коррекции ее ошибки при движении по поверхности воды используют приемник спутниковой навигационной системы. При движении под водой вместо GPS применяют информацию от лага. Коррекция осуществляется по алгоритму, в основе которого лежит обработка информации с помощью оптимального фильтра Калмана [9].

Заданная траектория движения ПА введена в ECNIS и сохраняется в базе данных. Информация о текущем местоположении ПА M_2 вырабатывается IONS и подается в вычислитель С, где сравнивается с информацией M_1 , поступающей от ECNIS. В результате вырабатываются сигналы управления M_c по следующим уравнениям:

$$m_{Ci} = -[k_{1i}(\psi - \Delta\psi) + k_{2i}\omega_z]; \quad (7)$$

$$\Delta\psi = k_{3i}\eta + k_{4i} \sum_{j=1}^N \eta_j, \quad (8)$$

где $\psi = (K_1 - K_2)$ – отклонение ПА от курсового угла участка траектории; $\Delta\psi$ – поправка к заданному курсу; ω_z – угловая скорость рыскания ПА; $\eta(M_1, M_2)$ – боковое отклонение аппарата от траектории; $k_{1,2,3,4}, N$ – коэффициенты управления.

Боковое отклонение ПА от заданной траектории η вычисляют по формуле:

$$\eta = \left\{ -\ln \left[\frac{(tg\varphi_c / 2 + \pi / 4)}{(tg\varphi_0 / 2 + \pi / 4)} \right] \sin P + (\lambda_c - \lambda_0) \cos P \right\} \times R \cos \left(\frac{\varphi_0 + \varphi_c}{2} \right),$$

где φ_c, λ_c – измеренные в IONS текущие значения широты и долготы местоположения подводного

аппарата; φ_0, λ_0, P – известные координаты начальной точки и курсовой угол текущего участка траектории; R – радиус Земли.

Сигналы управления M_C подаются на авторулевой с нечетким регулятором для управления движением ПА по заданной траектории. Структура вычислителя C и нечеткого регулятора авторулевого ПА показана на рис. 4.

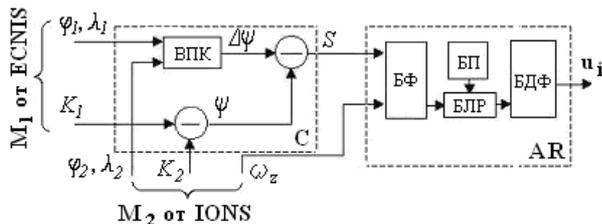


Рис. 4. Структурная схема системы управления движением ПА с нечетким регулятором: K_1 – заданный курс; K_2 – текущий курс; $\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2$ – заданные и текущие координаты ПА; БФ – блок фазификации; БП – база правил; БЛР – блок логического решения; БДФ – блок дефазификации; ВПК – вычислитель поправки к заданному курсу

Расчеты показывают, что применение такой системы управления обеспечивает определение навигационных координат ПА на поверхности воды и под водой с точностью 2...5 метров.

2.4. Структура системы управления движителем ПА на основе инверсной нейросетевой модели объекта управления

Инверсные модели используют для воспроизведения входного сигнала объекта управления $u(t)$ при определенном его выходном сигнале $U(t)$ [10]. Такие модели могут применяться в прямом канале управления при их последовательном подключении с объектом управления для повышения качества переходных процессов последнего при обработке управляющего воздействия. Из теории автоматического управления известно, что система, в которой инверсная модель используется в прямом канале последовательно с объектом управления, имеет передаточную функцию, близкую к единице. Это означает, что такая система должна иметь очень хорошие качественные показатели работы.

Пусть исполнительным механизмом в ПА является электродвигатель постоянного тока (ЭПТ) с независимым возбуждением, для которого $u(t)=\omega_3$ – заданная угловая частота, а $U(t)=\omega_d$ – фактическая угловая частота вращения вала ЭПТ. Схема управления ЭПТ на основе применения инверсной нейросетевой модели (НСМ) его функционирования показана на рис. 5.

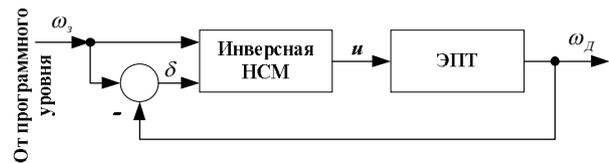


Рис. 5. Система управления исполнительным электроприводом ПА

При создании инверсной модели на основе искусственной нейронной сети следует учитывать то, что точность воспроизведения нейромоделью динамики объекта управления зависит от выбора входных сигналов сети, количества скрытых слоев и нейронов, которые они содержат. Нейроны входного слоя в таких сетях транслируют входные сигналы на первый скрытый слой сети без их преобразования. В скрытом слое нейронной сети последовательно происходит нелинейное преобразование входных сигналов. Сигналы с последнего скрытого слоя поступают на нейроны выходного слоя, которые формируют реакцию сети.

Синтез инверсной НСМ ЭПТ проводят с использованием экспериментальных или расчетных характеристик его работы.

Опыт авторов показывает, что применение инверсных НСМ для буксируемых и самоходных ПА обеспечивает уменьшение времени переходных процессов при случайных воздействиях на ПА в 2,5-3 раза, а точность управляемого движения увеличивается в 1,5-2 раза.

3. Особенности проектирования высоковольтного подводного инструмента

Применение высокого электрического напряжения (3...10 кВ) под водой сопряжено с рядом

трудностей, обусловленных высокими электропроводящими свойствами воды. Вместе с тем необходимость создания высоковольтных подводных систем возрастает в связи с передачей электроэнергии для ПА по кабель-тросам на глубины до 2000...4000 м [11], а также в связи с созданием высоковольтного подводного инструмента для малых глубин [12]. Последний тип оборудования, приведенный в таблице, – опускаемый необитаемый рабочий ПА «ЭГИР».

Проблемными научными вопросами при создании такого рода подводной техники являются:

- создание высоковольтных накопителей электроэнергии и электроразрядников для ПА типа «ЭГИР», реализующих разрядно-импульсную технологию разрушения твердых донных пород;

- создание специальных высоковольтных подводных кабель-тросов нулевой плавучести с разрывным усилием порядка $10^4...10^5$ Н;

- создание систем автоматического управления работой подводных устройств импульсной энергетики в условиях сильных электромагнитных помех.

Рассмотрим пути решения первой проблемы. Отметим, что создание высоковольтных накопителей электроэнергии общепромышленного назначения теоретически достаточно глубоко исследовано, а производство освоено украинской промышленностью [13]. Применительно к использованию в подводной технике необходимо лишь адаптировать имеющиеся технические решения к требованиям морской техники.

Создание высоковольтных электроразрядников для ПА типа «ЭГИР» является новой задачей, так как в их конструкции необходимо предусмотреть совмещение функций бурения грунта и электрогидроимпульсного воздействия на грунт путем серии высоковольтных подводных электроразрядов с энергией в импульсе до 100 кДж.

Поэтому проектирование электроразрядника

следует выполнять с позиций одновременного удовлетворения следующим требованиям:

- выполнение операции бурения (ударно-вращательное движение бурового инструмента с одновременной подачей забортной воды для выноса грунта из зоны бурения);

- контроль скорости бурения и глубины пробуренного шурфа;

- выполнение серии высоковольтных подводных электроразрядов в шурфе с контролем их эффективности.

Конструкция рабочего органа ОРПА – электробура – высоковольтного электрогидроимпульсного разрядника показана на рис. 6.

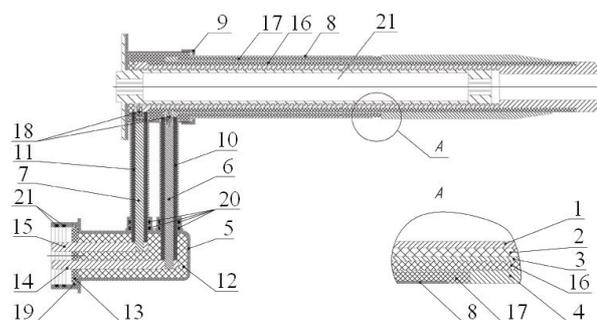


Рис. 6. Конструкция высоковольтного электрогидроимпульсного разрядника ОРПА

На рис. 6 обозначено: 1 - сердечник; 2 - высоковольтный изолятор; 3 - положительный электрод; 4 - отрицательный электрод; 5 - внешний корпус; 6, 7 - токопроводы; 8 - кожух; 9 - гайка; 10, 11 - высоковольтные изоляторы токопроводов; 12 - изолятор прямоугольный; 13 - шайба; 14, 15 - плоские токоведущие стержни; 16, 17 - изоляторы разрядника; 18 - винт; 20-22 - кольца; 21 - канал для бурового инструмента.

Лабораторные испытания указанного рабочего органа ОРПА, выполненные в натуральных условиях, показали его эффективность при проведении дноуглубительных работ на донных грунтах с пределом прочности при сжатии 2...5 кгс/см² (т.е. грунтах, относящихся к VII группе твердости по VII-балльной шкале твердости).

Проблемы создания специальных высоковольтных подводных кабель-тросов и систем управления ПА типа «ЭГИР» в настоящее время не решены и требуют проведения дополнительных исследований.

Заключение

Выполнен обзор существующих подводных аппаратов, работающих в украинской промышленности, оценены потребности в подводных аппаратах на ближайшую перспективу. Сформулированы основные проблемы создания современных средств автоматики и электрооборудования подводных аппаратов.

Рассмотрены особенности математического моделирования движения подводных аппаратов и возможности применения элементов искусственного интеллекта в системах управления их движением.

Описаны особенности создания высоковольтных элементов для рабочих подводных аппаратов.

Литература

1. Романовский Г.Ф., Блинцов В.С., Родин И.А. Современное состояние и перспективы развития подводных аппаратов в Украине // Proceedings of the 5-th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. Volume 2. Szczecin, 2004. – S.107-117.
2. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект - основа новой информационной технологии. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
3. Станкевич Л.А. Интеллектуальные роботы и системы управления // Нейрокомпьютеры - разработка, применение. – М.: Радиотехника. – 2005. – № 8-9. – С. 54-66.
4. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов: Учебник. – СПб.: Элмор, 2002. – 360 с.
5. Справочник по теории корабля: В 3 т. / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – Т.1. – 768 с.
6. Ставинський А.А., Блінцов С.В. Удосконалення математичної моделі самохідного підводного апарата для дослідження просторового руху // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2004. – № 3 (396). – С. 161–166.
7. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. / Під ред. М.Г. Поповича та О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
8. Несенюк Л.П. Бесплатформенные инерциальные системы. Обзор состояния и перспектив развития // Гироскопия и навигация. – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – № 1 (36). – С.13-21.
9. Браммер Л., Зифлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси: Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация: Пер. с нем. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
10. Зотов М.Г. Конструирование управляющих устройств с компенсатором нелинейности // Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. Вып.1(9). – Казань: КГТУ им. А.Н.Туполева, 1999. – С. 37-43.
11. Блинцов В.С. Привязные подводные системы. – К.: Наук. думка, 1998. – 232 с.
12. Вовченко О.І., Швець І.С., Кузьменков М.І., Блінцов В.С., Бова О.В., Різун А.Р., Голень Ю.В. Комплекс для електрогідроімпульсного руйнування міцних монолітних об'єктів під водою. Патент України на винахід №76299. Бюл. № 7, 17.07.2006.
13. Вовченко А.И. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах / А.И.Вовченко, А.А.Посохов; Отв. ред. И.С.Швец. – К.: Наук. думка, 1992. – 168 с.

Поступила в редакцию 21.02.2007

Рецензент: лауреат Государственной премии Украины, д-р техн. наук, проф. Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.