



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южный федеральный университет»
Научно-исследовательский институт Робототехники и процессов управления

- Перспективы применения робототехнических комплексов
- Противодействие робототехническим комплексам военного назначения
- Системы энергетики и приводной техники
- Системы управления и моделирования
- Системы и средства связи навигации и наведения
- Системы технического зрения

Сборник материалов

XIII Всероссийской научно-практической конференции
«Перспективные системы и задачи управления»

и IX молодежной школы-семинара

«Управление и обработка информации
в технических системах»

2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Научно-исследовательский институт робототехники и процессов
управления Южного федерального университета

Перспективные системы и задачи управления

Материалы
XIII Всероссийской
научно-практической конференции

и IX молодёжной школы-семинара
**«УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»**

Ростов-на-Дону
2018

УДК 681.51

Издание осуществлено при поддержке Фонда перспективных исследований (121059, г. Москва, Бережковская наб., д. 22, стр. 3) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-20006\18).

Перспективные системы и задачи управления: материалы Тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Девятой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2018. – 281 с.

В сборник трудов Тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Девятой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах», вошли статьи по следующим секциям: Перспективы применения робототехнических комплексов; Противодействие робототехническим комплексам военного назначения; Системы энергетики и приводной техники; Системы управления и моделирования; Системы и средства связи, навигации и наведения; Системы технического зрения.

Публикуется в авторской редакции

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Коллегия Военно-промышленной комиссии Российской Федерации
Министерство обороны Российской Федерации
Министерство внутренних дел Российской Федерации
Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации
Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральная служба безопасности Российской Федерации
Федеральная служба войск национальной гвардии Российской Федерации
Федеральное агентство научных организаций (ФАНО России)
Военно-научный комитет Вооруженных Сил Российской Федерации
Морской научный комитет Минобороны России
Фонд перспективных исследований
Национальный центр развития технологий и базовых элементов робототехники
Российский фонд фундаментальных исследований
Главное управление научно-исследовательской деятельности и технологического
сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) Министерства
обороны Российской Федерации
Главное управление вооружения Вооруженных Сил Российской Федерации
Управление перспективных межвидовых исследований и специальных проектов
Министерства обороны Российской Федерации
Секция прикладных проблем при Президиуме РАН
Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова
ФГУ ВНИИ ГОЧС (Федеральный центр науки и высоких технологий) МЧС России
46 ЦНИИ Министерства обороны Российской Федерации
АО «Объединенная судостроительная корпорация»
Концерн радиостроения «Вега»
ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»
Ассоциация предприятий индустрии беспилотных авиационных систем
Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Кабардино-Балкарский научный центр РАН
Дальневосточный федеральный университет
Южный федеральный университет
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова
Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева
ФГУП «ЦНИИ автоматики и гидравлики»
Журнал «Мехатроника, автоматизация и управление»
Журнал «Известия ЮФУ. Технические науки»
Журнал «Труды СПИИРАН»
Научно-технический журнал «Интеллект&Технологии»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА:**

Член коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации

Мартьянов О.В.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА:

Директор НИИ робототехники и процессов управления ЮФУ

Пшихонов В.Х.

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА:

- Алфимов С.М.** – ответственный секретарь научно-технического совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации;
- Анисимов Н.Ю.** – ректор ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»;
- Апполонов Е.М.** – генеральный директор АО «ЦКБ «Лазурит»;
- Беккер А.Т.** – директор Инженерной школы ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»
- Буренок В.М.** – президент Российской академии ракетных и артиллерийских наук;
- Вельтищев В.В.** – заведующий кафедрой «Подводные роботы и аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- Григорьев А.И.** – генеральный директор Фонда перспективных исследований;
- Денисов И.И.** – руководитель Национального центра развития технологий и базовых элементов робототехники;
- Доброхотов А.В.** – советник президента АО «Объединенная судостроительная корпорация»;
- Иванов П.М.** – научный руководитель Кабардино-Балкарского научного центра РАН;
- Киселев Л.В.** – главный редактор журнала «Подводные исследования и робототехника», главный научный сотрудник Института морских технологий ДВО РАН;
- Комченков В.И.** – главный инженер 2 отдела Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов Минобороны России;
- Кононов А.Ф.** – руководитель приоритетного технологического направления по технологиям РТК (главный технолог РТК);
- Кордюков Р.Ю.** – заместитель начальника Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) Минобороны России;
- Королев И.О.** – заместитель командующего по вооружению Тихоокеанского флота;
- Кутахов В.П.** – директор проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы» ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского»;

- Мионов А.М.** – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) Министерства обороны Российской Федерации;
- Михайлов Ю.М.** – председатель научно-технического совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, заместитель председателя коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, академик РАН;
- Наумов В.Н.** – заведующий кафедрой «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- Наумов Л.А.** – научный руководитель Института морских технологий ДВО РАН, член-корр. РАН;
- Никитин В.С.** – генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр»;
- Панков С.Е.** – начальник Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов Минобороны России;
- Пашков Ю.Д.** – заместитель начальника Департамента информационных технологий, связи и защиты информации МВД России;
- Пешехонов В.Г.** – генеральный директор АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», академик РАН;
- Попов С.А.** – начальник Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники Министерства обороны Российской Федерации;
- Рахманов А.А.** – председатель экспертного совета Высшей аттестационной комиссии по военной науке и технике;
- Рахманов А.Л.** – президент АО «Объединенная судостроительная корпорация»;
- Рубцов И.В.** – начальник центра робототехнических систем и комплексов МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- Себряков Г.Г.** – начальник подразделения ФГУП «ГосНИИ авиационных систем», член-корр. РАН;
- Суров А.Б.** – председатель Морского научного комитета Минобороны России;
- Сыроежко А.А.** – директор по управлению программами развития роботизированных беспилотных систем АО «Концерн радиостроения «ВЕГА»;
- Сычков В.Б.** – руководитель Сибирского отделения Фонда перспективных исследований;
- Туричин Г.А.** – и.о. ректора Санкт-Петербургского государственного морского технического университета;
- Цариченко С.Г.** – начальник базового методического полигона испытаний робототехнических комплексов ФКП «НИИ «Геодезия»;
- Цыганов Д.И.** – заместитель начальника Управления координации и обеспечения деятельности организаций в сфере науки ФАНО России;

- Черников С.Г.** – заместитель генерального директора
АО «НИИ автоматической аппаратуры
им. В.С. Семенихина»;
- Щербинин В.В.** – начальник научно-технического отделения
ФГУП «ЦНИИ автоматики и гидравлики»;
- Щербатюк А.Ф.** – директор Института морских технологий
ДВО РАН, член-корр. РАН;
- Юсупов Р.М.** – научный руководитель Санкт-Петербургского
института информатики и автоматизации РАН,
член-корр. РАН.

ТЕХКОМИТЕТ:

Косенко Е.Ю.,
Маевский А.М.,
Медведев М.Ю.,
Павленко Д.Д.,
Пархоменко В.Б.,
Пшихопова К.В.,
Хлебникова Н.В.,
Щукина С.Ю.

В.Г. Довгань

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВЗЯТИЯ И ДОСТАВКИ НА ЗЕМЛЮ ЛУННОГО ГРУНТА

Человечество на протяжении многих веков стремилось заглянуть в необъятное. И, наконец, в XX веке сама История зафиксировала начало отсчёта НОВОЙ эры – Космической. В 22:28:34 по московскому времени 4 октября 1957 г. с полигона Тюра-Там (ныне всемирно известный космодром Байконур) стартовала двухступенчатая ракета-носитель, знаменитая королёвская «семёрка», которая вывела на околоземную орбиту рукотворное изделие – космический аппарат. Он стал первым в мире искусственным спутником Земли и первым искусственным небесным телом в Солнечной системе. А вскоре, 3 ноября 1957 г. в 05:30:42, состоялся запуск второго ИСЗ. Это был первый в мире биологический спутник Земли с подопытным животным – собакой по кличке «Лайка». Запуск третьего советского ИСЗ состоялся 15 мая 1958 г., и в космосе заработала первая в мире научная лаборатория.

Успешные запуски советских искусственных спутников Земли позволили предприятиям ракетно-космической отрасли, воинским частям и учреждениям Министерства обороны накопить бесценный опыт для осуществления межпланетных полётов. Для этого требовалось создать широчайшую кооперацию научных и образовательных учреждений, проектно-конструкторских организаций, предприятий многих отраслей промышленности, суметь скоординировать их деятельность, оптимизировать руководство военно-промышленным комплексом. Так же, как и в годы Великой Отечественной войны, в период восстановления народного хозяйства, чтобы руководить мощным широким фронтом усилий, нужны были Личности. И им по праву принадлежит достойное место в Истории, в подъёме Отечества, его науки, техники, в обеспечении безопасности государства

Выдающийся советский учёный в области прикладной математики и механики, крупный организатор советской науки, идеолог советской космической программы Мстислав Всеволодович Келдыш (1911–1978) является одним из инициаторов исследования космоса межпланетными станциями, зондирования Луны и планет Солнечной системы. Академик АН СССР (1946), член Президиума (1953), вице – президент (1960), президент (с 1961) АН СССР.

Советский учёный, конструктор и организатор производства ракетно-космической техники Сергей Павлович Королёв (1907–1966) занимает особое место в истории создания и развития практической космонавтики.

С 1931 г. – в московской Группе изучения реактивного движения (МосГИРД), возглавив её в 1932 г., главный инженер, заместитель начальника Реактивного научно-исследовательского института (1933), начальник конструкторского отдела СКБ НИИ-88 Министерства оборонной промышленности (МОП) СССР (1946), начальник и главный конструктор ОКБ-1 НИИ-88 (1950), а с 1956 по 1966 гг. – начальник и главный конструктор ОКБ-1 МОП СССР (ныне РКК «Энергия» имени С.П. Королёва). С.П. Королёв – основоположник практической космонавтики, создатель советского стратегического ракетного оружия средней и межконтинентальной дальности. Его конструкторские разработки имеют исключительную ценность в создании ракетно-ядерного щита Отечества, а вклад в организацию и развитие практической космонавтики имеет мировое значение.



В те годы в публикациях на космическую тематику в связи с секретностью проводимых работ М.В. Келдыша безымянно называли «Главным теоретиком космонавтики», а С.П. Королёва - «Главным конструктором».

Необходимо напомнить, что после труднейшей, разорительной войны образовалось неформальное объединение – Совет главных конструкторов. Предложенный С.П. Королёвым Совет заложил стратегические основы дальнейшей политики освоения космического пространства и с 1947 г. стал самым влиятельным органом в развитии всей отечественной космонавтики.

В его первый состав входили В.П. Бармин – главный конструктор отечественных стартовых комплексов и наземного оборудования для ракетной техники, В.П. Глушко – главный конструктор отечественного жидкостного ракетного двигателя, В.И. Кузнецов – главный конструктор комплексов командных гироскопических приборов и систем управления стратегических ракет и КА, Н.А. Пилюгин – главный конструктор систем автономного управления ракетными и ракетно-космическими комплексами, М.С. Рязанский – главный конструктор по радиотехническим системам управления и измерений. Позднее туда вошёл А.Ф. Богомолов – главный конструктор средств радиотелеметрии и траекторных измерений.



*Совет Главных конструкторов: А.Ф. Богомолов, М.С. Рязанский, Н.А. Пилюгин, С.П. Королёв, В.П. Глушко, В.П. Бармин, В.И. Кузнецов (слева направо).
Полигон Капустин Яр, сентябрь 1947 г.*

Премьеры достижений советской науки и техники в космосе продемонстрировали всему миру высокий уровень и мощный потенциал, духовную силу и талант нашего народа. Начали сбываться предсказания С.П. Королёва: «Можно предположить, что в будущем именно Луна станет основной промежуточной станцией на пути с Земли в глубины космоса...» (газета «Правда» от 10 декабря 1957 г.)

И «космическим объектом № 1» для наших учёных, конструкторов, инженеров становится Луна.

В январе 1958 г. М.В. Келдыш предложил С.П. Королёву разработать несколько научно-технических проектов по исследованию Луны космическими аппаратами. Такие проекты были подготовлены заместителем С.П. Королёва – начальником головного отдела 9 (проектирование космических объектов) М.К. Тихонравовым (1900–1974).



К.Э. Циолковский и М.К. Тихонравов (Калуга, 17.02.1934 г.)

Выдающийся учёный, создатель авиационной и ракетной техники, один из пионеров практической космонавтики Михаил Клавдиевич Тихонравов (1900–1974) состоял в Вооружённых силах с июня 1919 г. по декабрь 1954 года. Окончил Институт инженеров Красного Воздушного Флота им. Н.Е. Жуковского в 1925 году. С 1932 г. – начальник бригады МосГИРД. С октября 1933 г. – сотрудник РНИИ (старший инженер отдела, начальник отдела, старший научный сотрудник, начальник группы РНИИ). Большое влияние на Тихонравова оказали работы К.Э. Циолковского и встреча с ним. С сентября 1944 г. – начальник научно-исследовательского сектора филиала № 2 НИИ-1. С 1946 г. – заместитель начальника НИИ-4, с февраля 1955 г. – начальник отдела (проектирование искусственных спутников Земли, пилотируемых космических кораблей и автоматических межпланетных аппаратов) ОКБ-1 НИИ-88.

С.П. Королёв, выступая на заседании Комиссии по военно-промышленным вопросам (ВПК) при Совете министров СССР с докладом «О программе исследования Луны», научно обосновал предлагаемые проекты. Результатом рассмотрения предложений «О перспективных работах по освоению космического пространства. (Основные этапы исследования Луны, Марса и Венеры)» стало принятие правительственного Постановления от 20 марта 1958 г. «О запусках космических объектов в направлении Луны», получившего наименование Программа «Е».

Программа включала следующие проекты: проект Е1 – научные исследования на трассе полёта Земля–Луна по траектории прямого попадания в Луну; проект Е2 – получение фотографий обратной стороны Луны с облётной траектории и

последующей радиопередачи их на Землю; проект Е3 – более детальная фотосъёмка Луны с облётной траектории; проект Е4 – проведение мощного взрыва на Луне; проект Е5 – выведение аппарата на орбиту искусственного спутника Луны (ИСЛ); проект Е6 – мягкая посадка на Луну; проект Е7 – выведение на орбиту ИСЛ и трансляция телевизионного изображения поверхности Луны; проект Е8 – доставка на Луну подвижного исследовательского аппарата, управляемого с Земли.

Для её реализации необходимо было создать: специальные лунные космические аппараты (ЛКА); многоступенчатую ракету-носитель (РН) с мощными двигателями, работающими на высококалорийном топливе, и с особо точной системой автономного управления её полётом; наземную инфраструктуру для РН космического назначения; современные радиотехнические средства для обеспечения надёжного дистанционного управления РН и ЛКА.

Управление полётом ЛКА возлагалось на «Центр по управлению работой и эксплуатацией измерительных средств объектов Д и Е», названный впоследствии Командно-измерительным комплексом (КИК). Согласно Постановлению он был сформирован слиянием «Центра по руководству и координации работ комплекса измерительных средств, средств связи и службы единого времени для обеспечения полёта геофизического искусственного спутника Земли (ИСЗ)» и 13-ти измерительных пунктов, созданных для работы по спутникам (Постановление СМ СССР от 3.09.1956 г. № 1241-632). Также были внесены изменения в состав и дислокацию войсковых частей, получивших закрытое наименование «Отдельный научно-измерительный пункт» (ОНИП). Началось более эффективное их оснащение современными радиотехническими средствами широкого применения. Особое внимание уделялось повышению уровня профессиональной подготовки личного состава, улучшению его жизненных условий, как в Центре, так и в местах дислокации пунктов.

Математический фундамент и научный поиск путей реализации выше названных проектов обеспечивал академик М.В. Келдыш.



Совет Главных конструкторов предложил создать на базе ракеты Р-7, развивавшей первую космическую скорость (7,9 км/с) и испытанной при запусках первых ИСЗ, трёхступенчатую РН. К разработке двигателя для третьей ступени по предложению С.П.Королёва приступил Главный конструктор ОКБ-154 авиационной промышленности (ныне – ОАО «Конструкторское бюро химической автоматики» – «КБХА», г. Воронеж) Семён (Шолом) Ариевич Косберг (1903–1965). Третья ступень ракеты (её назвали космической) была разработана в 1958 г. в рекордно короткое время – девять месяцев. Она получила наименование блок «Е», а новая РН 8К72 – «Восток-Л».

В 1958 г. наступил черёд выполнить задачу Программы «Е» – попасть в Луну космической ракетой. Это – осуществление мечты Человека Разумного о познании небесных тел по соседству с нашей планетой.

Первый период (1958–1959) лунной программы ознаменовался применением телеконтроля для первых двух советских космических аппаратов и первым в истории телеуправлением третим ЛКА. Второго января в 19:41:21 (здесь и далее – время московское) боевые расчёты Ракетных частей МО с 1-й стартовой площадки полигона Тюра-Там осуществили старт РН «Восток-Л». Телеграфное агентство Советского Союза (ТАСС) оповестило весь мир о старте к Луне «первой совет-

ской космической ракеты». Пройдя вблизи Луны, она стала первой искусственной планетой Солнца с красивым именем «Мечта». В сентябре того же года «вторая советская космическая ракета» доставила в Море дождей вымпелы с изображением Государственного герба Советского Союза и надписью «Союз Советских Социалистических Республик. Сентябрь 1959». В октябре 1959 г. «третья советская космическая ракета» вышла на орбиту вокруг Луны и сфотографировала её. Земляне впервые увидели обратную сторону естественного и вечного спутника нашей планеты. Упоминаемые в последующем тексте советские лунные космические аппараты именовались соответственно «Луна-1», «Луна-2» и «Луна-3», однако следует иметь в виду, что они получили данные наименования только после запуска ЛКА «Луна-4» (02.04.1963).

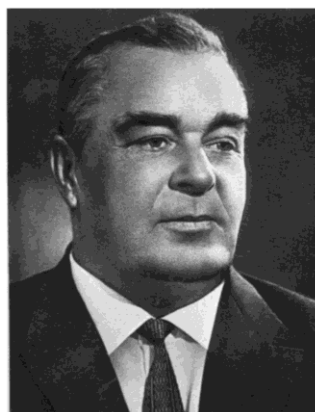
1959 год вошёл в историю мировой науки и техники, как год начала совершенно нового этапа исследования Луны и окололунного пространства советскими космическими аппаратами.

Так началась лунная одиссея отечественной космонавтики.

Во втором периоде (1960–1966) активное исследование Луны и окололунного пространства продолжилось. Мягкая посадка на Луну была одной из труднейших проблем космической баллистики и создания новых технологий. Первые полёты наших лунных ракет проходили без коррекции траектории. Точность их выведения на трассу как для попадания в небесное тело, так и для облёта и фотографирования обеспечивалась системой управления ракеты-носителя. А для посадки в заданный район необходима была более высокая точность расчёта трассы к моменту отделения аппарата от РН. Расчёты показали, что технически проще вывести ЛКА на оптимальную траекторию, если во время полёта провести коррекцию таковой. Кроме того, трёхступенчатая РН 8К72 способна была доставить к Луне груз массой не более 325 килограмм. Между тем масса будущего «лунника», по самым жёстким расчётам, была вчетверо больше – около полутора тонн. Поэтому в ОКБ-1 приступили к разработке новой, четырёхступенчатой РН 8К78, получившей наименование «Молния». Её первые две ступени были аналогичны РН 8К72, третья ступень (блок «И») имела четырёхкамерный ЖРД разработки С.А. Косберга, а четвёртая (разгонный блок «Л») представляла корректирующе-тормозную двигательную установку с принципиально новым ЖРД замкнутой схемы и с возможностью запуска в невесомости (КТДУ-5А). Блок «Л» оснащался существенно модифицированной системой управления блоками «И» и «Л» разработки НИИ – 885 под руководством Н.А. Пилюгина, системой стабилизации и ориентации, а также блоком обеспечения запуска двигателя в невесомости. Запуск разгонного блока «Л» на промежуточной орбите в условиях невесомости проводился впервые.

КТДУ-5А была разработана под руководством главного конструктора Алексея Михайловича Исаева (1908–1971) в ОКБ-2 (ныне ФГУП «Конструкторское бюро химического машиностроения имени А.М. Исаева» – «КБХиммаш»). Она являлась основным несущим элементом объекта, на котором размещались блок астронавигации, блок управления, аппаратура радиотехнических систем траекторных измерений, посадочная ступень и другие служебные системы.

Полёты последующих станций выполнялись по более сложной схеме: после вывода станции тремя ступенями РН «Молния» на орбиту спутника Земли с помощью четвёртой ступени в заданный момент времени осуществлялся старт с этой ор-



биты и набор скорости, близкой ко второй космической, затем – коррекция траектории при подлёте к Луне, гашение скорости КТДУ-5А и обеспечение мягкого прилунения. Решение этих задач, как оказалось, потребовало длительной отработки.

Началась большая подготовительная работа, в том числе в частях и подразделениях Командно-измерительного комплекса. На головном, симферопольском Центре дальней космической связи (ЦДКС) вводятся в действие параболические антенны: приёмная ТНА-400 с диаметром зеркала 32 м и передающая П-200Б с диаметром зеркала 25 метров.



Рис. 1. ТНА-400

Согласно Постановлению ЦК КПСС и СМ СССР от 22 марта 1962 г. срок запусков ЛКА был запланирован на 1963 год. В 1963–1965 гг. решались проблемы мягкой посадки контейнера с научной аппаратурой на лунную поверхность. Общее руководство силами и средствами, участвующих в работе, возлагалось на Главную оперативную группу управления (ГОГУ). В её состав входили представители Министерства обороны, специалисты ОКБ-1 (головная организация) и смежных организаций. Руководителем ГОГУ назначался представитель Центра КИК. ГОГУ лунными аппаратами размещалась на НИП-10 (симферопольском ЦДКС). Управление объектом поручалось оперативной группе, в состав которой входили наряду со специалистами Центра КИК и представители промышленных организаций, участвовавших в разработке, создании ЛКА и подготовке его к запуску. Оперативная группа обычно включала несколько подгрупп: управления и программ; анализа; дешифровки; баллистики и др.

Хроника операции «Мягкая посадка»

Первый старт РН 8К78 с ЛКА состоялся 4 января 1963 года. Три ступени РН отработали нормально, но двигатель разгонного блока «Л» не запустился, и ЛКА остался на промежуточной орбите ИСЗ. Это событие произошло вне зон радиовидимости телеметрических приёмных станций, расположенных на территории СССР. Но на этот раз для работы с этим объектом в район Гвинейского залива направили плавучий (морской) измерительный пункт «Долинск». Дежурная смена его экспедиции приняла с борта ЛКА телеметрическую информацию, позволившая установить причину отказа двигателя блока «Л».

Для справки. Морские измерительные пункты были созданы при проведении лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ) МБР в 1957–1958 гг. для контроля точности падения головных частей в акваторию Тихого океана, а затем и при запусках первых ИСЗ. По предложению С.П. Королёва создаются плавучие командно-измерительные комплексы для обеспечения телеконтроля на тех суточных витках КА, которые проходят над акваториями Атлантического и Индийского океанов и находятся вне зон радиовидимости наземных пунктов. На судах смонтировали новейшие радиотехнические средства, параболические антенны, электронные вычислительные машины, систему спутниковой привязки. Они осуществляли: телеконтроль полёта РН и КА; траекторные измерения; приём научной информации; баллистические расчёты; обработку информации; двухстороннюю телефонную и телеграфную связь с Центром управления полётами; передачу радиокоманд на борт космического аппарата (в необходимых случаях).

Вторая попытка отправить ЛКА была сделана 3 февраля 1963 года. На этот раз он, отклонившись от расчётного курса, вошёл в плотные слои атмосферы и сгорел над районом Гавайских островов. 2 апреля 1963 г. стартовала «Луна-4» (так с этого времени стали называться в сообщениях ТАСС космические аппараты для исследования Луны). 6 апреля из-за отказа системы астронавигации она пролетела мимо диска Луны и стала очередной искусственной планетой Солнца, не выполнив поставленную перед ней задачу. Четвёртый (21.03.64) и пятый (20.04.64) старты были неудачными. После передачи С.П. Королёвым (март 1965) работ по непилотируемым КА для исследования ближнего и дальнего космоса Машиностроительному заводу имени С.А. Лавочкина (ныне – ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»). Главным конструктором его ОКБ-301 стал Георгий Николаевич Бабакин (1914–1971).



Новый период деятельности МЗ им. С.А. Лавочкина начался с лунной программы по проекту Е6. От королёвского ОКБ-1 была получена вся необходимая документация, в том числе и на разгонный блок «Л». Новый коллектив разработчиков внёс существенные изменения в Программу «Е». Проект Е7 был закрыт. А в проекте Е6, кроме создания ЛКА для мягкой посадки (Е-6М) появились его модификации для искусственного спутника Луны (Е-6С), спутника-картографа (Е-6ЛФ) и разработки перспективного радиокомплекса (Е-6ЛС).

12 марта 1965 г. состоялся шестой запуск ЛКА. По донесению начальника экспедиции «Долинска» запуск двигателя блока «Л» вновь не состоялся. Объект остался на околоземной орбите, и ТАСС вынужден был сообщить о выводе на орбиту очередного ИСЗ «Космос-60». Седьмой старт (10.04.65) оказался также аварийным. 9 мая 1965 г. с космодрома «Байконур» удачно стартовала «Луна-5», но осуществляя посадку, разбилась. Тем не менее, при этом были получены первые опытные данные о работе систем мягкой посадки. 8 июня 1965 г. был осуществлён девятый старт ЛКА. «Луна-6» прошла в 160 тыс. км от диска Луны. И этот сбой позволил проверить функционирование командных радиолиний на дальности в 600 тыс. километров. Кроме того, по команде дежурного из симферопольского ЦДКС удалось осуществить отделение спускаемого аппарата ЛКА от КТДУ и убедиться в нормальном наддуве амортизирующих резиновых баллонов. Десятый старт с «Луной-7» состоялся 4 октября. Это был первый пуск РН «Молния-М» с модернизированными двигателями пер-

вой и второй ступени. Однако в ночь с 7 на 8 октября радиотехнические средства зафиксировали блокирование системы на включение КТДУ, вследствие чего произошло жёсткое прилунение.

Согласно директивам Генштаба от 07.10.65 г. и Главного штаба РВСН 03.11.65 г. был создан «153-й Центр командно-измерительных комплексов искусственных спутников Земли и космических объектов» (КИК, ныне – Главный испытательный космический центр имени Г.С. Титова Министерства обороны Российской Федерации).

Одиннадцатый старт ракеты с «лунником» состоялся 3 декабря 1965 года. Блок «Л» отработал заданный импульс, и «Луна-8» приступила к выполнению программы полёта. В ночь на 6 декабря из-за нарушения ориентации относительно лунной вертикали двигатель отработал 9 секунд вместо 42, что привело к жёсткому прилунению.

31.01.66 г. состоялся старт первого модернизированного на МЗ им. С.А. Лавочкина ЛКА для мягкой посадки Е-6М – «Луны-9». Прилунение состоялось 3 февраля в 21:45:30 в западном районе Океана Бурь в районе кратеров Рейнер и Марий, в точке с координатами 780 с.ш. и 640 32/ з.д. На Луну были доставлены вымпелы с надписью «Союз Советских Социалистических Республик. Январь 1966» и Государственным гербом Советского Союза. Таким образом, «Луна-9», созданная совместными усилиями коллективов королёвского ОКБ-1 и бабакинского ОКБ-301, выполнила возложенную на неё задачу: совершила мягкую посадку на естественный спутник Земли. Полёт «Луны-9» по значимости был приравнен к запуску первого ИСЗ, первому полёту человека в космос и первому выходу космонавта в открытый космос. Это был заслуженный успех коллектива ОКБ-301, и не последнюю роль в этом успехе сыграли специалисты, непосредственно участвовавшие в управлении ЛКА. Этот успех по праву принадлежит и Командно-измерительному комплексу.

Для справки. Первая мягкая посадка станции «Surveyor-1» состоялась 02.06.1966 г. (старт 30.05.1966).

31 марта 1966 г. с космодрома «Байконур» ушла в небо «Луна-10» (Е-6С), которая 3 апреля стала первым в мире искусственным спутником Луны.

Для справки. Станция «Lunar Orbiter 1» (старт 10.08.1966 г. РН «Атлас-Анджана Д») стала первым американским ИСЛ 14.08.1966 года.

«Луна-11» (Е-6ЛФ) стартовала 24 августа 1966 г., вышла на окололунную орбиту, близкую экваториальной, и стала 27 августа вторым советским ИСЛ. Третьим советским ИСЛ 25 октября 1966 г. стала «Луна-12» (Е-6ЛФ), стартовавшая 22 октября.

21 декабря 1966 г. стартовала «Луна-13», которая 24 декабря совершила мягкую посадку. Основная её цель состояла в исследовании плотности поверхностного слоя лунного реголита – дисперсного грунта. Определение механической прочности реголита проводились с помощью установленных на выносных механизмах грунтомера-пенетromетра ВГ-1. Управление механизмами осуществлялось оператором по радиокомандам, что позволяло установить эти приборы на расстоянии 1,5 м от места прилунения. Конический наконечник из титана под воздействием порохового реактивного двигателя, развивавшего в течение секунды усилие в 7 кг, внедрялся в поверхность грунта, а сопротивление пенетрации измерялось динамографом ДС-1 «Ястреб». 31 декабря успешная работа с «Луной-13» была закончена.

Итак, в этот период при проведении комплекса научных исследований сделано было немало. Принятая информация всё же не давала возможность получить достоверные данные многих важных физических и микроструктурных характери-

стик лунного покрова. Ни один ЛКА к тому времени не был возвращён на Землю и не доставил непосредственно в руки учёных результаты исследований. Тщательное и эффективное изучение материалов исследований и их оценка могли быть проведены только при возвращении их на Землю. Для решения задачи возвращения КА на Землю после его полёта к другому небесному телу требовалось дальнейшее развитие отечественной ракетной и космической техники, так как при этом скорость подлёта в атмосфере Земли превышала вторую космическую. Перелёт с Луны на Землю стал основополагающим во всём комплексе проблем, которым пришлось заниматься при разработке ЛКА третьего поколения.

Третий период (1967–1976) – уникальный по своей значимости развитием и применением телеуправления многофункциональными ЛКА, в том числе телеоператорного управления лунными самоходными аппаратами. В этот же период формулировались и первоначальные технические требования на проектирование ЛКА, предназначенного для забора лунного грунта и доставки его на Землю. Идея принадлежала научному руководителю лунных экспедиций директору Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского АН СССР (ГЕОХИ) академику А.П. Виноградову. После анализа результатов, полученных «Луной-13», он изложил Г.Н. Бабакину своё мнение, заключающееся в том, что одной из важнейших задач изучения Луны является лабораторное исследование образцов лунного грунта. От имени АН СССР он высказал просьбу «о доставке всего 100 граммов лунного грунта».

В начале 1967 г. Г.Н. Бабакин, при активной поддержке М.В. Келдыша получив одобрение руководства страны, сконцентрировал основные силы на проектировании космических аппаратов нового поколения для исследования Луны и окололунного пространства. Это поколение должно было включать в себя комплекс автоматизированных устройств и телеуправления, который позволял бы проводить исследования как с орбиты ИСЛ, так и непосредственно с поверхности Луны, изучать самые различные участки видимой и обратной её сторон – и доставлять образцы вещества на Землю. Если для объектов проекта Е6 была предусмотрена прямая схема прилунения, то по проекту Е8 оно осуществлялось с орбиты спутника Селены, что практически снимало ограничения по координатам точки посадки.

Появилась возможность расширить научные исследования и эксперименты. Опыт запусков космических аппаратов для мягкой посадки на поверхность Луны, а также ИСЛ, позволил коллективу бабакинского ОКБ-301 предложить интереснейшую задачу: доставить с Луны пробы грунта. Замысел был таков: на поверхность спутника Земли мягко садится аппарат, несущий грунтозаборное устройство, сферический возвращаемый объект с теплозащитой, в которой впечатывается ампула с лунным грунтом, и возвратную ракету. В нужный момент возвращаемый аппарат стартует на Землю, гасит вторую космическую скорость в земной атмосфере и на парашюте спускается в заданный район на территории СССР. Осуществление этой задачи увлекло как специалистов ОКБ и его опытного производства, так и многочисленных соисполнителей разных отраслей.

Предложение по созданию ракетно-космической системы для доставки на Землю лунного грунта было подписано 10 января 1968 г., а 28 февраля 1968 г. уже был утверждён эскизный проект такого аппарата. Георгий Николаевич отдавал предпочтение варианту, при котором одна и та же ракетно-космическая система могла доставлять на Луну в одном случае луноход, а в другом – грунтозаборное устройство (ГЗУ), возвратный носитель и возвращаемый аппарат с образцами лунного грунта. Коренным образом изменялся облик ЛКА. В первую очередь это коснулось ракетной ступени коррекции и торможения, для которой на основе опыта разработки КТДУ-5А в ОКБ-2 А.М. Исаева была создана КТДУ-417. Она пред-

ставляла собой корректирующе-тормозной модуль (КТ), с новой системой управления перелётом и посадкой, осуществляемой на четыре амортизированные опоры. Таким образом, создавался базовый для всех непилотируемых ЛКА третьего поколения новый универсальный служебный модуль – орбитально-посадочный блок (ОПБ), включавший унифицированное посадочное устройство – посадочную ступень (ПС) и полезную нагрузку. В зависимости от целевой задачи ЛКА на его ПС могли устанавливаться либо луноход (объект Е8), либо ГЗУ, ракета «Луна–Земля» с возвращаемым аппаратом (объекты Е8-5, Е8-5М), либо научные приборы для дистанционного исследования Луны (объект Е8-ЛС). Основу ПС составляла связка из четырёх основных сферических топливных баков с КТДУ-417, с двух сторон к которой крепились сбрасываемые отсеки (СО) и баки цилиндрической формы с топливом на все коррекции и торможения, предшествовавшие сходу с орбиты и посадке. Сбрасываемые отсеки соединялись между собой приставками, на которых крепились герметичные приборные контейнеры с аккумуляторными батареями питания бортовой аппаратуры, основного ПВУ и САО. Для обеспечения перелёта к Луне и функционирования на орбите ИСЛ под руководством Н.П. Никитина в КБ «Салют» была разработана система управления. На ПС располагались антенны для связи с Землёй, радиовысотомер больших высот (РВ-В) «Вега», доплеровский измеритель скорости ДА-018, а также высотомер малых высот «Квант-2», разработанный Ленинградским политехническим институтом имени М.И. Калинина. Систему астроориентации для объектов проекта Е8, как и для Е6, разработал коллектив НИИ-923 (с 1970 г. – отделение № 1 Московского института электромеханики и автоматики, ныне – МОКБ «Марс») под руководством В.П. Морачевского.

Запуск ОПБ осуществлялся мощной четырёхступенчатой РН «Протон-К» (УР-500), созданной коллективом под руководством Главного конструктора ракетно-космической техники и учёного в области механики и процессов управления Владимира Николаевича Челомея (1914–1984).

После осуществления посадки и оценки полученной телеметрической информации планировалась выдача радиокоманды на подрыв пироструйных устройств в узлах крепления амортизаторов четырёх опор. ПС полностью соприкасалась с поверхностью, что способствовало улучшению условий для схода лунохода или работы ГЗУ. Для доставки на Луну ПС с грунтозаборным устройством, возвратной ракетой, стартовой установкой для неё, системой загрузки лунного образца в капсулу возвращаемого на Землю аппарата и другие различные обеспечивающие системы необходимо было уложиться в те конкретные весовые характеристики, которыми располагала в то время РН «Протон-К». А масса такого ЛКА превышала их. Задача была сверхсложная. Но специалист в области управления и баллистики Юлий Давидович Волохов решил эту задачу. Он предложил вариант обеспечения посадки возвращаемого аппарата в заданной области Земли без коррекции траектории его полёта. При этом необходимо строго выполнить условия: обеспечить посадку ЛКА в расчётном районе Луны; осуществить старт ракеты в строго определённое время по лунной вертикали со скоростью, обеспечивающей её разгон, вывод на заданное направление и удержание системой управления с помощью гироскопа на этой траектории; выключить двигатель ракеты «Луна-Земля» в расчётный момент. Научный труд Ю.Д. Волохова



«Специальный метод прицеливания в заданную точку на поверхности Земли» проверили в ИПМ АН СССР и утвердили. В результате было получено авторское свидетельство на способ управления полётом ЛКА, грунтозаборное устройство, другие системы и на ЛКА проекта Е8-5 в целом.

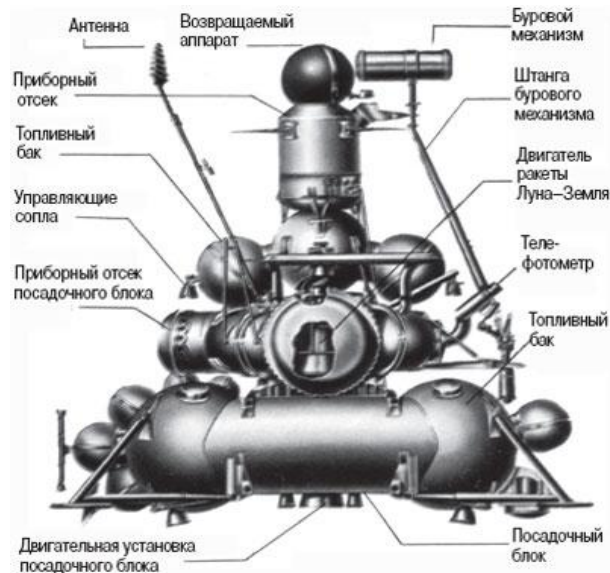


Рис. 2. Унифицированная посадочная ступень с грунтозаборным устройством и ракетой «Луна-Земля»

В 1968–1969 гг. на симферопольском ЦДКС вводится в эксплуатацию уникальнейший наземный единый радиотехнический комплекс «Сатурн-МС», созданный на НИИ-885 (НИИ Приборостроения министерства общего машиностроения – НИИП). В состав комплекса вошли: приёмная антенна ТНА-400; передающая антенна ТНА-200; передатчики «Горизонт» и «Бирюза»; аппаратура «Бархат»; антенна К-524. Для личного состава подчинённых им подразделений, а также на пунктах, привлекаемых к работе по лунной программе, была организована целенаправленная работа по повышению их квалификации. Со всеми сотрудниками отделов были проведены занятия по программе, рассчитанной на 14 академических часов. Она включала: эскизный проект и исходные данные; состав бортовой радиотехнической аппаратуры; баллистические требования; программу полёта; программу работы технических средств КИК; программу получения и обработки телеметрической информации; схему передачи всех видов информации с пунктов; состав вычислительных центров; привлекаемые дополнительные средства КИК; схему организации управления; схему связи. Также изучались назначение, конструкция ЛКА и состав технических средств, программы и типовые сеансы связи, особенности работы всех бортовых систем и заложенной логики при выполнении программы полёта. Схема организации управления представлялась в следующем виде: Государственная комиссия (её состав и место расположения); оперативное техническое руководство (его состав и место расположения); ГОУ (её состав и место расположения); группы управления, анализа, баллистики, дешифровки, координации техническими средствами и др. В баллистическую группу входили подгруппы расчёта и выдачи ЦУ, решения краевых и начальных условий, а также прогноза оценки точности. По опыту предыдущих работ были созданы смены на каждый сеанс связи и чётко определялись обязанности их расчётов.

Акт о готовности к работе комплекса «Сатурн-МС» и космической радиотехнической станции (КРС), подписанный 13 июня 1969 г. со стороны Центра КИК полковниками И.Л. Геращенко и В.П. Косолаповым, а от НИИП МОМ – А.Н. Сорокиным и М.М. Кручковичем, был утверждён полковником А.А. Большим и Главным конструктором НИИП МОМ М.С. Рязанским. В нём отмечалось, что «...смешанные расчёты из представителей промышленности и НИП-10 на комплексе «Сатурн-МС» и станции КРС составлены и утверждены, к работе в штатных режимах командной радиолинии (КРЛ), телеметрии (ТМ) и фототелеметрии (ФТ) готовы».

Расширились возможности по телеуправлению ЛКА и на всех других пунктах, принимавших участие в работах по лунной программе.

В акватории Тихого и Атлантического океанов были выведены отдельные плавучие измерительные комплексы (ОПИК) «Чажма», «Невель» и «Моржовец». Их экспедиции принимали телеметрическую информацию на этапах выведения и полёта РН с ЛКА. А на участках подлёта к Земле возвращаемого аппарата с лунным грунтом телеконтроль осуществляли ОПИК «Чумикан», «Ристна» и «Долинск».

Первый старт ракеты-носителя (РН) «Протон-К» с ЛКА Е8-5 был назначен на 14 июня 1969 года. К сожалению, он оказался аварийным, т.к. не включилась двигательная установка разгонного блока РН.

А спустя месяц, 13 июля 1969 г., с космодрома «Байконур» в 05:54:41 стартовала РН «Протон-К» с аппаратом Е8-5, получившим название «Луна-15».

По рекомендации Георгия Николаевича все члены экипажа лунохода приняли непосредственное участие в работе групп управления и анализа по ЛКА, предназначенных для доставки лунного грунта, в том числе и на этапах перелёта и мягкой посадки.

«Луна-15» стала первым космическим аппаратом нового поколения, выведенным к Луне РН «Протон-К». В схеме полёта от момента старта с Земли и до посадки на Луну существовали жёсткие ограничения по выбору места посадки. Это диктовалось условиями прямого старта возвратной ракеты к Земле после забора грунта. При этом время старта возвратной ракеты также имело жёсткие временные рамки.

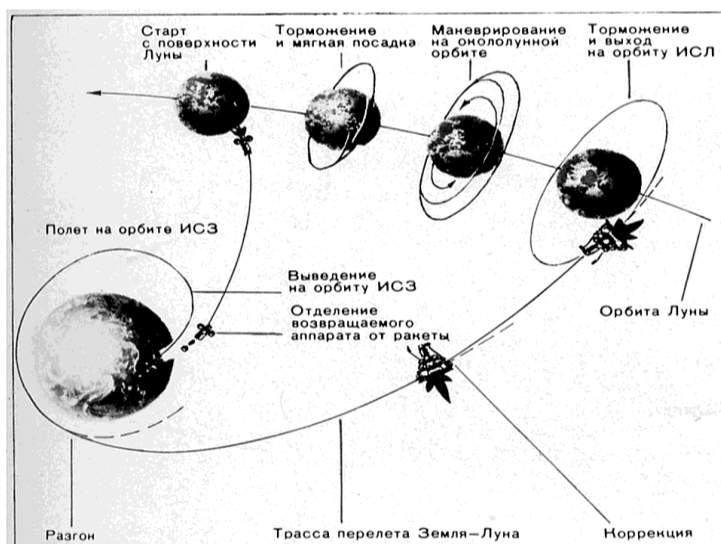


Рис. 3. Схема полёта ЛКА по проекту «Е8-5»

В целом полёт проходил нормально. Но телеуправление объектом было весьма напряжённым: в одни рабочие сутки проводилось по 20–22 сеанса связи. Управленцы работали практически круглосуточно: если и удавалось поспать два-три часа, то не всем и не каждый день.

17 июля в 10:00:00 «Луна-15» вышла на селеноцентрическую орбиту. Необходимые коррекции траектории были проведены 18 июля для снижения ЛКА над выбранной точкой посадки до высоты 20 км, а 19 июля – с целью подправить плоскость подхода ЛКА к точке посадки, как это и должно было быть по плану. ЛКА был выведен на орбиту ИСЛ с заданными параметрами.

Между тем, днём ранее, 16 июля в 16:32 с мыса Канаверал Космического центра имени Кеннеди стартовала трёхступенчатая РН с КК «Аполло-11», на борту которого находились астронавты Нил Армстронг, Эдвин Олдрин и Майкл Коллинз. Основная задача этой первой в истории космонавтики лунной экспедиции – отработка посадки на Луну и старта с Луны, выход экипажа на лунную поверхность, проведение научных исследований и доставка образцов лунного грунта на Землю. 19 июля «Аполлон-11» прибыл к Луне и в 20:22 вышел на селеноцентрическую орбиту.

Согласно расчётной программе полёта, момент посадки «Луны-15» должен был произойти 20 июля в 21:54:40. Но она так и осталась на орбите. 20 июля лунный модуль «Аполлона-11» совершил посадку в 23:17:42, т.е. всего через час с небольшим после расчётного времени посадки «Луны-15». И уже 21 июля 1969 г. в 05:56:20 Н. Армстронг ступил на поверхность Луны со словами: «Это небольшой шаг для человека, но огромный скачок для человечества». А в 20:54 того же дня взлётная ступень покинула Луну, унося с собой первые образцы грунта.

«Луна-15» 21 июля 1969 г. после включения тормозной двигательной установки в 18:47:00 на 53 витке пошла на посадку. Но касание Луны произошло не через 6 мин, как было предварительно рассчитано, а через 4 минуты. Касание было жёстким, и аппарат разбился. Баллистики ещё точно не знали рельеф предполагаемого района посадки (12° с.ш., 60° в.д.), а там оказалась достаточно высокая гора...

Для справки. Существует несколько версий задержки ЛКА на окололунной орбите (более полусотни витков, прежде чем началась фаза посадки): на борту были неполадки (однако принимаемая телеметрическая информация этого не показала); гравитационное поле Луны не было достаточно изучено, поэтому ЛКА решили задержать на орбите ещё на сутки; США обратились к СССР с просьбой не проводить активных работ с «Луной-15», чтобы не помешать посадке «Аполлона-11».

Тем не менее, полёт «Луны-15» подтвердил правильность технических решений, жизнеспособность организации весьма сложного процесса управления и явился новым шагом в познании ближнего космоса.

В течение того же 1969 г. наши учёные и конструкторы ещё дважды пытались доставить на Землю лунный грунт. Так, 23 сентября стартовала РН «Протон-К» с объектом Е8-5. Однако из-за отказа двигательной установки разгонного блока он остался на орбите искусственного спутника Земли, получив название «Космос-300». Время жизни КА на такой орбите составляло три–четыре месяца, после чего объект вошёл бы в плотные слои атмосферы. Государственная комиссия приняла решение к немедленному сходу спутника с орбиты. Для этого использовали программу расчёта при посадках пилотируемых кораблей типа «Союз». Система ориентации ЛКА была рассчитана для работы вдали от Земли. Вектор тяги двигателя на объектах Е8 всегда направлен по оси «-Х», в отличие от пилотируемых КК, у которых – по оси «+Х». Баллистики этого не учли. С большим трудом управленцам удалось сориентировать «Космос-300», после чего дежурный расчёт выдал радиокоманду на его сход с орбиты. Однако траекторные измерения показали отклонение объекта от ожидаемой траектории спуска, и он упал в акваторию Жёлтого моря 27 сентября.

Схожая судьба ожидала и очередной объект Е8-5, выведенный на промежуточную орбиту 22 октября. Опять не произошло включения разгонного блока, и ЛКА также остался на низкой орбите ИСЗ под названием «Космос-305». Учтя опыт предшествовавших ситуаций, группа управления совместно с баллистической группой реализовали созданную ими же специальную программу, в результате чего 24 октября «Космос-305» был сведен в плотные слои атмосферы и прекратил своё существование над акваторией Тихого океана.

В начале следующего года, 6 февраля 1970 г., состоялся ещё один, также аварийный запуск объекта Е8-5. Причина сбоя – выключение двигательной установки второй ступени РН «Протон-К» в нерасчётное время.

И только 12 сентября 1970 г. в 16:25:52 «Протон-К» успешно вывел на промежуточную орбиту близкую расчётной ЛКА «Луну-16».

С помощью телескопа, снабжённого высокочувствительной телевизионной системой, обсерватория Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга наблюдала полёт ЛКА и её РН. Это самая высокогорная в стране обсерватория, размещённая на высоте около трёх тысяч метров в горах Заилийского Алатау. Полученные ею точные угловые координаты траектории полёта оперативно передавались в симферопольский ЦДКС и обрабатывались на электронно-вычислительной машине «Мир». В ходе полёта было проведено 26 сеансов связи. 13 сентября для обеспечения выхода ЛКА в расчётную точку окололунного пространства была проведена коррекция траектории. 17 сентября в 05:38 «Луна-16» перешла на селеноцентрическую круговую орбиту с апоселением 118,6 км и периселением 102,6 километра. Коррекция орбиты, проведённая 18 сентября, обеспечила прохождение аппарата над выбранным районом посадки с одновременным понижением высоты периселения до 20,8 километра. С помощью второй коррекции 19 сентября периселений был понижен до 11,86 километра. 20 сентября в 06:06 приступили к одному из наиболее ответственных этапов полёта – осуществление мягкой посадки. Группа логики, учитывая баллистический прогноз, но, не полагаясь на него, предложила на участке схода с лунной орбиты и спуска к Луне ввести в контур управления радиовысотомер. Высота над поверхностью Луны на начало торможения составляла 13,28 км, а на момент выключения двигателя – 2,45 километра. После его выключения ЛКА в течение 43-х секунд совершал свободное падение. На высоте 600 м вновь начал работать основной двигатель в режиме регулируемой тяги в соответствии с выбранной программой управления и поступающей информацией от доплеровского измерителя скорости «ДА-018» и радиовысотомера «Вега». На высоте 20 м горизонтальная скорость была погашена, а вертикальная снижена примерно до 2 м/с. По выданной дежурным расчётом радиокоманде основной двигатель был выключен, и торможение осуществлялось двигателями малой тяги. На высоте около 2 м по команде от гамма-высотомера «Квант» они были выключены. До посадки оставались считанные минуты. Радиовысотомер малых высот отсчитывал последние метры такого длинного и сложного пути к Луне. Но всех волновал вопрос: как поведёт себя унифицированная посадочная платформа при снижении и посадке. Не забыть последних минут перелёта. В пункте управления наступила тишина, и только из динамика слышался напряжённый голос Александра Васильевича, руководителя группы оперативного анализа, систематически докладывавшего о выполнении элементов программы мягкой посадки. А вот и долгожданное сообщение: «Есть касание! Сигнал устойчивый, качество телеметрии хорошее!» Невозможно описать радость присутствующих. Все поздравляли друг друга с успехом. Расчёты верны, унифицированная посадочная платформа программу выполняет безукоризненно.

Так, 20 сентября в 08:18 «Луна-16» совершила мягкую посадку на поверхность Луны в районе Моря Изобилия, в точке с координатами $0^{\circ}41'$ ю.ш. и $56^{\circ}18'$ в.д. Отклонение составило всего около 1,5 километра. Посадочная ступень массой в 1880 кг твёрдо стала на свои четыре лапы. За девять дней полёта с «Луной-16» было проведено 72 сеанса связи.



Группа управления «Луной-16»: Слева направо, первый ряд: А.П. Гончаров, А.П. Попов, Л.М. Шатинская, В.Н. Львова, Л.А. Звягинцева и Л.Я. Мосензов; второй ряд: Н.Я. Козлитин, Ю.В. Балашихин, Ю.М. Дуга, Г.И. Богатырёв, В.Н. Сморкалов, Ю.В. Андреев, А.И. Кочехин и Г.Г. Латыпов (фото автора)

После посадки дежурный расчёт по распоряжению группы управления выдал радиокоманду на включение бортового радиокомплекса. Анализ полученной информации показал, что все системы функционируют нормально. Определено было также и положение посадочной ступени на лунной поверхности. Затем с Земли поступила радиокоманда на ввод в действие грунтозаборного устройства (ГЗУ) для бурения. Оно состояло из бурового станка с системой электрических приводов и буровым снарядом, механизма выноса ГЗУ – штанги с вышеупомянутым буровым станком, и приводов, которые перемещали штангу в вертикальной и горизонтальной плоскостях (по азимуту и углу места). Буровой станок С25 разработали в СКБ министерства геологии СССР, а изготовили на Омском электромеханическом заводе. Для выбора места бурения на ПС были установлены два телефотометра. Параллельно им, чтобы освещать зону работы в условиях лунной ночи (а посадка так и осуществлялась), были установлены светильники (фары). Они также включались по командам с Земли, от оператора. Всего было три включения. Но изображение места бурения не было получено из-за недостаточной освещённости, на двух изображениях была видна Земля в виде светлого пятна. Тем не менее, следует выделить тот факт, что впервые в истории космонавтики исследования проводились лунной ночью, впервые активно КА функционировал на внеземном объекте при таких низких температурах (от -150° и ниже) и глубоком вакууме.

По команде с Земли открылся замок, удерживающий ГЗУ в полёте, штанга с буровым станком приняла вертикальное положение, повернулась на 180 градусов, обеспечивая положение корпуса бурового станка обращённым рабочей частью к лунной поверхности, открылась крышка бурового станка. Когда штанга была опущена, по команде оператора были включены приводы бурового механизма, представляющего собой пустотелую трубу с резами на торце. Бурение (прямой

ход) продолжалось 6 минут 14 секунд, контролировалось с Земли, измерялись плотности исследуемой породы, и было произведено на полную величину рабочего хода бурового снаряда – 350 миллиметров. После окончания операции бур с лунной породой был введён в корпус бурового станка. Затем по очередной команде штанга ГЗУ была поднята в вертикальное положение и повёрнута на 180 градусов вокруг своей оси, бур подведён к приёмному отверстию герметичного контейнера возвращаемого аппарата. Очередная команда переместила лунную породу внутрь контейнера, а бур был отведён от буровой установки. После этого приёмное отверстие в контейнере автоматически герметично закрылось, а штанга с буровым станком была отведена от возвратной ракеты.



Рис. 4. Схема работы грунтозаборного устройства на поверхности Луны



В зале группы управления «Луной-16»

На обратной стороне фотографии надпись, сделанная Анатолием Павловичем Поповым: «20.IX.70 г. Момент забора лунного грунта «Луной-16». ГОГУ слева направо: А.А. Кочехин, В.Д. Татаринов, В.Н. Сморгалов, А.Н. Хохлачёв, А.П. Попов, Г.А. Котлярский, А.П. Романов, Г.Н. Бабакин, А.И. Долженков, Г.А. Тюлин, В.Л. Морачевский»

На столе перед Георгием Николаевичем лежат цветы... Что это, уверенность в успешном завершении работы? Так в этом уже никто не сомневался. Но оказалось, что даже в такой волнующих всех участников завершения этого уникального эксперимента момент, Главный конструктор не забывал и о своих рядовых единомышленниках. Получив сообщение о благополучном приземлении возвращаемого аппарата, поблагодарив присутствующих, Георгий Николаевич поздравил с днём рождения одного из активнейших членов группы управления Юрия Михайловича Дугу и вручил ему эти цветы. Таким был и остаётся в нашей памяти Г.Н. Бабакин.

Посадочная ступень находилась на Луне более суток, точнее 26 часов 25 минут. Кроме забора грунта, уточнялись координаты места посадки, проводились температурные и радиационные измерения, велась проверка функционирования бортовых систем и агрегатов. В последующих сеансах связи (всего их было проведено 9) на борт была передана программа старта с Луны ракеты с возвращаемым аппаратом.

Дежурный расчёт КРС согласно указанию из группы управления выдал радиокоманду на старт ракеты «Луна-Земля», и 21 сентября 1970 г. в 10:43:21 она с возвращаемым аппаратом устремилась к Земле.

По окончании сеанса связи состоялось заседание ОТР, на котором автору этих строк посчастливилось получить автографы его участников (хранится в музее г. Краснознаменска).

Полёт первенца автоматической ракеты, стартовавшей с Луны с уникальнейшим грузом, проходил по баллистической траектории, без возможности коррекция её траектории. Продолжительность обратного перелёта составила 84 часа. За это время симферопольский ЦДКС провёл 13 сеансов связи с возвращаемым аппаратом. По результатам траекторных измерений каждый раз уточнялся район приземления возвращаемого аппарата на территорию Казахстана.

Руководители ГК по громкой связи поздравили всех участников с завершением незабываемого эксперимента.

24 сентября в 04:50 возвращаемый аппарат был отделён от приборного отсека ракеты, и в 08:10 вошёл в плотные слои атмосферы. После аэродинамического торможения и снижения вертикальной скорости до 250 м/с на высоте 14,5 км была введена в действие парашютная система, обеспечившая снижение скорости до 10 м/с. Возвращаемый аппарат в 08:26 совершил посадку в 80 км юго-восточнее г. Джезказган с координатами 47°15' с.ш. и 68°25' в.д., откуда подавал радиосигналы. Поисково-спасательная служба, оснащённая авиационными средствами и радиолокационными станциями, обеспечила быстрое обнаружение и эвакуацию контейнера с образцами лунного грунта.

Возвращаемый аппарат был доставлен на МЗ имени С.А. Лавочкина в цех № 104 (ныне цех № 81), в котором подготовили специальное помещение для выемки лунного грунта. Так как на Луне был вакуум, то именно в таких условиях и следовало сохранить образцы до начала исследований. «Шарик» установили на фрезерный станок и капсулу вырезали. Всем было интересно, что в ней находится. Каждый, кто в этот момент находился рядом, постарался подержать капсулу в руках, пытаясь определить – не пустая ли. И вот министр С.А. Афанасьев, качая её возле уха, громовым голосом возвещает: «Есть грунт!», и в ответ – дружное «Ура!».



Рис. 5. Возвращаемый аппарат «Луны-16» доставлен на Землю



Руководители программы исследования Луны у камеры с образцами лунного грунта. Слева направо: С.А. Афанасьев, Г.Н. Бабакин, Б.А. Строганов, Г.А. Тюлин, М.Я. Маров, О.Г. Ивановский

Затем капсулу упаковали и доставили в ГЕОХИ имени В.И. Вернадского АН СССР. После вскрытия выяснилось, что бур заполнен сыпучим лунным грунтом – реголитом массой 105 граммов. Он представлял собой разнозернистый тёмно-серый (черноватый) порошок, который легко формуется и слипается в отдельные рыхлые комки. Эта особенность существенно отличает грунт (реголит) от земной бесструктурной пыли; по этому свойству он напоминает влажный песок или комковатую структуру земных почв.

Образцы грунта после карантина были переданы для исследований нескольким академическим институтам. Результаты были опубликованы в печати.

Программа исследований Луны и окололунного пространства «Луной-16» была выполнена полностью.

Впервые в мире непилотируемый, телеуправляемый с Земли космический робот – геолог выполнял обязанности активного работника и доставил на Землю образцы лунного грунта.

Наука и техника СССР блестяще решили новую научно-техническую проблему, а исполнители вписали золотую главу в историю своих предприятий, войсковых частей и учреждений.



Слева направо: в первом ряду – Г.А. Тюлин, Г.Н. Бабакин, С.А. Афанасьев; во втором – Б.Н. Петров, Б.А. Строганов, Ю.Н. Труханов и Р.С. Кремнёв; в третьем – М.Я. Маров, В.А. Сальников, В.В. Домоховский и Ю.Н. Коптев

Для справки. Международная авиационная федерация (FAI) зарегистрировала приоритетные научно-технические достижения «Луны-16»: доставка на поверхность Луны космической ракеты «Луна-Земля» с возвращаемым аппаратом; телеуправляемый старт с Луны и доставка лунного грунта на Землю; возвращение на Землю после посадки на поверхность Луны.

Также зарегистрированы и подтверждены дипломами FAI рекорды, установленные в результате полёта «Луны-16», как межпланетной автоматической станции (класс «С»): мировой рекорд максимальной массы, доставленной на лунную поверхность в классе «С»; мировой рекорд максимальной массы, возвращённой на Землю с поверхности Луны в классе «С»; мировой рекорд максимальной массы лунных пород, доставленной на Землю в классе «С».

Таким образом, впервые в истории изучения космического пространства «Луна-16» – представитель третьего поколения ЛКА – осуществила выдающееся достижение отечественной науки и техники, открыв новые широкие возможности для проведения систематических научных исследований небесных тел с помощью телеуправляемых аппаратов.

Для справки. 18 июня 2009 г. с полигона на мысе Канаверал стартовал к Луне американский лунный орбитальный разведчик LRO. Основными целями миссии являются глобальное картографирование Луны, уточнение безопасных мест посадки для пилотируемых экспедиций, определение радиационной обстановки, а также мест залегания потенциальных ресурсов, в том числе и водного льда. Среди научных приборов, установленных на борту ИСЛ, находится нейтронный детектор LEND (Lunar Exploration Neutron Detector), который предназначен для создания карты распределения водорода в верхних слоях реголита и получения сведений о нейтронной компоненте окололунной радиации. В соответствии с соглашением между Роскосмосом и NASA детектор разработан в ИКИ РАН под руководством И.Г. Митрофанова.

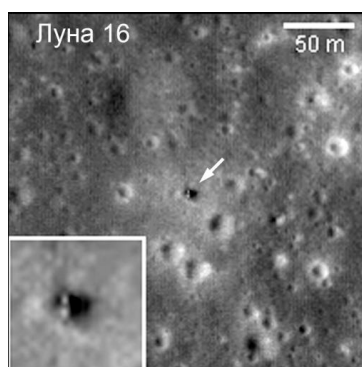


Рис. 6. Место нахождения посадочной ступени «Луны-16» (фото, снятое камерами американского спутника LRO и опубликованное 15 марта 2010 г.)

На сайте миссии были опубликованы фотоматериалы, снятые камерами спутника. 15 марта 2010 г. специалисты, обрабатывающие данные с LRO, опубликовали уточнённые координаты мест посадки как американских, так и советских ЛКА. Беспрецедентное доныне разрешение изображений, достигающее 0,5 м на пиксель, позволило выявить множество до сих пор недоступных человеческому взгляду деталей на лунной поверхности. Также уточнены координаты прилунения наших отечественных ЛКА из серии Е8-5, в том числе и «Луны-16».

После изучения лунного грунта, доставленного «Луной-16», большой интерес учёные проявляли теперь уже к получению грунта, добытого с горной поверхности Луны. Именно такая цель и была поставлена перед миссией нового объекта Е8-5.

И вновь «Протон-К» со станцией стартовал 2 сентября 1971 г. в 16:40:40. Согласно заложенной в систему управления РН программе аппарат был выведен на околоземную орбиту (т.н. опорную орбиту ИСЗ), а затем, в 19:52:39, и на траекторию полёта к Луне. С этого момента ЛКА получил наименование «Луна-18». По своей конструкции и составу бортовой аппаратуры она была аналогом «Луны-15» и «Луны-16». Для проведения сеансов связи с «Луной-18» привлекались радиотехнические средства комплекса «Сатурн-МС» симферопольского ЦДКС, где располагался и Центр управления полётом (ЦУП). Приём информации с борта осуществлялся расчётом станции КРС с антенной ТНА-400, а выдача радиокоманд (специальных кодограмм, или уставок) на борт – антенной П-200Б. Траекторные измерения проводились в дециметровом диапазоне угломерной системой «Маяк», в которой были задействованы антенны АДУ-1000 комплекса «Плутон» НИП-16 (евпаторийский ЦДКС), передающие антенны РС-10 и приёмные антенны РС-10-2М щёлковского НИП-14 и уссурийского НИП-15. К работе привлекались также суда ОПИК «Боровичи», «Ке-гостров», «Моржовец» и «Невель», которые находились в акваториях Тихого и Атлантического океанов. На трассе перелёта 4 и 6 сентября была скорректирована траектория, и 7 сентября «Луна-18» вышла на круговую орбиту спутника Луны. Для отработки новых методов навигации и мягкой посадки именно в горном районе у Моря Изобилия по радиокомандам симферопольского ЦДКС осуществлялось неоднократное маневрирование. Одна из коррекций проводилась вне зоны радиовидимости. Телеметрическая информация с борта показала, что параметры орбиты стали существенно отличаться от расчётных. Причина – сбой в работе одного из двигателей стабилизации. Предпринятые усилия по ликвидации нештатной ситуации положительного результата не дали. 11 сентября после выдачи радиокоманды на включение режима посадки на 54-м вит-

ке вокруг Луны ЛКА сошёл с орбиты и направился к Луне. Однако прилунение оказалось жёстким, и в 10:47:16,5 связь с «Луной-18» прервалась в точке с координатами 30 34/ с.ш. и 560 30/ в.д.

Однако по-прежнему требовала решения задача взять образцы грунта из горных районов Луны и доставить их на Землю. Старт РН «Протон-К» состоялся с космодрома «Байконур» 14 февраля 1972 г. в 06:27:58,5. С промежуточной околоземной орбиты ЛКА вышел на траекторию полёта к Луне, получив название «Луна-20». Она являлась полным аналогом предшествующих станций. Согласно программе была проведена коррекция траектории, по результатам которой группа управления решила отказаться от второй коррекции. После 105 часов космического полёта 18 февраля «Луна-20» вышла на селеноцентрическую круговую орбиту, а 19 февраля после проведения соответствующей коррекции она перешла на эллиптическую орбиту с апоселением 100 км и периселением – 21 километр. 21 февраля в 22:19:00 посадочная ступень ЛКА совершила мягкую посадку в высокогорном материковом районе между Морями Изобилия и Кризисов, всего в 130 км к северу от места посадки «Луны-16». Была успешно решена важнейшая научно-техническая задача – доставить ЛКА в район со сложным рельефом местности.

На естественный спутник Земли были доставлены вымпел в виде прямоугольной пластины. На лицевой её стороне надпись «Союз Советских Социалистических Республик» и Герб Советского Союза, на оборотной – «Луна-20, февраль 1972», изображения старта ракеты с Луны, трассы полёта «Луна-Земля», земного шара с очертаниями территории СССР и обозначением места посадки возвращаемого аппарата. Обзор местности, проведённый с помощью телефотометров, показал, что «Луна-20» опустилась на сравнительно ровную поверхность, лишённую крупных, отдельно лежащих камней. После этого было выбрано место взятия образцов лунного грунта. По командам с симферопольского Центра в 23:14:00 было включено грунтозаборное устройство, и началась операция по взятию грунта. Ввиду повышенного сопротивления грунта дважды срабатывал автомат защиты по току. Буровой станок останавливался, и его снова включали по командам с Земли. Процесс отбора вещества продолжался 16 минут. Общая глубина проникновения снаряда в грунт составила около 330 миллиметров. Взятые образцы с помощью управляемого с земли манипулятора были помещены в контейнер возвращаемого аппарата возвратной ракеты и загерметизированы. Затем вновь были включены телефотометры, чтобы провести повторную съёмку места взятия пробы.



Рис. 7. Свидетельство успешной работы грунтозаборного устройства «Луны-20». На снимке чётко видна цилиндрическая вмятина, оставленная торцом бурового снаряда, а в центре – отверстие от извлечённой буровой колонки

Возвратная ракета, используя в качестве стартовой площадки посадочную ступень, оставшуюся на Луне, по команде от бортового программно-временного устройства в 01:58:00 вышла на прямую траекторию полёта к Земле. Символично, что это произошло 23 февраля, в годовщину создания наших Вооруженных Сил, представители которых активно участвовали в обеспечении лунных экспедиций. На трассе «Луна – Земля» постоянную связь с возвратной ракетой обеспечивал радиотехнический комплекс «Сатурн-МС» симферопольского ЦДКС. Полученные данные передавались для обработки в координационно-вычислительный центр с целью контроля состояния бортовых систем и фактической траектории полёта.

На завершающем этапе полёта 25 февраля в расчётное время от ракеты отделился возвращаемый аппарат, который до посадки контролировался наземными радиолокационными средствами. При входе в плотные слои атмосферы началось аэродинамическое торможение. Затем была введена в действие парашютная система, и в 22:12:15 в 40 км от города Джезказган Казахской ССР лунный грунт благополучно прибыл на Землю. В исключительно неблагоприятных погодных условиях (сильный ветер, метель, низкая облачность) поисковая служба обнаружила шар возвращаемого аппарата и обеспечила его эвакуацию. Образцы лунного грунта массой 55 граммов были переданы в АН СССР. Отечественная космическая наука и техника ещё раз продемонстрировали широкие возможности исследований Луны и окололунного пространства непилотируемыми космическими аппаратами. В историю изучения Солнечной системы была вписана ещё одна золотая страница.

С целью ещё раз доставить образцы лунного грунта на Землю 28 октября 1974 г. в 17:30:32 «Протон-К» вновь направил ЛКА к нашей соседке – Луне. На сей раз это была «Луна-23». Примечательно, что начиная с «Луны-15», стартовая масса всех последующих «лунников» была примерно одинаковой – 5700–5800 килограммов. Возвращаемая капсула, то есть «сухой остаток» миссии – 34–35 килограмма. На посадочной платформе стояло новое усовершенствованное ГЗУ. Оно было создано Конструкторским бюро общего машиностроения (КБОМ) и его Ташкентским филиалом (впоследствии ТашКБМ) под руководством академика В.П. Бармина. Заказчиком ГЗУ и практически одним из создателей его являлось НПО им. С.А. Лавочкина. В связи с жёсткой установкой ГЗУ на корпусе посадочной ступени из состава аппаратуры были исключены телефотометры и светильники. Конструкция возвратной ракеты и возвращаемого аппарата остались без изменений, за исключением герметизируемой капсулы для размещения грунта, чей диаметр был увеличен с 68 до 100 миллиметров. На трассе перелёта 31 октября была проведена коррекция траектории. При подлёте к Луне 2 ноября включением двигателя КТДУ проведено торможение, и станция вышла на орбиту ИСЛ, близкую расчётной. Для обеспечения посадки 4 и 5 ноября были осуществлены коррекции орбиты. В результате станция перешла на эллиптическую орбиту с апоселением 105 км и периселением – 16 км 290 метров. В расчётное время 6 ноября была включена ДУ для схода ЛКА с орбиты. Первый этап торможения прошёл штатно и закончился на высоте 2 км 280 метров. После выключения двигателя включился доплеровский измеритель скорости ДА-018. На высоте 400–600 м переключение на второй диапазон измерений по каналу дальности не произошло, поэтому скорость к моменту посадки более чем вдвое превысила допустимую (11 м/с вместо 5 м/с). К тому же площадка места посадки оказалась с углом наклона 10–15°. При скорости и перегрузках, вдвое превышавших допустимые, в момент посадки произошло опрокидывание аппарата, что привело к механическому повреждению объекта, разгерметизации приборного отсека и отказу дециметрового передатчика. Попытки по командам с Земли включить ГЗУ и подготовить возвратную ракету к старту ни к чему не привели, что подтвердила информация от радиокомплекса возвратной ракеты. Доставка образцов грунта на Землю стала невозможной, и 9 ноября работа с «Луной-23» была прекращена.

Для справки. В 2010 г. лунным орбитальным зондом LROC NAC был обнаружен астрономический объект 2010 KQ. Как считают учёные, он является искусственным и, вероятно, представляет собой станцию «Луна-23».

16 марта 2012 г. на сайте «НАСА/Лунный орбитальный зонд» был опубликован снимок места посадки «Луны-23»: Океан Бурь, западнее кратеров Рейнер и Марий, в точке с координатами $12^{\circ} 41'$ с.ш. и $62^{\circ} 17'$ в.д. На снимке высокого разрешения видно, что станция при посадке опрокинулась.

Очередная попытка челночного рейса и доставки лунного грунта была предпринята 16 октября 1975 г. Старт РН «Протон-К» состоялся в 17:04:56. Однако ЛКА на трассу полёта к Луне не вышел из-за отказа ДУ разгонного блока.

9 августа 1976 г. в 18:04:12 с космодрома «Байконур» за грунтом отправился новый «бурильщик-грузовик» – «Луна-24». По конструкции это был полный аналог «Луны-23». Для вывода станции в заданную точку окололунного пространства 11 августа на трассе перелёта была проведена коррекция траектории. При подлёте к Луне 14 августа после торможения ЛКА перешёл на круговую селеноцентрическую орбиту. Для формирования условий схода с орбиты 16 и 17 августа проводились коррекции траектории движения, в результате чего станция стала совершать полёт по эллиптической орбите с апоселением 120 км и периселением 12 километров. После включения тормозного двигателя 18 августа в 09:36 «Луна-24» совершила мягкую посадку в юго-восточном районе Моря Кризисов в точке с координатами $12^{\circ} 45'$ с.ш. и $62^{\circ} 12'$ в.д., на расстоянии 2,3 км от не выполнившей свою миссию «Луны-23».

Новое усовершенствованное ГЗУ, как и на «Луна-23», было предназначено для бурения поверхности Луны до глубины 2,5–3 м, забора керна по всей глубине бурения в специальный грунтонос, перегрузки грунтоноса с забранным грунтом в возвращаемый аппарат (ВА) для дальнейшей доставки его на Землю. Полная масса с блоком управления составляла 54 кг, а масса забираемого грунта – 130–250 грамм. Время полного цикла работы (по штатной циклограмме) было рассчитано на 70–110 минут.



Рис.8. «Луна-24»

ГЗУ состояло из следующих основных частей:

1. Ферма, на которой располагались составные части ГЗУ. Одновременно элементы фермы являлись направляющими для осевого движения буровой головки с буровым инструментом. Ферма специальными кронштейнами крепилась к ЛКА. Верхняя часть фермы после завершения бурения и перегрузки грунта в возвращаемый аппарат отклонялась (отбрасывалась) от ЛКА для обеспечения старта возвратной ракеты.

2. Буровая головка (БГ) сообщала вращение и, при достижении определённого осевого усилия, ударные импульсы буровому инструменту.
3. Буровой инструмент (БИ) с грунтоносом обеспечивал внедрение в грунт, вынос шлама из скважины, забор керна.
4. Механизм подачи обеспечивал осевое усилие на БИ и прижатие его к поверхности в процессе бурения.
5. Механизм перегрузки обеспечивал намотку на свой барабан контейнера грунтоноса с забранным грунтом с синхронным его перемещением в ВА.
6. Блок управления работой ГЗУ обеспечивал управление процессом забора и перегрузки грунта как в автоматическом (программном) режиме, так и по радиокомандам с Земли.

В ходе бурения грунт поступает во внутреннюю полость штанги, где расположены гибкая трубка – грунтонос и механизм, который подхватывает грунт и удерживает его в виде столбика на протяжении всего процесса. По его окончании грунтонос с веществом извлекается из внутренней полости штанги и наматывается на барабан, размещённый в специальном контейнере. Затем этот контейнер помещается в герметизируемую капсулу ВА возвратной ракеты.

Через 15 минут после проверки состояния бортовых систем, определения положения посадочной ступени на лунной поверхности по команде с Земли было включено грунтозаборное устройство. При заборе грунта до глубины 120 см использовался режим вращательного бурения, а далее происходила смена способов пенетрации – с вращательного на ударно-вращательный. Общая глубина бурения составила 225 сантиметров. В связи с тем, что оно производилось с наклоном, общее заглубление составило около 2 метров.

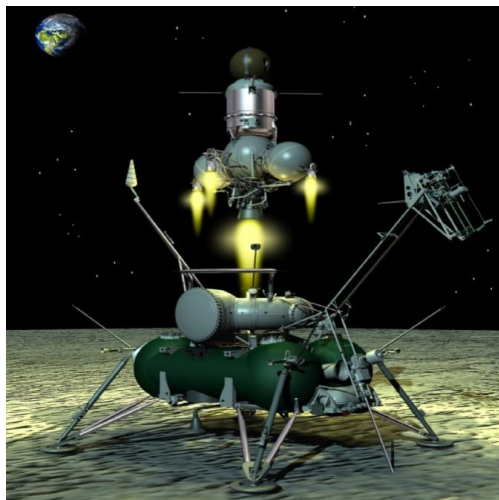


Рис. 9. Старт с Луны

Возвратная ракета с образцами грунта стартовала к Земле 19 августа в 08:25:00. Продолжительность обратного перелёта составила 84 часов. 22 августа она приблизилась к Земле со второй космической скоростью. В расчётное время, за 8 часов до входа в атмосферу Земли, произошло отделение ВА от возвратной ракеты. На высоте 15 км была введена в действие парашютная система, и ВА совершил посадку в 200 км юго-восточнее Сургута (Тюменская область).

Новые образцы грунта массой 170,1 г были переданы в ГЕОХИ им. В.И. Вернадского. Образцы грунта удивили учёных: они обнаружили характеристики, неожиданные и важные для понимания геологии Моря Кризисов на тот момент времени. Самое главное: содержание титана и возраст грунта (или количество времени, в течение которого образцы подвергались воздействию космической среды) были иными, нежели ожидалось. Но как это могло быть? На основании анализа геологических условий в районе, где производилось бурение, причину несоответствия теперь можно понять. С учётом точного местоположения посадки «Луны-24», снимки с американского зонда LRO показывают, что были взяты образцы выброса из соседнего 64-метрового кратера. Он образовался ниже уровня поверхности, привнеся материал из глубоких потоков лавы, которые не были ранее подвержены воздействию космической среды. Таким образом, образцы грунта с «Луны-24» содержат не околоповерхностные материалы Моря Кризисов, наблюдаемые с помощью методов дистанционного зондирования, а материал из недр, который подвергся воздействию космической среды лишь относительно короткое время.

«Луна-24» завершила список непилотируемых космических аппаратов, направленных к Луне с территории СССР.

Полёты ЛКА, доставивших образцы лунных пород из «морских» и материковых районов, внесли существенный вклад в изучение нашего естественного спутника и системы «Земля-Луна - Земля». По своему техническому совершенству они оказались первоклассными космическими аппаратами, которыми может гордиться отечественная и мировая наука. Эксперименты по автоматическому забору лунного вещества до сих пор не повторены ни одной страной.

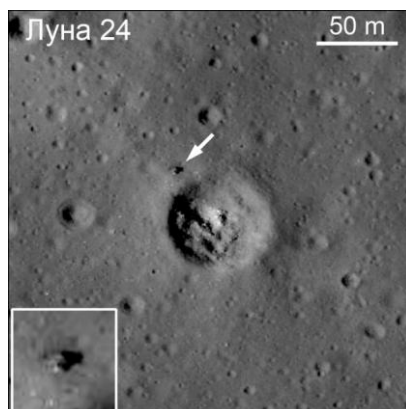


Рис. 10. Место посадки «Луны-24» (фото, снятое камерами американского спутника LRO и опубликованное 15 марта 2010 г.)

Время отсчитало шесть десятилетий от начала исследования Луны космическими аппаратами. И уже 42 года продолжается затянувшийся перерыв наших исследований Луны и Солнечной системы. НПО им. С.А. Лавочкина и РАН в 2006–2007 гг. подготовили «Программу разработки автоматических космических комплексов для исследования и освоения Луны». Однако уже не раз менялись приоритеты и даже смысловые задачи предлагаемых разработок лунно-планетных аппаратов, с постоянной корректировкой их запусков. Генеральный директор Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС» И.А. Комаров на «Королёвских чтениях – 2016» в МГТУ им. Н.Э. Баумана в докладе «О современном состоянии, реформировании и перспективах развития отече-

ственной ракетно-космической промышленности» представил лунную программу России до 2025 г., включающую в себя четыре миссии и четыре космических аппарата: 2019 г. – «Луна-Глоб посадочный» («Луна-25»), отработка технологии полярной посадки, начало изучения Южного полюса; 2020 г. – «Луна-Ресурс орбитальный» («Луна-26»), дистанционное зондирования Луны (глобальный обзор и разведка лунных ресурсов); 2021 г. – «Луна-Ресурс посадочный» («Луна-27»), изучение реголита и экзосферы на Южном полюсе; 2024 г. – «Луна-Грунт» («Луна-28» с возвращаемым аппаратом), доставка на Землю лунного полярного грунта. И.А. Комаров при этом подчеркнул, что реализация этих фундаментальных программ позволит обеспечить России возвращение на передовые рубежи в мировом научно-космическом сообществе.

Для справки. С воссоединением Крыма с Россией в состав Главного испытательного космического центра имени Г.С.Титова возвратился и евпаторийский Центр дальней космической связи. На сегодняшний день – это вновь один из современных командно-измерительных комплексов, который продолжит прерванную в 90-х годах прошлого века авангардную роль нашей отечественной космонавтики.

Основоположник космонавтики К.Э. Циолковский писал: «Нет ничего важнее, чем наше счастье и счастье всего живого в настоящем и будущем. Мы живём более жизнью космоса, чем жизнью Земли, т.к. космос бесконечно значительней Земли по своему объёму, массе и времени». Прошло почти сто лет, но мысли, предвидения, научные открытия великого русского учёного актуальны и в наши дни. Активное исследование космоса и освоение Луны – это обеспечение ресурсов, национальной безопасности и технологической независимости России, это престиж нашего государства как ведущей космической державы.

Итак, только вперёд, без непреодолимых препятствий!

Секция применения РТК морского базирования, в т.ч. при взаимодействии с другими видами РТК и традиционными средствами ВВСТ

УДК 681.883:534.2

Ю.В. Матвиенко, А.Ф. Щербатюк

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОБИЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

Представлены предложения по решению проблемы освещения подводной обстановки путем контроля гидроакустических полей в акватории, основанные на применении гибридных подводных роботов, оснащенных комбинированными скалярно-векторными приемниками звука.

Гибридный подводный робот, скалярно-векторный приемник звука, освещение подводной обстановки.

Yu.V. Matvienko, A.F. Shcherbatyuk

CONCEPT OF ROBOTIC TOOLS CREATING FOR MOBILE MONITORING OF UNDERWATER ENVIRONMENT

The proposals for solution of the problem for clearing the underwater environment by controlling the hydro acoustic fields in the water area, based on the use of hybrid underwater robots equipped with combined scalar-vector sound receivers, are presented.

Hybrid underwater robot, scalar-vector sound receiver, underwater lighting.

В докладе идет речь о перспективах применения подводной робототехники для создания средств освещения подводной обстановки, которые смогут отличаться от известных систем возможностями скрытной постановки, оперативного развертывания в установленном необорудованном районе, способностью функционировать достаточно продолжительное время для контроля районов значительной площади.

Основу такой системы могла бы составить группа подводных роботов, оснащенных средствами приема и обработки шумовых сигналов, создаваемых подводными объектами, находящимися в контролируемой акватории, средствами точного позиционирования, информационного обмена и связи с удаленным пунктом управления. Группа роботов должна быть способной выполнить скоординированный переход от места базирования в заданный район, обеспечить формирование антенной системы из приемников звука, размещенных в составе каждого аппарата, и организовать прием и обработку получаемых данных. В составе группы также должны быть средства оперативной связи с пунктом управления, например через специализированный поверхностный буй, который может быть выполнен в виде отделяемого модуля робота.

В качестве приемников на борту роботов наиболее эффективным представляется применение комбинированных скалярно-векторных приемников для формирования энергетических параметров контролируемого звукового поля с возможно-

стью управления пространственной избирательностью и фильтрации полезных сигналов. Каждым таким приемником можно определять угловое положение источников шума в широкой полосе частот, что оказывается очень важным для формирования дополнительных сведений при принятии решений об обнаружении объектов в акватории сигнала на основе контроля устойчивости расчетных угловых характеристик по наблюдаемому частотному диапазону и закономерному изменению угловых характеристик во времени на основе предполагаемой модели движения источника. Кроме того, данные пеленгования необходимы при определении текущего местоположения объектов при обработке данных от группы роботов.

Каждый аппарат должен быть гибридным, т.е. совмещать возможности как активного движения за счет пропульсивной движительной установки, так и зависания в точке (или медленного вертикального перемещения) за счет управления собственной плавучестью.

Следует отметить, что вместо группы роботов можно также рассмотреть вариант построения системы с использованием одиночного многофункционального робота, приходящего в район и далее управляющего работой выставленных им модулей приемной антенны.

Работа многоэлементной антенны из скалярно-векторных приемников может стать особенно эффективной в условиях относительно мелкого моря, в том числе прибрежных акваторий. В таких условиях за счет дисперсионных свойств волноводов формируются интерференционные картины полей движущегося источника и, для решения задач обнаружения и измерения параметров движения контролируемого объекта, могут быть использованы например голографические методы обработки интерферограмм [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 4. – С. 406-418.

УДК 623.827

Е.М. Апполонов, А.А. Бачурин, А.И. Горохов, Л.О. Пономарев

О ВОЗМОЖНОСТИ И НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ СВЕРХБОЛЬШОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА*

Целью работы является оценка возможности и необходимости создания сверхбольшого обитаемого подводного аппарата (СБНПА) с большой дальностью подводного хода (БД). В статье приведены основные положения классификации АНПА в РФ и за рубежом. Приведены примеры зарубежных АНПА, которые свидетельствуют о появлении нового класса АНПА со сверхбольшим водоизмещением. В РФ созданы только АНПА тяжелого класса. Больших и сверхбольших АНПА в РФ нет. Сделан вывод о необходимости разработки отечественного СБНПА БД для охраны морских границ, в том числе границ, проходящих подо льдами арктических морей. Приведены результаты работ по применению ЭУ с ЭХГ на подводных лодках и подводных аппаратах и сделан вывод о возможности создания СБНПА БД за счет применения ЭУ с ЭХГ типа «Фотон» с криогенной системой хранения реагентов. Приведены результаты конструкторских проработок СБНПА БД, которые показывают возможность создания СБНПА БД с дальностью подводного хода не менее 5600 км на основе существующего технического задела и освоенных технологий разработ-

* Работа выполнена в рамках инициативных проработок АО «ЦКБ «Лазурит».

чиков основного нового оборудования в течение нескольких лет. Полученные ТХ подтверждают, что СБНПА БД будет находиться на одном техническом уровне с лучшими зарубежными аналогами, а по дальности и максимальной скорости подводного хода значительно превосходить их.

Сверхбольшой автономный необитаемый подводный аппарат, большая дальность подводного хода, энергетическая установка на базе электрохимических генераторов, система криогенного хранения реагентов.

E.M. Appolonov, A.A. Bachurin, A.I. Gorokhov, L.O. Ponomarev

RE: FEASIBILITY AND NECESSITY OF DEVELOPING AN EXTRA LARGE UNMANNED UNDERSEA VEHICLE

The work's objective is assessment of the feasibility and necessity of developing an Extra Large Unmanned Undersea Vehicle (XLUUV) with a long submerged cruising range (LR XLUUV for "Long Range Extra Large Unmanned Undersea Vehicle"). The article presents the basic regulations for classifying autonomous UUVs in Russia and abroad, cites examples of foreign-made AUUVs that testify to the emergence of a new class of AUUVs with an extremely large displacement. Russia has built only heavy-class AUUVs; as for large and extra large AUUVs, they are non-existing here. A conclusion is drawn about the necessity of developing Russia's own LR XLUUV to guard its maritime boundaries, including those passing under the ice of the Arctic seas. The results of works concerning application of propulsion plants based on electro-chemical generators (ECG) at submarines and submersibles are provided and an inference is reached about the possibility of developing a LR XLUUV through the use of a propulsion plant based on ECG of FOTON type with a cryogenic agent storage system. The results of the LR XLUUV design studies are presented. These show a possibility of creating a LR XLUUV with a submerged cruising range of 5,600 km on the basis of the existing engineering potential and proven technologies of novelty-equipment developers within a few years. The performances obtained confirm that the LR XLUUV will be technologically on a par with the best foreign counterparts; as for the submerged cruising range and the maximum submerged speed, it will surpass them.

Autonomous unmanned undersea vehicle, long submerged cruising range, propulsion plant based on electro-chemical generators, cryogenic agent storage system.

Анализ развития АНПА. В РФ классификация АНПА определена ГОСТ Р 56960 – 2016, которые по массе подразделяются на три типа: легкие, средние и тяжелые с массой от 500 кг до 5 тонн. За рубежом АНПА подразделяются на четыре класса. Мастер – планом развития военных НПА ВМФ США (Navy UUV Master Plan) предусматривается дополнительно класс больших аппаратов (Large Class). Требования класса для больших автономных необитаемых подводных аппаратов (БНПА) следующие: диаметр – более 36 дюймов (914 мм), водоизмещение – ок. 20000 фунтов (ок. 9080 кг), автономность при высокой нагрузке – 100–300 часов, автономность в экономическом режиме – более 400 часов, объем полезной нагрузки – 15–30 куб. футов [1].

Мировым лидером в разработке и создании БНПА являются США. В США создан не имеющий аналогов АНПА «Echo Voyager» сверхбольшого водоизмещения. Разработка АНПА «Echo Voyager» выполнена подразделением Интегрированных оборонных систем компании «Боинг» (Boeing Defense, Space & Security) и завершена в 2016 году. Водоизмещение этого аппарата составляет 50 т, автономность – до 6 месяцев, максимальная дальность плавания с подзарядками литий – ионной аккумуляторной батареи (ЛИАБ) от дизель-генератора составляет 7500 миль [2].

В обеспечение создания перспективных и боевых БНПА в США начата реализация программы НИОКР по созданию АНПА большого водоизмещения – Large Displacement Unmanned Undersea Vehicle (LDUUV) и макетов – прототипов БНПА для экспериментальной отработки их основных подсистем [3]. Под эту программу

подпадает разработка больших АНПА «Proteus», «Manta», тестового прототипа «Manta Test Vehicle» (MTV) и инновационного военно-морского прототипа БНПА – LDUUV Innovative Naval Prototype (LDUUV INP).

АНПА «Proteus» разработан группой компаний The Columbia Group совместно с компанией Bluefin Robotic. АНПА «Proteus» может функционировать в трех режимах: подводное средство доставки боевых пловцов (SEAL) «сухого типа», противоминный АНПА и противолодочный АНПА. Начало серийного производства БНПА на базе АНПА «Proteus» намечено на 2020 год [4].

Разработка необитаемых подводных аппаратов «Manta» выполнена в научно-исследовательском центре подводной войны ВМС США (Naval Underwater Warfare Center – NUWS) на уровне концептуальных проектов. Разработаны две концепции создания НПА «Manta». Первая получила наименование «Proud conformal». НПА данного типа длиной 15 м будет нести полезную нагрузку массой до 8 т. В состав его вооружения войдут шесть-восемь малогабаритных, две легкие и две тяжелые торпеды, а также пусковая установка с восемью направляющими для неуправляемых 155 мм ракет. Вторая концепция, названная «Integrated conformal» (получила также обозначение «Super Manta»), предусматривает создание боевого БНПА длиной 25 м и водоизмещением 90 т, способного нести функциональную полезную нагрузку массой до 14 т [4].

Для подтверждения реализуемости концепции БНПА «Manta» NUWS создана тестовая модель аппарата «Manta Test Vehicle» (MTV). Длина MTV – ок. 11 м, масса – 14 т. Испытания MTV были успешно проведены в 2007-2008г.

Работы по инновационному прототипу LDUUV INP выполняются под руководством Управления научных исследований ВМФ США (ONR). Автономность прототипа должна составлять 50–70 суток, рабочая глубина – до 300 м, основная задача – проведение разведывательных действий в прибрежных зонах неприятеля. В рамках темы LDUUV INP разрабатываются проекты перспективных систем энергоснабжения, радиоэлектроники и навигации. Работы по этим проектам осуществляются по заказам Агентства передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA) и Управления научных исследований ВМС США (ONR). Создание и тестирование LDUUV INP намечено на 2018г.

Массогабаритные характеристики перечисленных аппаратов значительно превышают классификационные требования, что позволяет сделать вывод о появлении в США нового класса АНПА сверхбольшого водоизмещения.

Разработка БНПА начата так же и в других передовых странах. В Японии фирмой «Jamstec» создан БНПА «Urashima», в Канаде компанией ISE – АНПА «THESEUS» [5], в Норвегии – НПА «HUGIN-3000» и «HUGIN-4500» с ЭУ с ЭХГ [6].

В России создано два тяжелых АНПА. ИПМТ ДВО РАН создан аппарат АНПА «Клавесин-1Р» с дальностью ок. 300 миль, ЦКБ МТ «Рубин» – АНПА «Клавесин-2Р-ПМ» с дальностью ок. 50 миль. В настоящее время ЦКБ МТ «Рубин» ведет разработку БНПА специального назначения, однако конкретных сведений в открытых источниках нет.

Анализ развития перспективных АНПА в передовых странах мира и в РФ позволяет сделать следующие выводы:

- ◆ в большинстве передовых морских держав начато создание больших АНПА;
- ◆ сверхбольшие АНПА разрабатываются только в США. Это АНПА «Echo Voyager» длиной 15,5 м и водоизмещением 50 т. Перспективными боевыми АНПА являются сверхбольшой АНПА «Manta» по концепции «Proud conformal» и «Super Manta» по концепции «Integrated conformal»;

- ◆ большие и сверхбольшие АНПА разрабатываются с неатомной энергетикой в виде носителей (платформ) сменной полезной нагрузки;
- ◆ созданных больших и сверхбольших АНПА с большой дальностью подводного хода в РФ нет.

Россия имеет морские границы длиной ок. 38000 км, из них длина границы, проходящей по северным морям – ок. 20000 км. Для устранения отставания России от США и защиты морских границ очевидным становится необходимость создания сверхбольшого НПА с большой дальностью подводного хода (СБНПА БД) на базе высокочастотных источников электроэнергии.

Цель создания отечественного СБНПА. Создание СБНПА в виде носителя-платформы для сменной полезной нагрузки позволит получить специализированные и боевые АНПА для охраны морских районов, включая северные моря со сплошным ледяным покровом, повысить функциональные возможности подводных сил ВМФ, решать глубоко специфичные задачи и, в конечном итоге, обеспечить повышение безопасности страны в целом. Источник электроэнергии должен иметь приемлемые габариты и обеспечивать подводный ход в течение нескольких месяцев с дальностью на менее 5000 км.

Задачи для достижения цели. Основными задачами для создания СБНПА с большой дальностью является задача создания ЭУ на базе высокочастотного источника энергии, разработка компактного движительного комплекса с максимально высоким КПД и выбор компоновки аппарата, обеспечивающей использование модулей полезной нагрузки. Задачами второго уровня являются задача создания навигационного оборудования, САУД и ТС и аппаратуры связи, обеспечивающие использование СБНПА подо льдом, отработка обводов, создание малогабаритного оборудования подсистем аппарата.

Опыт АО «ЦКБ «Лазурит». ЦКБ «Лазурит» в 1979 г. разработало технический проект ПЛ проекта 613ЭХГ «Катран» с энергетической установкой с электрохимическими генераторами (ЭУ с ЭХГ). В 1988 г. были завершены государственные испытания ПЛ проекта 613ЭХГ, которая стала первой в мире подводной лодкой с ЭУ на базе ЭХГ.

В последующие годы в ЦКБ «Лазурит» неоднократно выполнялись НИР по применению ЭУ с ЭХГ на СМПЛ, МПЛ и ПА.

В число этих работ вошла НИР «Восток», выполненная ЦКБ совместно с РКК «Энергия» по созданию различного типа ПА с ЭУ на базе ЭХГ «Фотон». Однако все НИР по теме использования ЭУ с ЭХГ на подводных аппаратах в виду отсутствия финансирования реализованы не были.

Анализ данных зарубежной печати по СБНПА показывает, что водоизмещение этих аппаратов составляет 30–50 т. Данный диапазон водоизмещений хорошо освоен ЦКБ «Лазурит» при разработке ОПА различного назначения.

Положительные результаты ранее выполненных НИР по применению ЭУ с ЭХГ на аппаратах и имеющийся технический задел по обитаемым ПА позволил ЦКБ выполнить инициативную проработку по определению облика СБНПА БД и его технических характеристик.

Требования к СБНПА БД. В качестве исходных для проработки СБНПА БД приняты следующие основные технические требования:

1. БНПА БД должен использоваться на морских акваториях, включая северные моря со сплошным льдом, на рабочих глубинах до 1 км и быть предназначен для эксплуатации сменных модулей полезной нагрузки.

2. Конструктивные требования:

- ◆ длина – 16–17 м, нормальное водоизмещение с полезной нагрузкой – не более 50 т (для обеспечения базирования на существующих судах носителях);

- ◆ дальность непрерывного подводного хода на экономической скорости – не менее 5600 км (принята равной длине Северного морского пути);
- ◆ форсажный ход в течение 1 часа со скоростью до 18 узлов (обеспечение режима слежения за подводным объектом);
- ◆ конструкция СБНПА должна быть модульная в составе: носовой модуль (модуль РЭВ), модуль сменной полезной нагрузки (трюм), энергетический модуль (система криогенного хранения реагентов для ЭУ с ЭХГ), кормовой модуль (прочный корпус с литий-ионной АБ (ЛИАБ) и ЭУ с ЭХГ, и маршевый движительный комплекс);
- ◆ объем трюма – не менее 6 м^3 , длина трюма – не менее 2,0 м (для обеспечения высокого уровня универсальности);
- ◆ составные части (СЧ) БНПА (корпус, устройства, энергетическая установка, движительно-рулевой комплекс, электрооборудование, радиоэлектронное вооружение) должны обеспечивать использование СБНПА по назначению.

Результаты проработки СБНПА БД. Компоновочная схема СБНПА БД, полученная в результате проработок, приведена на рис. 1.

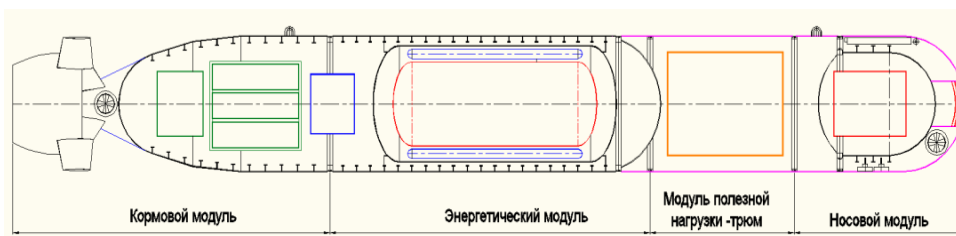


Рис. 1. Компоновочная схема БНПА БД

В проработке СБНПА БД рассмотрены два варианта ЭХГ:

- ◆ с щелочными топливными элементами (ЩТЭ);
- ◆ с твердо-полимерными топливными элементами (ТПТЭ).

Сравнение ЭХГ с ЩТЭ и ЭХГ с ТПТЭ по удельным характеристикам потребления реагентов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение ЭХГ с ЩТЭ и ЭХГ с ТПТЭ

Наименование	ЭХГ с ЩТЭ	ЭХГ с ТПТЭ*
Удельное потребление кислорода, кг/ кВт. ч	0,35	0,457
Удельное потребление водорода, кг/ кВт. ч	0,044	0,057

* – принято по данным ООО «НПО «ССК».

Из табл. 1 видно, что при установке на СБНПА ЭХГ с ТПТЭ потребуется увеличить объем реагентов на 30 %, по этой причине для СБНПА выбрана ЭУ с ЭХГ с ЩТЭ.

В настоящей проработке СБНПА применены ЭХГ с ЩТЭ типа «Фотон» (размеры 920 x 720 x 360 мм, масса – 145 кг, 2 шт., мощностью по 20 кВт) [7]. Общий вид ЭХГ «Фотон» представлен на рис. 2.

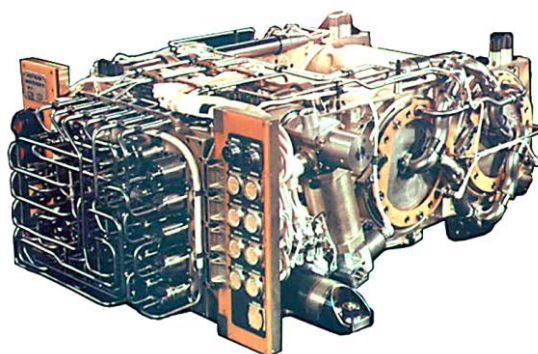


Рис. 2. Общий вид ЭХГ «Фотон»

В настоящее время ЭХГ типа «Фотон» могут быть поставлены в кратчайшие сроки ООО «НПО «Центротех» (г. Новоуральск), в которое в 2017 г. вошли все предприятия Новоуральской промышленной площадки по производству ЭХГ, в том числе ООО «Уральский завод газовых центрифуг» и ООО «Завод электрохимических преобразователей».

Следует заметить, что требования к чистоте реагентов для ЭХГ «Фотон» значительно выше по сравнению с ЭХГ на основе ТПТЭ, что требует дополнительных затрат.

Система криогенного хранения реагентов для ЭУ с ЭХГ (СКХР) размещается в энергетическом модуле. Конструкция СКХР предложена ООО «Криомаш-БЗКМ».

Емкость кислорода выполнена в виде двух полуторов, соединенных цилиндрическими наружной и внутренней оболочками (масса кислорода – 2,4 т). Емкость водорода – цилиндр, замкнутый эллиптическими оболочками, (масса водорода - 0,3 т), устанавливается внутри кислородной емкости. Обе емкости устанавливаются в корпус вакуумной изоляции. Общий вид СКХР приведен на рис. 3.

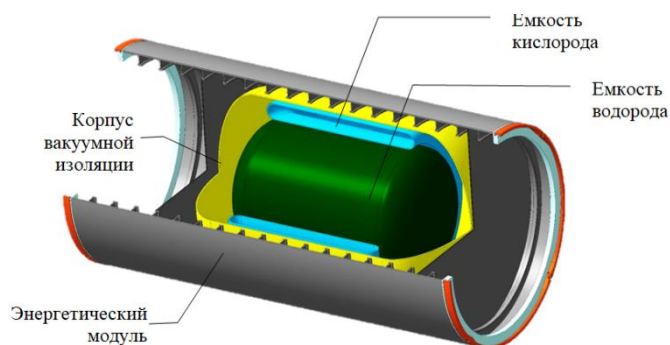
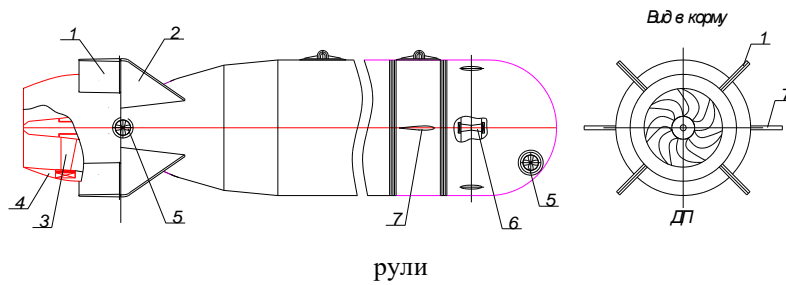


Рис. 3. Общий вид СКХР

Двигательно-рулевой комплекс (ДРК) предусматривается в составе маршевого двигательного комплекса (МДК) и четырех подруливающих устройств (ПУ) – двух лаговых в носу и корме и двух вертикальных, установленных в кормовой части носового модуля, носовых горизонтальных рулей (НГР) и «Х»-образных кормовых рулей (КР). Схема установки ДРК на СБНПА приведена на рис. 4. В качестве привода двигателей приняты погружные кольцевые электродвигатели-двигатели, которые все чаще начинают находить применение на АНПА [8].



рули
 Рис. 4. Схема установки ДРК на СБНПА: 1 – «X»-образные кормовые рули; 2 – стабилизаторы; 3 – гребной винт; 4 – насадка; 5 – лаговое ПУ; 6 – вертикальное ПУ, 7 – носовые горизонтальные

МДК выполнен с маршевым кольцевым электродвигателем (МЭД) в насадке и электродвигателем экономического хода (ЭДЭХ) в ступице гребного винта. Общий вид МДК приведен на рис. 5.

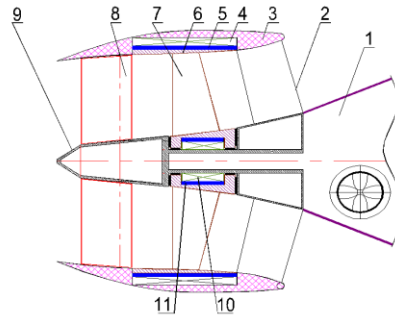


Рис. 5. Общий вид МЭД: 1-корма АНПА, 2 – аппарат направляющий, 3 – передняя часть насадки, 4 – статор МЭД, 5 – кольцевой ротор МЭД, 6- наружное кольцо ГВ, 7 – лопасти ГВ, 8 – спрямляющий аппарат, 9 – обтекатель, 10 – статор ЭДЭХ, 11 – ротор ЭДЭХ

Для обеспечения форсажных ходов применена ЛИАБ ООО «НПО «ССК» (г. Москва) емкостью 500 кВт т.ч. ЛИАБ включена в буфер к ЭУ с ЭХГ и установлена в ПК кормового модуля. Масса ЛИАБ – 2,7 т. Предполагаемый разработчик МЭД ВЭИ им. В.И. Ленина подтвердил возможность создания МЭД мощностью 400кВт при массе 1,2 т.

На рис. 6 приведена схема установки на БНПА БД сейсмомодуля для 2D сейсморазведки взамен трюма.

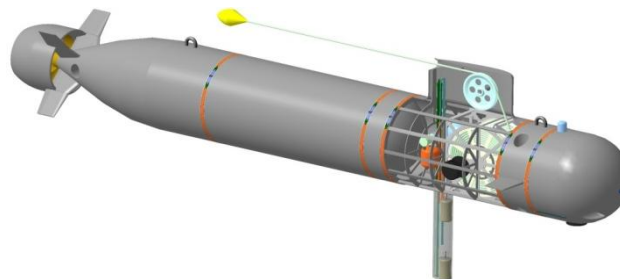


Рис. 6. Схема установки на СБНПА БД сейсмомодуля

Состав сейсмооборудования для 2D сейсморазведки: сейсмокоса – 500 м, диаметр 45 мм; блок излучателей БИЗ ВЧ – 2шт., 250 Гц; выдвигной блок БИЗ ВЧ; лебедка для сейсмокосы. Состав сейсмооборудования принят по рекомендации ИПФ РАН (г. Нижний Новгород).

Технические характеристики БНПА БД и сравнение с аналогами приведено в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики БНПА БД и сравнение с аналогами

Название характеристики	БНПА БД	Echo Voyager	PROTEUS	URASHIMA	THESEUS
Страна	РФ	США	США	Япония	Канада
Длина, м	-	15,5	7,8	10,0	10,7
Диаметр корпуса, м	-		1,62	1,3	1,3
Водоизмещение, т	45	50	10	10	8,6
Скорость экономхода, уз	ок.2,0	2,0	2...4	2	2
Автономность, ч/сутки	1500 /60	4320 /180	72-112 /3-5	56 /2,3	
Дальность хода на эк. скорости, миль/км	3000/ 5600	7500/ 13640*	330/600	175/317	755/1360
Скорость максимальная, уз	18	8	10	6	4
Источник электроэнергии	ЛИАБ и ЭУ с ЭХГ	ЛИАБ	АБ	ЭХГ с PEFC	ЛИАБ
Полезная нагрузка	Трюм – ок. 6м ³	Нет данных	Трюм – 4,8 м ³	Трюма нет	Трюм – ок. 2 м ³

* – с подзарядкой АБ от ДГ,

Заключение. Выполненная проработка показала принципиальную возможность создания СБНПА БД водоизмещением около 45 тонн с дальностью подводного хода не менее 5600 км и обеспечением форсажных ходов до 18 узлов с ЭУ на базе ЛИАБ и ЭХГ типа «Фотон» с системой криогенного хранения реагентов. По этим показателям СБНПА БД не имеет аналогов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Department of the Navy, USA, The Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan, November 9, 2004. – Режим доступа: <http://www.navy.mil/navydata/technology/uuvmp.pdf/>.
2. Hydrographic Catalogue. – Режим доступа: <http://www.hydrographic-catalogue.com/>.
3. Marine technology, may 2016. – Режим доступа: <http://agazines.marinelink.com/magazines/MarineTechnology/201605/pdf/>.
4. Бочаров Л.Ю. Фундаментальная и прикладная гидрофизика / Институт проблемных исследований РАЕН. – Режим доступа: <http://hydrophysics.info/wp-content/uploads/2014/10/Бочаров.pdf/>.
5. Jane's Navy International, 2016-2017.
6. Каталог «Hugin». – Режим доступа: <https://www.km.kongsberg.com/ks/>.
7. От энергетики орбитального корабля «БУРАН» к энергетике космических кораблей и станций. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/26564867-От-energetiki-orbitalnogo-korablya-buran-k-energetike-kosmicheskikh-korabley-i-stanciy.html/>.
8. Характеристика технологий создания кольцевых электродвигателей-двигателей для необитаемых подводных аппаратов и кораблей. – Режим доступа: <http://hydrophysics.info/wp-content/uploads/2014/10/Бочаров.pdf/>.

УДК 623.827

К.З. Лаптев, А.Г. Квашнин

МИНИ-ТОРПЕДЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Одним из перспективных направлений Мирового развития морского подводного оружия является разработка оружия малых калибров. Наибольшее распространение в ряде стран получило оружие ближней зоны самообороны на базе мини-торпед калибром 5 дюймов. Так, например, итальянской фирмой *Whitehead Alenia* на базе мини-торпеды *A200* создано более 12 видов сверхмалого подводного оружия. Аналогичные разработки выполнены немецкой фирмой *STN Atlas Elektronik* на базе мини-торпеды *Seapike*. По утверждению разработчиков некоторые из образцов могут применяться на мелководье и в ближней зоне самообороны как противолодочное оружие. Эти примеры свидетельствуют о том, что возник и бурно развивается за рубежом новый вид морского подводного оружия – сверхмалые торпеды (мини-торпеды) и комплексы различного назначения на их основе.

В работе [7] предлагалось с применением методов системного анализа и исследовательского проектирования обосновать отечественный рациональный типоряд мини-торпед состоящий из 4-х типов:

- ◆ первый тип – мини-торпеды для решения задач противолодочной и противоминной обороны;
- ◆ второй тип – мини-торпеды для решения задач гидроакустического противодействия;
- ◆ третий тип – малогабаритные самоходные средства для решения задач активной противоминной защиты;
- ◆ четвертый тип – мини-торпеды для решения задач противоторпедной защиты.

Не вызывает сомнения, что мини-торпеды могут являться основным оружием автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) военного назначения.

Рассмотрим некоторые из них. Противолодочная мини-торпеда *Seapike* (рис. 1). Первые публикации о разработке торпеды появились в 2002 г. Малогабаритная, легкая, недорогая противолодочная торпеда производства фирмы *STN Atlas Elektronik* (Германия) предназначена для борьбы с подводными лодками (ПЛ) в прибрежных и мелководных районах [6]. Основные известные тактико-технические характеристики (ТТХ) торпеды *Seapike* следующие: длина 900 мм; калибр 124 мм; масса 20 кг. Сведения о скорости, дальности и диапазоне глубин хода отсутствуют.

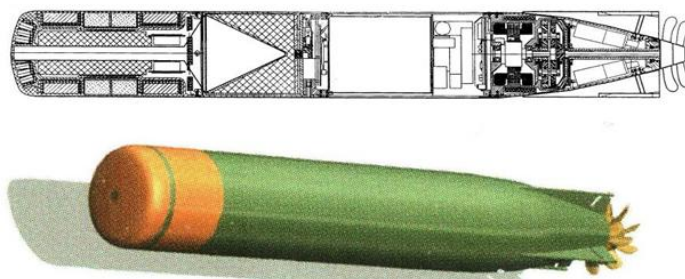


Рис. 1. Мини-торпеда *Seapike*: а – конструкция; б – общий вид

Мелководье и прибрежные районы, проливные зоны и т. п. создают существенные трудности для проведения противолодочных операций. Здесь присутствуют значительные природные шумы окружающей среды, неравномерность донного рельефа, присутствие скалистых образований и т.п., существует сложная стратификация по температуре и солености, высокий уровень реверберации. Все это повышает вероятность ложных срабатываний гидроакустической аппаратуры обычных торпед, в особенности при поиске малошумных и тихоходных ПЛ. Торпеда *Seapike*, если верить рекламе, способна парировать эти проблемы. Она выстреливается из пускового устройства (ПУ) ПЛ (или АНПА), сбрасывается с авиационных носителей или же запускается по баллистической траектории с надводного корабля в составе ракетно-торпедного комплекса. Торпеда имеет два гидроакустических средства (ГАС): гидролокатор кругового обзора размещается в зоне фугасной части заряда взрывчатого вещества (ВВ), а приемно-излучающая антенна системы самонаведения (ССН) конформного типа располагается в носовой части. Энергосиловая установка (ЭСУ) торпеды представляет собой химический источник тока, высокоскоростной одновальный двигатель, редуктор-раздвоитель и соосные, противоположно-вращающиеся гребные винты. Торпеда *Seapike* оснащена комбинированным зарядом ВВ, который состоит из двух частей, размещенных тандемно. Фугасная часть располагается в передней части БЗО, а кумулятивная непосредственно за ней. После пуска торпеда осуществляет поиск ПЛ-цели при свободном погружении с выключенным двигателем. При погружении гидролокатор кругового обзора в горизонтальной плоскости производит поиск цели. После обнаружения цели включается ЭСУ, и торпеда переходит в горизонтальную плоскость слежения, где работает носовая приемно-излучающая антенна ССН конформного типа. Затем торпеда выходит на глубину хода цели и начинает сближение с ней в режиме самонаведения. На конечном участке самонаведения торпеда выполняет специальный маневр, в результате которого она занимает перпендикулярное по отношению к корпусу цели положение, чтобы обеспечить максимальную эффективность кумулятивного заряда.

Мини-торпеда *A200* предназначена для использования против ПЛ в сложной помеховой обстановке, т.е. в условиях высокой вероятности ложных срабатываний ССН [4]. Внешний вид торпеды *A200* показан на (рис. 2), а продольный разрез представлен на (рис. 3). В носовой части торпеды *A200* располагается активнопассивная ССН, которая обеспечивает классификацию и селекцию целей.

ССН позволяет работать, против однокорпусных и двухкорпусных ПЛ, в том числе лежащих на грунте, а также в условиях мелководья. В боевом зарядном отделении (БЗО) размещается кумулятивный заряд ВВ массой 3 кг, разрушающее воздействие которого эквивалентно 14 кг тротила, и неконтактный взрыватель. Электронная система управления располагается непосредственно за зарядом ВВ и обеспечивает поражение цели под прямым углом (по нормали к корпусу ПЛ). ЭСУ торпеды *A200* состоит из тепловой батареи, низкоскоростного одновального электродвигателя постоянного тока и гребного винта. Основные ТТХ торпеды *A200* следующие: длина 883 мм; калибр 124 мм; масса 12 кг; глубина хода 300 м; скорость хода 15 уз; дальность хода 8 км; масса ВВ 3 кг; радиус реагирования ССН 700 м. Стоимость торпеды *A200* составляет 10 % от стоимости обычной легкой торпеды калибра 324 мм. В рекламном проспекте фирмы *Whitehead Alenia* [4] приведены следующие характеристики эффективности использования торпеды *A200* против ПЛ-цели, движущейся со скоростью 8 уз на глубинах 30–300 м: вероятность попадания в цель 98 %; вероятность поражения цели 90 %; вероятность уничтожения 81 %. Фирмой *Whitehead Alenia* на базе торпеды *A200* создано более 12 видов сверхмалого подводного оружия.



Рис. 2. Итальянская сверхмалая торпеда A200: а – вид спереди; б – вид сбоку; в – хвостовая часть

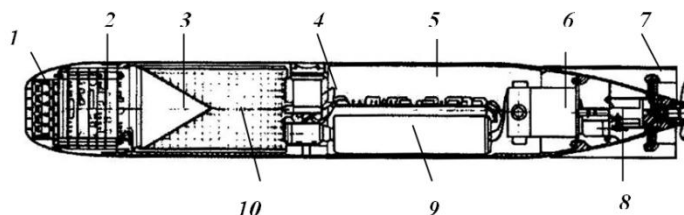


Рис. 3. Сверхмалая торпеда A200: 1 – приемно-излучающее устройство антенны АСН; 2 – блок электронной аппаратуры (система управления и АСН); 3 – кумулятивная воронка заряда ВВ; 4 – блок контакторов; 5 – корпус; 6 – электродвигатель; 7 – рули; 8 – рулевая машинка; 9 – аккумуляторная батарея; 10 – БЗО

Концепция торпеды *Black Scorpion*. На военно-морской выставке *Euronaval 2014* итальянская компания *Whitehead Underwater Systems (WASS)* представила макет 127-мм торпеды *Black Scorpion*, находящейся на этапе отработки концепции [3]. Данная торпеда (рис. 4) должна стать относительно недорогим средством для борьбы с малыми и сверхмалыми подводными лодками и подводными диверсионными средствами в прибрежной зоне. Оценочная стоимость этой торпеды должна составлять около 10 % стоимости современной 324 мм противолодочной торпеды. Считается, что применение таких торпед должно вести не только к непосредственному поражению подводного противника, но и вынуждать его к попыткам уклонения и тем самым обнаружению себя. Для этого торпеда *Black Scorpion* будет иметь уровень акустических сигналов системы самонаведения, идентичный 324 мм противолодочной торпедой, чтобы противник предполагал, что его атакуют именно этими торпедами.



Рис. 4. Макет перспективной 127 мм торпеды Black Scorpion в экспозиции военно-морской выставки Euronaval 2014

Торпеда *Black Scorpion* будет при калибре 127 мм иметь длину 900 мм и массу около 11 кг. Боевая часть массой 2,5 кг будет оснащаться контактным и неконтактным взрывателями. Электрический двигатель обеспечит торпедой скорость

15 уз. Применение торпеды должно обеспечиваться при глубинах от 30 м до 200 м. Система самонаведения – активная акустическая. Одной из рассматриваемых моделей применения *Black Scorpion* является постановка вертолетом барьера путем сброса от четырех до восьми мини-торпед на пути предполагаемого следования подводной цели.

Концепция АНПА – носителя мини-торпед показана на (рис. 5). Основными отличиями данного АНПА является наличие бортового гидроакустического комплекса (БГАК) для поиска целей и бортового комплекса торпедного оружия (БКТО). БКТО может включать в свой состав: пусковые устройства торпед (ПУ); систему управления пуском, находящуюся в одном из прочных контейнеров АНПА и собственно мини-торпеды. Конструкция ПУ должна обеспечивать АНПА следующие возможности: прием мини-торпед на борт АНПА в береговых условиях; безопасное хранение торпед на борту АНПА; выпуск торпед (выстрел); выгрузку не израсходованных мини-торпед с АНПА в береговых условиях. ПУ расположены в средней части АНПА по его бортам или снизу. В результате исследовательского проектирования установлено, что ПУ может состоять из следующих частей: каркаса; ложемента торпеды; механизма фиксации торпеды; механизма выталкивания торпеды; механизма пуска торпеды; прочного контейнера системы управления (СУ).



Рис. 5. Пуск торпеды с АНПА

СУ должна обеспечивать управление БКТО на всех режимах работы:

- ◆ погрузки торпед в ПУ (подготовка торпед к хранению и пуску);
- ◆ хранения торпед в ПУ (на берегу и на корабле);
- ◆ штатного пуска торпед (ввод стрельбовых данных и пуск);
- ◆ выгрузки торпед;
- ◆ ввод в торпеды исходных данных для их наведения на цель;
- ◆ контроль технического состояния торпед при их нахождении в ПУ АНПА;
- ◆ блокирование БКТО (недопущение несанкционированного пуска торпед).

В режиме пуска торпеды реализуется следующий алгоритм действий:

1. БГАК АНПА обнаружил цель и ввел свои данные в СУ БКТО.
2. СУ дает команду на приведение торпед в режим готовности к пуску и вводит необходимые данные в торпеды.
3. АНПА выполняет условия пуска: дает максимально возможный ход и поддерживает постоянство скорости своего движения; дифферент и крен АНПА поддерживаются равным нулю; глубина хода АНПА постоянная; курс АНПА постоянный.

4. СУ дает команду на запуск двигателя торпед (двигатель запускается и выходит на рабочий режим внутри ПУ).

5. СУ дает команду на пуск (происходит выталкивание торпед из ПУ).

6. Выпущенные торпеды начинают движение к цели.

В качестве выводов можно отметить следующее:

1. В ближайшей перспективе, мини-торпеды будут являться одним из основных видов оружия автономных необитаемых подводных аппаратов военного назначения.

2. При формировании требований к любым образцам морского подводного оружия, применяемым с АНПА, наибольшее влияние оказывают такие группы факторов как: тактические; технические; экономические.

3. Особое место при создании мини-торпед должно отводиться мини-зарядам, размещаемых в противолодочных, противоминных противодиверсионных и др. АНПА.

4. В целом требования к оружию состоят в том, чтобы совместно с обеспечивающими системами выполнять боевые задачи с требуемой эффективностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ефимов О.И., Красильников Е.П., Юрин В.Ф.* Создание мини-оружия для подводных лодок. /Электронный ресурс/. – Режим доступа: <http://www.ozakaz.ru/index.php/articles/n-25-12-2007/209-n27032011-18-27>.
2. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины: 21 век. – Хабаровск, 2011. 304 с.
3. Миниатюрная торпеда Black Scorpion /Электронный ресурс/. – Режим доступа: <http://superorujie.ru/blog/43353518432/Miniaturnaya-torpeda-Black-Scorpion?domain=mirtesen.ru&pad=1>.
4. Рекламный буклет фирмы Whitehead Alenia по миниторпедe A200.
5. Рекламный буклет фирмы Whitehead Alenia по миниторпедe A202.
6. Рекламный буклет фирмы STN Atlas Elektronik по миниторпедe Seapike.
7. *Чикалев Ф.М.* Разработка многоцелевого образца морского подводного оружия на основе сверхмалой торпеды. // Труды МНТК «Морское подводное оружие – памятные даты истории». – СПб, 2004.
8. *Чикалев Ф.М.* Состояние и перспективы развития сверхмалых образцов морского подводного оружия ВМС иностранных государств // Морской сборник. – 2006. – № 7.
9. *Чикалев Ф.М.* Типовые модели боевого применения сверхмалого морского подводного оружия // Морской сборник. – 2008. – № 8.
10. The Navy Unmanned Undersea Vehicle. (UUV) Master Plan. /Электронный ресурс/. Режим доступа: <http://www.navy.mil/navydata/technology/uuvmp.pdf>.

УДК 626

А.И. Машошин, И.В. Пашкевич

ОБЛИК ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ

В докладе рассматривается облик подводного робототехнического комплекса, обеспечивающего поиск месторождений углеводородов на морском шельфе при любом состоянии поверхности моря, в том числе подо льдом.

Введение. В настоящее время стратегически важной национальной задачей является поиск месторождений залежей углеводородов на морском, особенно Арктическом, шельфе. Основным методом решения этой задачи является сейсморазведка. Её суть заключается в излучении в воду мощных низкочастотных акустических сигналов, которые проникают в грунт и отражаются от различных неоднородностей.

родностей в грунте, в том числе от полостей, содержащих залежи углеводородов. Отраженные сигналы фиксируются полем донных станций, оборудованных геофонами, либо протяженными линейными многоэлементными антеннами (сейсмокосами), буксируемыми за судном, либо сейсмокосами, лежащими на дне (рис. 1). Зафиксированные сигналы в береговых условиях обрабатываются на мощных компьютерах по специальным программам, позволяющим интерпретировать зафиксированные сигналы.



Рис. 1. Способы сейсморазведки, используемые в настоящее время

Для решения всех перечисленных задач используется специально оборудованное судно, которое способно буксировать излучатель и сейсмокосу, а также ставить и впоследствии поднимать на борт донные станции.

Недостатком описанных способов сейсморазведки является существенная зависимость возможности её проведения от состояния поверхности моря. Естественно, что эти способы не применимы в районах, покрытых льдом. Также они не применимы в штормовую погоду. В морях Российской части Арктики благоприятная для сейсморазведки погода стоит суммарно не более 2 месяцев в году, что делает сейсморазведку с использованием надводных судов экономически не эффективной.

Выходом из данной ситуации является создание подводных робототехнических комплексов (РТК) для поиска и добычи углеводородов на морском шельфе. Идея создания подобных РТК известна сравнительно давно [1]. Однако ввиду исключительной сложности их создания, работы в данном направлении во всем мире находятся на стадии поисковых исследований. Но учитывая, что альтернативы подводным РТК для поиска нефтегазовых месторождений в районах моря, покрытых вечным льдом, в настоящее время не существует, работы по их созданию необходимо начинать безотлагательно. Причем России иметь приоритет в данной области весьма желательно.

Целью доклада является изложение облика подводного РТК для сейсморазведки на морском шельфе независимо от состояния поверхности моря, в том числе подо льдом.

1. Современное состояние с созданием подводных РТК для сейсморазведки на морском шельфе. Подготовительные работы, направленные на создание в будущем подводных РТК для проведения морской сейсморазведки, в настоящее время интенсивно ведутся за рубежом. Наиболее известным является проект Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) [2], посвященный разработке технологии создания подводного РТК, базирующегося на совместном функционировании большого числа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и ориентированного на поиск углеводородов на морском шельфе. Проект выполнялся с 2015-го по 2017 год по заказу Евросоюза и рассматривался

как продолжение десяти проектов, выполненных за последние 10 лет. Для реализации проекта был создан консорциум из 4-х научно-исследовательских организаций и 5 индустриальных партнёров.

Целью проекта WiMUST являлась разработка методологии, технологии и процедур создания робототехнической системы на базе АНПА для проведения сейсморазведки на морском шельфе в интересах:

- ♦ повышения эффективности сейсморазведки путем повышения информативности получаемых данных за счет формирования оптимальной (с точки зрения решаемой задачи) адаптивной приёмной динамической пространственной 3D антенной решётки, в которой датчиками являются короткоапертурные сейсмокосы (стримеры), буксируемые АНПА;

- ♦ упрощения и сокращения стоимости процесса сейсморазведки.

Следует особо заметить, что задача обеспечения сейсморазведки в штормовую погоду и подо льдом в проекте не ставилась и не решалась.

В качестве совершенствуемого прототипа в проекте WiMUST рассматривалась сейсморазведка с применением 10-рядной сейсмокосы длиной до 12 км (рис. 1,б). Результатом совершенствования должна была стать робототехническая система, состоящая из нескольких десятков (до 100) АНПА, каждый из которых буксирует короткоапертурный стример (сейсмокосу) длиной порядка 13 м, движущихся в заданном 3-мерном строю за кораблем, буксирующим излучатель (рис. 2).

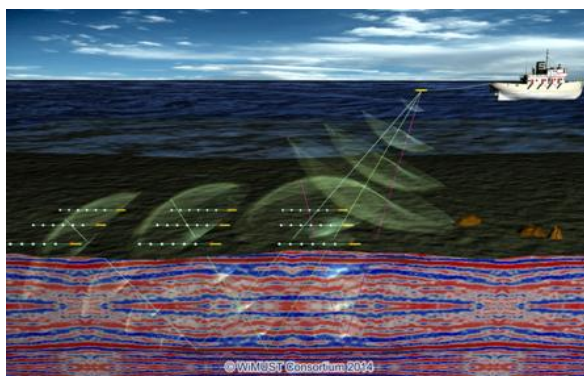


Рис. 2. РТК, прорабатываемая в проекте WiMUST

Для достижения поставленной цели в проекте WiMUST разрабатывались следующие технологии:

- ♦ методы и алгоритмы расчета формируемой группой АНПА оптимальной пространственной 3D антенной решётки для приёма сигналов, отраженных от подземных неоднородностей;

- ♦ методы и алгоритмы динамического формирования и стабилизации этой решетки;

- ♦ методы и алгоритмы кооперативного управления группой АНПА;

- ♦ методы создания стримера, буксируемого АНПА, в том числе на базе векторно-скалярных приёмников;

- ♦ методы и алгоритмы взаимного позиционирования и навигации группы АНПА;

- ♦ методы звукоподводной связи АНПА между собой и с судном управления.

Проект завершился демонстрационными испытаниями разрабатываемой РТК и признан успешным в части разработки перечисленных технологий. Ожидается его продолжение в виде промышленной разработки.

В России работы в данном направлении на сегодняшний день ограничены постановкой задачи либо отдельными техническими предложениями [3–8].

2. Облик отечественного подводного РТК для сейсморазведки на шельфе. Для России выполнения проекта, аналогичного проекту WiMUST, недостаточно, поскольку он не решает главную проблему – устранение зависимости сейсморазведки от погодных условий и в частности от наличия ледового покрова.

Для нашей страны принципиально необходимо создание подводного РТК, обеспечивающего:

- ◆ проведение сейсморазведки в любых районах (в том числе подо льдом) и при любой погоде;
- ◆ высокое качество получаемых данных;
- ◆ высокую производительность сейсморазведки.

Создание такого РТК позволит:

- ◆ повысить эффективность морской сейсморазведки и, как следствие, увеличить добычу углеводородов на морском шельфе;
- ◆ завоевать приоритет России в данной высокотехнологичной области.

Подводный РТК для сейсморазведки на морском шельфе должен включать:

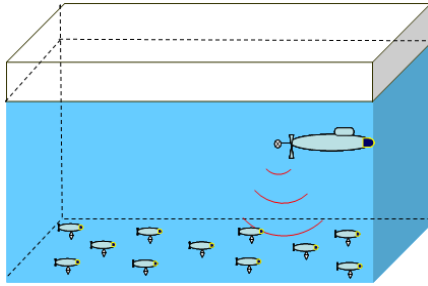
- ◆ комплект АНПА (по разным оценкам от нескольких десятков до нескольких сотен), оснащенных геофонами либо короткими сейсмокосами с датчиками-гидрофонами, а также средствами высокоточного позиционирования и навигации;
- ◆ подводную док-станцию (т.е. специализированную подводную лодку), обеспечивающую доставку АНПА в район проведения работ, управление ими, а также буксировку низкочастотного гидроакустического излучателя;
- ◆ береговую инфраструктуру для обслуживания АНПА и док-станции.

Судя по публикациям (например, [9]), наиболее информативным способом сейсморазведки является прием отраженных сигналов полем донных станций, оборудованных геофонами. Объясняется это тем, что геофоны, имеющие непосредственный контакт с грунтом, позволяют регистрировать так называемые поперечные волны, которые в ряде случаев, например, в газовых трубках, являются единственным источником информации об изучаемом объекте. Вместе с тем определенные достоинства (в частности высокую производительность сейсморазведки) имеет и способ приема отраженных сигналов на буксируемые сейсмокосы, однако при том условии, что буксировка будет осуществляться в непосредственной близости от дна.

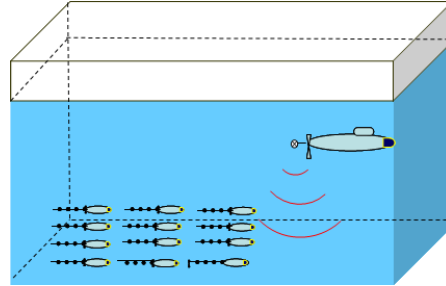
Учитывая это, АНПА, применяемые в подводном РТК, должны:

- 1) обладать универсальностью, т.е. иметь способность нести либо трехкоординатный геофон и обеспечивать его надежный контакт с грунтом, либо буксировать стример с гидрофонами (рис. 3);
- 2) обеспечивать:
 - ◆ точность позиционирования относительно док-станции и других АНПА группы не хуже 10 % длины волны на верхней частоте используемого диапазона частот (40–50 см);
 - ◆ синхронизацию времени с док-станцией и другими АНПА не хуже 0,2–0,3 мс;
 - ◆ скорость передачи и приема данных по звукоподводному каналу не менее 1 кбит/сек на дистанции до 3 км;
- 3) иметь эффективную систему управления, способную обеспечить:
 - ◆ маневрирование АНПА по программе;
 - ◆ оперативное выполнение поступивших команд;

- ◆ самостоятельный обход неподвижных и маневрирующих препятствия, недопущение столкновений с другими САНПА;
- ◆ адекватные решения в нестандартных ситуациях;
- 4) иметь небольшие габариты, позволяющие размещение на док-станции большого числа АНПА.



а) прием сигналов на 3-координатные геофоны, которыми оборудованы АНПА (донная сейсмозвездка)



б) прием сигналов на динамическую 3-D антенну, образованную гидрофонами, буксируемыми АНПА (придонная сейсмозвездка)

Рис. 3. Способы сейсмозвездки с использованием АНПА

К подводной док-станции, в свою очередь, предъявляются следующие требования:

- 1) док-станция должна быть способна:
 - ◆ нести необходимое количество АНПА;
 - ◆ надежно и оперативно выпускать и принимать АНПА;
 - ◆ ставить и буксировать гидроакустический излучатель, имея достаточный запас электроэнергии для обеспечения его работы;
- 2) док-станция должна обеспечивать:
 - ◆ точность абсолютной подводной навигации не хуже 500 м;
 - ◆ точность позиционирования относительно каждого АНПА не хуже 40–50 см;
 - ◆ точность синхронизации времени с каждым АНПА не хуже 0,2–0,3 мс;
 - ◆ скорость передачи и приема данных по звукоподводному каналу не менее 1 кбит/сек на дистанции до 3 км;
- 3) док-станция должна быть оборудована эффективной высокоавтоматизированной системой управления группой до нескольких сотен АНПА.

Для того чтобы фактически приступить к созданию подводного РТК для сейсмозвездки необходимо предварительно выполнить следующие работы:

- 1) проанализировать современный уровень развития подводных технологий с целью оценки принципиальной возможности создания подводного РТК, способного решить поставленную задачу;
- 2) разработать концепцию сейсмозвездки с использованием подводного РТК;
- 3) выполнить сравнительный анализ вариантов ведения сейсмозвездки в условиях сильного волнения и подо льдом;
- 4) разработать физико-математическую модель применения подводного РТК и вытекающие из неё требования к составу и характеристикам РТК;
- 5) разработать методы:
 - ◆ посадки АНПА на морское дно;

- ◆ синхронного погружения группы АНПА на морское дно и всплытия на заданную глубину для дальнейшего продольного перемещения в новое положение;
 - ◆ согласованного продольного перемещения группы АНПА;
 - ◆ приема сейсмосигналов на борту АНПА с возможностью их автоматической регистрации;
 - ◆ определения оптимальной частоты зондирования морского дна в условиях ведения сейсморазведки с использованием АНПА;
 - ◆ оптимизации количества и топологии размещения АНПА в группе при ведении сейсморазведки;
 - ◆ навигации АНПА в условиях сильного волнения и в подледных условиях;
 - ◆ удержания каждого АНПА на маршрутной траектории в условиях наличия течений и погрешностей определения собственного местоположения;
 - ◆ обмена данными между АНПА в группе;
 - ◆ оценки эффективности ведения сейсморазведки с использованием РТК;
 - ◆ разработать алгоритмы управления группой АНПА при ведении сейсморазведки;
- б) создать имитационную модель функционирования подводного РТК при проведении сейсморазведки и с её использованием провести моделирование с целью оценки эффективности сейсморазведки с использованием подводного РТК и выявления проблемных вопросов.

Заключение. Создание подводного робототехнического комплекса (РТК) для поиска и добычи углеводородов на морском шельфе при любом состоянии поверхности моря, в том числе подо льдом, является крайне актуальной задачей для РФ.

Учитывая исключительную сложность решения этой задачи, для получения мирового приоритета к её решению нужно приступить незамедлительно.

В работе рассмотрен облик подводного РТК, сформулированы основные требования к его элементам и приведен перечень первоочередных задач, которые нужно решить, прежде чем приступить к фактическому созданию подводного РТК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Landrø M., Amundsen L. Seismic Imaging Technology // GEOExPro. – 2008. – Vol. 5, No. 2–5.
2. WiMust – A Fleet of AUVs for Seismic Surveys. – <https://www.hydro-international.com/content/article/wimust-a-fleet-of-aUVs-for-seismic-surveys>.
3. Патент РФ 2515170. Подвижная подводная автономная сейсмогидроакустическая станция разведки углеводородов на акватории арктического шельфа.
4. Мартынова Л.А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1 (86). – С. 83-92.
5. Мартынова Л.А. Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 2 (87). – С. 77-87.
6. Мартынова Л.А., Конюхов Г.В., Пашкевич И.В., Рухлов Н.Н. Мультиагентный подход к групповому управлению АНПА при ведении сейсморазведки // «Экстремальная робототехника». – Санкт-Петербург. – 2017. – С. 117-128.
7. Мартынова Л.А., Маиошин А.И. Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 38-48.
8. Маиошин А.И., Скобелев П.О. Применение мультиагентных технологий для управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174). – С. 45-59.
9. Лавёров Н.П., Рослов Ю.В., Тулунов А.В., Воронов М.А., Лобковский Л.И., Ганжа О.Ю. Перспективы донной сейсморазведки в РФ // Морские информационно-управляющие системы. – 2015. – № 1 (7). – С. 40-51.

УДК 629.584

**А.В. Багницкий, А.В. Воронцов, Г.Ю. Илларионов, С.В. Мальцева,
Д.М. Сонькин, Ю.А. Чурсин**

**АНПА "ПЛАТФОРМА" - МНОГОЦЕЛЕВОЙ НОСИТЕЛЬ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Институт проблем морских технологий расширил в 2016 году модельный ряд серии автономных необитаемых подводных аппаратов МТ-2010 новой разработкой с названием «Платформа». В отличие от всех других ранее выпущенных институтом аппаратов, описываемый АНПА поставляется не оснащенный встроенным оборудованием для выполнения обзорно-поисковых работ или датчиками для измерений. Вместо этого он должен оснащаться полезной нагрузкой, выбираемой под текущие потребности пользователя. Комплекс учебно-исследовательского АНПА «Платформа» изготовлен по заказу Томского политехнического университета и использовался в ходе арктической экспедиции, проводимой в Восточно-Сибирском море, осенью 2016 года.

Автономный необитаемый подводный аппарат, полезная нагрузка.

**A.V. Bagnitckii, A.V. Vorontsov, G.Yu. Ilarionov, S.V. Maltseva, D.M. Sonkin,
Yu.A. Chursin**

**AUV "PLATFORM" – MULTIPURPOSE RESEARCH EQUIPMENT CARRIER
ANDREI**

In 2016, Institute of Marine Technology Problems has expanded the model range of MT-2010 AUV series with the new development named "Platform". Unlike all other vehicles produced earlier by the institute, this AUV is supplied not equipped with any embedded survey devices or sensors. Instead, payload chosen for current needs of user must be installed. Research/educational AUV system "Platform" is built for Tomsk Polytechnic University and was used during the Arctic expedition at East Siberian Sea in autumn, 2016.

Automated underwater vehicle, payload.

В 2016 году Институтом проблем морских технологий ДВО РАН был представлен комплекс АНПА «Платформа», прототипом которого послужил успешно работающий аппарат «Пилигрим» [1]. Таким образом, серия МТ-2010, к которой принадлежит «Пилигрим», пополнилась новым представителем. Заказчиком комплекса выступил Томский политехнический университет.

Главные отличия АНПА «Платформа» от предшествующих разработок института заключаются в наличии отсека полезной нагрузки и оснащении цифровой гидроакустической системой связи (ГАСС).

АНПА представляет собой базовую версию подводного носителя – при поставке отсутствует какое-либо исследовательское или обзорно-поисковое оборудование. Вместо этого состав оборудования полезной нагрузки выбирается в зависимости от работ, которые необходимо выполнить с его помощью. Области потенциального использования АНПА определяются установленной полезной нагрузкой.

АНПА может выступать носителем для следующих классов оборудования (не ограничиваясь данным списком): гидролокатора бокового обзора, многолучевого эхолота, гидроакустического донного профилографа, фото- или видеосистемы, датчиков физико-химических параметров морской воды.

Новый АНПА обладает следующими основными техническими характеристиками:

- ◆ рабочая глубина: 500 м;
- ◆ масса: 220 кг;

- ◆ габариты: длина 3, ширина 0,6, высота 1,05 м;
- ◆ диаметр корпуса: 450 мм;
- ◆ скорость хода: 0–1,5 м/с;
- ◆ дальность хода (длина траектории в течение одного запуска): до 25 км;
- ◆ минимальное время автономной работы: 5 ч.
- ◆ В состав комплекса входят:
 - ◆ АНПА (рис. 1);
 - ◆ пульт контроля и управления;
 - ◆ компьютер оператора;
 - ◆ погружаемая с борта обеспечивающего судна антенна ГАСС с кабелем на ручной лебедке;
 - ◆ радионавигационный модуль, включающий в себя приемник спутниковой навигационной системы и радиомодем для связи с АНПА в надводном положении;
 - ◆ вспомогательное оборудование (транспортировочные и такелажные принадлежности) и комплект ЗИП.

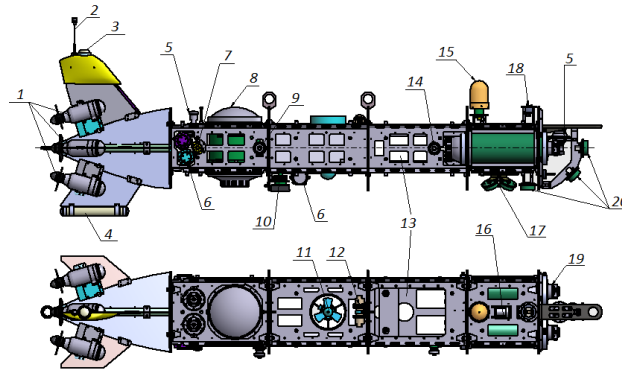


Рис. 1. АНПА «Платформа»

Представление о конструктивном устройстве АНПА можно получить из рисунка 2, на котором изображен аппарат со снятыми обтекателями и блоками плавучести. В состав аппарата входят следующие устройства и системы:

- ◆ несущая конструкция;
- ◆ средства обеспечения плавучести;
- ◆ движительно-рулевой комплекс;
- ◆ система программного управления и навигации;
- ◆ контрольно-аварийная система;
- ◆ система энергообеспечения;
- ◆ система радиосвязи;
- ◆ гидроакустическая система связи.

Несущая конструкция составляет основу облика аппарата, служит для размещения и крепления всех устройств и систем, включает в себя каркасы секций и элементы для выполнения грузоподъемных работ с аппаратом. Секционированное устройство несущей конструкции АНПА позволило оборудовать его проницаемым отсеком для размещения полезной нагрузки во внутренней части АНПА. Выделенный отсек для полезной нагрузки (поз. 13 на рис. 2) имеет свободное пространство размерами 400×312×212мм для размещения полезной нагрузки внутри АНПА. Помимо этого, датчики или устройства могут быть размещены снаружи АНПА на кронштейнах, крепящихся к переборкам отсеков.



*Рис. 2. Размещение основных элементов и систем АНПА «Платформа»:
 1 – маршевые двигатели; 2 – радиоантенна; 3 – приемник спутниковой навигационной системы; 4 – кормовые балластировочные грузы;
 5 – компенсаторы давления; 6 – блоки управления двигателями; 7 – радиомодем;
 8 – контейнер аккумуляторных батарей; 9 – герморазъем заряда батарей;
 10 – электромагнит балласта всплытия; 11 – вертикальное подруливающее устройство; 12 – герморазъединитель секций АНПА; 13 – отсек полезной нагрузки; 14 – герморазъем связи с пультом; 15 – антенна ГАСС; 16 – датчик глубины; 17 – антенна доплеровского лага; 18 – вертушечный лаг;
 19 – контейнеры системы программного управления и навигации; 20 – антенны эхолотационной системы*

К средствам обеспечения плавучести относятся блоки плавучести и балластная система, включающая в себя балластировочные грузы для подстройки плавучести к плотности воды в районе работ и электромагнит балласта всплытия. АНПА обладает запасом плавучести, позволяющим установить оборудование полезной нагрузки общим весом в воде до 10 кг.

Двигательно-рулевой комплекс состоит из 4 маршевых электроприводов и одного вертикального подруливающего устройства. Схема с расположением маршевых двигателей в корме под углом к оси аппарата обеспечивает баланс между тяговыми характеристиками и маневренностью АНПА. Вертикальное подруливающее устройство обеспечивает стабилизацию вертикального положения АНПА при низких скоростях движения.

Система программного управления и навигации (СПУН) включает в себя:

- ◆ бортовой одноплатный компьютер под управлением ОС QNX;
- ◆ магнитный компас;
- ◆ датчики крена и дифферента;
- ◆ датчик глубины;
- ◆ трехканальная эхолотационная система;
- ◆ доплеровский лаг;
- ◆ вертушечный лаг;
- ◆ приемник спутниковой навигационной системы.

На СПУН возложены две задачи: обеспечение движения в соответствии с программой-заданием и обеспечение безопасности этого движения, в частности, обход препятствий [2]. Для обнаружения препятствий и определения дистанций по курсу движения аппарата используется эхолотационная система с тремя дальнотерами.

В СПУН реализована возможность работы с гидроакустической навигационной системой с длинной базой (ГАНС ДБ) и/или малогабаритной инерциальной навигационной системой в случае оснащения АНПА этими системами.

Для информационного обмена между СПУН АНПА и полезной нагрузкой предусмотрен интерфейс Ethernet 10/100. Программное обеспечение бортового компьютера АНПА осуществляет периодическую передачу текущих данных о позиции и режиме движения аппарата. В дальнейшем намечена реализация двухстороннего обмена данными по согласованному протоколу. Это позволит обеспечивать реакцию системы программного управления АНПА на события, генерируемые оборудованием полезной нагрузки.

СПУН и контрольно-аварийная система позволяют обеспечить ряд мероприятий, повышающих безопасность АНПА в нештатных ситуациях, вызванных как различными отказами оборудования, так и состоянием среды. Запас электроэнергии позволяет находиться в подводном положении после окончания программы-задания (миссии) АНПА в случае непогоды до 24 часов. При необходимости экстренного всплытия сбрасывается балласт, закрепленный на электромагните перед погружением. На случай отказа бортового компьютера СПУН имеются аварийные режимы систем связи. В аварийном режиме ГАСС обеспечивает определение дистанции, на которой находится АНПА, а система радиосвязи передает координаты, определенные с помощью приемника спутниковой навигационной системы.

Система энергообеспечения выполнена на основе 2 батарей литий-ионных аккумуляторов суммарной емкостью 2,5 кВт·ч. В состав системы также входят контроллер батарей и программно-управляемые ключи для различных групп потребителей, в частности, для движительного рулевого комплекса и полезной нагрузки. Оборудование полезной нагрузки с суммарным энергопотреблением до 75 Вт может быть включено или выключено в нужный момент командой программы-задания АНПА.

Гидроакустическая система связи [3] обеспечивает двухстороннюю связь между АНПА и постом оператора в полудуплексном режиме. Для отображения в программе мониторинга миссии (рис. 3) АНПА передает своё текущее пространственное положение и основные данные о состоянии, включая признаки аварий [4]. Оператор может вмешаться в ход исполнения программы-задания АНПА, отправив команду телеуправления из заданного набора. При добавлении в комплект маяков-ответчиков система может работать в режиме ГАНС ДБ. Данная ГАСС впервые внедрена в описываемом комплексе АНПА.

Планирование траектории производится на посту оператора и выполняется путём компоновки траектории из примитивов движения [5]. В набор примитивов, помимо прямолинейных галсов, входят прямоугольный меандр, циклоида и спираль (рис. 4).

АНПА при движении обеспечивает стабилизацию курса, скорости, высоты над дном или глубины (выбирается оператором при составлении миссии). Таким образом, представляемый АНПА обладает характеристиками, позволяющими эффективно обеспечивать работу и перемещение разнообразного подводного исследовательского оборудования по требуемым траекториям с необходимыми режимами движения.

В период с 24 сентября по 31 октября 2016 г. комплекс АНПА «Платформа» участвовал в работе экспедиции, проводимой в Восточно-Сибирском море, по изучению процессов в арктическом шельфе, влияющих на изменение климата. Перед проведением испытаний в арктических условиях на АНПА была установлена по-

лезная нагрузка, предоставленная Томским политехническим университетом. В состав оборудования вошли комплексы для измерения глубины и температуры, элементы системы технического зрения и резервная система связи по гидроакустическому каналу [6].

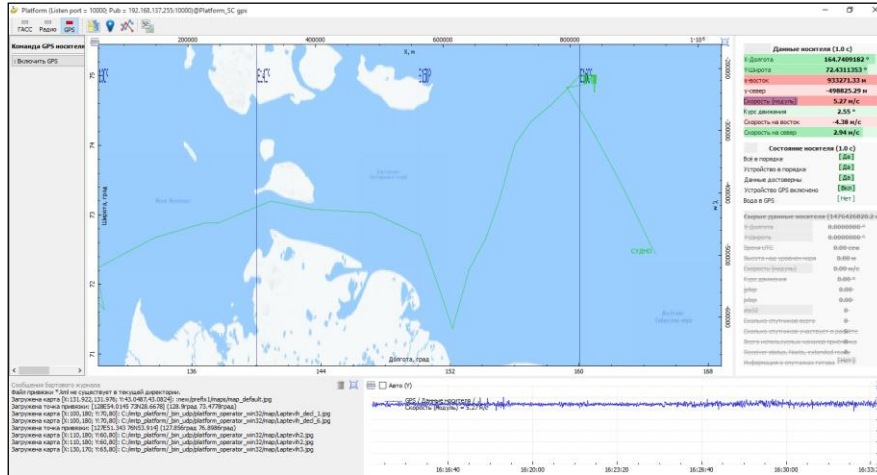


Рис. 3. Программа мониторинга миссии АНПА

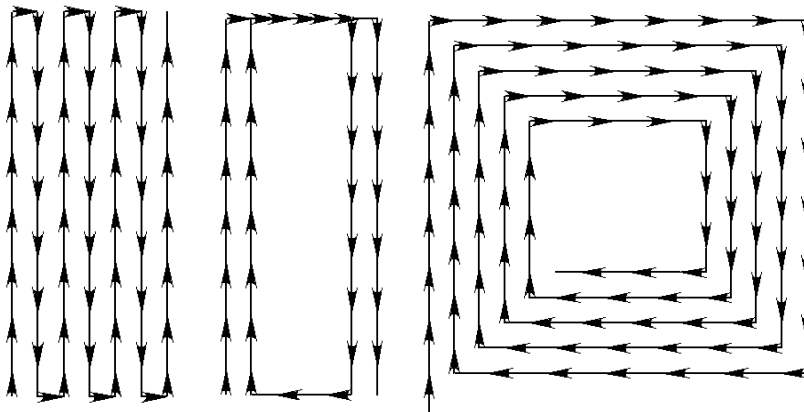


Рис. 4. Примитивы движения АНПА «Платформа». Слева направо – меандр, циклоида, спираль

В планы по дальнейшему использованию входят несколько вариантов оснащения АНПА дополнительным оборудованием для участия в различных исследовательских проектах. Помимо использования в качестве носителя для электрооптических и гидроакустических средств сбора информации, в ближайшей перспективе планируется задействовать АНПА «Платформа» в исследованиях по разработке технологий точного позиционирования с использованием системы длиннобазной навигации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н. Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат МТ-2010 // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – № 2 (12). – С. 37-42.
2. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6), Владивосток, 28 сентября – 2 октября 2015 г. – С. 450-454.
3. Бурдинский И.Н., Карабанов И.В., Линник М.А., Миронов А.С. Гидроакустическая телекоммуникационная система подводного робота // Сб. материалов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 30 мая–01 июня 2011 г. СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2011. – С. 251-263.
4. Инзарцев А.В., Павин А.М., Елисеенко Г.Д., Родькин Д.Н., Сидоренко А.В., Лебедко О.А., Панин М.А. Реконфигурируемая кроссплатформенная среда моделирования поведения необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – №2 (20). – С. 28-34.
5. Багницкий А.В., Инзарцев А.В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. – 2010. – № 2(10). – С. 17-24.
6. Российский подводный робот успешно испытан в Восточно-Сибирском море. 2016. – URL: <http://tass.ru/nauka/3746469> (дата обращения: 15.08.2017).

УДК 551.46.077:629.584

А.И. Боровик, С.Б. Гудименко, Л.А. Наумов

СВЕРХМАЛЫЙ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ «ГОЛОВАСТИК»

В докладе описаны технические характеристики и основные сферы применения сверхмалого ТНПА «Головастик», в настоящий момент разрабатываемого ООО «СМТ».

Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА), подводный дрон, «Головастик».

A.I. Borovik, S.B. Gudimenko, L.A. Naumov

**SMALL REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLE
“GOLOVASTIK”**

Article describes technical specifications and areas of use for the small ROV (underwater drone) “Golovastik”, that is currently under development in «Modern Marine Technologies» Ltd.

Remotely operated underwater vehicle (ROV), underwater drone, “Golovastik”.

По данным анализа мирового рынка необитаемых подводных аппаратов (НПА), проведенного MarketsandMarkets в 2017 году, более 85 % продаж в отрасли приходится на телеуправляемые НПА, при этом эксперты ожидают двукратного роста рынка к 2022 году [1]. В последнее время наблюдается тенденция к превращению ТНПА из высокотехнологического продукта, востребованного в основном в военной и нефтяной сферах, в доступный по цене для небольших компаний и даже частных лиц инструмент для проведения подводных работ. Формируется целый сегмент сверхмалых ТНПА (также называемых *подводными дронами*), ко-

торые при небольшой цене обладают целым рядом полезных функций. Основная сфера применения подобных роботов: подводная съемка, обследование корпусов кораблей и причальных стенок, помощь при водолазных работах. Часто подобные устройства используют для изучения моря в научных институтах и экологических организациях, благодаря их невысокой цене и доступности. В качестве примера можно привести такие аппараты как: OpenROV Trident [2], BlueRobotics BlueROV2 [3], VideoRay Scout [4].

Следует отметить, что сейчас в мире наблюдается бум производства подобных роботов (сравнимый с бумом производства беспилотных летательных аппаратов несколько лет назад), в то же время в России данный рынок практически пустует. Из аппаратов российского производства, производящихся для массового рынка, можно отметить лишь серию ТНПА «Гном», разрабатываемых в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН [5].

Актуальной задачей создания доступных для широкого круга потребителей в России и за рубежом сверхмалых ТНПА решила заняться недавно созданная компания ООО «Современные морские технологии». Данная статья посвящена первой разработке компании – подводному дрону «Головастик». Внешний вид робота представлен на рис. 1.

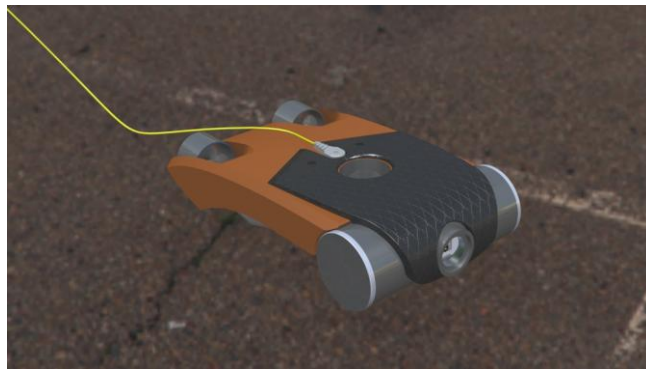


Рис. 1. Внешний вид ТНПА «Головастик»

Приведем основные технические характеристики дрона:

1. Максимальная рабочая глубина – 100 м;
2. Вес на воздухе – 2,7 кг.;
3. Габариты – 20x40x7 см.;
4. Максимальная скорость движения – 3м/с;
5. Максимальное время работы – 5 часов;
6. Движительная система: 2 двигателя для движения в продольной плоскости, 1 – в вертикальной;
7. Связь с компьютером оператора: Ethernet 100BASE-TX (100 Мб/с) и WiFi (до 100 Мб/с)
8. Вычислительная база: компьютер Raspberry Pi 3 model B, полетный контроллер Pixhawk 2.
9. Камера: Raspberry Pi на 8-мегапиксельном сенсоре Sony IMX219
10. Управление: джойстик Logitech или любой XInput-совместимый, либо виртуальный джойстик на устройстве Андроид.

«Головастик» оснащен 300-метровым грузонесущим кабелем связи с нулевой плавучестью и съемной литий-полимерной аккумуляторной батареей, которая обеспечивает до 5 часов работы без подзарядки. Заряжать батарею можно посред-

ством зарядного устройства от сети 220В или 12-вольтового аккумулятора. Управление роботом осуществляется с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом ArduPilot, которое может быть установлено на компьютеры под управлением ОС Linux или Windows, а также на смартфоны с ОС Android. Для управления движением дрона можно использовать любой XInput-совместимый джойстик, либо виртуальный джойстик на устройстве Android. Корпус дрона выполнен из пластмассы.

«Головастик» предназначен для решения следующих задач:

- ◆ Обследование корпусов судов.
- ◆ Обследование причальных стенок.
- ◆ Поисково-спасательные работы в прибрежной полосе на небольших глубинах.
- ◆ Инспекция протяженных объектов (кабели, трубопроводы) на небольшой глубине.
- ◆ Исследование морского дна с помощью фото- и видеосъемки.
- ◆ Помощь при водолазных работах.
- ◆ Мониторинг популяции рыб.

Робот может работать под управлением оператора, а также в автономном режиме, выполняя заранее написанную программу. Автономный режим (или режим *автопилота*) особенно полезен при выполнении продолжительных работ, таких как обследование причальной стенки или мониторинг популяции рыб. Оператор при этом может вмешаться в ход выполнения миссии в любой момент и взять управление аппаратом на себя.

Важной особенностью робота является наличие специального контейнера для размещения пользовательской полезной нагрузки. Благодаря этому робот легко может быть укомплектован различными датчиками и сенсорами, предназначенными для проведения конкретных исследований (например, датчиком СТД). Благодаря использованию популярной платформы Raspberry Pi программная интеграция датчиков (в том числе самодельных) не должна составить большого труда.

К ключевым особенностям робота, выгодно отличающих его от аналогов, можно отнести следующие:

- ◆ Малый вес;
- ◆ Большая глубина погружения;
- ◆ Высококачественная камера;
- ◆ Возможность установки пользовательских датчиков;
- ◆ Возможность автономной работы;
- ◆ Низкая цена.

Важнейшей особенностью аппарата будет являться его цена, благодаря которой робот будет доступен для небольших компаний и частных лиц. На настоящий момент прогнозируемая цена дрона – не более 150'000 рублей.

Проект ТНПА «Головастик» находится на финальной стадии разработки. Уже к августу 2018 планируется завершение работ по сборке и отладке первого образца. Сразу после этого компания ООО «СМТ» готова приступить к серийному выпуску модели. Также в рамках проекта планируется создание модификации аппарата с алюминиевым корпусом, рассчитанной на глубину погружения до 300 метров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Unmanned Underwater Vehicles (UUV) Market worth 5.20 Billion USD by 2022 // MarketsandMarkets. – Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-underwater-vehicles.asp>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

2. Trident Underwater Drone // OPENROV SA. – Режим доступа: <https://www.openrov.com/products/trident/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
3. BlueROV2 // Blue Robotics. – Режим доступа: <https://www.bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
4. VideoRay Scout ROV / VideoRay LLC. – Режим доступа: https://www.videoray.com/scout-rov-photo-gallery.html#!BeckyKaganROVjackson_sm, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
5. Розман Б.Я. Малогабаритный аппарат ГНОМ – подводный телеглаз человека. – URL: https://gnomrov.ru/about/articles/underwater_eye/ (дата обращения: 21.02.2018).

УДК 623.467

И.О. Артамонов, Р.А. Дурнев, А.Ф. Шаклеин

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ БОЕВОЙ ЭКИПИРОВКИ
ВОЕННОСЛУЖАЩИХ**

В статье обосновывается необходимость проведения исследований, направленных на решение теоретических и методических вопросов оценки возможностей применения технологий искусственного интеллекта в средствах оснащения от командиров рот и до отдельных военнослужащих с учетом ближайшей и более отдаленной перспективы развития систем и средств автоматизации и связи.

Боевые действия, искусственный интеллект, экипировка, низовое звено управления, робототехнические системы, экспертные системы, НИР.

I.O. Artamonov, R.A. Durnev, A.F. Shaclein

**THE PROSPECTS OF USE OF TECHNOLOGIES OF ARTIFICIAL
INTELLIGENCE IN THE SYSTEM OF FIGHTING EQUIPMENT
OF THE MILITARY PERSONNEL**

Need of carrying out the researches directed to the solution of theoretical and methodical questions of assessment of opportunities of use of technologies of artificial intelligence in means of equipment from commanders of companies and to the certain military personnel taking into account the closest and more remote prospect of development of systems and the automation equipment and communication is proved in article.

Fighting, artificial intelligence, equipment, local control link, robotic systems, expert systems, scientific research.

Анализ современного состояния и мировых тенденций развития тактики ведения боевых действий, средств вооружения и боевой экипировки, расширение номенклатуры средств разведки и поражения, а также динамичные изменения боевой обстановки указывает на необходимость существенного повышения качественных характеристик управления боевыми действиями подразделений, в частности, низового звена (рота – взвод – отделение – отдельный военнослужащий).

Особое значение в настоящее время приобретает проблема оперативности и качества отработки принимаемых решений, как правило, в условиях дефицита времени и наличия деструктивных внешних воздействий. Решение этой проблемы возможно на основе достижений в области искусственного интеллекта за счет оснащения командиров и отдельных военнослужащих вычислительными устройствами с элементами искусственного интеллекта, которые помогали бы им оперативно принимать рациональные решения в процессе организации и ведения боевых действий [1].

Кроме того, применение методов искусственного интеллекта может способствовать решению определенных проблем, выявленных в процессе применения экипировки второго поколения «Ратник». Боевая экипировка военнослужащего «Ратник» – один из самых масштабных проектов модернизации Российской армии, работа над которым ведется с 2013 г. Ратник обладает сразу несколькими уникальными качествами, особенно в части защиты и повышенной степени маскировки от обнаружения в инфракрасном свете. Однако при всех несомненных плюсах «Ратник» имеет и немало минусов. Самая ценная система «Ратника» – комплекс разведки, управления и связи «Стрелец» – персональный компьютер с периферией. Комплекс «Стрелец» предназначен для решения всех информационных задач, с которыми может столкнуться военнослужащий. Так, например, информация о каждом солдате передается на экран персонального компьютера командира, а его расположение отображается на карте местности и обновляется в режиме реального времени. Однако комплекс «Стрелец» оказался весьма сложной системой в применении, особенно при ведении ближнего боя, поэтому не каждый военнослужащий способен ее хорошо освоить за один год службы в армии.

В перспективе «Ратник» планируется оснастить более современным компьютерным оборудованием, включая датчики медико-биологического состояния, обнаружители СВЧ-излучения и т.д. Это несомненные плюсы системы, которые, в то же время, еще более усложняют ее применение без интуитивно понятного интерфейса и максимального упрощения способа управления такими системами.

Проведенный анализ показывает, что с учетом наличия семантических аспектов в исходной информации, используемой при отработке решений, а также сложности и, во многих случаях, многовариантности рассматриваемых решений, наиболее рациональным выбором для решения рассматриваемых проблем и, во многих случаях, сведения к минимуму негативного влияния человеческого фактора, является использование методов и технологий искусственного интеллекта (ИИ).

В настоящее время исследованиям в направлении развития и использования в войсках методов и технологий ИИ, в том числе и в низовом звене управления, уделяется первостепенное внимание в ведущих зарубежных государствах. В частности, в рамках работ, осуществляемых в США по реализации концепции «Соприжение и функциональная интеграция систем управления, вычислительной техники, связи и разведки на поле боя» – C4I/TW (Command, Control, Communication, Computers and Intelligence for the Warrior) и концепции «Борьба с системами управления» – C2W (Command and Control Warfare). Значительные усилия направляются на решения прикладных вопросов применения методов и технологий ИИ для повышения боевой эффективности решения задач боевого управления и комплексного использования средств вооружения в низовом звене. На базе элементов искусственного интеллекта предполагается выполнять отработку в сжатые сроки наиболее рациональных действий в конкретных боевых условиях, результаты которые будут отображаться, например, в рамках перспективных средств автоматизации управления, в том числе средств, входящих в состав боевой экипировки военнослужащего.

Предполагается, что в результате завершения соответствующих разработок каждый отдельный военнослужащий, отделение (экипаж), система поражения (оружие), с входящими в нее подсистемами, должны быть объединены в единую боевую систему за счет внедрения сложнейших опто-электронных, микро-электронных и информационных технологий. При этом для отработки решений по боевому применению сил и средств будут активно использоваться методы и средства на базе технологий ИИ. Такой подход может существенно повысить боевые возможности отдельно взятого военнослужащего и боевую эффективность подразделения в целом.

Важным моментом, существенно влияющим на необходимость проведения исследований в рассматриваемом направлении, является наметившаяся тенденция внедрения принципов сетецентрического управления и их практическая реализация на базе сервис-ориентированной архитектуры. Это ставит на повестку дня необходимость постановки и решения ряда крупных научных и технических проблем. Одной из наиболее важных в этом плане является проблема создания систем поддержки решений на основе методов ИИ.

Необходимость и важность практического решения этой проблемы обусловлена логикой функционирования систем управления, предполагающих достижение информационного превосходства над противником. Информационное превосходство выражается в обеспечении более глубокого, соответствующего обстановке осознания и понимания ситуации на поле боя, более точного уяснения своих преимуществ и недостатков противника, в способности сформировать замысел действий, в котором эти преимущества будут в максимальной степени реализованы, а недостатки противника использованы в своих целях, в опережающем принятии и незамедлительном доведении до подчиненных и соседей решений, полностью адекватных сложившейся обстановке, в непрерывном контроле их исполнения.

В этих условиях «узким местом» в системе управления становится человек, который в силу присущих человеческому организму психо-физиологических ограничений зачастую оказывается не в состоянии адекватно осмыслить в сжатые сроки всю доступную информацию и принять наиболее рациональное решение. Естественным выходом из этой ситуации является широкое внедрение в системы боевого управления современных методов поддержки решений, основанных на использовании ИИ [2, 3].

Основными сферами применения технологий ИИ в военной области, которые могут применяться и в системах обеспечения боевой деятельности военнослужащих низовых подразделений, являются [4, 5]:

- ◆ разведка и наблюдение;
- ◆ обработка разведывательных данных;
- ◆ планирование боевых действий и связь;
- ◆ управление боевыми действиями;
- ◆ диагностика и обслуживание военной техники;
- ◆ автоматические и полуавтоматические средства вооруженной борьбы;
- ◆ обучение и проведение занятий с использованием тренажеров.

В настоящее время имеется существенный научный задел в области создания и применения методов и технологий ИИ в различных прикладных областях. С одной стороны имеется достаточно обширный арсенал технологий ИИ, каждая из которых зарекомендовала себя положительно на решении определенных классов прикладных задач. С другой стороны, невозможно выделить какую-то одну технологию, которая бы во всех отношениях имела преимущества перед другими. Более того, за счёт адекватного выбора технологии возможно существенно повысить эффективность решения прикладных задач. В то же время отсутствуют оценки степени адекватности технологий ИИ и прикладных задач.

Особенно остро этот вопрос стоит для низовых звеньев (рота – взвод – отделение – расчет – группа) и отдельных военнослужащих, поскольку эта проблематика до настоящего времени практически не исследовалась для такого рода задач.

Каждая из технологий ИИ имеет свои достоинства и недостатки и, как следствие, свою «нишу» наилучшего приложения в военной области.

Главные усилия в этой области будут в перспективе направлены на интеграцию возможностей отдельных технологий ИИ в единую систему, обеспечивающую широкий комплекс услуг каждому должностному лицу в рамках его компетенции, в том числе в вопросах поддержки принятия решений.

Одной из наиболее важных в этом отношении является проблема рационального комплексирования различных технологий для решения всей совокупности прикладных задач в заданной области. Для решения этой проблемы необходимо исследовать ряд важных вопросов, связанных с оценкой и оптимальным синтезом технологий ИИ на совокупности прикладных задач.

Вместе с тем, учитывая специфику функционирования органов управления низовых войсковых подразделений, можно полагать, что в ближайшей перспективе на низовом уровне войсковой иерархии могут найти применение специализированные экспертные системы, ориентированные на решение задач оценки обстановки, включая оценку действий противника, а также задач отработки решений по рациональному применению сил и средств с учётом факторов местности, помеховой обстановки, собственных возможностей и др. В дальнейшем в этом плане определенное преимущество может получить реализация систем знаний.

Робототехнические системы также являются перспективными, особенно в вопросах сбора информации, а также при нанесении ударных воздействий. Отдельный интерес в этом плане могут представлять малые БПЛА.

Что касается нейросетевых систем, то здесь возникают определенные сомнения, связанные с необходимостью их обучения. Представляется, что проведение такого обучения и закладывание его результатов в систему управления заблаговременно вряд ли даст хороший эффект ввиду высокой доли непредсказуемости событий в динамике боевых действий. А обучение НС в процессе боевой работы вряд ли получится по соображениям большой динамики процессов управления в боевой обстановке /6/.

В свете изложенного становится очевидной необходимость проведения исследований, направленных на решение теоретических и методических вопросов оценки возможностей применения рациональных технологий ИИ в средствах оснащения от командиров рот и до отдельных военнослужащих.

Новизна этих исследований будет заключаться в следующем:

- ◆ определение основных сфер применения технологий ИИ на низовом уровне войсковой иерархии;
- ◆ обоснование основных путей повышения боевой эффективности подразделений и военнослужащих за счет создания системы поддержки решений на базе методов ИИ;
- ◆ разработка методологии и теоретико-методического аппарата анализа и синтеза систем поддержки решений на базе моделей и методов ИИ для повышения боевой эффективности объектов низового звена управления;
- ◆ разработка макета программных средств для оценки возможностей повышения боевой эффективности объектов и подразделений низового звена управления при использовании систем поддержки решений на базе методов ИИ;
- ◆ проведение исследований по оценке эффективности систем поддержки принятия решений на базе ИИ для объектов низового звена управления;
- ◆ разработка принципов построения систем с ИИ для решения боевых задач подразделений и военнослужащих различных специальностей, оценка степени совместимости технологий ИИ и прикладных задач;
- ◆ разработка предложений и рекомендаций по использованию предлагаемого теоретико-методического и программного аппарата ИИ при создании и развитии перспективной боевой экипировки военнослужащего и средств оснащения командиров низового звена.

Основными результатами, которые необходимо получить в ходе поисковых исследований, являются:

1. Обоснование основных путей повышения боевой эффективности подразделений и боевых возможностей военнослужащих за счет создания системы поддержки принятия решений на базе методов ИИ, включая решение вопросов:

- ♦ анализа мировых тенденций развития систем интеллектуальной поддержки решений для повышения боевой эффективности подразделений в том числе за счет включения средств с ИИ в том числе в состав индивидуальной экипировки военнослужащего;

- ♦ анализа современных тактических действий низовыми подразделениями (рота – взвод – отделение) и путей их развития в ближайшей перспективе, оценка возможности применения в их действиях средств с ИИ;

- ♦ обоснования путей наиболее рационального использования потенциальных возможностей систем и средств поддержки решений на базе ИИ для повышения боевой эффективности низовых подразделений.

2. Разработка методологии и теоретико-методического аппарата анализа и синтеза систем поддержки решений на базе методов ИИ для повышения боевой эффективности подразделений и боевых возможностей военнослужащих, включая решение следующих вопросов:

- ♦ разработки методов формализации нечетких понятий и представлений современного боя для отображения процессов поддержки решений в низовом звене армейского управления;

- ♦ обоснования системы показателей эффективности методов поддержки решений на базе ИИ для подразделений низового звена управления;

- ♦ разработки методического аппарата оценки степени совместимости методов и технологий ИИ и отдельных классов задач принятия решений, характерных для низовых звеньев и отдельных военнослужащих.

3. Разработка макета программных средств для оценки возможностей повышения боевой эффективности подразделений низового звена управления при использовании систем поддержки принятия решений на базе методов ИИ, включая следующие работы:

- ♦ разработку алгоритмов, программирование и отладка макета программных средств;

- ♦ применения разработанных алгоритмов и программных средств для оценки возможных действий подразделений и военнослужащих при выполнении боевых задач;

- ♦ проведения исследований по оценке эффективности систем поддержки принятия решений на базе ИИ. Отработка предложений и рекомендаций по использованию предлагаемого теоретико-методического и программного аппарата при создании средств оснащения с элементами ИИ.

В процессе выполнения работы необходимо создать научно-методический задел в области применения технологий ИИ в средствах оснащения командиров низовых подразделений и в составе средств боевой экипировки военнослужащих для обеспечения повышения эффективности выполнения боевых задач.

Повышение эффективности боевых действий подразделений и отдельных военнослужащих оснащенных, например, средствами поддержки принятия решений на базе ИИ возможно за счет:

- ♦ уменьшения времени на оперативное принятие решений;

- ♦ повышения качества принимаемых решений, выработанных с использованием технологий ИИ;

♦ сокращения потерь личного состава за счет принятия рациональных решений по ведению боевых действий и снижения уровня психофизиологической напряженности военнослужащих особенно в ближнем бою.

Разработка принципов и обоснование способов построения систем поддержки принятия решений на базе ИИ и их реализация в низовом звене войсковой иерархии позволит в более короткие сроки принимать качественные решения по организации и ведению боя, обеспечит повышение эффективности боевых действий подразделений и возможностей отдельных военнослужащих, особенно в сложной обстановке и является одной из самых актуальных тем в контексте создания систем вооружения будущего.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Буренок В.М.* Убить интеллектом. США создают для военных нужд искусственный разум нового поколения. Чем ответит Россия? Общероссийская еженедельная газета "Военно-промышленный курьер", 25 сентября 2017 г.
2. *Балыбердин В.А., Степанов О.М., Иванов В.В.* Методы, модели и алгоритмы рационального построения информационных технологий в АСУВ. – М.: 3 УНИИ МО РФ, 2012. – 264 с.
3. *Балыбердин В.А., Пенкин О.М., Подунин А.И.* Проблемные вопросы создания и внедрения новых информационных технологий в автоматизированных системах военного назначения. – М.: Изд. «Вооружение. Политика. Конверсия», 2001. – 143 с.
4. *Балыбердин В.А., Зубарев И.В., Панов В.В., Степанов О.А.* Прикладные аспекты автоматизации управления войсками и оружием в современных условиях. – М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2013. – 240 с.
5. *Романов П.С.* Обоснование путей построения автоматизированных систем управления артиллерийскими формированиями на основе новых информационных технологий. – Коломна, КГПИ, 2005. – 398 с.
6. *Айдаркин Е.К., Пахомов Н.В., Шаклеин А.Ф. и др.* Некоторые вопросы использования методов искусственного интеллекта в системах обеспечения боевой деятельности военнослужащих низовых подразделений // Известия РАН. – 2017. – Вып. 4 (99).

УДК 623.827

**А.А. Борейко, А.В. Воронцов, Д.Н. Михайлов, Ю.В. Матвиенко, В.В. Негода,
А.Ф. Щербатюк**

СОВРЕМЕННЫЙ ОПЫТ ВЫПОЛНЕНИЯ МОРСКИХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ, РАЗРАБОТАННЫХ В ИПМТ ДВО РАН

В докладе также приведены некоторые сведения о современных разработках ИПМТ в области создания морских робототехнических комплексов и о ряде новых выполненных практических работ.

Одной из важных работ была проверка работоспособности РК ОВР «Галтель» в САР в условиях порта Тартус, оценка его возможностей и определение способов применения в конкретных условиях обстановки. Работа выполнялась в период с 07 июня по 22 июля 2017 г. Обследована донная поверхность на внешней и внутренней акватории порта Тартус, составлена карта с привязкой обнаруженных объектов. Проведено обследование поверхности дна и батиметрическая съемка в районе подхода и стоянки кораблей в период празднования Дня Военно-морского флота. Потенциально опасных предметов не обнаружено, составлены батиметрические карты района с разрешением от 10 до 100 метров. В декабре 2017 г. завершена работа по сервисному обслуживанию РК ОВР «Галтель», после работ в САР.

Несколько практических работ были связаны с использованием АНПА среднего класса типа «ММТ 3000». Унифицированный АНПА среднего класса является аппаратом с открытой конструктивной и информационной архитектурой, легко конфигурируемый под конкретную задачу. Отличительной особенностью данных аппаратов является наличие широких возможностей по установке поискового и измерительного оборудования.

Успешно выполнен контракт по договору с ООО «Морская геодезия» по съемке морского дна с помощью АНПА ММТ 3000 для планирования прокладки оптокабеля от о. Сахалин до Курильских островов. Рабочие глубины – от 70 до 2000 метров. Подводным аппаратом пройдено 525 км со съемкой с помощью многолучевого ГБО, поддонного профилографа и магнитометра. Подписан акт о приемке работы заказчиком.

ИПМТ выполнил работы с использованием АНПА типа «ММТ 3000», оснащенного датчиками внешней среды (флюорометрами и STD-метром), в рамках проекта по оценке экологического состояния бухты Золотой рог во Владивостоке. Получены градиенты распределения физических и гидрохимических параметров водной среды вблизи места впадения речки Объяснения в бухту Золотой Рог.

УДК 681.883:534.2

А.К. Насонов, М.И. Панкратов, Ю.А. Чурсин

РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕЗЭКИПАЖНОГО КАТЕРА ПРОМЕЖУТОЧНОГО КЛАССА

В сентябре 2017 года магистранты научно-исследовательской лаборатории телекоммуникаций, приборостроения и морской геологии Томского политехнического университета начали разработку безэкипажного катера промежуточного класса. Это было вызвано необходимостью облегчения развертывания длиннобазных гидроакустических систем навигации с одной стороны, а с другой отсутствием катеров данного типа. Для увеличения универсальности использования разрабатываемого катера отсек полезной нагрузки предполагается в модульном исполнении, в который могут устанавливаться компоненты, решающие различные задачи. В настоящий момент катер находится на стадии создания уменьшенной модели копирующей функции оригинального аппарата. Разработка участвовала в конкурсе Умник Маринет - 2017, вышла в финал и была поддержана.

Безэкипажное судовождение, сменные модули, спутниковая система навигации, инерциальная система навигации, эхолот, радио канал передачи данных, автоматизированная система управления движительно-рулевым комплексом.

A.K. Nasonov, M.I. Pankratov, Yu.A. Chursin

DEVELOPMENT OF MULTI-FUNCTIONAL INTERMEDIATE CLASS SILENT UNMANNED BOAT

In September 2017 undergraduates of the research laboratory of telecommunications, instrumentation and marine Geology of Tomsk Polytechnic University began the development of an intermediate-class unmanned boat. This was due to the need to facilitate the deployment of long-range hydroacoustic navigation systems on the one hand, and on the other hand the lack of boats of this type. In order to increase the versatility of the use of the developed boat, the payload compartment is intended in a modular design, in which components can be installed that solve various

problems. At the moment the boat is at the stage of creation of the reduced model of copying function of the original device. Development participated in the competition UMNİK Marinet - 2017, reached the final and was supported.

Unmanned ship navigation, replaceable modules, satellite navigation system, inertial navigation system, echo sounder, radio data channel, automated control system of propulsion-steering complex, shipless Navigation, replaceable modules, satellite navigation system, inertial navigation system, echo sounder, radio data channel, automated control system of propulsion-steering complex.

Разрабатываемый многофункциональный безэкипажный катер промежуточного класса будет предназначен работы с объектами различных типов, в частности для расстановки сбора в акватории навигационных буев подводной длиннобазной навигации, в заданных точках с помощью GPS навигации, а также для захвата и передачи видеоизображения оператору[1].

Уникальность разработки заключается в том, что разрабатываемый многофункциональный безэкипажный катер промежуточного класса сможет нести до 40 кг полезной нагрузки, что, с одной стороны, гораздо больше, чем у коммерческих моделей, используемых для рыбалки, а с другой стороны, имеет небольшие массогабаритные характеристики, что позволит эксплуатировать его одному человеку. Предполагается использование так называемой модульной структуры для выполнения разнообразных задач [2].

Катер будет обеспечивать расстановку и сбор в автоматическом режиме навигационных буев в соответствии с заданием миссии. Возможно управление катером в ручном режиме. Одной из ключевых особенностей катера является возможность использования сменных блоков полезной нагрузки. Таким образом, катер сможет выполнять различные задачи, в зависимости от заданных требований и условий. Научной новизной в разработке обладают программно-аппаратные решения для работы с объектами в акватории. Самыми близкими аналогами являются модели на радиоуправлении, в частности, рыболовные судна с автопилотом.

Основными недостатками катеров для рыбалки является отсутствие необходимых датчиков для устойчивости на плаву, навигации по GPS и малая грузоподъемность[3]. «Большим» аналогом можно считать роботизированный безэкипажный катер "Искатель". Основными его недостатками являются дороговизна в обслуживании, высокая цена сборки и комплектующих (катер оснащен двумя дизельными двигателями мощностью по 220 л.с., скорость полного хода 25 уз., автономность до 7 суток) и необходимость места постоянного базирования. После выполнения миссии его нельзя убрать на склад, до следующего выхода[4].

Практическим применением предлагаемой разработки является разворачивание системы длиннобазной навигации для АНПА и других объектов в автоматическом режиме. При проектировании автономно управляемого судна закладываются следующие технические характеристики [5]:

- ◆ длина 2,5 м,
- ◆ ширина 1 м,
- ◆ высота 1 м,
- ◆ сухой вес 100 кг,
- ◆ осадка 25 см,
- ◆ грузоподъемность 40 кг,
- ◆ устойчивость к качке, ветер до 6 Б, волна до 2 м,
- ◆ автономность работы до 3 часов,
- ◆ скорость передвижения до 7 узлов.

Разрабатываемый безэкипажный катер предполагает наличие следующих компонентов (рис. 1):

1) микроконтроллер с микропроцессором и периферийным оборудованием, таким как видеокамера для передачи видеоизображения оператору, датчик автоматического определения глубины, инерциальная система навигации, датчик скорости, ГЛОНАСС/GPS приемник.

2) программное обеспечение, основные функции которого инициализировать и устанавливать параметры датчиков, получать и обрабатывать данные, строить траекторию движения по точкам размещения буев, отображать ориентацию положения катера в пространстве. Используемые навигационные системы: ГЛОНАСС, GPS, инерциальная система навигации.

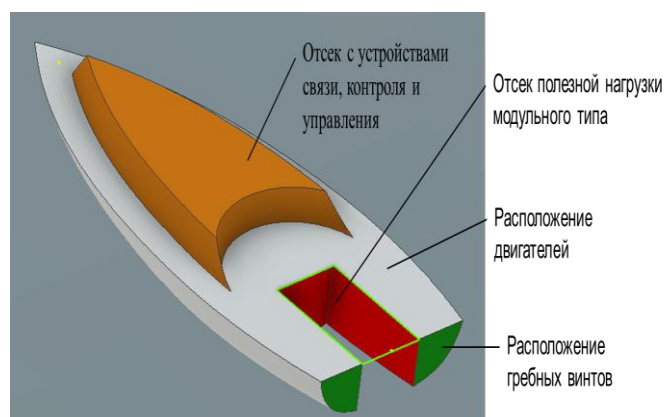


Рис. 1. Основные составляющие безэкипажного катера

3) устройство управления включает в себя систему датчиков, инерциальную систему навигации, эхолот и осуществляют расчет управляющих воздействий, устройство питания величиной постоянного напряжения 48V, устройство сбора и установки буев, видеокамера для передачи изображения.

4) управление движительно-рулевым комплексом включает в себя контроллер заряда аккумуляторов, драйверы двигателей, контроллер управления движением [6].

5) устройство передачи данных состоять из GSM приемопередатчика, коротковолнового приема передатчика и устройства управления ими. Алгоритм выбора канала передачи данных адаптивный.

6) управление отсеком полезной нагрузки, состоит из специальных захватов для различных модулей, а также оборудованием для подключения к микроконтроллеру.

Катер вместе со сменным модулем для расстановки навигационных буев следует по заранее определенной оператором программе, двигаясь с места старта от точки к точке тем самым разворачивая систему длиннобазной навигации и, пройдя весь маршрут, возвращается к месту старта. После того как подводные аппараты завершили работу в области где была развернута система длиннобазной навигации, катер собирает навигационные буи и возвращается к месту старта, где катер, если его задачи завершены, увозят на склад. Либо к нему подключается другой модуль, и он выполняет другую задачу. Схема движения катера выполняющего задачу по расстановке буев представлена на рис. 2.

В зависимости от поставленных задач, которые необходимо выполнить, к катеру подключаются различные модули. Оператор составляет маршрут, подключает необходимый модуль, например, модуль связи с подводными аппаратами или аппарат для сканирования и составления карты дна акватории. На рис. 3 изображена схема движения аппарата, в ходе выполнения поставленной задачи, по заданному маршруту.



Рис. 2. Схема движения катера по расстановке навигационных буйев



Рис. 3. Схема движения катера в ходе выполнения программы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пинский А.С.. Е-навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт Российской Федерации. – СПб.: Т-Пресса, 2016. – Вып. № 65. – С. 50-54.
2. Круглеевский В.Н., Денисов В.И. Особенности развития, задачи и состав комплекса «Безэкипажный роботизированный катер» // Судостроение. – СПб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2013. – Вып. № 810. – С. 23-25.
3. Описание и технические характеристики прикормочный кораблик CARPBOAT Deluxe. – URL: <https://carpboat.ru/catalog/boats/carpboat-deluxe.html> (дата обращения: 10.11.2017).
4. Безэкипажный катер "Искатель" на испытаниях в Кронштадте. – URL: <https://bmpd.livejournal.com/2725709.html> (дата обращения: 10.11.2017).
5. Новак Г.М. Справочник по катерам, лодкам и моторам // Судостроение. – 1982. – С. 5-106, 129-134.
6. Хейфец Л.Л. Гребные винты для катеров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. – С. 85-107.

УДК 007.52:623.9:622.276.04

В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ШАГАЮЩИХ ПЛАТФОРМ

Рассматриваются вопросы применения подводных роботизированных платформ с шагающими движителями. Предложена концепция подводных роботизированных платформ с энергетически-эффективными шагающими движителями, которые характеризуются высокими показателями проходимости и способных работать на грунтах с низкой несущей способностью

Подводная робототехника, роботизированная шагающая платформа, мобильный робот; шагающий движитель.

V.A. Shurygin, V.A. Serov, I.V. Kovshov, S.A. Ustinov

THE CONCEPT OF THE USING THE UNDERWATER ROBOTIC LEGGED PLATFORMS

The Problems of using the underwater robotic platforms with legged drives are considered. The concept of the underwater robotic platforms with energy-efficient legged drives is proposed. Applied legged drives are characterized by high mobility and can be used on the low bearing capacity ground.

Underwater robotics, robotic legged platform, mobile robot, legged drive.

Интенсивное освоение ресурсов мирового океана, а также необходимость обеспечения безопасности, охраны и обороны морских и береговых объектов требуют развития технологий подводных грунтовых работ.

К подводным грунтовым работам могут быть отнесены: разведка морского дна, инженерно-геологические изыскания с проведением измерений характеристик грунта и сейсмической разведкой, строительство подводных объектов, прокладка подводных коммуникаций (высоковольтных электрических и волоконно-оптических кабелей, трубопроводов), бурение и обустройство подводных скважин, сбор донных отложений, ликвидация последствий аварийных ситуаций, спасательные работы, разминирование [1, 2].

Проведение подводно-технических грунтовых работ с поверхности затруднено в арктических условиях (сложная ледовая обстановка, климатические условия), на малых глубинах и прибойной зоне. Плавающие и комбинированные донно-плавающие подводные аппараты имеют недостаточную энергетическую оснащенность для выполнения ряда грунтовых операций, ограниченное тяговое усилие. Самоходные подводные донные колесные и гусеничные аппараты способны работать только на плотных грунтах с небольшими уклонами дна с существенным ограничением грунтовой проходимости и маневренности. Колесные и гусеничные амфибийные аппараты, работающие в прибойной зоне подвержены наматыванию подводной растительности на движитель и по причине относительно низких тягово-сцепных характеристик ограничены по массе размещаемого технологического оборудования.

Вышеперечисленные подводно-технические работы, а также работы в прибойной зоне могут быть выполнены с применением подводных роботизированных платформ, оборудованных шагающими движителями.

Использование шагающего способа передвижения дает качественный рост основных показателей по сравнению с колесными и гусеничными движителями. Имеют место высокая профильная проходимость и маневренность, допускающая перемещения произвольном направлении и разворот на месте, возможность работы на слабых грунтах, возможность управления опорными реакциями и поддержания заданного положения корпуса в процессе движения [3]

Работы по созданию и исследованию подводных шагающих аппаратов в настоящее время проводятся несколькими зарубежными компаниями. Примерами таких зарубежных разработок являются разработанные по заказу научно-исследовательского управления ВМС США (ONR) и управления перспективных исследовательских проектов МО США (DARPA) подводные роботы Benthic Autonomous Underwater Vehicle, Ariel и Ariel-II, предназначенные для разведки и разминирования в прибрежной зоне, а также телеуправляемый подводный аппарат CRABSTER CR200 (республика Корея) [4, 5].



Рис. 1. Подводные шагающие роботы для разминирования: Benthic Autonomous Underwater Vehicle (слева), ARIEL (в центре), ARIEL-II (справа)



Рис. 2. Подводный шагающий аппарат CRABSTER CR200

Основным недостатком вышеуказанных роботов является сложность адаптации к неровностям грунта по причине необходимости согласованного движения всех приводов каждой ноги, а также наличие существенных энергозатрат на поддержание веса робота в процессе движения.

При значительном разнообразии шагающих движителей для применения в подводных роботизированных шагающих платформах наиболее предпочтительными являются ортогональные движители, которые характеризуются высокими показателями энергетической эффективности, в сочетании с относительно простым способом адаптации к опорной поверхности [6, 7].

Федеральным научно-производственным центром «Титан-Баррикады» (г. Волгоград), совместно с Волгоградским государственным техническим университетом выполнен ряд НИР и ОКР по созданию роботизированных шагающих аппаратов, в том числе тяжелого класса.

На рис. 3 представлена базовая конструкция роботизированной шагающей платформы, включающей в свой состав: несущую и опорно-поворотную платформу, восемь ортогональных шагающих движителей с приводами курсового движения и адаптации, систему энергоснабжения, бортовую систему управления, информационную систему (датчики с устройствами сопряжения), систему навигации [2].

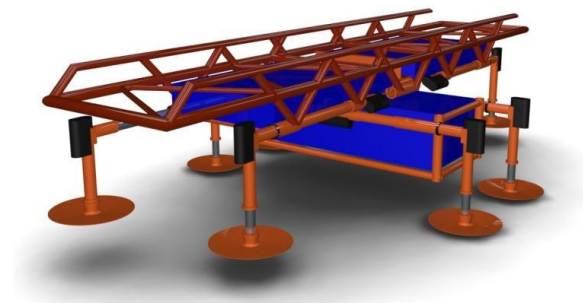


Рис. 3. Роботизированная шагающая платформа с ортогональными движителями

Технологическое оснащение платформы определяется решаемыми задачами и областью применения и может содержать манипуляторы, оборудование буровой установки, барабан с подводным кабелем и др.

Для ряда технологических задач (в основном связанных с перемещением со слабым грунтам без необходимости управления точками постановки опор, например, в прибойной зоне) практический интерес также представляют аппараты на базе цикловых механизмов шагания (рис. 4) [8].



Рис. 4. Испытания шагающей платформы с цикловыми шагающими движителям

Результаты испытаний платформ с различными шагающими движителями подтвердили высокую проходимость, адаптивные свойства и маневренность на слабонесущих грунтах. В частности, осуществлялось успешное передвижение по морскому дну и заболоченной местности, преодолевались подъёмы до 30° и локальные препятствия [8, 9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шурыгин В.А., Серов В.А., Ковшов И.В.* Концепция обустройства и обеспечения эксплуатации месторождений углеводородов на морском шельфе с использованием роботизированных шагающих платформ // Труды Международной конференции и выставки по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения континентального шельфа Offshore Marintec Russia – 2016 и 16-го Петербургского международного энергетического форума 4–7 октября 2016 года, Санкт-Петербург. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2016. – С. 113-120.
2. *Серов В.А., Ковшов И.В., Устинов С.А.* Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подлёдных) месторождений полезных ископаемых // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 181-191.
3. *Брискин Е.С., Шаронов Н.Г., Чернышев В.В., Малолетов А.В.* Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 6-14.
4. *Yoo S.Y., Jun B.H., Shim H.* Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A, Vol. 38, Issue 9, September 2014. – P. 989-997.
5. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В.* МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.
6. *Шурыгин В.А., Серов В.А., Шаронов Н.Г.* Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями // Известия ВолгГТУ. – 2011. – № 11. – С. 41-44.
7. *Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Серов В.А., Устинов С.А.* Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 184-190.
8. *Chernyshev V.V., Gavrilov A.E.* Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. – P. 21-24.
9. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Шаронов Н.Г., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А.* Отработка методов удаленного управления движением шагающего робота «Ортоног» // Электротехнические системы и комплексы: [ежегодник / МГТУ им. Г.И. Носова]. – 2013. – № 21. – С. 153-160.

УДК 004.932.2

Б.А. Скороход

**ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ ПЛАВАНИИ СУДНА В АВТОНОМНЫХ
РЕЖИМАХ**

Рассматривается задача конструирования управления безэкипажным судном, обеспечивающее предотвращение его столкновения с потенциальными препятствиями и последующее возвращение на заданную траекторию. В основе предлагаемого подхода лежат методы построения оптимальных прогнозирующих управлений, опирающиеся на модели судна и препятствий, нелинейные ограничения, описывающие запретную для препятствий область вокруг судна. Корректировка маршрута судна начинается только после прогноза попадания, хотя бы одного из обнаруженных препятствий, в запретную область (адаптация алгоритма управления к изменяющимся внешним условиям). Предполагается, что позиционирование судна и препятствий осуществляется путем обработки сигналов, поступающих с оптико-электронной системы пассивной локации и инерциальных датчиков. Полученные теоретические результаты иллюстрируются моделированием на примере одного из типичных для судоходства сценариев – судно и препятствие двигаются на встречных курсах.

Автоматическое обнаружение и автосопровождение препятствий, оценка риска столкновения, прогнозирующее управление.

B.A. Skorohod

**PREDICTIVE ALGORITHMS PREVENTING
COLLISIONS DURING NAVIGATION IN AUTONOMOUS MODES**

The problem of designing the control of an unmanned ship, ensuring prevention of its collision with potential obstacles and subsequent return to a given trajectory, is considered. The proposed approach is based on the methods of constructing optimal predictive controls, a model of the ship and obstacles, nonlinear restrictions describing a forbidden obstacle area around the ship. The correction of the ship's route begins only after detection for a specified horizon, at least one of obstacles in the restricted area (adaptation of the control algorithm to changing external conditions). It is assumed that the positioning of the ship and obstacles is carried out by processing the signals coming from the optoelectronic system of passive location and inertial sensors. The obtained theoretical results are illustrated on the example of the typical scenarios for navigation – the ship and the obstacle are moving in oncoming courses.

Automatic detection and tracking of obstacles, a collision risk assessment, predictive control.

1. Постановка задачи. После оценки риска столкновения, по результатам позиционирования препятствия, может быть принято решение о выборе нового безопасного маршрута, обеспечивающего минимальные затраты в смысле времени, расстояния, корректировок маршрута и т.д. В такой неформальной постановке, задача является типичной для любых автономных транспортных средств и, как следствие, для ее решения может быть использован, например, опыт, накопленный при разработке наземных мобильных роботов. Известны многочисленные публикации, посвященные решению этой задачи. Так, метод искусственных потенциальных функций (ПФ) был предложен в [1–3]. Управление роботом осуществляется таким образом, чтобы, двигаясь в направлении к цели, избегать столкновения с препятствием. В [4] предлагается использовать оптимальное прогнозирующее управление. Критерий качества представляет собой взвешенную сумму ПФ, определяющих, в неявной форме, качество слежения за траекторией, ограничения на управление и состояние, а также ограничения, позволяющие избежать столкновения (величины обратные расстояниям до препятствий). Для решения задачи используются принцип максимума и динамическое программирование, реализация

которых требует значительных вычислительных ресурсов. В этой статье нами предлагается новый алгоритм обхода препятствий, основанный на линеаризации системы и ограничений в окрестности прогноза текущей траектории.

2. Алгоритмы обхода препятствий. Предположим, что видеонаблюдение ведётся за N препятствиями. Движение каждого из препятствий и самого судна описываются системами уравнений

$$q_{t+1}^{o,i} = f^{o,i}(q_t^{o,i}, w_t^{o,i}), \eta_t^{o,i} = (x_t^{o,i}, y_t^{o,i})^T, t = 0, 1, \dots, i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

$$q_{t+1} = f(q_t, u_t), q_0 = \bar{q}, \eta_t = (x_t, y_t, \varphi_t)^T, t = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где $q_t^{o,i}$, $w_t^{o,i}$, $\eta_t^{o,i}$, $x_t^{o,i}$, $y_t^{o,i}$ – векторы состояния, неизвестного возмущения и выхода, земные координаты i -го препятствия, соответственно, $i = 1, 2, \dots, N$, $q_t, u_t, x_t, y_t, \varphi_t, \eta_t$ – вектор состояния системы, управление, координаты, курсовой угол судна в земной системе координат, выход, соответственно, $f^{o,i}(\cdot, \cdot)$, $f(\cdot, \cdot)$ – известные векторные функции.

Требуется выбрать управляющее воздействие u_t таким образом, чтобы минимизировать критерий качества

$$J = \sum_{j=1}^h \left[(\eta_{t+j} - \eta_{t+j}^r) \Lambda (\eta_{t+j} - \eta_{t+j}^r) + \lambda (u_{t+j} - u_{t+j}^r) \right] \quad (3)$$

и выполнялись ограничения

$$D_{t+h}^i = \left[(x_{t+h} - x_{t+h}^{o,i})^2 + (y_{t+h} - y_{t+h}^{o,i})^2 \right]^{1/2} > D_t, \quad (4)$$

где $\Lambda \in R^{3 \times 3}$, $\lambda > 0$ – веса критерия, D_t – заданная функция, характеризующая маневренные свойства судна, препятствия и запретную область судна.

Система

$$q_{t+1}^r = f(q_t^r, u_t^r), q_0 = \bar{q}^r, \eta_t^r = (x_t^r, y_t^r, \varphi_t^r)^T, t = 0, 1, \dots \quad (5)$$

определяет желаемое движение судна при отсутствии препятствий.

Оптимальная траектория системы (2) должна удовлетворять дополнительно условию возврата на исходную траекторию после обхода препятствия: существует такая постоянная $\delta > 0$, что если $\|\bar{q} - \bar{q}^r\| < \delta$, то

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|q_t - q_t^r\| = 0. \quad (6)$$

Разлагая правые части (2) в окрестности желаемой траектории (q_t^r, u_t^r) , получим

$$\begin{aligned} f(q_t, u_t) &= f(q_t^r, u_t^r) + \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{x=q_t^r, u=u_t^r} (q_t - q_t^r) + \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \Big|_{x=q_t^r, u=u_t^r} (u_t - u_t^r) = \\ &= f(q_t^r, u_t^r) + A_t (q_t - q_t^r) + B_t (u_t - u_t^r), \end{aligned}$$

где

$$A_t = A(q_t^r, u_t^r), B_t = B(q_t^r, u_t^r). \quad (7)$$

Вводя обозначение $\tilde{q}_t = q_t - q_t^r$, $\tilde{u}_t = u_t - u_t^r$, получим линеаризованную систему в отклонениях относительно желаемого движения

$$\tilde{q}_{t+1} = A_t \tilde{q}_t + B_t \tilde{u}_t, \quad \tilde{\eta}_t = C \tilde{q}_t. \quad (8)$$

Линеаризуя (4), получим

$$\begin{aligned} D_{t+h}^i &= \left[(x_{t+h} - x_{t+h}^{o,i})^2 + (y_{t+h} - y_{t+h}^{o,i})^2 \right]^{1/2} = \\ &= \left[(x_{t+h}^r - x_{t+h}^{o,i} + \tilde{x}_{t+h})^2 + (y_{t+h}^r - y_{t+h}^{o,i} + \tilde{y}_{t+h})^2 \right]^{1/2} = \\ &= \tilde{D}_{t+h}^r + \frac{\partial D_{t+h}(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=(x_{t+h}^r - x_{t+h}^{o,i}), y=(y_{t+h}^r - y_{t+h}^{o,i})} \tilde{x}_{t+h} + \\ &+ \frac{\partial D_{t+h}(x, y)}{\partial y} \Big|_{x=(x_{t+h}^r - x_{t+h}^{o,i}), y=(y_{t+h}^r - y_{t+h}^{o,i})} \tilde{y}_{t+h} = \\ &= \tilde{D}_{t+h}^i + C_{t+h}^{x,i} \tilde{x}_{t+h} + C_{t+h}^{y,i} \tilde{y}_{t+h} > D_t, \quad i=1,2,\dots,N. \end{aligned} \quad (9)$$

В новых переменных критерий качества (3) примет вид

$$J = \sum_{j=1}^h (\tilde{\eta}_{t+j} \Lambda \tilde{\eta}_{t+j} + \lambda \tilde{u}_{t+j}^2). \quad (10)$$

Рассмотрим следующую линейную задачу оптимального управления. Требуется выбрать \tilde{u}_t таким образом, чтобы минимизировать (10) при ограничениях (9). Покажем, как может быть получено решение этой задачи. Используя (20), находим

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_{t+1} &= CA_t \tilde{q}_t + CB_t \tilde{u}_t, \\ \tilde{\eta}_{t+2} &= CA_{t+1} A_t \tilde{q}_t + CA_{t+1} B_t \tilde{u}_t + CB_{t+1} \tilde{u}_{t+1}, \\ &\text{-----} \\ \tilde{\eta}_{t+h} &= CA_{t+h-1} A_{t+h-2} \cdots A_t \tilde{q}_t + CA_{t+h-1} A_{t+h-2} \cdots A_{t+1} B_t \tilde{u}_t + \dots + \\ &+ CB_{t+h-1} \tilde{u}_{t+h-1}. \end{aligned}$$

Или в эквивалентной, более компактной форме

$$Q_t = F_t \tilde{q}_t + H_t \tilde{U}_t, \quad (11)$$

где

$$\tilde{U}_t = (\tilde{u}_t, \tilde{u}_{t+1}, \dots, \tilde{u}_{t+h-1}), \quad Q_t = (\tilde{\eta}_{t+1}, \tilde{\eta}_{t+2}, \dots, \tilde{\eta}_{t+h-1}),$$

$$F_t = F_t(q_t^r, u_t^r, q_{t+1}^r, u_{t+1}^r, \dots, q_{t+h-1}^r, u_{t+h-1}^r), \quad (12)$$

$$H_t = H_t(q_t^r, u_t^r, q_{t+1}^r, u_{t+1}^r, \dots, q_{t+h-1}^r, u_{t+h-1}^r). \quad (13)$$

Подстановка (11) в (10), (9) даёт

$$\begin{aligned} J &= (F_t \tilde{q}_t + H_t \tilde{U}_t) \Lambda (F_t \tilde{q}_t + H_t \tilde{U}_t) + \lambda \tilde{U}_t \tilde{U}_t = \\ &= \tilde{q}_t' F_t' \Lambda F_t \tilde{q}_t + 2 \tilde{q}_t' F_t' \Lambda H_t \tilde{U}_t + \tilde{U}_t' (H_t' H_t + \lambda I) \tilde{U}_t, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} D_{t+h}^i &= \tilde{D}_{t+h}^i + C_{t+h}^{x,i} (F_t^x \tilde{q}_t + H_t^x \tilde{U}_t) + C_{t+h}^{y,i} (F_t^y \tilde{q}_t + H_t^y \tilde{U}_t) = \\ &= \tilde{D}_{t+h}^i + (C_{t+h}^{x,i} F_t^x + C_{t+h}^{y,i} F_t^y) \tilde{q}_t + (C_{t+h}^{x,i} H_t^x + C_{t+h}^{y,i} H_t^y) \tilde{U}_t > D_t, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$F_t^x = (1, 0, \dots, 0)F_t, \quad F_t^y = (0, 1, 0, \dots, 0)F_t,$$

$$H_t^x = (1, 0, \dots, 0)H_t, \quad H_t^y = (0, 1, 0, \dots, 0)H_t.$$

С учётом выражений (14), (15) задача оптимального управления системой (8) может быть сформулирована как задача минимизации квадратичной формы при линейных ограничениях

$$\min (\tilde{U}_t' W_t \tilde{U}_t + D_t' \tilde{U}_t), \quad \tilde{U}_t = (\tilde{U}_t^1, \tilde{U}_t^2, \dots, \tilde{U}_t^h)' \in M_t, \quad M_t = \{U_t : L_t \tilde{U}_t \leq b_t\},$$

где $W_t = H_t' \Lambda H_t + \lambda I$, $D_t = 2\tilde{q}_t' F_t' \Lambda H_t$, $L_t = C_{t+h}^{x,i} H_t^x + C_{t+h}^{y,i} H_t^y$,

$$b_t = \tilde{D}_{t+h} + C_{t+h}^{x,i} F_t^x + C_{t+h}^{y,i} F_t^y.$$

Известно, что при $W_t \geq 0$ решение этой задачи существует и единственно [5]. Прогнозирующее управление линейной системой (8) при ограничениях (9) может быть представлено в виде

$$u_t = (1, 0, \dots, 0) \tilde{U}_t = \varphi_t(\tilde{q}_t) = \varphi_t(q_t - q_t^r). \quad (16)$$

Одновременно это выражение может быть использовано в качестве прогнозирующего управления исходной нелинейной системой, если считать, что q_t в (16) является решением (2) (прогнозирующее управление с линеаризацией в окрестности желаемого движения).

Более интересной, как показывает численное моделирование, представляется следующая его модификация. С учётом выражений (7), (12), (13) видно, что u_t зависит от прогнозирующих значений желаемого движения $\beta_t^r = [(q_t^r, u_t^r), (q_{t+1}^r, u_{t+1}^r), \dots, (q_{t+h-1}^r, u_{t+h-1}^r)]$, т.е.,

$$u_t = \varphi_t(\beta_t^r, q_t - q_t^r). \quad (17)$$

Пусть прогноз траектории движения судна определяется системой

$$\hat{q}_{t+1} = f(\hat{q}_{t+1}, \tilde{U}_t^1), \quad i = 1, 2, \dots, h-1, \quad t \geq h.$$

Заменяя в (17) β_t^r на $\hat{\beta}_t = [(\hat{q}_t, \tilde{U}_t^1), (\hat{q}_{t+1}, \tilde{U}_t^2), \dots, (\hat{q}_{t+h-1}, \tilde{U}_t^h)]$, получим выражение для прогнозирующего управления с линеаризацией в окрестности прогноза текущей траектории.

Проиллюстрируем, полученные результаты, на одном из типичных для судоходства сценариев – судно и препятствие движутся на встречу друг другу с постоянными линейными скоростями. Мы используем модель судна, учитывающую его динамику, идентифицированную по реальным данным [6]:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + v \cos(\psi_t) \Delta t \\ y_{t+1} = y_t + v \sin(\psi_t) \Delta t \\ \psi_{t+1} = \psi_t + r_t \Delta t \\ r(s) = \frac{K(T_3 s + 1)}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} \\ \delta(s) = \frac{K(T_3 s + 1)}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)} \end{cases}$$

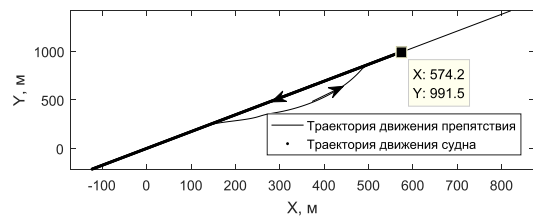
и кинематическую модель препятствия

$$\begin{cases} x_{t+1}^o = x_t^o + v^o \cos(\varphi) \Delta t \\ y_{t+1}^o = y_t^o + v^o \sin(\varphi) \Delta t \end{cases},$$

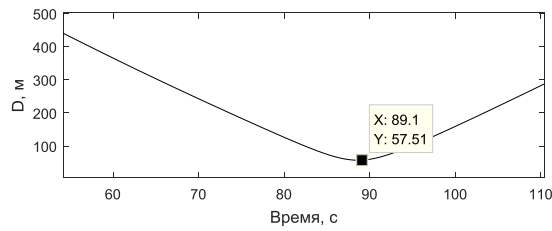
где ψ_t – курсовой угол судна, $\delta(s)$, $r(s)$ – преобразованные по Лапласу угол поворота руля, $u_t = \delta_t$ и скорость изменения курса r_t .

Желаемое движение судна, до попадания препятствия в его запретную зону, описывается системой

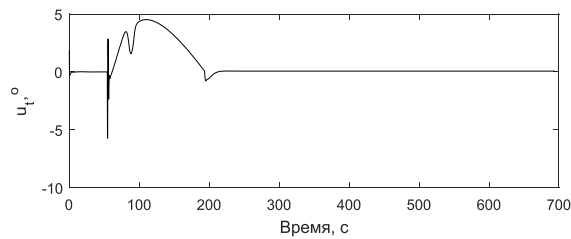
$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + v \cos(\psi) \Delta t \\ y_{t+1} = y_t + v \sin(\psi) \Delta t \end{cases}.$$



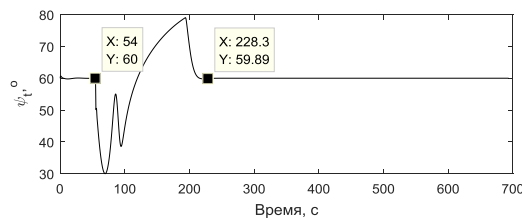
а



б



в



г

Рис. 1. Результаты моделирования прогнозирующего управления: а – траектории движения судна и препятствия, б – расстояние до препятствия, в – угол поворота руля, г – курсовой угол судна

На рис. 1,а-г приведены результаты моделирования при следующих значениях параметров:

судно – $x_0 = 10$ м, $y_0 = 10$ м, $v = 5$ м/с, $\psi = 60^\circ$, $\Delta t = 0.3$ с, $K = 0.3619$,
 $T_1 = 1.1918$, $T_2 = 1.4442$, $T_3 = 1.5711$;

препятствие – $x_0^o = 574$ м, $y_0^o = 995$ м, $v^o = 8$ м/с, $\varphi_0^o = 240^\circ$, $\Delta t = 0.3$ с;

критерий качества – $\Lambda = 5 \cdot 10^{-5} I_6$, $\lambda = 0.5$.

ограничения – $D_t = \begin{cases} 400 \text{ м, } t \leq 350 \text{ с} \\ 50 \text{ м, } t > 350 \text{ с} \end{cases}$.

Отметим следующее. Прежде всего, видно, что система управления справляется с поставленной задачей предотвращения столкновения – непопадания препятствия в запретную зону судна (минимальное расстояние между судном и препятствием должно быть не менее 50 м). При этом, амплитуда δ_t по абсолютной величине не превышает 6 градусов. После завершения маневра судно возвращается на заданную траекторию, а время маневра составляет примерно 2.9 минуты. Кроме того, проведенное моделирование показывает, что алгоритм управления обеспечивает обход судном препятствия при варьировании их скоростей в пределах 3–10 м без перенастройки параметров. Время реализации одного такта управления в пакете Matlab на ПК с процессором Intel Pentium 3 ГГц составляет 0.07 с.

Заключение. В этой работе предложены и исследованы новые алгоритмы управления судами в автономных режимах, основанные на методах построения оптимальных прогнозирующих управлений, моделях судна и препятствий, и нелинейных ограничениях, описывающих запретную для препятствий область вокруг судна. В следующих публикациях предполагается исследовать возможности учета координат и скоростей судна и препятствий при формировании нелинейных ограничений на их относительное движение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Khatib O.* Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The international journal of robotics research. – 1986. – Vol. 5, no. 1. – P. 90-98.
2. *Koren Y. and Borenstein J.* Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation // in Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1991. – P. 1398-1404.
3. *Sigurd K. and How J.* UAV Trajectory Design Using Total Field Collision Avoidance // in AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Austin, TX, Aug. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2003.
4. *Wei Xi, John S. Baras* MPC Based Motion Control of Car-like Vehicle Swarms. Mediterranean Conference on Control & Automation, 2007. MED '07. – P. 1-6.
5. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 384 с.
6. *David Moreno-Salinas, Dictino Chaos, Jesús Manuel de la Cruz, and Joaquín Aranda.* Identification of a Surface Marine Vessel Using LS-SVM // Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics, Volume 2013, Article ID 803548. – 11 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2013/803548>.

УДК 534.23

Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин, Ю.А. Хворостов
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЁМНИКОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ
ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований скалярно - векторных звуковых полей на акватории залива Петра Великого (Японское море) с использованием трёхэлементной приёмной системы на основе комбинированных приёмников (КП). Приведена оценка помехоустойчивости КП в звуковом поле находящихся на акватории залива судов, в спектре шумового поля которых присутствуют дискретными составляющими вально-лопастного ряда в инфразвуковом диапазоне частот 2,0–20Гц. Выполнена сравнительная оценка помехоустойчивости при различных алгоритмах её определения и различных алгоритмах выделения помехи из суммарного случайного процесса сигнал плюс помеха. Результаты исследований подтверждают предпочтительность мультипликативных алгоритмов обработки сигналов на выходе комбинированного приёмника и его повышенную помехоустойчивость.

Помехоустойчивость, комбинированный приемник.

B.A. Kasatkin, Dr.Sc, S.B. Kasatkin, Ph.D., Y.A.Hvorostov
EXPERIMENTAL ESTIMATES OF NOISE STABILITY OF THE COMBINED
RECEIVERS AND THE PROSPECT OF THEIR USE FOR DETECTION
OF QUIET UNDERWATER OBJECTS

The results of experimental studies of scalar-vector sound fields in the water area of Peter the Great Bay (the Sea of Japan) are presented using a three-element receiver system based on combined receivers (CR). The estimation of noise immunity of the gearbox in the sound field of ships located in the water area of the Gulf is given, in the spectrum of the noise field of which there are discrete components of the vane-lobed series in the infrasonic frequency range of 2.0-20 Hz. A comparative evaluation of noise immunity is performed with various algorithms for its determination and various algorithms for isolating interference from the total random process signal plus interference. The results of the studies confirm the advantage of multiplicative algorithms for signal processing at the output of the combined receiver and its increased noise immunity.

Noise immunity, combined receiver.

Введение. Теоретическим и экспериментальным исследованиям скалярно-векторной структуры звуковых полей посвящено достаточно большое количество работ, из которых отметим только монографии [1–4]. Во всех этих работах использовались мультипликативные алгоритмы обработки информации на выходе КП, которые, по мнению авторов этих работ, позволяют реализовать повышенную, по сравнению с аддитивными алгоритмами, помехоустойчивость КП. Однако сами оценки помехоустойчивости КП, приведённые в этих работах, изменяются в широких пределах. Так, например, в работах [2, 3] описана экспериментальная оценка помехоустойчивости КП в условиях глубокого моря (15–16дБ). Более оптимистическая оценка помехоустойчивости КП (30–35дБ) содержится в работах [1, 4, 5]. Самые пессимистические теоретические оценки (5–6дБ) содержатся в ряде работ [6–8]. Основное внимание в работе уделено методике экспериментальной оценки помехоустойчивости КП в звуковом поле, создаваемом находящимися на акватории залива судами, в спектре шумов которых присутствуют дискретные составляющие вально-лопастного ряда в инфразвуковом диапазоне частот 2,0–20Гц.

Основные определения. Значительный разброс в оценках помехоустойчивости КП свидетельствует о том, что разные авторы понимают эту величину по-разному. В качестве примера сошлёмся на два определения помехоустойчивости $\Pi_{1,2}$, приведённые в работе [4].

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{i1} = 10 \log \frac{|\bar{I}_i(S+N) - \bar{I}_i(N)|}{|\bar{I}_i(N)|}, \quad \Pi_{i1} = \max \left(\frac{S}{N}\right)_{i1} - \left(\frac{S}{N}\right)_0, \quad i = x, y, z \quad (1)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{i2} = 10 \log \frac{|\bar{I}_i(S+N) - \bar{I}_i(N)|}{|D_i(N)|^{1/2}}, \quad D_i(N) = \bar{I}_i^2(N) - \bar{I}_i^2(N), \quad (2)$$

$$\Pi_{i2} = \max \left(\frac{S}{N}\right)_{i2} - \left(\frac{S}{N}\right)_0, \quad i = x, y, z$$

где $\bar{I}_i(S+N), \bar{I}_i(N)$ – среднее значение потока мощности в суммарном процессе сигнал плюс помеха ($S+N$) и в поле шумовой помехи N в « i » канале комбинированного приёмника соответственно, $\bar{I}_i^2(N)$ – среднее значение квадрата потока мощности в поле шумовой помехи N в « i » канале комбинированного приёмника, $D_i(N)$ – дисперсия потока мощности в « i » канале комбинированного приёмника, $i = x, y, z$, $i = 0$ соответствует каналу звукового давления, $I_0 = |p|^2$.

При работе комбинированного приёмника в качестве обнаружителя слабых сигналов, как правило, достаточно подробная информация о шумовом поле помехи в реальном масштабе времени отсутствует. Можно предположить, однако, что спектр шумовой помехи является сплошным, а спектр сигнала содержит дискретные составляющие, для выделения которых следует использовать методы спектрального анализа высокого разрешения. С учётом этого, можно предложить различные алгоритмы аппроксимации комплексной амплитуды соответствующей спектральной составляющей шумовой помехи, основанные только на предположении о «гладкости» сплошного спектра помехи. Рассмотрим сначала простейшие из них, линейный алгоритм (3) и его обобщение (4).

$$A_N(f_0, t) = \frac{1}{2} [A_{S+N}(f_0 + \Delta f_0, t) + A_{S+N}(f_0 - \Delta f_0, t)], \quad (3)$$

где f_0 – средняя частота частотного канала, Δf_0 – варьируемый параметр, примерно на порядок превышающий ширину дискретной составляющей Δf в спектре суммарного процесса (сигнал плюс шум). При необходимости алгоритм (3) можно обобщить, включив в процедуру усреднения набор дискретных составляющих (частотное окно) с весовыми коэффициентами (окно Хэмминга).

$$A_N(f_0, t) = \frac{1}{M} \sum_{f_0 - \Delta f_0}^{f_0 + \Delta f_0} a_i A_{S+N}(f_i, t), \quad (4)$$

$$f_i = f_0 \pm \Delta f_0 \frac{2i}{M}, \quad M = \frac{2\Delta f_0}{\Delta f}, \quad i \in (1, \frac{M}{2}), \quad a_i = \sin \pi \frac{2i}{M},$$

$2\Delta f_0$ – ширина окна Хэмминга.

Алгоритмы (3), (4) выделения шумовой помехи из суммарного процесса применяются к линейным по полю величинам $A(f, t)$, т.е. к комплексным амплитудам спектральных составляющих в канале давления и в векторных каналах. По найденным комплексным амплитудам спектральных составляющих шумовой

помехи находятся квадратичные по полю величины. Кроме этих алгоритмов, приведём также нелинейный алгоритмы выделения шумовой помехи для положительно определённых квадратичных по полю величин $B(f, t)$, т.е. потоков мощности в канале давления и в векторных каналах

$$B_N(f_0, t) = \exp \left[\exp \left(\frac{1}{M} \sum_{f_0 - \Delta f_0}^{f_0 + \Delta f_0} \ln \ln B_{S+N}(f_i, t) \right) \right], \quad f_i = f_0 \pm \Delta f_0 \frac{2i}{M}, \quad (5)$$

Описание эксперимента. Рассмотрим результаты эксперимента, проведённого в мелком море с использованием приёмной системы, содержащей три комбинированных приёмника, распределённых по глубине моря. Глубина моря в месте расположения приёмной системы составляла 85 м, горизонты позиционирования приёмников составляли 20, 40, 60 м. В качестве источников звукового поля использовались суда, проходящие мимо приёмной системы на траверсном расстоянии порядка 10 км, в спектре излучения которых хорошо выделялись дискретные составляющие вально-лопастного ряда в инфразвуковом диапазоне частот. Глубина моря на трассах движения судов изменялась от минимальных значений 30–50 м мелководной части акватории до глубин открытого моря 1000–1500 м.

Ниже приводятся результаты экспериментальной оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника при использовании четырёх алгоритмов обработки:

- ◆ линейного алгоритма выделения помехи из (3) и определения помехоустойчивости по формуле (1), обозначенного ниже как алгоритм 1-I;
- ◆ линейного алгоритма выделения помехи (3) и определения помехоустойчивости по формуле (2), обозначенного ниже как алгоритм 1-D;
- ◆ нелинейного алгоритма выделения помехи (5) и определения помехоустойчивости по формуле (1), обозначенного ниже как алгоритм 5-I;
- ◆ нелинейного алгоритма выделения помехи (5) и определения помехоустойчивости по формуле (2), обозначенного ниже как алгоритм 5-D.

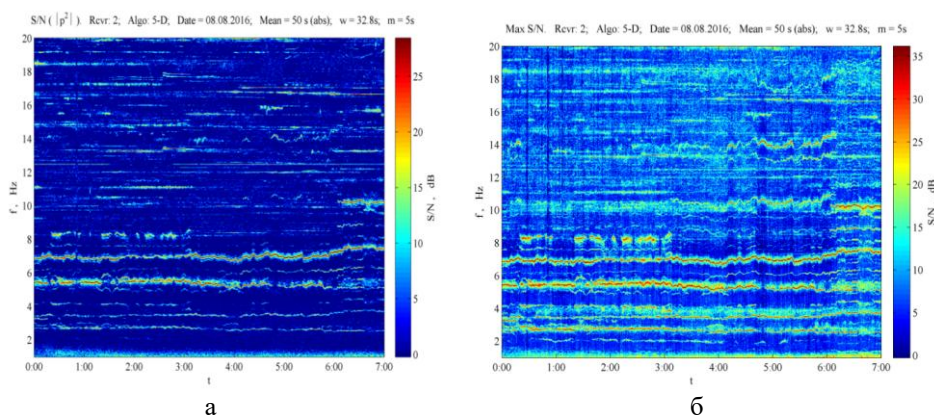


Рис. 1. Сонограммы для отношения S/N на выходе канала звукового давления а) и на выходе компаратора б), алгоритм обработки 5-D

Сонограммы звукового поля для отношения сигнал/помеха на выходе устройства обработки вычислялись по семи информативным параметрам: квадрату звукового давления на выходе p -канала звукового давления, компонентам x, y, z вещественной составляющей вектора интенсивности, компонентам x, y, z мнимой составляющей вектора интенсивности. Численные оценки отношения сиг-

нал/помеха по всем семи информативным параметрам сравнивались в компараторе. Компаратор выбирал информативный параметр, которому соответствует наибольшее отношение сигнал/помеха.

Сонограммы, вычисленные на выходе канала звукового давления и на выходе компаратора поясняются (см. рис. 1), для алгоритма обработки 5-D для второго приёмника, расположенного в средней части волновода. Эти сонограммы позволяют оценить помехоустойчивость комбинированного приёмника в инфразвуковом диапазоне частот по формулам (2), которая поясняется рис. 2 для второго приёмника.

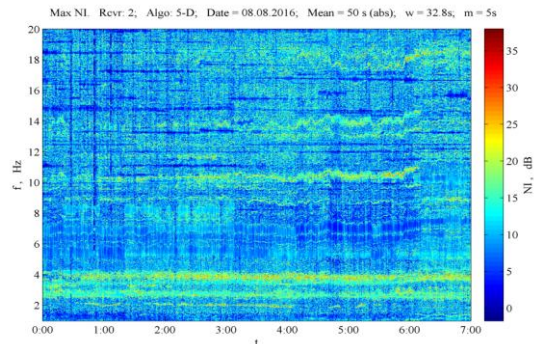


Рис. 2. Сонограммы для оценки помехоустойчивости КП, алгоритм обработки 5-D

Выводы. Выполнены оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника в звуковом поле инфразвукового диапазона 2,0–20 Гц, создаваемого дискретными составляющими вально-лопастного ряда судов, находящихся на акватории залива Петра Великого Японского моря. Выполнены сравнительные оценки помехоустойчивости при различных алгоритмах её определения. Полученные оценки подтверждают как повышенную помехоустойчивость КП (10–15 дБ), так и повышенную вариабельность самой оценки (0–36 дБ). Авторы благодарят всех сотрудников ИПМТ ДВО РАН, принимавших участие в экспериментах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. – М.: Наука, 1989. – 224 с.
2. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. – 308 с.
3. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в акустике. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 194 с.
4. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. – М.: Физматлит, 2007. – 479 с.
5. Гордиенко В.А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приёмных систем, регистрирующих поток акустической мощности // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54, № 5. – С. 774-785.
6. Смартышев М.Д. О помехоустойчивости комбинированного акустического приёмника // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 4. – С. 558-559.
7. Смартышев М.Д. Сравнительная оценка помехоустойчивости антенн, состоящих из комбинированных приёмников, в анизотропном поле помех // Гидроакустика. – СПб.: ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», 2006. – Вып. 6. – С. 18-24.
8. Шендеров Е.Л. О помехоустойчивости приёмной антенны, состоящей из приёмников звукового давления и приёмников колебательной скорости // Гидроакустика. – СПб.: ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», 2002. – Вып. 3. – С. 24-40.
9. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Особенности определения и оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника при его работе в звуковом поле движущегося в мелком море источника // Труды конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток, 2017. – С. 161-165.

УДК 623.827

Г.Ю. Илларионов, А.А. Карпачёв, А.В. Матвиенко

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В КОНФЛИКТНОЙ СРЕДЕ

Неотъемлемой частью современного развития военной и специальной робототехники является разработка автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) и комплексов на их основе. Одним из новых направлений является создание АНПА дальнего радиуса действия. Термин «АНПА дальнего радиуса действия» подразумевает, что данный аппарат будет действовать автономно в океанской зоне без обеспечивающего судна. Поэтому к АНПА дальнего радиуса действия должен предъявляться ряд дополнительных требований, которые ранее не предъявлялись. С этими требованиями тесно связана задача скрытного маневрирования АНПА при плавании в Мировом океане. При подготовке к такому плаванию АНПА необходимо учесть ряд факторов, ограничивающих возможность его свободного маневрирования. Такими факторами могут быть:

- ◆ районы действия противолодочных сил противника;
- ◆ районы боевых служб стратегических подводных лодок и боевой подготовки сил противника;
- ◆ районы действия судов гидроакустической разведки;
- ◆ районы действия стационарной гидроакустической системы освещения подводной обстановки противника;
- ◆ районы рыболовства и интенсивного судоходства;
- ◆ районы дрейфующего мусора и другие.

Задача выбора маршрута, обеспечивающего наименьшую вероятность обнаружения АНПА, должна быть решена на береговом центре управления (БЦУ) заранее, во время выработки замысла глобального перехода [1].

Одним из наиболее опасных для АНПА факторов является стационарная гидроакустическая система освещения подводной обстановки (СГСОО) SOSUS, гидрофоны которой способны обнаруживать подводные цели на больших дистанциях и с высокой вероятностью. На рис. 1 представлена схема расположения гидрофонов SOSUS.

В работе [2] представлен один из способов расчёта вероятностной дальности обнаружения морских целей в режиме гидролокации. В этом режиме прием полезных сигналов осуществляется на фоне шумовой и реверберационной помех. Тип реверберационной помехи определяется районом океана, его глубиной, характеристиками морской воды и типом цели.

Различают три основных типа реверберационных помех: донный, поверхностный и объёмный. Необходимо выбрать тип реверберационной помехи, произвести расчёт её интенсивности и анализ отношений мощностей шумовой и реверберационной помех. При этом в формулы расчёта их интенсивностей входит множитель $\exp(-4\beta \cdot D)$, в котором β – коэффициент пространственного затухания, дБ/км, D – дистанция обнаружения цели.

Как известно, при проектировании гидроакустических станций задаётся дальность обнаружения, которая предполагает выбор оптимальной частоты. В свою очередь оптимальная частота должна обеспечивать наибольшее отношение коэффициента сигнал/помеха и наибольшую вероятность обнаружения цели при заданных рабочих параметрах станции (размеры антенны, акустическая мощность и т.д.).

В работе [2] приводится формула для расчёта коэффициента сигнал/помеха, в которую также входит множитель $\exp(-4\beta \cdot D)$, оказывающий существенное влияние на величину коэффициента в целом. Опыт расчёта вероятностной дальности обнаружения морских целей показывает, что вероятность обнаружения цели на дистанции не менее величины D с учётом приведённых замечаний можно приближённо определять по формуле

$$P(D) \approx \exp(-A \cdot D), \quad (1)$$

где A – константа, учитывающая конкретные параметры гидроакустической станции.

В работе [3] при расчёте вероятности обнаружения объекта на траектории используется геометрическая вероятность. Предполагается, что в районе поиска площадью S случайным образом равномерно разбросаны n неподвижных буев. Дальность обнаружения буем объекта определяется по формуле

$$D = \sqrt{\frac{\sigma_c^2}{\sigma_{ш}^2} \cdot d_0^2 \cdot \frac{h_0 - h_1}{h_1} \cdot (v/v_0)^m} \quad (2)$$

где σ_c^2 – интенсивность (мощность сигнала, излучённая объектом), определённая на частоте 1 ГГц в полосе 1 Гц на расстоянии d_0 от точки излучения; $\sigma_{ш}^2$ – интенсивность (мощность) шума в районе приёмника; v/v_0 – степенная зависимость мощности сигнала от его скорости v ; v_0 – эталонная (малозумная) скорость; h_0 – квантиль уровня $(1 - \alpha)$, α – вероятность ложной тревоги; h_1 – квантиль уровня $(1 - \beta)$, β – вероятность правильного обнаружения объекта.

Дальность D , как правило, значительно меньше размеров района поиска. Принято считать, что объект, движущийся со скоростью v , обнаруживается буем, если последний находится внутри полосы шириной $2D$, построенной вдоль траектории движения.

Площадь полосы за время Δt равна:

$$S_{\Pi} = 2D \cdot v \cdot \Delta t.$$

Тогда вероятность обнаружения объекта одним буем можно определить как геометрическую вероятность:

$$P_{\text{обн}} = \frac{S_{\Pi}}{S} = \frac{2D \cdot v \cdot \Delta t}{S}.$$

Вероятность $P_{\text{обн}}$ является малой величиной, поэтому, используя разложение для малых величин, находим вероятность необнаружения объекта:

$$P_{\text{необн}} = 1 - P_{\text{обн}} \approx \exp(-P_{\text{обн}}) = \exp\left(-\frac{2D \cdot v \cdot \Delta t}{S}\right).$$

Фиксируя промежуток времени Δt и скорость v , можно считать, что

$$P_{\text{необн}} \approx \exp(-A \cdot D),$$

где $A = 2v \cdot \Delta t/S$.

В случае применения n буев получаем

$$P_{\text{необн}} \approx \exp(-n \cdot A \cdot D).$$

Приведённые примеры, а также практические расчёты показывают, что для определения приближённой вероятности обнаружения (необнаружения) объекта на дистанции D от гидроакустической станции (ГАС) можно использовать формулу

$$P_{\text{обн}} \approx \exp(-A \cdot D).$$

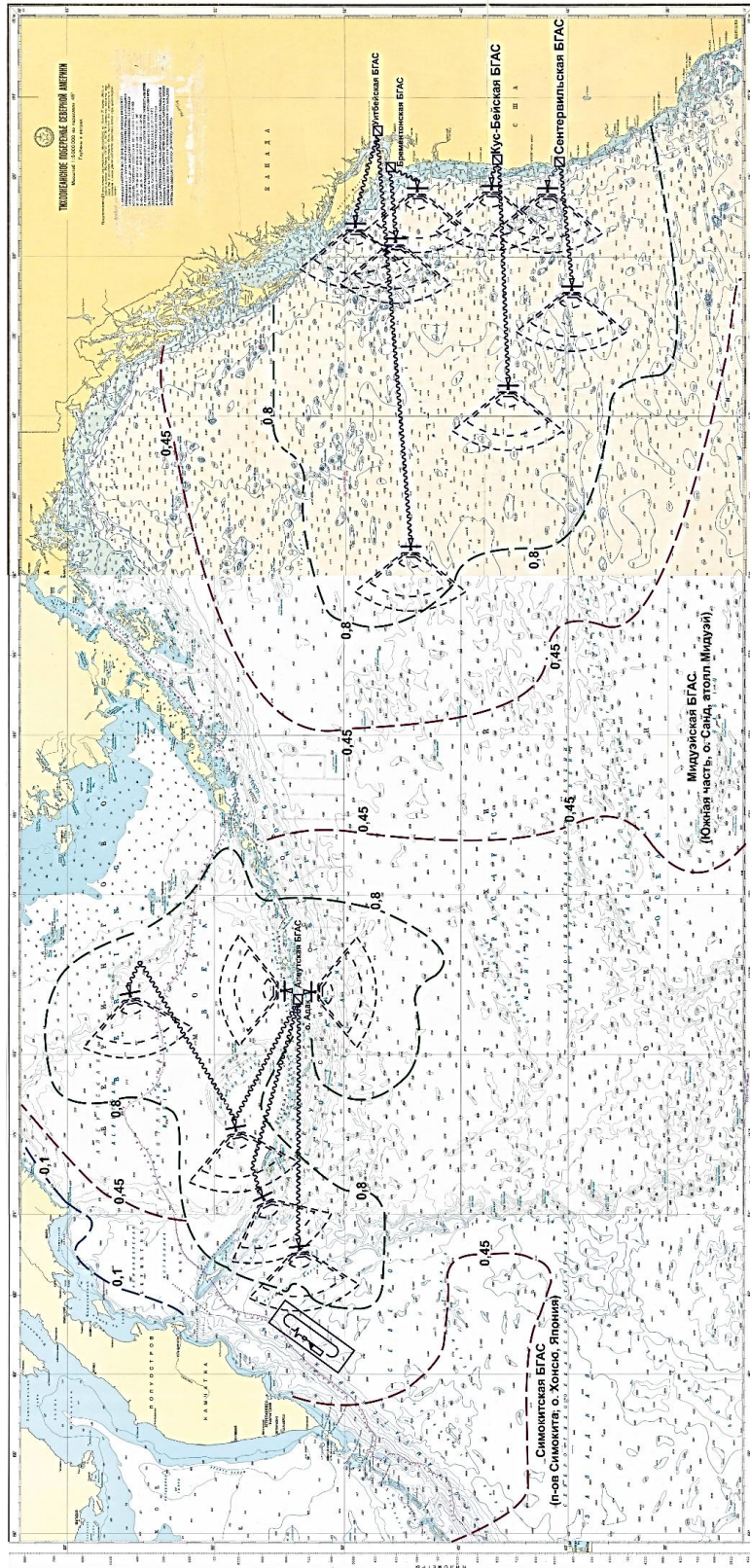


Рис. 1. Схема расположения гидрофонов SOSUS

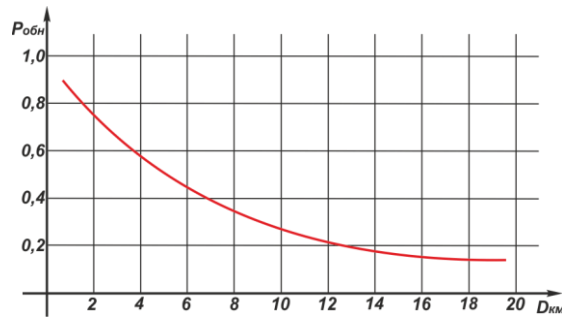


Рис. 2. График функции $\exp(-A \cdot D)$

График функции $\exp(-A \cdot D)$ имеет такую же форму, как и графики вероятностей, приведённые в работе [2]. На рис. 2 для примера представлен график такой функции для значений: $A = 0,1$ и $D = 1, 2, 3, \dots, 20$ км.

В случае если существуют сведения о координатах размещения ГАС и форме границы области с постоянной вероятностью обнаружения, например, $P = 0,9$, нанесённой на карту, то для каждого угла $-\pi < \varphi \leq \pi$ можно определить константу $A(\varphi)$ по формуле

$$A(\varphi) = \frac{-\ln(P)}{d(\varphi)},$$

где $d(\varphi)$ – расстояние от ГАС до точки пересечения луча (под углом φ) с границей области (линией уровня вероятности $P = 0,9$).

Заметим, что набор таких констант $A(\varphi)$ для $\varphi = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, \dots, 360^\circ$ позволяет рассчитывать вероятность обнаружения объекта для направления любого угла φ по основной формуле:

$$P_{\text{обн}} \approx \exp(-A(\varphi) \cdot D).$$

Заменив в этом выражении величину $A(\varphi)$, находим рабочую формулу:

$$P_{\text{обн}} \approx \exp(-A(\varphi) \cdot D) = \exp\left(-\frac{-\ln(P)}{d(\varphi)} \cdot D\right) = (\exp \ln(P))^{D/d(\varphi)}.$$

Таким образом,

$$P_{\text{обн}} \approx P^{D/d(\varphi)}, \tag{3}$$

где P – фиксированная вероятность обнаружения гидрофоном СГСОПО, которая обеспечивается в районе его действия;

D – расстояние от места расположения гидрофона до любой точки системы;

$d(\varphi)$ – расстояние от места расположения гидрофона до границы района его действия, в котором обеспечивается фиксированная вероятность обнаружения подводной цели.

На основании вышеизложенного для решения поставленной задачи скрытного маневрирования в районе действия СГСОПО можно предложить следующий алгоритм.

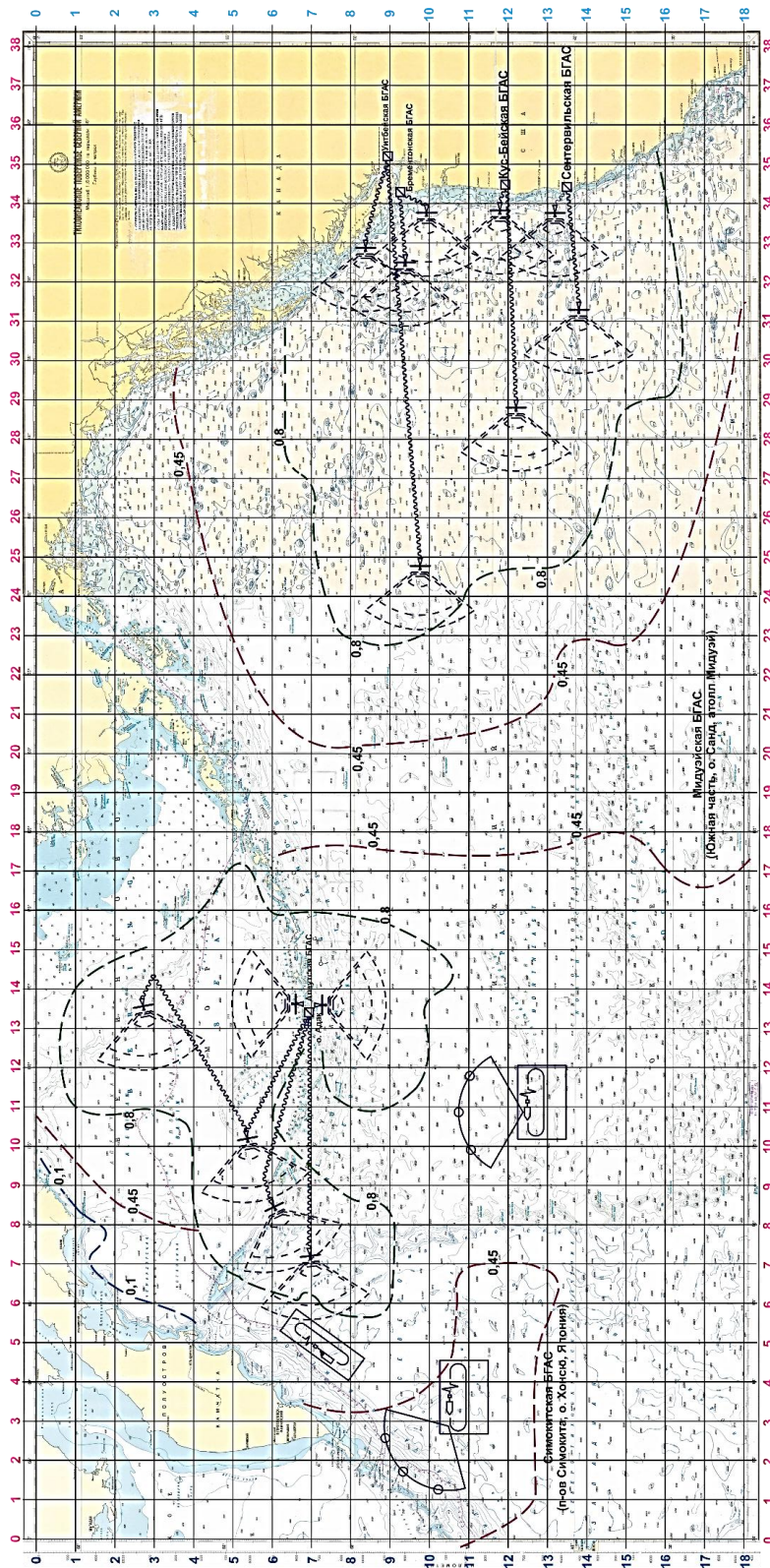


Рис. 3. Морская навигационная карта с обстановкой

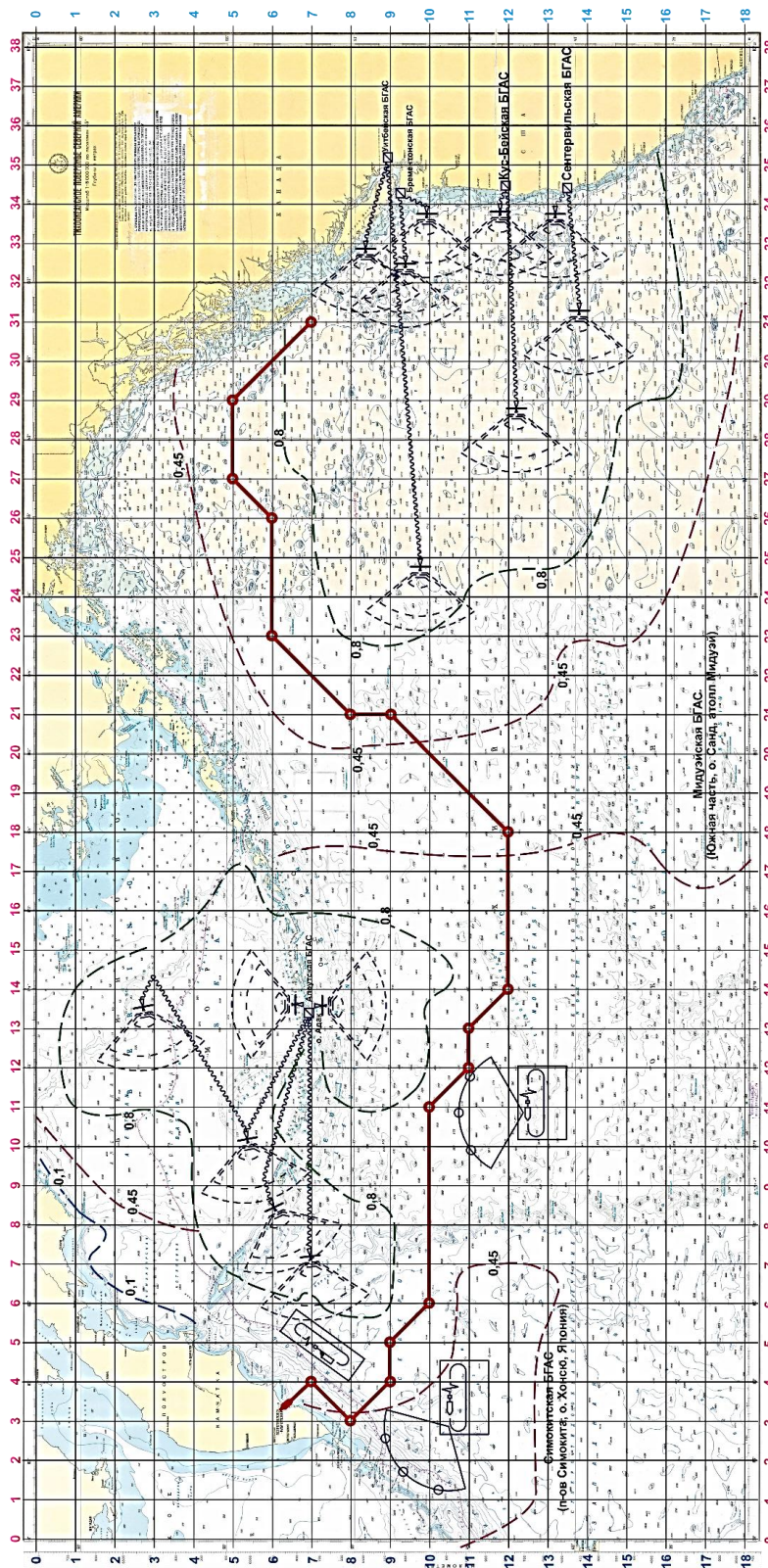


Рис. 4. Морская навигационная карта с вариантом

На морскую навигационную карту, охватывающую район планируемого плавания, по данным разведки наносятся предполагаемые места расположения гидрофонов СГСОО с областями, в которых обеспечивается заданная вероятность обнаружения подводных целей. Затем на карту наносится специальная сетка прямоугольной системы координат с ценой деления в один сантиметр.

Начало системы координат помещается в левый верхний угол и имеет координаты $(x(0) = x_0; y(0) = y_0)$, как показано на (см. рис. 3). Тогда любая точка этой системы будет иметь координаты $(x(1, 2, 3, \dots, N) = x_{1,2,3, \dots, N}; (y(1, 2, 3, \dots, N) = y_{1,2,3, \dots, N})$.

Теперь необходимо рассчитать вероятность обнаружения подводной цели в каждой точке новой координатной сетки.

Вероятность $P_{\text{обн}}(D)$ является функцией расстояния D [3], которое, в свою очередь, является функцией времени, определяемой законом движения объекта. Пусть гидрофон СГСОО находится в точке с координатами $(x_{\text{гф}}; y_{\text{гф}})$, а объект за время t проходит путь из точки A с координатами $(x(i) = x_i; y(i) = y_i)$ в точку B с координатами $(x(t) = x_t; y(t) = y_t)$. Тогда вероятность его обнаружения в каждой точке системы можно определить из выражения (3).

Таким образом, подставив в выражение (3) конкретные значения, можно получить:

$$P_{\text{обн}}(D) = P^{D/\arctg\left(\frac{y_i - y_{\text{гф}}}{x_i - x_{\text{гф}}}\right)} \quad (4)$$

Таким же образом рассчитывается вероятность обнаружения подводной цели для каждого гидрофона всего района перехода и затем находится общая вероятность обнаружения от всех гидрофонов совместно:

$$P_{\text{общ}} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_{\text{обн } i}).$$

После расчёта общей вероятности прокладывается маршрут АНПА по точкам с наименьшей вероятностью обнаружения. Вариант такого маршрута показан на (см. рис. 4). Затем снимаются географические координаты поворотных точек, которые вводятся в программу-задание для бортовой системы управления АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Илларионов Г.Ю., Лаптев К.З., Матвиенко А.В.* Дополнительные требования к автономным обитаемым подводным аппаратам дальнего радиуса действия // VII Всероссийская научно-техническая конференция. Технические проблемы освоения Мирового океана: материалы конференции. 02–06 октября. – Владивосток, 2017. – С. 25-33.
2. *Казанцев Г.И., Останин А.К., Сенченко А.Г.* Основы теории статистических методов в прикладной гидроакустике. – Владивосток: ТОВМИ имени С.О. Макарова, 2000. – 159 с.
3. *Добровидов А.В., Кулида Е.Л., Рудько И.М.* Выбор траектории движения объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. – 2011. – № 3. – С. 64-75.

УДК 629.73.02; 629.73.05/06

А.С. Болдырев, Л.С. Веревкина, А.Л. Веревкин**АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО
БЕСПИЛОТНИКА НА БАЗЕ РАКЕТЫ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

Статья посвящена проблеме реализации сверхзвукового беспилотного летательного аппарата (БЛА) соответствующего современным требованиям. Рассматривается задача о выборе конструкции и прототипа сверхзвукового беспилотного летательного аппарата. На основе анализа тактических характеристик современных сверх звуковых летательных аппаратов таких как: БЛА XQ-222 Valkyrie («Валькирия»), БЛА D-21V(D-21A), самолета беспилотного разведчика 123 aftershock. new, ракеты Метеорит морской вариант 3M25 и авиационный вариант 3M25A, определены параметры и характеристики сверхзвукового БЛА. Для обеспечения качества и надежности предложены уникальные технические решения: корпуса, складных крыльев, радиолокационной защиты, моделей процессов аэроупругости крыла, программы работы рулей и системы управления беспилотного летательного аппарата. Изложенным требованиям соответствует прототип российской разработки - крылатая ракета Метеорит. Приведены принципиальные отличия и ограничения обеспечения надежности ракеты и БЛА. Показано, что необходимо учитывать различные режимы работы и состояния электронных систем при расчетах параметров надежности. Предложен метод и алгоритм оценки надежности для разных режимов работы с использованием матриц, вероятностей состояний и матриц интенсивностей изменений состояний. Предлагается трехэтапный метод решения задачи - оценки надежности сверхзвукового беспилотного летательного аппарата. На первом этапе определяются структурные части, режимы и условия работы и выполняют расчеты параметров надежности систем традиционным методом. На втором этапе выполняются расчеты с учетом резервирования. На третьем этапе выполняются расчеты с учетом процессов перехода из одного режима в другой. Используются метод Марковских цепей, теория вероятности и матрицы, последние не накладывают никаких ограничений на структуру и способы соединения. Разработан алгоритм расчета надежности методом Марковских цепей для третьего этапа с учетом перехода из одного режима (состояния) в другой. Алгоритм позволяет выполнять и обратную задачу на ЭВМ моделировать различные состояния БЛА в зависимости от задаваемых параметров надежности.

Сверхзвуковой беспилотный летательный аппарат, алгоритм, морское базирование, качество, конструкция; оценка надежности, метод Марковских цепей, матрицы, моделирование.

A.S. Boldyrev, L.S. Verevkina, A.L. Verevkin**ASPECTS OF THE QUALITY AND RELIABILITY OF A SUPERSONIC
DRONE-BASED MISSILES, SEA-BASED**

The article is devoted to the problem of realization of the supersonic unmanned aerial vehicle (UAVS) corresponding to modern requirements. The problem of choosing the design and prototype of a supersonic unmanned aerial vehicle is considered. On the basis of the analysis of tactical characteristics of modern over sonic aircraft such as: UAV XQ-222 Valkyrie ("Valkyrie"), UAV D-21V(D-21A), aircraft unmanned scout 123 aftershock. new rocket Meteor Maritime and aviation 3M25 option option 3M25A, defined the parameters and characteristics of a supersonic UAV. To ensure the quality and reliability of the proposed unique technical solutions: hull, folding wings, radar protection, models of the processes of aeroelasticity of the wing, steering program and control system of the unmanned aerial vehicle. The prototype of the Russian development - a Meteorite cruise missile-meets the stated requirements. The fundamental differences and limitations to ensure the reliability of missiles and UAVS. It is shown that it is necessary to take into account different operating modes and States of electronic systems in calculating reliability parameters. The proposed method and algorithm of reliability evaluation for different operating modes using a matrix of probabilities of States and matrices of the intensities of state changes.

A three - stage method of solving the problem is proposed-evaluation of the reliability of a supersonic unmanned aerial vehicle. At the first stage, the structural parts, modes and operating conditions are determined and the reliability parameters are calculated by the traditional method. In the second stage, calculations are performed taking into account the reservation. In the third stage, calculations are performed taking into account the processes of transition from one mode to another. The Markov chains method, probability theory and matrices are used, the latter do not impose any restrictions on the structure and connection methods. An algorithm for calculating the reliability of Markov chains method for the third stage, taking into account the transition from one mode (state) to another. The algorithm allows you to perform and reverse the problem on the computer to simulate different States of UAVS, depending on the specified reliability parameters.

A supersonic unmanned aerial vehicle, algorithm, sea-based, quality, design, reliability estimation, the method of Markov chain matrices, modeling.

Введение. Для большой территории РФ необходимо использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для осмотра береговых линий, обнаружения терпящих бедствие кораблей, обследования состояния протяженных прибрежных вод, объектов военной инфраструктуры. Например, в Арктике эскадрилья Северного флота имеет на вооружении комплекс "Форпост" – три БЛА с радиусом действия до 250 км и мобильный комплекс "Орлан-10" четыре БЛА, дальность действия – 120 км [1]. Однако расстояния 120–250 км – это не решение проблем контроля столь обширной береговой и морской территории. Сверхзвуковые БЛА, на базе крылатых ракет, позволяют за один час времени, как на большой высоте, так и на малой, пролететь расстояние более 3000км. Использование сверхзвуковых беспилотных летательных аппаратов наиболее эффективно в Арктике и океане.

В настоящее время и зарубежными компаниями разрабатываются проекты сверхзвуковых беспилотных летательных аппаратов. Американская компания Kratos Defense & Security Solutions, Inc. на авиасалоне в Ле Бурже в июне 2017 года продемонстрировала сверхзвуковой беспилотный летательный аппарат (БЛА) XQ-222 Valkyrie («Валькирия», рис. 1). Новый класс БЛА: «XQ-222 обладает высокой скоростью и маневренностью, наряду с возможностью нести средства разведки и наблюдения, а также оружия». Дрон может разогнаться до сверхзвуковой скорости, его первый полет запланирован на 2018 год [2–5]. Малая цена XQ- БЛА 222 Valkyrie 2–3 млн. долларов США позволяет продавать его войскам в большом количестве, так как боевой самолет обходится в 50–100 млн долларов США. Из прессы стало известно, что эти дроны хочет приобрести Индия... [4]. Известные и предполагаемые авторами статьи технические характеристики БЛА Валькирия приводятся в табл. 1. Примечательно, что девятиметровая «Валькирия» стоит сравнительно недорого и поэтому новые беспилотники могут массово применяться в поддержке авиации. Например, их возможно использовать в качестве отвлекающих целей (рис. 1) для вражеской ПВО.



Рис. 1. Сверхзвуковой беспилотный летательный аппарат (БЛА) XQ-222 Valkyrie («Валькирия») и группа в полете

Описание технических характеристик сверхзвуковых БЛА. В данной статье рассматривается вопрос реализации сверхзвукового БЛА [5] на базе крылатой ракеты и предлагаются технические решения необходимые для обеспечения надежной работы дрона. На примере рассекреченной и представленной на международном авиасалоне МАКС-2007 крылатой сверхзвуковой ракеты (СКР) «Метеорит» показана возможность реализации в России такого БЛА. Наиболее близкие летно-технические характеристики ракеты «Метеорит» имел американский беспилотный разведывательный летательный аппарат D-21B. Который 9 ноября 1969, после выработки топлива, упал на нашей территории и доставлен был в КБ Туполева [6].

Для ракеты «Метеорит» была разработана эродинамическая схема «утка» с треугольным крылом, передними горизонтальными рулевыми поверхностями (дестабилизаторами) и вертикальным оперением внизу хвостовой части фюзеляжа. С целью уменьшения габаритов ракеты, для размещения на носителях, крылья и киль были выполнены складными. В хвостовой части фюзеляжа размещался маршевый турбореактивный двигатель. В качестве входного устройства двигателя использовался плоский регулируемый подфюзеляжный воздухозаборник. Ракета морского базирования помимо маршевого двигателя имела стартово-разгонную ступень, состоящую из двух жидкостных ракетных двигателей.

Тактико-технические характеристики американского БЛА D-21B, ракеты Метеорит и аналога БЛА – самолета приводятся в табл. 1 [5–10].

Таблица 1

Тактико-технические характеристики сверхзвуковых БЛА, ракет и самолета

Параметр	Самолета 123" aftershock.new	БЛА XQ-222 Valkyrie («Валькирия»)	БЛА D-21B (D-21A)	Ракета Метеорит	
				Морской вариант 3M25	Авиационный вариант 3M25A
Длина, м	27,83	9	13,1	12,5	12,8
Размах крыла, м	8,41		5,8	5,1	5,1
Масса стартовая, кг	35610		12000	12650	
Масса маршевой ступени (крылатой ракеты), кг	топлива – 16600		5000	6380	6300
Дальность действия, км	3,680	5,500	5,550	5,000	5,000
Скорость маршевая, км/ч (М)	2700(2.5M)	(4,5M)	(3,2–3,5 M)	3500(2.5–3M)	3000
Высота полета, км	22,8; в конце маршевого участка – 19	20–40	29	20	22-24

Технические решения необходимые для обеспечения надежной работы сверхзвукового БЛА. Носитель ракеты «Метеорит» – самолёты, корабли, подводные лодки, и наземные пусковые установки. Продолжительность полета – более

1 часа. Ракета была разработана более 25 лет назад и готова к серийному производству, однако не поступила на вооружение из-за ратификации СССР договора о ракетах средней дальности.

По мнению военных экспертов и разработчика СВЧ устройств этой ракеты (соавтора этой статьи Веревкиной Л.С.), проект, доведенный до серийного производства, можно реанимировать, как сверхзвуковой беспилотный летательный аппарат. Современные средства электроники и вычислительной техники позволяют это сделать. Массу боевой части – можно заменить средствами контроля и мониторинга.

Уникальные и оригинальные системы ракеты «Метеорит» актуальны и для нового поколения сверхзвуковых БЛА. Для сверхзвуковых БЛА можно использовать следующие технические решения ракеты «Метеорит-А»:

1) ракета «Метеорит-А» летит к цели на предельно малых высотах с дозвуковой крейсерской скоростью. И при испытаниях возвращалась без разрушения к месту пуска [8] (рис. 2) приводнялась и приземлялась потому, что коротко ресурсный ТРД КР-23, способен работать в широком диапазоне полетных условий: скорость от 0,4 до 3 М и высота от 0 до 24 км.

3) разработанная на ЭВМ точная математическая модель процессов аэроупругости крыла, и эффективная программа работы рулей позволяет осуществлять траекторное управление полетом.

4) для преодоления «горла транзвука» и дальнейшего разгона ракеты и увеличения тяги разработан чрезвычайный режим работы маршевого двигателя и определены требования к качеству обработки поверхности ракеты;



Рис. 2. Маршрут испытаний и особенности складных крыльев ракеты «Метеорит-А»

5) специальное устройство формирует шлейф ионизированного воздуха генератора пучка электронов, который препятствует точному наведению на нее наземных зенитных ракет;

6) для радиолокационной защиты использовались радиопоглощающие материалы;

7) внутри канала воздухозаборника двигателя установлена специальная переотражающая решетка. На радарх ракету Метеорит не было видно и в тепловом спектре излучения;

8) при обстреле ракета выбрасывала ложную цель из контейнера и буксировала на длинном тросе, для плавной размотки которого использовались амортизаторы и вязкий герметик. Этот механизм можно использовать для посадки путем выбрасывания парашюта.

Разработанная теория управления полетом ракеты позволяет ей двигаться по замкнутой траектории. Теория управления такими БЛА с максимальной площадью охвата наземной поверхности приводится в [11].

Режимы работы и оценка надежности сверхзвуковых БЛА. Сверхзвуковой БЛА на базе ракеты Метеорит функционирует в нескольких режимах работы:

- ◆ предстартовой подготовки и ввода полетного задания и посадки
- ◆ разгон ракеты до скорости $>1M$ и сбрасывание отсека со стабилизатором;
- ◆ включается РДТТ раскрутки (турбостартер) маршевого ТРД;
- ◆ турбина выходит на чрезвычайный режим (форсаж) и работает в этом режиме в процессе разгона – в течение нескольких десятков секунд;
- ◆ маршевый режим.
- ◆ режим посадки

С целью компенсации потери дальности при таких режимах работы на маршевой ступени использовался новый тип высокоэнергетического синтетического топлива, которое обеспечивает заданную дальность полета. На рис. 3 показана конструкция беспилотника на базе ракеты Метеорит [5].

Степень стартового разгона, как у морской, так и наземной ракеты одинаковы. Степень стартового разгона устанавливается под ракетой с двумя ЖРД. РД-0242 обеспечивает общую тягу 24 тонны и имеет управляемые поворотные сопла. Для вывода из под воды используются 2 стартовых РДТТ. Двигатели ступени – модернизированные двигатели первой ступени от межконтинентальной «15А20 / УР-100К». Система пневмогидравлики очень похожа на аналогичную от баллистической ракеты подводного старта Р-29 (4К75). Боевое время работы ступени – 32 секунды [5].

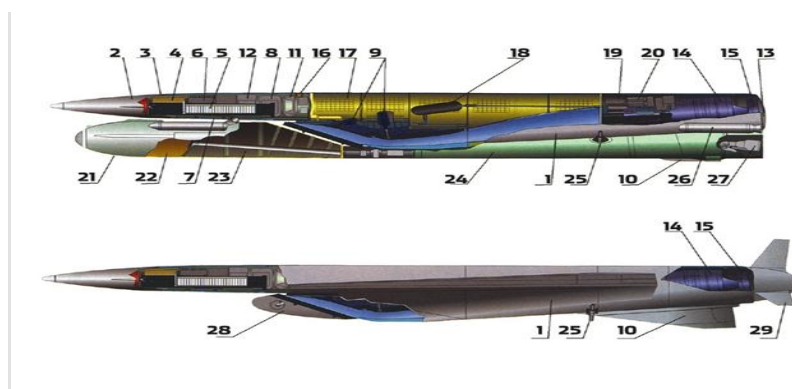


Рис. 3. Сборочный чертеж сверхзвукового БЛА морского и авиационного варианта на базе ракеты «Метеорит-А» [12]

Маршевая ступень: 1 – планер; 2 – отсек мониторинга и контроля или боевого снаряжения; 3 – отсек бортовой системы управления; 4 – система корректировки траектории полета с наведением по радиолокационным картам местности; 5 – антенна СНРК; 6 – бортовой цифровой управляющий комплекс; 7 – доплеровский измеритель скорости; 8 – блок силовых коммуникаций; 9 – электрогидравлическая система управления воздухозаборником; 10 – вертикальное оперение; 11 – агрегаты системы терморегулирования; 12 – комплекс командных приборов; 13 – обтекатель донный; 14 – маршевый двигатель; 15 – твердотопливный турбостартер; 16 – электроразъем связи с носителем; 17 – топливный бак маршевой ступени; 18 – питательный бак; 19 – агрегаты пневмогидравлической системы; 20 – электрогенераторы, стартово-разгонная ступень: 21 – передний блок СРС; 22 – бак «Г»; 23 – бак «0»; 24 – задний блок стартово-разгонной ступени; 25 – силовой цилиндр автомата раскрытия крыла; 26 – стартовый пороховой ракетный двигатель; 27 – жидкостный ракетный двигатель СРС; 28 – обтекатель воздухозаборника; 29 – обтекатель хвостовой.

Уфимское КБ машиностроения разработало короткоресурсный ТРД КР-23, способный работать в широком диапазоне полетных условий: скорость от 0,4 до 3 М и высота от 0 до 24 км [13, 14].

Постановка задач оценки надежности сверхзвукового БЛА. Для сверхзвукового БЛА многократного использования более жесткие требования к параметрам надежности электронных средств, чем для одноразового использования ракеты. Для разных условий работы и хранения и режимов работы сверхзвукового БЛА необходимо определять параметры надежности: интенсивность отказов, наработку на отказ, графики вероятности безотказной работы, время восстановления и время периодических ремонтов и технического обслуживания [15, 16].

В настоящее время расчеты надежности электронных систем БЛА выполняются разработчиками устройств [17, 18] разных предприятий, без учета времени и режимов работы БЛА и не дается комплексное наглядное представление параметров надежности. А ведь БЛА может быть на хранении, в полете на разные расстояния и в разных режимах и условиях, что необходимо учитывать и при проектировании и при эксплуатации.

Как следует из теории управления БЛА [19], их полеты могут быть разной продолжительности, и переход из одного состояния в другое, также может быть случайной величиной. При необходимости учета процессов перехода из одного состояния в другое, из одного режима работы оборудования в другой, расчеты надежности еще более усложняются. Предлагается использовать для расчета надежности, матрицы, такой подход не накладывает никаких ограничений на структуру и способы соединения. В этом его достоинство.

Последовательность режимов работы сверхзвукового БЛА и сам процесс переходов из одного состояния в другое называется цепью.

В настоящее время наиболее изучены цепи, обладающие марковским свойством. Вероятности переходов обозначаются символами $P_{ij}(t)$, а процесс P_{ij} переходов называется Марковской цепью или цепью Маркова. Цепь Маркова предполагает отсутствие последствия – состояние в будущем зависит только от состояния в настоящее время, и не зависит от того каким образом достигнуто это состояние. Такой подход позволяет описывать последовательности состояний отказов или восстановлений систем, посредством графа.

Для расчета надежности БЛА предлагается применять метод Марковских цепей с непрерывным временем, и состояния сложной системы представлять дифференциальными уравнениями в матричной форме [20]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = P(t) * \Lambda,$$

где $P(t) = P_0$ – начальные условия;

$$\frac{dP(t)}{dt} = \left[\frac{dP_1(t)}{dt} * \frac{dP_2(t)}{dt} \dots \frac{dP_k(t)}{dt} \right];$$

Λ – матрица интенсивности переходов (матрица коэффициентов вероятностях состояний)

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^n \lambda_{1i} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1i} \\ \lambda_{21} & -\sum_{i=1}^n \lambda_{22} & \dots & \lambda_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \dots & -\sum_{i=1}^n \lambda_{ni} \end{pmatrix},$$

$$\lambda_{i.} = -\sum_{j=1}^n \lambda_{ij},$$

где λ_{ij} – интенсивности перехода системы из i -го режима в j -q; P_j – вероятность того, что система находится в j -м режиме.

Расчет надежности сложных резервируемых и восстанавливаемых систем методом Марковских цепей при большом числе состояний структурных элементов комплекса требуются сложные вычисления. Для однотипных систем работающих в одних и тех же режимах и одинаковых условиях, с целью уменьшения числа состояний используется метод укрупнения. Состояния с одинаковым количеством систем, объединяются что позволяет, уменьшать размерность уравнений [20]. Алгоритм оценки надежности резервируемых и восстанавливаемых систем БЛА посредством метода Марковских цепей с непрерывным временем показан на рис. 4:

Описание переменных

Составляется структурная схема надежности.

Приводятся все режимы работы и состояния. Определяют состояние устройств, для каждого режима работы БЛА,

Строят граф состояний – в каждом режиме работы определяют системы и элементы соответствующие рабочему или выключенному состоянию.

Составляют систему дифференциальных уравнений Колмогорова вероятностей состояний для каждого режима БЛА.

Предельная вероятность режима, в котором находится БЛА S_i , показывает, среднее относительное время пребывания БЛА в этом режиме. Например, если предельная вероятность $p_0 = 0,5$ БЛА в режиме хранения S_0 , то это означает, что в среднем половину времени БЛА находится в режиме хранения S_0 .

$$\begin{cases} p'_0 = \lambda_{10}p_1 + \lambda_{20}p_2 - (\lambda_{01} + \lambda_{02})p_0, \\ p'_1 = \lambda_{01}p_0 + \lambda_{31}p_3 - (\lambda_{10} + \lambda_{13})p_1, \\ p'_2 = \lambda_{02}p_0 + \lambda_{32}p_3 - (\lambda_{20} + \lambda_{23})p_2, \\ p'_3 = \lambda_{13}p_1 + \lambda_{23}p_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{32})p_3; \end{cases}$$

Записывают начальные условия, для решения задачи полагая, что предельные вероятности режимов БЛА постоянны, заменяют в системе уравнений Колмогорова производные нулевыми значениями, получают систему линейных алгебраических уравнений стационарного состояния. Для БЛА с четырьмя основными режимами функционирования, системы уравнений приводятся в алгоритме на рис. 4.

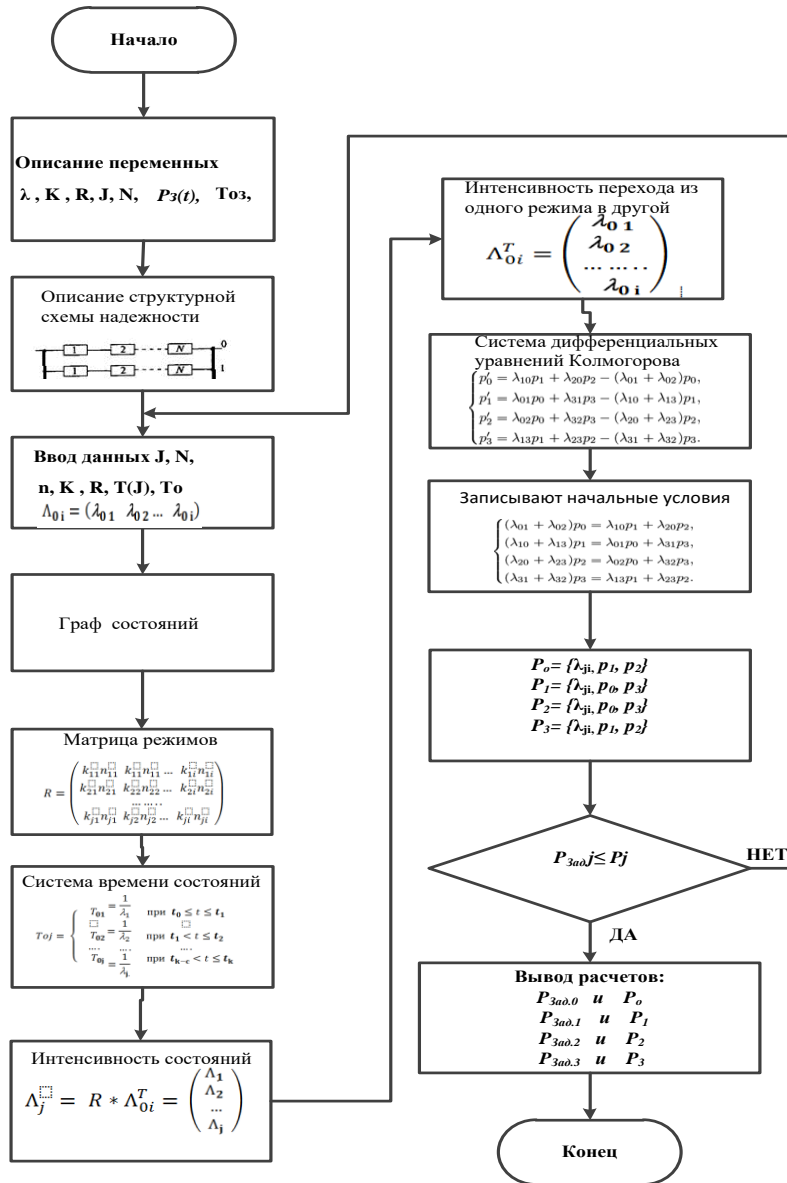


Рис. 4. Алгоритм оценки надежности резервируемых и восстанавливаемых систем БЛА посредством метода Марковских цепей

$$\begin{cases} (\lambda_{01} + \lambda_{02}) p_0 = \lambda_{10} p_1 + \lambda_{20} p_2, \\ (\lambda_{10} + \lambda_{13}) p_1 = \lambda_{01} p_0 + \lambda_{31} p_3, \\ (\lambda_{20} + \lambda_{23}) p_2 = \lambda_{02} p_0 + \lambda_{32} p_3, \\ (\lambda_{31} + \lambda_{32}) p_3 = \lambda_{13} p_1 + \lambda_{23} p_2; \end{cases}$$

Определяются вероятности нахождения БЛА в работоспособном состоянии в произвольный момент времени.

Определяется вероятность безотказной работы системы.

В случае необходимости определяются и другие показатели.

Выводы. Реализация сверхзвукового БЛА морского и авиационного варианта на базе ракеты «Метеорит-А» возможна и по своим техническим характеристикам соответствует мировым образцам техники и не потребует значительных расходов на разработку.

Для обеспечения надежности работы устройств, сверхзвукового БЛА необходимо использовать обозначенные в статье уникальные и не имеющие аналогов технические решения крылатых ракет.

В связи с многократным использованием БЛА в разных режимах при эксплуатации необходима комплексная оценка надежности и наглядного представления параметров надежности всех систем в разных режимах. Приведенный алгоритм оценки надежности реализован с использованием матриц методом Марковских цепей с непрерывным временем, с учетом вероятности перехода из одного режима работы в другой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://aviation21.ru/bespilotniki-severnogo-flota/>.
2. <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/594f7cfb9a79470ea208e2dd>.
3. <https://topwar.ru/118914-amerikanskiy-sverhzvukovoy-bespilotnik-vaikiriya.html>.
4. https://rueconomics.ru/256440-ssha-predstavili-sverhzvukovoi-bespilotnik-vaikiriya#from_copy.
5. <http://alternathistory.com/raketa-3m25-meteorit-nesostoyavsheesya-superoruzhie-rossii>.
6. <http://www.testpilots.ru/tp/hard.htm>. Настоящие сверхзвуковые.
7. <http://military.tomsk.ru/blog/topic-406.html>.
8. <http://www.kbkha.ru>. Настоящие сверхзвуковые.
9. <http://www.testpilots.ru/tp/hard.htm>. "Ракетная техника" – информационная система.
10. *Широкорад А.Б.* Огненный меч Российского флота. – М.: Изд-во "Яуза", Изд-во "Эксмо", 2004. – 416 с.
11. *Якубович Н.* Боевые самолеты Туполева. – М.: Изд-во "Яуза", Изд-во "Эксмо", 2010. – 528 с.
12. *Кавелькина В.В., Голов М.А., Шумакова И.В. и др.* 60 лет в строю полигон Капустин Яр (1946–2006). – М., 2006. – 150 с.
13. Асанин В. Ракеты отечественного флота // Техника и вооружение. – № 10/2006. – №№ 6, 9/2007. № 6/2009.
14. Конструкторское Бюро Химавтоматики. – <http://www.kbkha.ru>.
15. *Веревкина Л.С., Алтатова О.В., Веревкин А.Л.* Стадии разработки и уровни расчета надежности. Всемирный технологический университет ЮНЕСКО. Московский технологический институт // Материалы международного форума. Вып. 2. «Человек в современном мире». – Росто-на-Дону: Гинго, 2014. – С. 308-312.
16. *Пищопов В.Х., Веревкина Л.С., Веревкин А.Л.* Проектирование электротехнических устройств: учеб. пособие. Ч. 1. Стадии проектирования. Техническое задание. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 50 с.
17. *Веревкина Л.С., Шульженко Д.Ю., Жуков В.В., Веревкин А.Л.* Оценка надежности многофункциональной системы управления беспилотным устройством в режиме наземного движения // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2017): Сб. трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, (06-08 декабря 2017 г.). – Южный федеральный университет. Т. 1. – С. 194.
18. *Веревкина Л.С., Гуска А.А., Андрющенко А.В., Веревкин А.Л.* Анализ и оценка надежности источников бесперебойного питания с зарядкой и без подзарядки аккумуляторов. Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2017): сборник трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, (06-08 декабря 2017 г.). Южный федеральный университет. – Т. 1. – С. 116-194.
19. *Моисеев В.С.* Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013 (Серия «Современная прикладная математика и информатика»). – 768 с.
20. <http://baumanki.net/lectures/10-informatika-i-programmirovaniye/350-nadezhnost-informacionnyh-sistem/4739-11-markovskie-modeli-dlya-ocenki-nadezhnosti.html>.

УДК 007:621.865.8

Н.А. Рудянов, В.С. Хрущев

**ФОРМИРОВАНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ
К РАЗРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ
ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
РОБОТИЗИРОВАННОГО ВООРУЖЕНИЯ**

На основе анализа требований к вооружению и военной технике Сухопутных войск и особенностей роботизированных комплексов показано, что требуется разработка специфического подхода при формировании тактико-технических требований, разработке и эксплуатации наземных РТК военного назначения, это связано с тем, что компоненты робототехники обладают разной динамикой развития. Существующие в настоящее время дистанционно-управляемые РТК имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений, основными из которых в условиях боевых действий являются повышенные требования к каналу связи, ограниченный радиус действия, демаскировка объекта и пункта управления, а также возможность применения средств радиоэлектронного и огневого противодействия вследствие интенсивного радиообмена. Повышение автономности заключается в последовательном переходе сначала от существующих в настоящее время простейших систем дистанционного управления к интеллектуальным системам дистанционного управления, обеспечивающим повышенную информативную осведомленность оператора и выполняющим часть его функций, а затем – к интеллектуальным системам автономного управления, обеспечивающим автономное функционирование. Интеллектуальные системы являются основанными на знаниях, являющихся основой как распознающих систем, так и систем принятия решений. Предлагается привлекать инженеров по знаниям во время опытно-войсковой эксплуатации для формирования опытным путем правил боевого применения робототехнических комплексов, формализации полученных знаний для последующей автоматизации процессов принятия решений и формирования интеллектуальных систем РТК военного назначения. Показано, что для постоянного поддержания информационно-управляющей системы РТК на уровне соответствующему передовому на текущий момент времени, эффективному применению наземных РТК ВН и их эксплуатации необходимо создание специальной робототехнической службы.

Робототехнический комплекс, интеллектуальная система управления, базы знаний, робототехническая служба.

N.A. Rudianov, V.S. Hrushev

**FORMATION OF TACTICAL AND TECHNICAL REQUIREMENTS
FOR THE DEVELOPMENT OF ADVANCED ROBOTIC COMPLEXES
FOR MILITARY USE, TAKING INTO ACCOUNT THE FEATURES
OF IMPLEMENTING THE LIFE CYCLE OF ROBOTIC WEAPONS**

Based on the analysis of the requirements for armament and military equipment of the Ground Forces and the features of the robotic complexes, it is shown that the development of a specific approach in the formation of tactical and technical requirements, the development and operation of ground-based military hardware is required, this is due to the fact that the components of robotics have different dynamics of development. The currently existing remote-controlled RTKs have a number of fundamental shortcomings and limitations, the main ones of which in the context of combat operations are increased requirements to the communication channel, limited range, unmasking of the object and control point, and the possibility of using electronic and fire countermeasures due to intensive radio communication. Increase of autonomy consists in a consistent transition from the currently existing simplest remote control systems to intelligent remote control systems, providing increased informative awareness of the operator and performing some of its functions, and then to intelligent autonomous control systems that provide autonomous oper-

ation. Intellectual systems are knowledge-based systems that are the basis of both recognition systems and decision-making systems. It is proposed to involve engineers in knowledge during the pilot military operation to formulate by experience the rules of combat use of robotic complexes, formalize the knowledge acquired for the subsequent automation of the decision-making processes and the formation of intellectual systems of the military-type military hardware. It is shown that for the constant maintenance of the information and control system of the RTK at the level appropriate to the advanced at the current time, the effective use of ground-based RTK VN and their operation, it is necessary to create a special robotic service.

Robotic complex, intelligent control system, knowledge base, robotics service.

Введение. Современный этап развития военной робототехники характеризуется переходом от разработки экспериментальных образцов наземных РТК к серийному производству и освоению в войсках различных типов боевых и обеспечивающих образцов роботизированных ВВТ [7, 10, 11, 20, 21]. В ближайшее десятилетие наземные РТК военного назначения будут составлять значительную долю численности вооружения и военной техники Сухопутных войск.

Робототехнические комплексы в составе комплектов вооружения Сухопутных войск должны удовлетворять следующим основным требованиям [1, 3]:

- ◆ возможность круглосуточного применения РТК СВ в условиях огневого, радиоэлектронного и информационного противодействия;
- ◆ сохранение работоспособности РТК СВ в условиях внешних воздействующих факторов (метеорологических, радиационного и химического заражений, электромагнитного излучения);
- ◆ модульность – возможность укомплектования функциональными элементами в соответствии с поставленной задачей;
- ◆ многофункциональность, совместимость, возможность интеграции в существующие и перспективные структуры ВС РФ;
- ◆ способность к самостоятельному выполнению задач в условиях неопределенности внешней обстановки (наличие интеллекта);
- ◆ применение единых с ЕСУ войсками и оружием принципов построения системы связи и передачи данных;
- ◆ возможность управления РТК СВ и приема информации от них при прямой радиовидимости, а также с использованием ретрансляторов, космических аппаратов связи военного и двойного назначения, пилотируемой авиации, БЛА, аэростатов;
- ◆ обеспечение электромагнитной совместимости, а также группового информационного обмена между РТК СВ при выполнении задач в едином районе боевого управления в составе смешанной группы, в том числе с экипажными образцами ВВТ;
- ◆ использование высокоскоростных, широкополосных, помехоустойчивых, защищенных каналов связи для передачи данных и приема команд управления;
- ◆ возможность одновременного применения и управления требуемым количеством РТК СВ;
- ◆ обеспечение дистанционного, автоматического (программного) и автоматизированного (с контролем оператора) управления РТК СВ и его целевой нагрузкой;
- ◆ оснащение интегрированной бортовой навигационной аппаратурой потребителя спутниковых систем навигации типа GPS, ГЛОНАСС и др.;
- ◆ оснащение комплексов РТК СВ аппаратурой государственного опознавания «свой-чужой»;
- ◆ унификации процессов обслуживания комплексов, а также обучения боевых расчетов;
- ◆ наличие в составе робототехнических комплексов программно-аппаратных средств, обеспечивающих тренажную подготовку и обучение операторов боевых расчетов.

Особенности формирования требований с учетом жизненного цикла автономных РТК с интеллектуальной информационно-управляющей системой. При этом роботизированное вооружение в силу особенностей ряда своих составных частей требует специфического подхода при формировании тактико-технических требований, разработке и эксплуатации ВВТ. Так, в ряде работ [2] подчеркивается, что компоненты робототехники обладают разной динамикой развития, в первую очередь высокой – алгоритмическое обеспечение, сенсоры и источники электроснабжения. Разработка РТК по требованиям, предъявляемым к ВВТ Сухопутных войск занимает значительное время, проходит ряд обязательных этапов, включая предварительные и Государственные испытания. Как показывает опыт, даже за это время высокотехнологичные элементы РТК успевают устаревать. Это касается, прежде всего, информационно-управляющей системы и системы связи.

Если речь идет об образцах роботизированной бронетанковой военной техники, срок эксплуатации которых рассчитан на несколько десятилетий и подразумевающих внесение существенных изменений в конструкцию только при глубокой модернизации, то поддержание информационно-управляющей системы РТК на уровне, соответствующем передовому на текущий момент, вступает в противоречие с существующими процедурами, определенными Государственными стандартами.

Возникает острая необходимость исследовать проблему планирования модернизации еще на этапе разработки РТК на основе сочетания агрегатно-модульного и функционально-модульного способа построения комплексов [2] и определить перечень и порядок принятия организационных мер.

В [5] показано, что существует ряд факторов, которые следует учитывать для обеспечения требуемого уровня надежности боевого РТК (применительно к комплексам с БЛА) в ходе его разработки. К факторам, учет которых позволит существенно сократить затраты на надежность и, соответственно, снизить стоимость комплекса, относятся: снижение влияния фактора безопасности полета, что исключает необходимость задания такого же высокого уровня безотказности для БЛА, как и для пилотируемых ЛА; существенно более низкий требуемый технический ресурс БЛА, значительно уступающий техническому ресурсу любого пилотируемого ЛА, в пределах которого должен быть обеспечен заданный уровень безотказности; значительно менее жесткие условия эксплуатации БЛА по сравнению с пилотируемыми ЛА, что обеспечивает изначально более высокий уровень безотказности без применения специальных мер ее повышения. Подобные же тенденции прослеживаются и для наземных РТК. Необходимо учитывать целесообразную планируемую кратность применения и соответствующего технического ресурса с учетом ограничений, связанных с условиями боевого применения РТК, в особенности предусматривающих однократное применение и в соответствии с этим определять требования к надежности, долговечности, стоимости и др. элементов комплексов.

Существует еще одна особенность роботизированного вооружения, которая повлечет за собой существенные изменения в порядок разработки и эксплуатации ВВТ. Хотя эта особенность касается РТК с высокой степенью автономности, которые появятся на снабжении не в самое ближайшее будущее, бурное развитие интеллектуальных систем, а главное труднопреодолимые недостатки дистанционно-управляемых РТК, позволяет прогнозировать их появление уже в обозримом будущем.

Как показано в [22] все разработанные и принятые на снабжение в настоящее время отечественные наземные РТК используются в режиме дистанционного управления. Опыт применения таких роботов показал их невысокую эффектив-

ность, в первую очередь – в вариантах оснащения боевыми средствами. Реально управлять боевым роботом в одиночку в условиях противоборства (особенно в условиях ближнего боя) невозможно: один оператор неспособен одновременно отвечать за движение робота, разведку обстановки, поиск и выбор цели, обстрел и оценку результатов стрельбы, принятие тактических решений [4,6,8,9,18]. Кроме того, дистанционно-управляемые РТК имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений, обусловленных необходимостью постоянного двухстороннего информационного обмена, а именно: повышенные требования к каналу связи; ограниченный радиус действия; демаскировка объекта и пункта управления; возможность применения средств радиоэлектронного и огневого противодействия, вследствие интенсивного радиобмена. Особенно остро перечисленные недостатки и ограничения проявляются в изобилующих экранированными зонами индустриально-городских средах и в зданиях, где доля проводимых спецопераций (в том числе и военных) с участием робототехнических средств неуклонно возрастает [22]. Таким образом, дальнейшее развитие отечественной военной робототехники также должно быть связано с повышением ее автономности за счет передачи функций, выполняемых человеком-оператором, бортовым средствам, что позволит снизить интенсивность информационного обмена между пунктом управления и объектом управления и даже полностью его исключить на больших промежутках времени.

Необходимо внедрение в военную робототехнику интеллектуальных систем принятия решений на этапах управления, в том числе группового, автономного движения и применения оборудования по назначению, включая вооружение.

Существующие образцы дистанционно-управляемых роботизированных машин по показателям автономности не соответствуют требованиям современного боя. В частности, они не обладают достаточной подвижностью на пересеченной местности, применяемые в них источники энергии не обеспечивают функционирование машины в течение заданного времени и не приспособлены к эксплуатации в различных климатических условиях. Существуют проблемы с построением систем автоматического вождения.

Однако, перечисленные недостатки, как правило, имеют перспективы решения в обозримом будущем техническими и технологическими методами. А вот обеспечение автономности функционирования роботов и их групп, находящихся на значительном удалении от центра управления, при выполнении ими задач по назначению связано прежде всего с разработкой интеллектуальных систем управления вооружением боевых роботов, включая все основные фазы боевой работы: поиск и обнаружение целей, оценка их важности (опасности), выбор цели для обстрела, выбор оружия и методов стрельбы, наведение оружия, стрельба, оценка результатов стрельбы и перенос огня.

Интеллектуальные системы – это системы основанные на знаниях, вне зависимости от того, получены и формализованы они традиционными способами (от экспертов, из инструкций, правил и т.п.) или в результате обучения на выборках нейросетевыми методами. Знания являются основой как распознающих систем, так и систем принятия решений.

В зависимости от перечисленных факторов, могут применяться различные методы объединения информации, среди них следующие.

Байесовская логика, позволяющая суммировать свидетельства, поступающие из различных источников, в предположении независимости (в статистическом смысле) различных источников информации и требованием определения полной группы событий. Тем не менее этот метод удобен для учета «субъективной вероятности» того или иного события, существующей у человека в зависимости от конкретных обстоятельств и может быть использован для адаптации баз

знаний при постановке перед роботом конкретной задачи. Это особенно важно, учитывая высокую степень ответственности за решение на применение оружия при отсутствии контроля со стороны человека.

В ряде случаев, особенно когда свидетельства в пользу гипотезы поступают не одновременно, удобно пользоваться известной схемой Шортлиффа для вычисления степени доверия и недоверия гипотезе при поступлении независимых свидетельств.

Метод выбора альтернатив на основе свертки критериальных оценок. Данный метод позволяет производить выбор альтернатив в случае, если заданы критерии (признаки) сравнения альтернатив и оценки альтернатив по каждому из критериев.

Метод ранжирования альтернатив при условии независимости критериев по предпочтению. Последнее требование позволяет использовать для оценки альтернативы аддитивную свертку, представляющую собой сумму оценок альтернатив по каждому из критериев.

Метод выбора альтернатив на основе нечеткого описания состояния системы и исходов. Он применяется для случаев: четких полезностей альтернатив и нечетких состояний системы; нечетких полезностей альтернатив и четких состояний системы; нечетких полезностей и нечетких состояний.

Существующие методы автоматизации процессов принятия решений в ходе боевой работы, которые являются основным содержанием систем управления вооружением РТК, частично внедренные в системы поддержки принятия решений авиационных комплексов, в принципе, позволяют создавать автономные интеллектуальные системы. Основные сложности возникают при приобретении знаний – процессе получения знаний от эксперта или каких-либо других источников и передаче их интеллектуальной системе, эффективность которой целиком и полностью зависит от качества извлеченных знаний и правильности их представления.

Несмотря на многочисленные попытки автоматизировать процессы приобретения знаний, в настоящее время и в обозримом будущем реально следующая модель приобретения знаний (рис. 1): эксперт с помощью инженера по знаниям решает задачи определения необходимости модификации или расширения знаний, и извлечения новых знаний о предметной области. Преобразованием знаний в форму понятную интеллектуальной системе занимается инженер по знаниям [12–17, 19]. Модификацию знаний производит сама интеллектуальная система, пользуясь встроенными возможностями. Таким образом, роль экспертов как носителей знаний не снижается.

При создании интеллектуальных систем управления вооружением в процессе роботизации существующего вооружения в качестве носителей знаний выступают: члены боевых расчетов комплексов, преподаватели учебных центров и военных училищ, инструкции по эксплуатации, учебники, правила стрельбы, уставы и т.п. В диалоге с инженером по знаниям создание соответствующей базы знаний и автоматических устройств на ее основе является задачей сложной, но реальной.

Автономные роботы, создаваемых изначально как безэкипажные, как правило они будут обладать комплексированной системой технического зрения, развитой информационной системой на основе датчиков различной физической природы, отсутствием подсистемы индикации и представления информации. Состав вооружения может существенно отличаться от обитаемых комплексов-прототипов, если таковые вообще будут существовать, а опыта управления, как правило, нет.

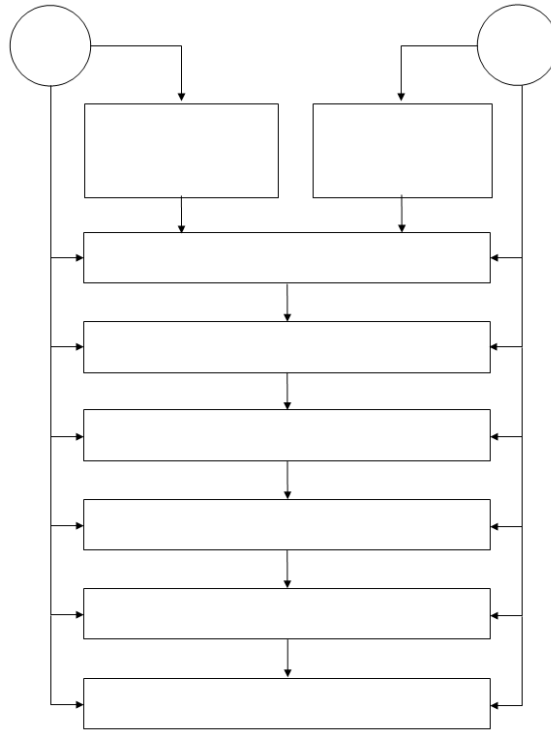


Рис. 1 Общая схема процесса приобретения знаний интеллектуальной системой принятия решений

Процесс приобретения знаний для построения интеллектуальной системы управления вооружением таких РТК может столкнуться с существенными сложностями – отсутствием экспертов, обладающих опытом принятия решений для конкретного образца вооружения, инструкций в части их боевого применения и других источников знаний о предметной области. Фактически обучать необходимо не только системы принятия решений, но и собственно учителей – экспертов. Это требует создания развитой модели внешней среды, включая противодействующего противника, описания множества боевых ситуаций и правил использования имеющегося оборудования и вооружения, алгоритмов поведения робота.

В [23] авторами предлагалось формирование баз знаний автономных РТК начинать уже сейчас, на этапе проведения опытно-войсковой эксплуатации разрабатываемых дистанционно-управляемых РТК. Целями опытно-войсковой эксплуатации РТК являются:

- ◆ определение возможности и особенностей использования образцов РТК в бою общевойсковых формирований тактического звена для мотострелковых, парашютно-десантных и разведывательных подразделений;
- ◆ первоначальное освоение РТК с оценкой его тактико-технических, эксплуатационных и боевых характеристик в дневных и ночных эксплуатационных условиях;
- ◆ отработка методики боевого применения РТК;
- ◆ оценка эффективности РТК;
- ◆ проверка работоспособности РТК и соответствия функциональности РТК требованиям Технического задания;

- ◆ фиксация сбоев, ошибок, недостатков, возникающих и выявленных в ходе опытно-войсковой эксплуатации;

- ◆ выдача рекомендаций о возможности принятия РТК на снабжение и целесообразности их промышленного производства.

Задачи, решаемые в ходе опытно-войсковой эксплуатации:

- ◆ оценка возможности обучения расчетов РТК из состава военнослужащих, проходящих военную службу по контракту;

- ◆ определение возможности и особенностей применения подразделений, оснащенных РТК, в общевойсковом бою мотострелковых, парашютно-десантных и разведывательных подразделений типа «отделение-взвод-рота-батальон»;

- ◆ оценка боевых и эксплуатационных возможностей образцов и подразделений, оснащенных РТК, в различных видах боя и различных условиях эксплуатации;

- ◆ оперативное устранение причин сбоев, ошибок, недостатков, возникающих в процессе опытно-войсковой эксплуатации;

- ◆ внесение изменений в техническую и эксплуатационную документацию по итогам опытно-войсковой эксплуатации;

- ◆ разработка методических рекомендаций по боевому применению РТК.

Таким образом, объем, привлекаемые средства и сроки (до года) ОВЭ РТК военного назначения позволяют говорить о возможности приобретения в ходе нее формализации знаний о типовых задачах функционирования, перечне, характеристиках и признаках типовых целей, последовательности действий, перечне возникающих альтернатив при принятии решений в ходе боевой работы и правилах их выбора и т.п.

Представляется целесообразным использовать этот период жизненного цикла для определения облика и формирования интеллектуальных систем принятия решений РТК военного назначения.

Для этого необходимо привлечение инженеров по знаниям во время всего цикла ОВЭ для формирования опросных листов по различным разделам этапа боевой работы с целью определения:

- ◆ типовых ситуаций применения РТК и их признаков;

- ◆ признаков целей для решения задач выбора;

- ◆ признаков ситуаций, требующих применения целевого оборудования, правила выбора той или иной целевой нагрузки;

- ◆ перечня и характеристик признаков успешности применения целевого оборудования;

- ◆ правил перехода к следующим этапам боевой работы и т.д.

Этот перечень зависит от конкретного типа РТК и его назначения. Члены боевых расчетов в ходе ОВЭ, осваивая технику и опытным путем формируя правила ее боевого применения, одновременно будут участвовать в их формализации для последующей автоматизации процессов принятия решений и формирования интеллектуальных систем РТК военного назначения.

Основными следствиями повышения автономности наземных РТК, по нашему мнению, являются:

- ◆ существенное повышение уровня помехоустойчивости РТК;

- ◆ повышение дальности применения РТК, ограничивающейся практически только ресурсами энергоустановки;

- ◆ снижение числа неправильных действий при применении РТК, вызванных ошибками человека-оператора;

- ◆ снижение количества операторов и снижение требований к операторам;

- ◆ возможность одновременного применения большого числа РТК (групповое выполнение задач);
- ◆ исключение человеко-машинного диалога из временного баланса управления, исключение задержек, вызванных преобразованием информации для оператора и временных задержек, связанных с принятием решений;
- ◆ расширение возможных областей применения РТК.

Необходимо ориентироваться на то, что основные задачи боевого, технического и тылового обеспечения должны решаться группами автономных РТК. Среди них – аудио-, видео- и инфракрасная разведка и наблюдение, повышение уровня ситуационной осведомленности, обеспечение огневой поддержки частей и подразделений и подавление огневого противодействия противника, артиллерийская разведка и обслуживание стрельбы наземной артиллерии, доставка боеприпасов, ГСМ и иных грузов подразделениям, находящимся в зоне огневого воздействия противника, организация связи и радиоэлектронного противодействия, доставка специальных технических средств, организация информационных полей путем установки необслуживаемых датчиков, имитация боевой техники (маскировка), устройство минно-взрывных заграждений под огнем противника, доставка и установка мин, доставка и применение нелетального оружия.

О необходимости организации робототехнической службы. Сформированные базы знаний систем принятия решений, как и обученные на примерах системы распознавания, построенные на нейросетевых принципах, являются принципиально открытыми системами и продолжают приобретать знания в ходе всего жизненного цикла РТК. В связи с этим необходимо быть готовыми к тому, чтобы предусмотреть процедуру передачи знаний от робота к роботу. Это подразумевает не только разработку соответствующего интерфейса, но и процедур организационного порядка. В случае массового поступления РТК в войска возникнет необходимость в штатных офицерах – инженерах по знаниям, ответственным за актуализацию программного обеспечения и баз знаний РТК ВН.

Учитывая упомянутую выше проблему постоянного поддержания информационно-управляющей системы РТК на уровне соответствующему передовому на текущий момент времени, эффективное применение наземных РТК ВН и их эксплуатация потребует создания специальной службы, условно назовем ее робототехническая служба по аналогии со службой ракетно-артиллерийского вооружения.

Служба эта должна иметь иерархическую структуру, обеспечивающую непрерывное взаимодействие разработчиков, специалистов по боевому применению, органов, осуществляющих эксплуатацию, и вплоть до отдельных расчетов РТК. Например, появление у потенциального противника новой типовой цели приводит к необходимости обучения нейросетевой распознающей системы. Приобретенные знания вносятся в текущую версию программного продукта, которая должна быть в кратчайшие сроки обновлена во всех линейных РТК. Таким же образом некоторый опыт применения автономных РТК на отдельном участке боевых действий должен быть формализован и стать достоянием всех РТК подобного типа, а может быть и класса.

Учитывая бурное развитие военной робототехники, подобная организация жизненного цикла автономных РТК не является далекой перспективой, а может стать необходимой уже в скором будущем. При этом совершенно очевидно, что требования к квалификации персонала подобной робототехнической службы являются очень высокими. Ни одно учреждение военных высших учебных заведений в настоящее время не готово к подготовке таких кадров. Специалист службы роботизации помимо обладания военно-техническими знаниями должен быть специалистом в области IT-технологий и инженерии знаний.

Заключение. Таким образом, для эффективного функционирования перспективного наземного роботизированного вооружения с высокой степенью автономности необходима организация специальной робототехнической службы и подготовка не только операторов управления РТК и командиров подразделений, оснащенных РТК, но и специалистов робототехнической службы, обеспечивающих эффективное применение РТК за счет обеспечения передового и актуального программно-аппаратного комплекса группировки РТК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шеремет И.Б., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С.* Проблемы развития роботизированного вооружения Сухопутных войск // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 21-24.
2. *Конюхов И.С.* Перспективные направления развития военной робототехники // Труды военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации», ГНИИЦ РТ. – М., 2016. – С. 77-80.
3. *Шеремет И.А., Шеремет И.Б., Рудянов Н.А.* Роботы в войсках: проблемы освоения, применения и взаимной адаптации // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу. – М., 2014. – № 3. – С. 3-8.
4. *Латишов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С.* Формирование моделей виртуальной реальности и информационно-навигационных полей для обеспечения автономного функционирования РТК специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 248-265.
5. *Волобуев М.Ф., Михайленко С.Б.* Обоснование требований к надежности боевых робототехнических комплексов ВВС // Труды военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации», ГНИИЦ РТ. – М., 2016. – С. 109-116.
6. *Латишов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С.* Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3. – С. 142-146.
7. *Попов С.А.* Создание и применение робототехники в вооруженных силах российской федерации // Труды II-й Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». – М., 2017. – С. 9-12.
8. *Шеремет И. Б., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С.* Обоснование семейства боевых и обеспечивающих роботов для боя в городе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 37-41.
9. *Шеремет И.Б., Рудянов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С.* О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения // С.-Петербург: ЦНИИ РТК. Труды Международной научнотехнической конференции «Экстремальная робототехника». – 2016. – С. 35-39.
10. *Кравченко А.Ю., Стукало Ю.Е.* Проблемы и перспективы создания робототехнических комплексов военного назначения // Материалы 8 научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Технологический институт ЮФУ, 2013. – С. 22-28.
11. *Помазуев О.Н.* Основные направления деятельности по совершенствованию работ в области роботизации ВС РФ // Труды II-й Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». – М., 2017. – С. 12-175.
12. *Станкевич Л.А., Юревич Е.И.* Перспективы создания искусственного разума в робототехнике // Известия высших учебных заведений. Машиностроение Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 13-16.
13. Искусственный интеллект. – В 3-х кН. Кн.2. Модели и методы: Справочник / под ред. Поспелова Д.А. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
14. *Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В., и др.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
15. *Лисинская Л.И., Хрущев В.С.* Оценка возможности автоматизации процессов принятия интеллектуальных решений в системах реального времени // Средства представления знаний в информационных технологиях. – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР 1992. – С. 9-13.

16. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Знание, 1990. – 184 с.
17. Кокорева Л.В., Перевозчикова О.Л., Ющенко К.Л. Диалоговые системы и представление знаний. АН Украины. Ин-т кибернетики. – Киев: Наук. Думка, 1992. – 448 с.
18. Каляев И.А., Шеремет И.А. Военная робототехника: выбор пути // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2.
19. Лохин В.М., Манько С.В., Александрова Р.И., Диане С.А.К., Панин А.С. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 8.
20. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 14-20.
21. Хриунов С.П., Благодаряцев И.В., Климов Р.С. Приоритетные направления развития военной робототехники. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – 294 с. (С. 280-286).

УДК 534.23

Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ - ШОЛТЕ
В ПРОБЛЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ОБЪЕКТОВ
В МЕЛКОМ МОРЕ**

В работе рассматриваются особенности описания и возбуждения пограничных волн Рэлея – Шолте в модельном волноводе жидкий слой - твёрдое полупространство. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований пограничных волн Рэлея – Шолте в мелком море. Особое внимание уделено интерференционным структурам, которые формируются широкополосным источником в звуковом поле, сформированном пограничными волнами Рэлея – Шолте.

B.A. Kasatkin, S.B. Kasatkin

**USE OF BOUNDARY WAVES OF THE RAYLEIGH - SHOLTE IN THE
PROBLEM OF DETECTION OF QUIET OBJECTS IN THE SHALLOW SEA**

The paper discusses the features of the description and excitation of Rayleigh-Sholte boundary waves in a model waveguide, a liquid layer-a solid half-space. The results of experimental studies of the Rayleigh-Scholte boundary waves in the shallow sea are discussed. Particular attention is paid to interference structures, which are formed by a broadband source in a sound field formed by the Rayleigh-Scholte boundary waves.

Введение. Пограничные волны различного типа всегда привлекали к себе повышенное внимание как обладающие минимальными потерями на распространение, которые соответствуют цилиндрической пространственной расходимости, и строгой локализацией на горизонте распространения. Наиболее известны и имеют практическое применение в прикладной гидроакустике и сейсмоакустике волны Рэлея, возникающие на свободной поверхности твёрдого полупространства, волны Шолте, возникающие на границе раздела жидкого и твёрдого полупространств, и волны Рэлея – Шолте, возникающие на импедансной границе раздела жидкий слой со свободной поверхностью – твёрдое полупространство. Все типы пограничных волн не имеют критической частоты и могут распространяться на любых сколь угодно низких частотах, что особенно важно в низкочастотной гидроакустике и сейсмоакустике.

Основные соотношения. Для рассмотрения пограничных волн различного типа, как регулярных, так и обобщённых, целесообразно использование несамосопряжённой модельной постановки. Несамосопряжённая модельная постановка граничных задач в акустике слоистых сред является естественным обобщением самосопряжённой модельной постановки. Особенности несамосопряжённой модельной постановки и полный анализ решений ряда граничных задач в этой модельной постановке рассмотрены нами в работах [1–2]. В настоящей работе нас будут интересовать особенности описания пограничных волн и звуковых полей, формируемых пограничными волнами различного типа. Для волны Рэлея, возникающей на свободной поверхности твёрдого полупространства, соответствующее характеристическое уравнение имеет вид [1]

$$Z_{\text{вх}}=Z_L+Z_t=0, \quad (1)$$

$$Z_L=\omega\rho(2x-1)^2/k_{3L}, Z_t=-4\omega\rho x(x-1)/k_{3t}, k_{3L}^2=k_L^2-\xi^2, k_{3t}^2=k_t^2-\xi^2, x=(\xi/k_t)^2, \xi=\omega/c_R,$$

где $Z_{\text{вх}}$ – входной импеданс твёрдого полупространства, ω, ρ – круговая частота и плотность, c_L, c_t – скорости продольных и поперечных волн в твёрдом полупространстве соответственно, ξ – постоянная распространения, c_R – скорость волны Рэлея. Уравнение (1) имеет решение в классе неоднородных расходящихся волн, амплитуда которых экспоненциально убывает при удалении от свободной поверхности ($x>1$). Для волны Шолте, возникающей на границе раздела жидкого и твёрдого полупространств, соответствующее характеристическое уравнение имеет вид [1]

$$Z_{\text{вх},2}+Z_{\text{вх},1}=0, Z_{\text{вх},1}=\omega\rho_1/k_{31}, k_{31}^2=k_1^2-\xi^2, k_1=\omega/c_1, c_{1l}=c_t/c_1, \rho_{12}=\frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{вх},1}, Z_{\text{вх},2}$ – входной импеданс жидкого и твёрдого полупространств, ρ_1, ρ_2 – плотность жидкого и твёрдого полупространств, c_1 – скорость звука в жидком полупространстве.

Среди корней характеристического уравнения (2) при всех параметрах сопряжённых сред существует один корень, соответствующий условию $x>1$ и определяющий скорость регулярной волны Шолте $c_{\text{Ш1}}$. Кроме решения, определяющего скорость регулярной волны Шолте, уравнение (2) имеет обобщённые решения, которым соответствуют обобщённые волны Шолте Lt-типа или L-типа. Обобщённая волна Шолте Lt-типа состоит из трёх неоднородных волн, расходящейся волны в жидкой среде, амплитуда которой экспоненциально убывает при удалении от границы раздела, расходящихся волн в твёрдой среде, продольной и поперечной, амплитуда которых экспоненциально растёт при удалении от границы раздела. Обобщённая волна Шолте L-типа состоит из трёх неоднородных волн, расходящейся волны в жидкой среде, расходящейся поперечной волны в твёрдой среде, амплитуда которых экспоненциально убывает при удалении от границы раздела, расходящейся продольной волны в твёрдой среде, амплитуда которой экспоненциально растёт при удалении от границы раздела. Для волны Рэлея - Шолте, возникающей на границе раздела жидкого слоя со свободной поверхностью и твёрдого полупространства, соответствующее характеристическое (дисперсионное) уравнение имеет вид [1]

$$Z_{\text{вх},2}+Z_{\text{вх},1}=0, Z_{\text{вх},1}=i\omega\rho_1\text{tg}(k_{31}h)/k_{31}, \quad (3)$$

где h – толщина жидкого слоя, $\xi=\omega/c_{\text{РШ}}, c_{\text{РШ}}$ – скорость волны Рэлея-Шолте.

Среди корней характеристического (дисперсионного) уравнения (3) при всех параметрах сопряжённых сред существуют два корня, которым соответствуют две нормальные волны, не имеющие критической частоты. В предельном случае низких частот $k_1h\ll 1$ эти волны вырождаются в волну Рэлея, а в предельном случае $k_1h\gg 1$ эти волны вырождаются в пограничные волны Шолте, регулярную и обобщённую Lt-типа или L-типа [1].

Физическая трактовка обобщённых решений. Физической основой несамосопряжённой модельной постановки является гипотеза о возможной трансформации расходящихся неоднородных волн в сходящиеся волны отдачи при отражении от импедансной границы раздела с одновременным изменением знака вертикального волнового числа. Такая операция означает переход к комплексно-сопряжённому решению, как в описании вертикальной структуры обобщённой волны, удовлетворяющей условию погашаемости, так и в описании волновой функции. Присутствие в суммарном решении собственных функций двух сопряжённых операторов означает переход к самосопряжённой модельной постановке, а само обобщённое решение непрерывно только по импедансу. Интерференционное взаимодействие двух встречных волн в окрестности горизонта источника приводит к формированию вихревой составляющей вектора интенсивности. В свою очередь, вихревая составляющая формирует периодическую структуру узловых точек, в окрестности которых давление равно нулю, и седловых точек, в окрестности которых вектор интенсивности равен нулю [3]. Такие локальные особенности названы в этой работе дислокациями фазового фронта, нарушающими фазовую структуру звукового поля.

Экспериментальные результаты. Теоретическому и экспериментальному исследованию пограничных волн Рэлея Шолте посвящено достаточно большое количество работ, краткий обзор которых приведён в работе [1, 2]. Наиболее интересна, на наш взгляд, работа [4], в которой экспериментально подтверждён факт существования обобщённых волн Шолте L₁-типа и L₂-типа. В работах [5, 6] описаны эксперименты, в которых для возбуждения волн Шолте также использован импульсный источник силы дипольного типа, расположенный на границе раздела вода – морское дно осадочного типа. При возбуждении звукового поля в волноводе широкополосным источником на низких частотах, меньших первой критической, звуковое поле формируется пограничными волнами Рэлея – Шолте, а на высоких частотах – нормальными волнами высшего порядка. На рис. 1 приведена 3D сонограмма звукового поля, создаваемого движущимся судном, в акватории со скальным дном.

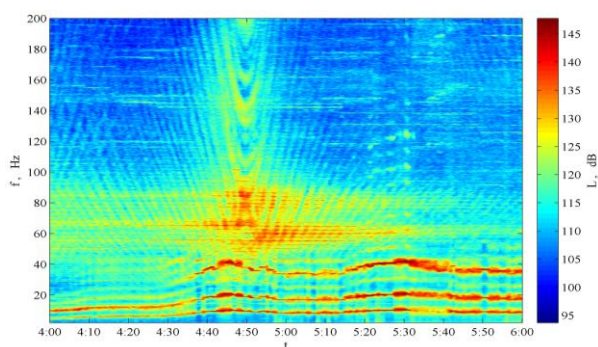


Рис. 1 Сонограмма звукового поля в окрестности траверсной точки
 $t=4\text{ час. } 50\text{ мин}$

Глубина места в районе эксперимента составляла 80 м, горизонт приёмника, в качестве которого использовался комбинированный приёмник, составлял 40 м, скорость поперечной волны в скальном грунте составляла 900–1000 м/с. Звуковое поле такого источника в области звуковых частот формируется сплошным спектром шумов обтекания, а в области инфразвуковых частот – дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР). В диапазоне частот, больших 50 Гц, в котором звуковое поле сформировано в основном нормальными волнами высшего порядка, инвариант принимает значение, близкое к единице. В этом случае ИРИ имеют вид гипербол положительной кривизны. В области инфразвуковых

частот звуковое поле сформировано дискретными составляющими ВЛЗР. Для этой части звукового поля инвариант является отрицательным. Структура звукового поля такова, что ИРИ имеют вид гипербол отрицательной кривизны.

На рис. 2 приведена сонограмма звукового поля, создаваемого двумя малошумными объектами.

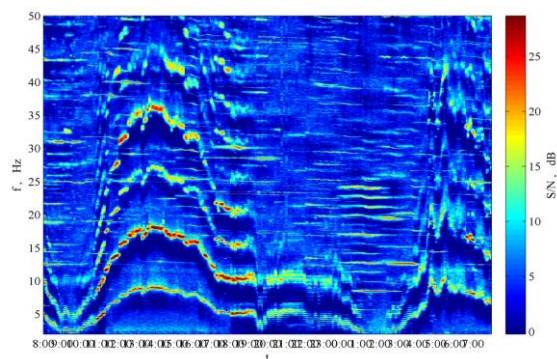


Рис. 2. Сонограмма звукового поля в окрестности траверзной точки $t=14$ час. 30 мин.

Выводы. При возбуждении низкочастотных звуковых полей в мелководных акваториях со скальным грунтом пограничные волны Рэлея – Шолте играют важную роль, т.к. для них потери на распространение являются минимальными.

В звуковом поле широкополосного движущегося источника инвариантная структура проявляется двояким образом. Для низкочастотной части звукового поля инфразвукового диапазона, которая формируется пограничными волнами Рэлея–Шолте, инвариант принимает отрицательные значения. Для высокочастотной части звукового поля звукового диапазона, которая формируется в основном нормальными волнами высшего порядка (водными модами), инвариант принимает положительные значения, близкие к единице, которые характерны для звукового поля в однородном волноводе. Уровень возбуждения пограничных волн Рэлея – Шолте экспоненциально растёт по мере приближения источника к границе раздела вода – морское дно скального типа, а потому они играют важную роль при обнаружении и классификации подводных малошумных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. – М.: Наука, 2009. – 406 с.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Вихревой осциллятор в волноводе Пекериса // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 1 (21). – С. 46-55.
3. Журавлёв В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потoki энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. – 1993. – Т. 104. – Вып. 5 (11). – С. 3769-3783.
4. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid – sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Amer. – 1999. – Vol. 106 (2). – P. 666-673.
5. Ali H.B., Bibee L.D. The influence of sediment layering and geoacoustics on the propagation of Sholte interface waves // Proc. OCEANS-93. – P. 1-105-P. 1-113.
6. Broadhead M.R. Ali H.B., Bibee L.D. Sholte waves attenuation estimates from two diverse test sites // Proc. OCEANS-93. – P. 1-114-P. 1-118.
7. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. Акустика океана. Современное состояние. – М.: Наука, 1982. – С. 71-91.

УДК 502.51:504

В.В. Горбачкий, Д.И. Дудко, Е.С. Лебедева, Н.Н. Шпилёв**ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ АНПА В ОТКРЫТОМ ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ КГНЦ**

В докладе представлены примеры изучения в открытом опытном бассейне гидрофизических полей, создаваемых маневрирующим автономным необитаемым подводным аппаратом в условиях неровности донного рельефа. Описана методика проведения измерений, применяемое оборудование и получаемые данные.

АНПА, опытный бассейн, температурные гирлянды, гидрофизические процессы.

V.V. Gorbatskiy, D.I. Dudko, E.S. Lebedeva, N.N. Shpilev**RESEARCHES OF AUV HYDROPHYSICAL FIELDS IN THE OPEN TEST BASIN**

The researches of the hydrophysical disturbances induced by AUV are presented. The investigation is carried out in Summer time in the open test basin of Krylov scientific research centre. The researches methods, the equipment and obtained data are described.

AUV, Test basin, temperature array, hydrophysics.

Предприятие ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) имеет крупномасштабный стенд для модельных исследований гидрофизических процессов в морской среде и испытаний разрабатываемой морской техники: открытый опытный бассейн (ООб). Размеры, конфигурация и общий вид чаши ООб показаны на рис. 1.

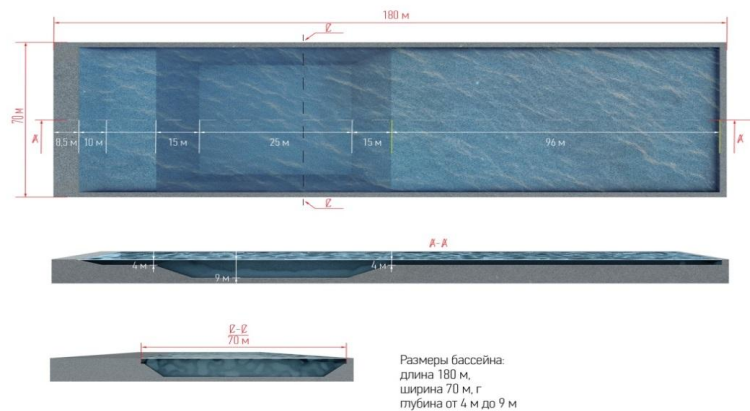


Рис. 1. Размеры и общий вид ООб

Водные массы в ООБ имеют устойчивую плотностную стратификацию, определяемую распределением температуры: летом под действием солнечного прогрева, зимой – под ледовым покровом. Это позволяет круглогодично проводить гидрофизические исследования и испытания морской техники в условиях, близких к натурным.

Выполненные в последние годы работы в рамках ОКР и договоров показали возможность использования ООБ для проведения испытаний подводной роботизированной техники, в частности АНПА лёгкого класса [1–3].

В настоящем докладе представлены примеры изучения в ООБ гидрофизических полей, создаваемых маневрирующим АНПА в условиях неровности донного рельефа.

Работа проводилась в летний период с использованием АНПА Ecomapper, многолучевого гидролокатора (рис. 2) и системы из трёх температурных гирлянд, регистрирующих возмущения температуры в толще воды (рис. 3).

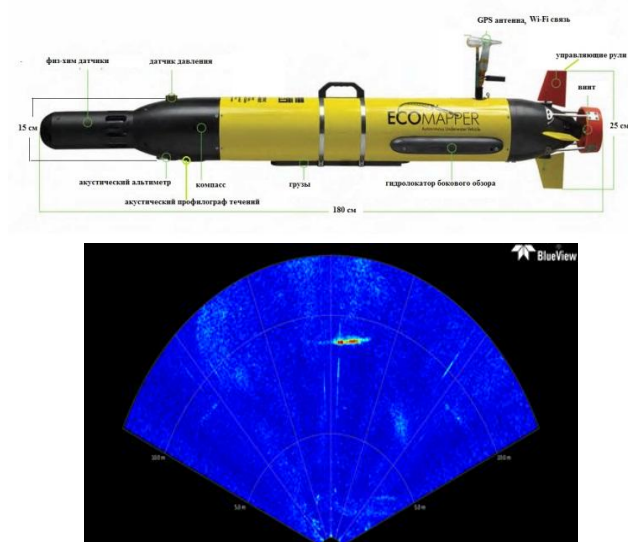


Рис. 2. Характеристики АНПА Ecomapper и картина АНПА на дисплее многолучевого гидролокатора

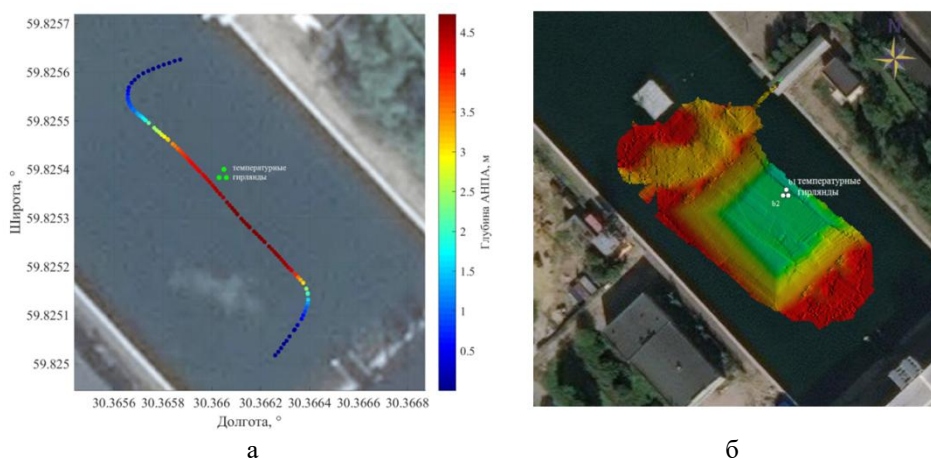
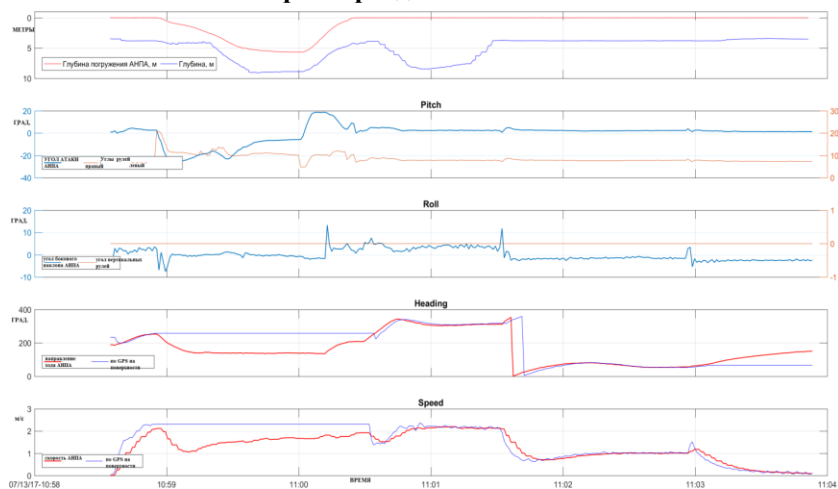


Рис. 3. Маневрирование АНПА в глубоководной части ООБ (3а) относительно подводных гирлянд температуры (3б)

Задачей исследований являлось определение возмущений поля температуры, создаваемых маневрирующим АНПА в окрестности слоя скачка температуры. В летний период вода в ООБ прогревается, и слой скачка температуры сохраняется только в глубоководной части бассейна. По этой причине, для создания возмущений поля температуры АНПА выполнял маневрирование по глубине в глубоководной части ООБ, достигая глубины, близкой к положению слоя скачка. На рис. 3,а показан пример траектории движения АНПА, где цветовая шкала указывает глубину его погружения. В табл. 1 показан пример регистрации параметров маневрирования АНПА: глубина хода, глубина акватории вдоль траектории движения АНПА, углы атаки при его маневрировании и режим работы кормовых рулей.

Таблица 1

Параметры движения АНПА



Представленные данные показывают, что АНПА при маневрировании достигал глубины на удалении от верхней границы слоя скачка около 0.8 м, что создавало возможность возникновения температурных возмущений в нижележащем слое.

Одновременно выполнялась регистрация прохода АНПА с помощью многолучевого гидролокатора, что позволяло определить точное положение АНПА относительно температурных датчиков по глубине и по дистанции.

С помощью системы из трёх гирлянд температурных датчиков, установленных на затопленных поплавках (рис. 4), проводилось измерение характеристик возмущений поля температуры, создаваемых АНПА.

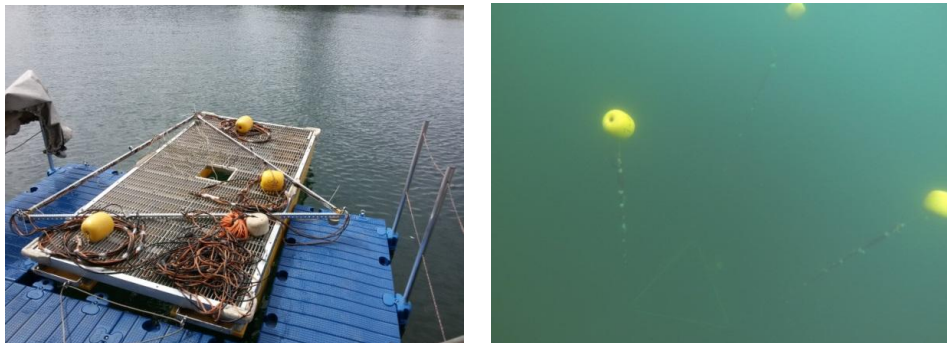


Рис. 4. Температурная гирлянда и её установка на подводных поплавках

На рис. 5 показана картина вертикального профиля температуры в период измерений, который позволяет установить глубину расположения датчиков температуры в гирляндах по измеряемым ими температурным значениям.

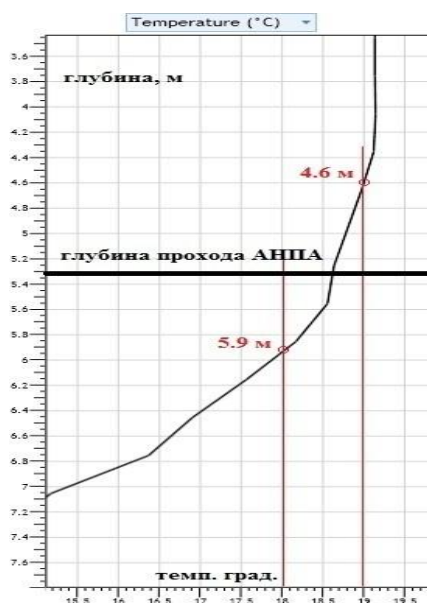


Рис. 5. Вертикальный профиль температуры в ООБ

Диапазон величин температуры на четырёх датчиках в каждой гирлянде соответствует интервалу глубин от 4.5 м до 6 м.

На рис. 6 показана область возмущений температуры после прохода АНПА на рядах измерений датчиками 3 и 4 температурной гирлянды, что подтверждает генерирование движением АНПА температурных возмущений на глубине термоклина.

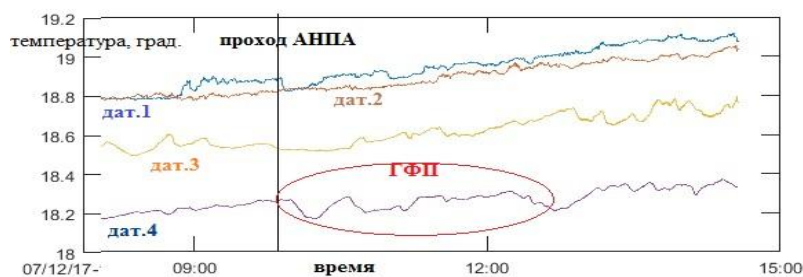


Рис. 6. Ряды температурных возмущений на датчиках гирлянды I в период прохода АНПА

Заключение. Представленные в докладе данные гидрофизических исследований в ООБ КГНЦ демонстрируют возможности этого экспериментального стенда для выполнения крупномасштабных исследований и испытаний морской подводной техники, в частности АНПА, в строго контролируемых режимах её работы и в различных гидрологических условиях. Существует возможность обеспечения сложных режимов маневрирования АНПА, контроля режима его движения и определения влияния гидрологических условий на его управляемость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воробьева Е.С., Дудко Д.И., Колмак Р.В., Федоров И.С.* Гидрофизические исследования на полунатурном стенде // Материалы конференции «МСОИ-2015». – М., 2015. – С. 141-145.
2. *Дудко Д.И., Воробьева Е.С., Колмак Р.В., Шилев Н.Н., Федоров И.С.* Особенности применения малогабаритного АНПА Есомаррег для инженерных изысканий и экологического мониторинга // Материалы конференции «МСОИ-2015». – М., 2015. – С. 75-78.
3. *Горбачкий В.В., Лебедева Е.С.* Опыт использования полунатурного гидрофизического стенда Крыловского государственного научного центра для изучения подводных роботизированных систем и автоматизированных измерительных комплексов // Сборник материалов конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону, 2016. – Т. I. – С. 201-208.

Секция технологического обеспечения систем энергетики и приводной техники РТК морского базирования

УДК 621.355 – 621.383

**С.Д. Лихоносов, Н.А. Проценко, В.П. Кульга, А.Н. Петров, И.В. Горбачева,
С.И. Щеколдин**

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПАО «САТУРН» В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

В настоящее время литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) получили наиболее широкое распространение в современной технике. Первый ЛИА был произведен корпорацией Sony в 1991 году, и к настоящему времени мировая потребность в литий-ионных источниках тока достигла 100 ГВт·ч [1]. Столь высокая динамика роста потребности в литий-ионных аккумуляторных батареях (ЛИАБ) связана с безусловными преимуществами данного типа химических источников тока (ХИТ) [2]: высокой удельной (массовой/объемной) энергией, низким саморазрядом, отсутствием необходимости частого обслуживания и удобством эксплуатации, практическим отсутствием эффекта памяти [3]. Такие критерии выбора типа автономного источника питания определяют применение литий-ионных аккумуляторов при проектировании робототехнических комплексов.

Литий-ионный аккумулятор, аккумуляторная батарея, удельная энергия, диапазон рабочих температур, мощностной аккумулятор, стартерная авиационная батарея.

**S.D. Likhonosov, N.A. Protsenko, V.P. Kulyga, A.N. Petrov, I.V. Gorbacheva,
S.I. Shchekoldin**

PROSPECTS FOR APPLICATION OF SATURN PJSC INDEPENDENT POWER SUPPLIES IN ROBOTIC SYSTEMS.

Currently, lithium-ion cells (LIC) are most widely used in modern technology. The first LIC was produced by Sony Corporation in 1991, and by now the world demand for lithium-ion current sources has reached 100 GWh [1]. Such a high growth rate of demand for lithium-ion storage batteries (LISB) is due to the obvious advantages of this type of chemical current sources (CCS) [2]: high specific energy (mass / volume), low self-discharge, no need for frequent maintenance, ease of operation, a practical absence of memory effect [3]. Such criteria for selecting an autonomous source predetermine the use of lithium-ion cells in the design of robotic complexes.

Lithium-ion cell, storage battery, specific energy, operating temperature range, power cell, starter aircraft battery.

Высокие требования специального и космического применения к удельно-энергетическим характеристикам, а так же малая серийность аккумуляторов задают использование призматической конструкции аккумулятора в производственной деятельности ПАО «Сатурн».

В настоящее время практически на всех современных космических аппаратах в системах электропитания используются литий-ионные аккумуляторные батареи разработки нашего предприятия. Работы по созданию параметрического ряд литий-ионных аккумуляторов емкостью от 10 А·ч до 120 А·ч призматической формы

и батарей на их основе на ПАО «Сатурн» ведутся с 2005 года. Активными материалами для аккумуляторов являются: положительный электрод на основе отечественного кобальтата лития (LCO), отрицательный – на основе графита (C). В различных стадиях отработки находятся системы на основе других материалов (LNCMO, LMR-NMC и др.), в том числе отечественного производства.

Первая литий-ионная аккумуляторная батарея (ЛИАБ), созданная в ПАО «Сатурн», с декабря 2008 года проходит летные испытания (летная квалификация) в составе СЭП КА «Глонасс-М». С 2013 года в составе низкоорбитального космического аппарата (КА) проходит летные испытания литий-ионная аккумуляторная батарея 4ЛИ-20, в состав которой интегрировано выравнивающее устройство. Кроме того ЛИАБ успешно эксплуатируются на ряде современных КА: Луч, Благовест, Аист-2. Несколько типов литий-ионных аккумуляторных батарей прошли полную наземную экспериментальную отработку и готовы к летным испытаниям.

ПАО «Сатурн» осуществляет развитие производства в сторону улучшения эксплуатационных характеристик ЛИАБ космического применения и расширения области применения выпускаемой продукции, с использованием полученного в космической деятельности научно-технического задела.

Совершенствование ЛИА космического применения отражено в плане модернизации ЛИА принятом на предприятии в 2016 году, по которому намечен путь повышения удельных характеристик до значений 250 Втч/кг и выше (рис. 1).

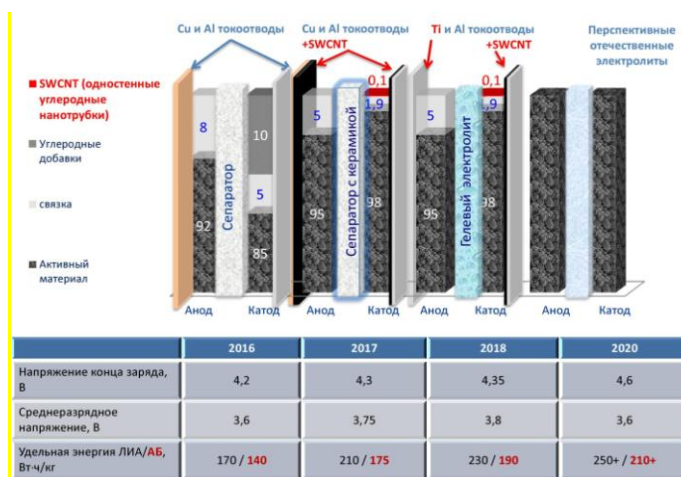


Рис. 1. План модернизации ЛИА с указанием удельных характеристик литий-ионных аккумуляторов и батарей производства ПАО «Сатурн»

По итогам работ, завершенных в 2017 году, получены макеты аккумуляторов с удельной энергией порядка 190 Втч/кг.

В этих аккумуляторах реализована идея по увеличению доли активного материала за счет уменьшения количества связки и добавления углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве электропроводной добавки с существенным увеличением содержания кобальтата лития до 99 % против 85 % по существующей технологии. За счет замены марки графита на отрицательном электроде, оптимизированы потери формировочного цикла аккумулятора, что привело к увеличению КПД первого цикла с 87 до 90–95 %. Применена алюминиевая фольга с нанесёнными на поверхность нанотрубками, что снизило электрические потери на границе активного материала катода и токоотвода и привело к повышению среднеразрядного напряжения аккумулятора.

Начальные испытания показали сопоставимость электрохимических характеристик с базовым вариантом. Установлено, что среднее разрядное напряжение, электродов с применением нанотрубок выше, чем у электродов базового состава ПАО «Сатурн».

Расширение области применения выпускаемой продукции одна из приоритетных задач предприятия.

Учитывая направленность предприятия, в настоящий момент на ПАО «Сатурн» разворачиваются работы (СЧ ОКР) по разработке ЛИАБ для работы космического назначения, предназначенного для выполнения технологических операций на внешней поверхности космических аппаратов и поддержки экипажа при внекорабельной деятельности с проведением летных испытаний на модуле НЭМ РС МКС (по техническому заданию ЦНИИ РТК). Основные технические характеристики разрабатываемой ЛИАБ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики разрабатываемой ЛИАБ

Наименование характеристики	Значение
1. Номинальная ёмкость в начале срока службы при нормальной температуре, А·ч, не менее	75,0
2. Номинальная ёмкость в конце срока службы при нормальной температуре, А·ч, не менее	67,5
3. Минимальное выходное напряжение, В, не менее при максимальном токе	42
4. Максимальное выходное напряжение, В, не более	58,8
5. Средний ток разряда сильноточного фидера, А	10,0
6. Средний ток разряда слаботочного фидера, А	5,0
7. Средний ток разряда фидера СОТР, А	5
8. Ток перегрузки разряда сильноточного фидера, А (не более 60 с).	10,1–40
9. Ток перегрузки разряда слаботочного фидера, А (не более 60 с)	5,1–10
10. Ток перегрузки разряда фидера СОТР, А (не более 60 с)	5,1
11. Время полного заряда, часов, не более	16
12. Количество зарядно-разрядных циклов при глубине разряда 85 % и уменьшении номинальной емкости не более чем на 20 %, более	500
13. Саморазряд в режиме хранения при температуре, %/мес:	15
◆ плюс 23 °С	35
◆ плюс 45 °С	
14. Продолжительность работы при номинальном разрядном токе 10 А, полностью заряженной БАБ, часов, не менее	6
15. Диапазон рабочих температур ЛИАБ:	Минус 50 – плюс 50
◆ при разряде °С	
◆ при заряде °С	

Учитывая имеющийся научно-технический задел, работы будут выполнены в полном объеме с достижением указанных характеристик.

Аккумуляторы, предназначенные для наземного применения, характеризуются значительно более широким диапазоном рабочих температур. Если аккумуляторы космического применения с высокими требованиями к надежности, автономности и массогабаритным характеристиками, эксплуатируются при относительно щадящих температурных условиях, источники питания для наземного применения имеют противоположные требования. Так для космической техники интервал предпочтительных рабочих температур, которые гарантирует разработчик КА, составляет плюс 5 °С плюс 35 °С, то для наземной техники диапазон расширяется до минус 40 °С плюс 60 °С, а в ряде случаев и того шире.

Исходя из этих требований, были проведены ряд работ направленных на разработку электрохимической группы обеспечивающей эксплуатацию аккумулятора при отрицательных температурах. Объектами испытаний являлись 15 макетов ЛИА в ламинатном корпусе емкостью ≈ 2 Ач с различным составом электролита. Целью ставилось: определение характеристик макетов ЛИА с измерением внутреннего сопротивления при температурах плюс 20 °С, 0 °С, минус 20 °С; проведение испытаний на сохраняемость; проведение испытаний на циклический ресурс. На рис. 3 и 4 представлен ход изменения напряжения разряда на прогоночных циклах.

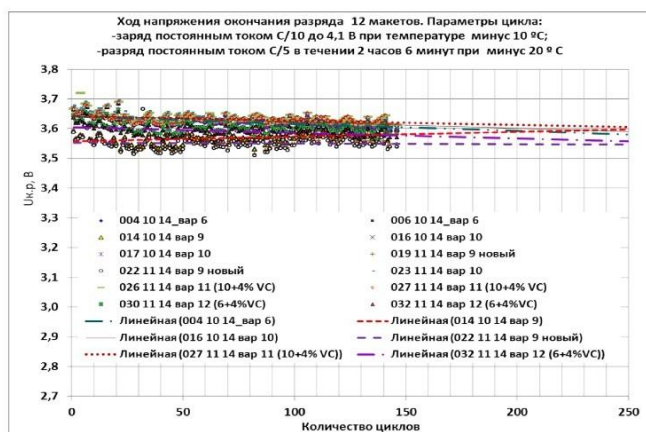


Рис. 2. Изменение напряжения окончания разряда на прогоночных циклах

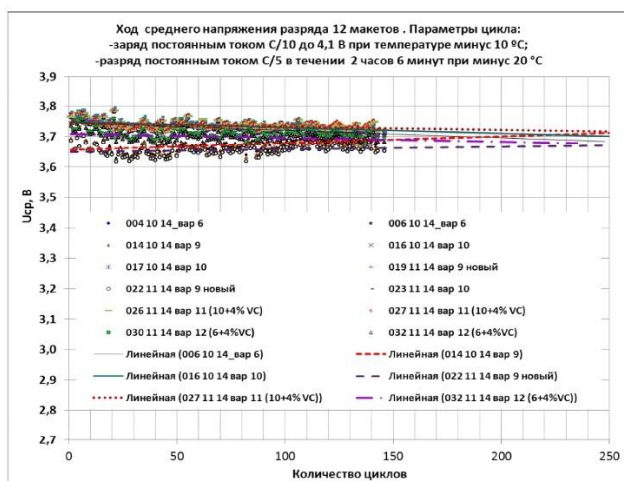


Рис. 3. Изменение среднего напряжения разряда на прогоночных циклах

Из представленных данных следует, что напряжение окончания разряда на протяжении 150 ПЦ для всех аккумуляторов стабильно, среднее напряжение разряда на протяжении 150 ПЦ для всех аккумуляторов варьируется около 3,7 В. Целью проведения контрольных циклов – определение запасов емкости и диагностика характеристик макетов ЛИА для оценки циклического ресурса. Контрольные циклы включали в себя циклы определения полной емкости с измерением внутреннего сопротивления при температурах плюс 20 °С и минус 20 °С для диагностики ресурсных характеристик макетов ЛИА (рис. 5, 6).

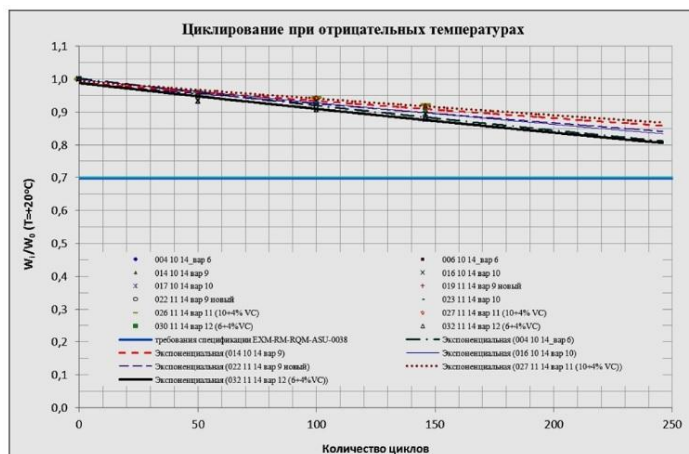


Рис. 4. Изменение энергоемкости ЛИА при $T=+20^{\circ}\text{C}$ от количества прогоночных циклов при отрицательных температурах

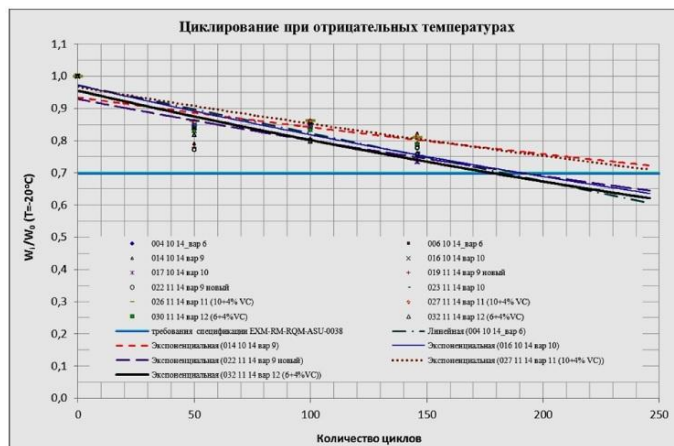


Рис. 5. Изменение энергоемкости ЛИА при $T=\text{минус } 20^{\circ}\text{C}$ от количества прогоночных циклов при отрицательных температурах

Исходя из полученных данных, видно, что требования по энергоемкости с контролем характеристик ЛИА при $T=+20^{\circ}\text{C}$ выполняются для всех макетов с запасом, а с контролем характеристик ЛИА при $T=\text{минус } 20^{\circ}\text{C}$ выполняются только для макетов ЛИА с вариантами электролита 9 и 11.

Таким образом, показано, что используя существующие электролиты можно расширить диапазон эксплуатации ЛИА в область отрицательных температур с вполне приемлемыми ресурсными характеристиками.

Расширение эксплуатационных характеристик литий-ионных аккумуляторов ПАО «Сатурн» в части диапазона рабочих температур создает предпосылки для решения еще одной важной задачи, а именно разработки мощностного аккумулятора ориентированного на применение в летательных аппаратах различной энерговооруженности.

Целью ставится налаживания мелкосерийного производства стартерных авиационных литий-ионных АБ с удельными характеристиками, превосходящими, применяемые в самолетах КБ Сухого, МиГ и Туполева, серебряно-цинковые и никель-кадмиевые АБ. Для реализации этих целей на предприятии ведутся проектные работы по организации участка изготовления стартерных аккумуляторов, закупки необходимого производственного и испытательного оборудования.

Согласно технического задания Объединенной авиастроительной корпорации (ОАК) к унифицированной АБ предъявляются следующие требования:

Таблица 2

Требования ОАК к унифицированной стартерной авиационной АБ

Параметры	Единица измерения	Величина параметра
1. Максимальный ток разряда (режим запуска), не менее: При времени разряда 2 с При времени разряда 10 с	А (ед. С)	$T \leq 2с, 1200 (27)$ До 10 с 450 (10)
2. Интервал рабочих температур батареи	$^{\circ}C$	Минус 60 ÷ плюс 85
3. Удельная энергия (в номинальных режимах), не менее.	Вт·ч/кг	100
4. Масса, не более	кг	14
5. Срок службы по техническому состоянию	лет	10
6. Сохраняемость 90%заряда, не менее	сутки	60
7. Номинальное напряжение/ НРЦ	В	25,2/29,4
8. Ёмкость батареи в течении гарантийного периода, не менее	А·ч	45
9. Ток разряда в непрерывных режимах, не менее	А (ед С)	100 (2,2)
10. Габаритные и присоединительные размеры, не более	(ВхШхД)мм	427x120x180
11. Ресурс, не менее	цикл	400

Значения параметров технических требований в отдельных пунктах значительно превосходят соответствующие показатели существующих стартерных авиационных аккумуляторных батарей.

Так по интервалу рабочих температур наиболее совершенными оказываются серебряно-цинковые АБ имеющие рабочий диапазон эксплуатации минус 20 °С – плюс 60 °С, с допустимым эксплуатационным окном от минус 50 °С со значительным снижением технических параметров. Никель кадмиевые аккумуляторы имеют

рабочий диапазон минус 20 °С плюс 50 °С с допустимым окном эксплуатации от минус 40 °С до плюс 70 °С. Т.е. применение выполнимого рабочего диапазона батарей от минус 40 °С до плюс 50 °С – будет так же означать расширение температурного диапазона. С возможностью кратковременного использования при температурах выше 50 °С и ниже минус 40 °С (с исключением заряда при отрицательных температурах).

Требования к удельной энергии на уровне не менее 100 Вт ч /кг выглядят так же значительно завышенными. На сегодняшний день серебряно цинковые АБ имеют 47 Втч/кг, никель кадмиевые 28 Втч/кг, значения в 90–95 Втч/кг будут значительным прогрессом. Возможны так же проведение работ по повышению удельных характеристик аккумуляторных батарей путем подъема рабочего напряжения.

Остальные требования проработаны в рамках существующих обширного научно технического задела.

Работы по созданию мощного аккумулятора обеспечивающего стартерные токи разряда на предприятии ведутся с 2014 года.

На рис. 7, 8 и 9 представлены разрядные кривые аккумуляторов разряжаемые током 10С при различной температуре. Используются толщины электрода положительного в 100, 70, мкм и строится прогноз к толщине 30 мкм. При температуре плюс 20 °С и минус 20 °С.

Если при положительной температуре достаточно использование толщин катода 70 мкм, то при отрицательных температурах необходимо использование толщин катода менее 50 мкм, в случае использования 30 мкм катода – получаются наиболее оптимальный аккумулятор для низкотемпературных испытаний. Кроме того необходимо использования низкотемпературного электролита с точкой замерзания ниже минус 50 °С.

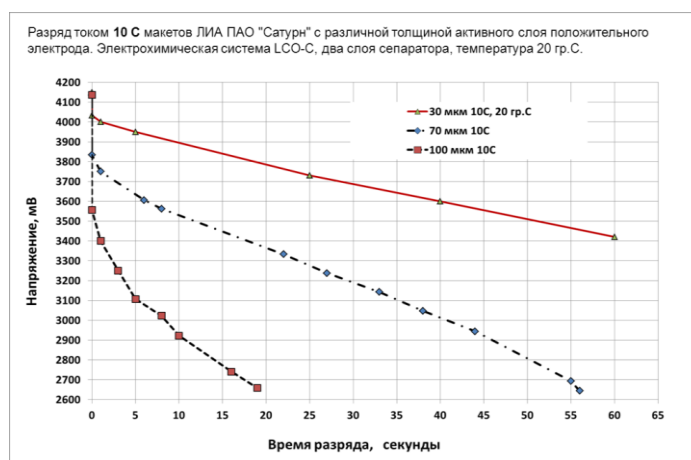


Рис. 7. Ход напряжения разряда макетов ЛИА ПАО «Сатурн» с различной толщиной активного слоя положительных электродов при токе разряда 10 С и температуре 20 °С

Ранее проведенные работы по созданию мощного аккумулятора обозначили первую технологическую проблему: необходимость изготовления электродов (катодов) с толщинами менее 50 мкм, что на сегодняшний день невыполнимо в рамках существующей на предприятии технологии. Это и обозначило необходимость начала работ по внедрению намазной технологии.

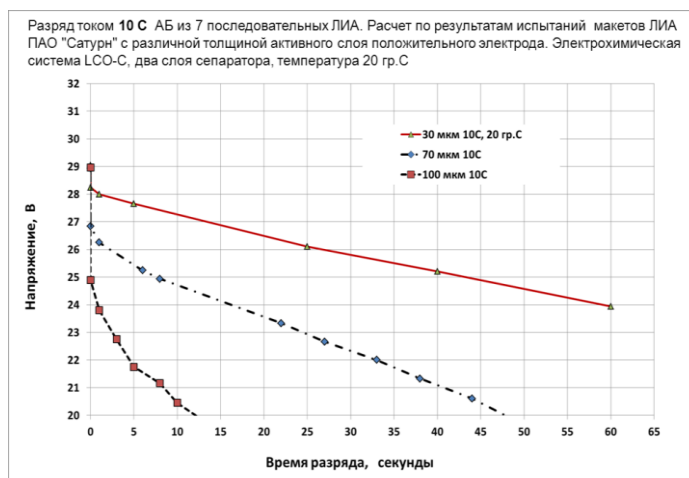


Рис. 8. Ход напряжения АБ из 7 последовательно соединенных ЛИА при токе разряда 10С и температуре 20 °С. Расчет по результатам испытаний макетов ЛИА с различной толщиной активного слоя положительных электродов

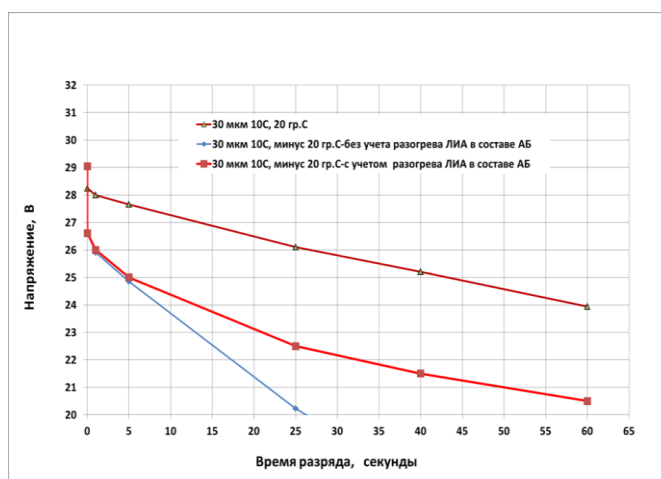


Рис. 9. Ход напряжения АБ из 7 последовательно соединенных ЛИА при токе разряда 10С при различных температурных условиях. Расчет по результатам испытаний макетов ЛИА с толщиной активного слоя положительных электродов 30 мкм

В табл. 3 приводится сравнение проектируемой авиационной батареи и существующих аналогов.

Как видно – литий-ионная батарея значительно опережает существующие АБ по температурному диапазону эксплуатации, удельной энергии, сроку службы. Имеет более низкие токи разряда (в случае изменения ТЗ возможно и их поднятие), при сопоставимой цене, имеет наименьшую стоимость пуска.

Таблица 3

Сравнение проектируемой авиационной батареи и существующих аналогов

Параметры	Единица измерения	Литий ионная АБ 7ЛИ45СТ	Серебряно-цинковая 15ЦЦ45Б	Ni Cd Батарея 20КСХ-27
1. Максимальный ток разряда (режим запуска), не менее: При времени разряда 2 с При времени разряда 10 с	А (ед С)	$T \leq 2с, 1200 (27)$ До 10 с 450 (10)	$T \leq 2с, 1200 (27)$ До 10 с 450 (10)	$T \leq 2с, 750 (19)$ До 10 с 150 (3,7)
2. Интервал рабочих температур батареи	$^{\circ}C$	-40/+50	-30/+50	+5/+50
3. Удельная энергия (в номинальных режимах), не менее	Вт·ч/кг	90	47	28
4 Масса, не более	кг	14	23	23
5. Срок службы по техническому состоянию	лет	10	6	6
6. Сохраняемость 90 % заряда, не менее	сутки	60	90	90
7. Номинальное напряжение/ НРЦ	В	25,2/29,4	24	24
8. Ёмкость батареи в течении гарантийного периода, не менее	А·ч	45	45	27
9. Ток разряда в непрерывных режимах, не менее	А (ед С)	100 (2,2)	240 (10)	240(10)
10. Габаритные и присоединительные размеры, не более	(ВхШхД) мм	427x120x180	430x134,5x227	433x134x182
11. Ресурс, не менее	цикл	1000	100	250

Выводы.

1. На предприятии имеется научно-технический задел позволяющий обеспечить проведение работ по разработке, изготовлению и квалификации литий-ионных аккумуляторов с удельной энергией более 200 Втч/кг.

2. Работы, направленные на расширение температурного диапазона эксплуатации ЛИА и АБ на их основе позволят увеличить потенциальную область их применения в робототехнических комплексах, приборах специального назначения, средствах связи и т.п.

3. Создание мощностного аккумулятора позволит не только обеспечить реализацию требований ТЗ ОАК по созданию унифицированной стартерной авиационной АБ, но и проводить модернизацию уже имеющегося парка авиатехники

осуществляя замену серебряно-цинковых и никель-кадмиевых АБ на более эффективные литий-ионные. Решения, принятые при реализации этого проекта должны найти применение и в беспилотных летательных аппаратах (дронах), разработка которых ведется в большинстве случаев с ориентацией на зарубежных производителей источников питания.

4. В докладе показана принципиальная возможность реализации указанных целей. По положительным результатам отработки конструкторско-технологических решений работы будут продолжены в части подтверждения циклического ресурса и сохраняемости ЛИА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Da Deng*. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges // *Energy Science & Engineering*. – 2015. – Vol. 3, No. 5. – P. 385-418.
2. *Menictas C., Skyllas-Kazacos M., Mariana L.T.* Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage. – 2015. – Part 6. – P. 125-211.
3. *Лихоносов С.Д., Попов В.А., Кулыга В.П., Пачуев А.В.* «Перспективные системы и задачи управления»: материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Седьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 2. – С. 49-63.
4. Результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ПАО «Сатурн».
5. *Baur C. et al.* Analysis of the radiation hardness of triple- and quintuple-junction solar cells, 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2005.
6. *Patel P. et al.* Initial results of the monolithically grown six-junction inverted metamorphic multi-junction solar cell, 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2012.
7. *Cornfeld et al.* Evolution of a 2.05eV AlGaInP top sub-cell for 5 and 6J-IMM applications, 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) 2012.

УДК 621.314

В.М. Рулевский, Р.В. Мещеряков

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Рассматриваются вопросы разработки и создания систем энергоснабжения для современных глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов. Приведена сравнительная оценка вариантов выполнения систем энергоснабжения, отмечаются достоинства и недостатки, также предложена наиболее оптимальная структура, позволяющая передавать по кабель-тросу, на предельные глубины до 6000 м, мощность до 60 кВт при высоких удельных характеристиках.

Система электроснабжения, телеуправляемый подводный аппарат, кабель-трос.

V.M. Rulevskiy, R.V. Mescheryakov

THE DEVELOPMENT OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR DEEP-SEA REMOTE UNMANNED UNDERWATER VEHICLES

In this paper, we consider the issues of development and design of the power supply systems (PSS) for the modern deep-sea remotely operated unmanned underwater vehicles. We perform a comparative evaluation of the EPSS designs and outline their advantages and drawbacks. As a result, we suggest the EPSS capable of transmitting the electric power up to 60 kW via a rope-cable for the depth up to 6000 m and possessing high specific energy performance.

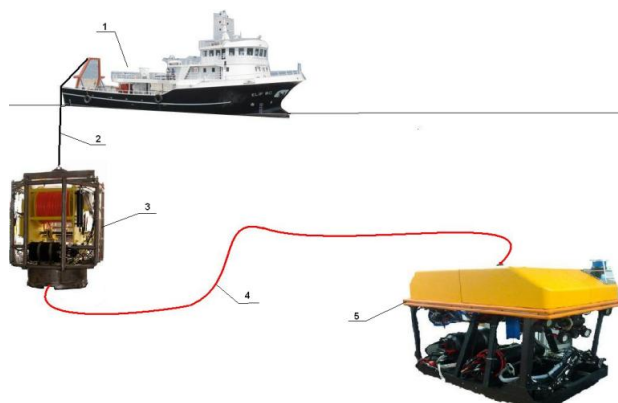
Power supply system, remotely operated unmanned underwater vehicle, rope-cable.

Введение. В настоящее время все большую тенденцию развития получают глубоководные телеуправляемые подводные аппараты (ТПА), которые выполняют научно-исследовательские, поисковые и другие виды работ на глубине до 6000 м. Для выполнения данных работ необходима система энергоснабжения (СЭС), обеспечивающая надежность функционирования и качество питания нагрузки подводного аппарата, а также высокие массогабаритные показатели.

Постановка задачи. Задача энергоснабжения глубоководного телеуправляемого подводного аппарата, ввиду ограниченной пропускной способности кабель-троса, связывающего аппарат с обеспечивающим судном, при больших глубинах погружения до 6000 метров является достаточно сложной. При такой длине кабель-троса, передача электрической энергии мощностью в несколько десятков киловатт, возможна путем передачи энергии повышенным переменным трехфазным напряжением повышенной частоты [1].

Целью работы является решение комплекса технических задач, связанных с разработкой и созданием систем энергоснабжения для глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов мощностью до 60 кВт, работающих на предельных глубинах до 6000 метров, имеющих улучшенные массогабаритные показатели, повышенную надёжность, ресурс и энергетическую эффективность.

Общая схема комплекса телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, подключенного к сети обеспечивающего судна представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Общая схема комплекса телеуправляемого подводного аппарата;
1 – обеспечивающее судно; 2 – кабель-трос; 3 – гараж-заглубитель;
4 – кабель связи; 5 – телеуправляемый подводный аппарат.*

СЭС ТПА условно состоит из двух частей: системы энергоснабжения бортовой и подводной части. СЭС бортовой части устанавливается на борту обеспечивающего судна (корабля-носителя), питание которой осуществляется как от трехфазной судовой сети напряжением 380 В, частотой 50 Гц, так и от сети постоянного тока. Напряжение с выхода СЭС бортовой части передается по кабель-тросу в систему подводной части, устанавливаемую на гараже-заглубителе и непосредственно на подводном аппарате.

В современных подводных комплексах с дистанционным управлением используется в качестве составной части гараж-заглубитель, в котором может размещаться подводный аппарат при его доставке на глубину, и с которым подводный аппарат может соединяться относительно коротким и легким кабелем связи. Гараж-заглубитель позволяет установить на нем часть блоков системы энергоснабжения и управления, при этом освобождается дополнительное, полезное пространство на подводном аппарате и снижается его вес [2].

Рассмотрим основные варианты выполнения СЭС для глубоководных ТПА, их достоинства и недостатки.

На рис. 2 представлена СЭС ТПА переменного тока с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением с частотой 50 Гц и трехфазным напряжением с частотой 1000 Гц по кабелю связи. СЭС ТПА содержит установленную на обеспечивающем судне бортовую часть системы, включающую коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой электрической сетью – основной или резервной, напряжением 380 В частотой 50 Гц. Выход коммутатора сети К соединен с фильтром радиопомех ФРП и силовым повышающим трансформатором Тр, который повышает напряжение сети до $U_{ЛЭФФ}=1000\div 1500$ В.

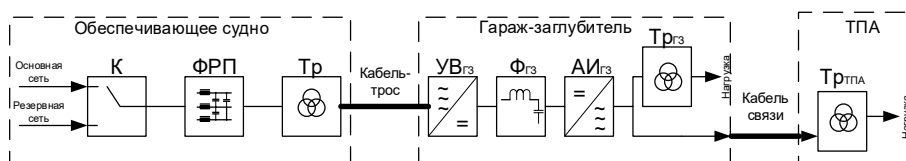


Рис. 2. Система энергоснабжения телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением с частотой 50 Гц и трехфазным напряжением с частотой 1000 Гц по кабелю связи

Повышенное трехфазное напряжение с частотой 50 Гц по кабель-тросу поступает на первый подводный блок системы, установленный на гараже-заглубителе. Первый подводный блок системы содержит управляемый выпрямитель $УВ_{Г3}$ с фильтром $Ф_{Г3}$, выход которого соединен с инвертором $АИ_{Г3}$, повышающим частоту питающего напряжения до 1000 Гц. Напряжение повышенной частоты с выхода $АИ_{Г3}$ подается на согласующий трансформатор $Тр_{Г3}$, обеспечивающий питание устройств гаража-заглубителя, а также по плавучему кабелю на согласующий трансформатор $Тр_{ТПА}$ второго подводного блока системы, установленного на подводном аппарате.

Достоинством данной СЭС ТПА является то что, за счет повышения частоты питающего напряжения до 1000 Гц существенно снижаются массогабаритные параметры трансформатора $Тр_{ТПА}$ в 2,5–3 раза по сравнению с трансформатором, работающим на промышленной частоте 50 Гц. В случае расположения трансформатора $Тр_{ТПА}$ в прочном корпусе с масляным охлаждением обеспечивается дополнительное уменьшение габаритов трансформатора, а также разгрузка стенок прочного корпуса от давления воды, что позволяет уменьшить толщину стенок прочного корпуса и соответственно уменьшить массу СЭС устанавливаемую на ТПА еще в 1,3–1,5 раза [3].

Недостатками рассмотренной СЭС ТПА являются низкие удельные характеристики гаража-заглубителя, так как трансформатор $Тр_{Г3}$ работает на переменном напряжении с частотой 50 Гц, а также усложнение СЭС подводной части за счет двойного преобразования энергии – переменного в постоянное и постоянного в переменное повышенной частоты.

В СЭС ТПА переменного тока с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением $U_{ЛЭФФ}=1000\div 1500$ В частотой 50 Гц и постоянным напряжением по плавучему кабелю, представленная на рис. 3, отсутствуют некоторые недостатки схемы СЭС ТПА (рис. 2).

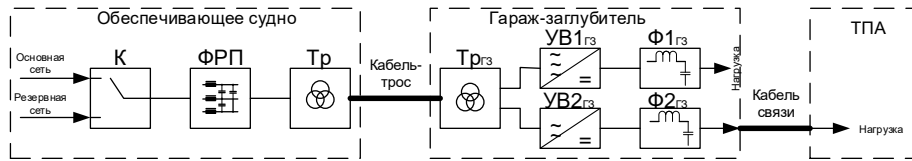


Рис. 3. Система энергоснабжения телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу трехфазным напряжением $U_{ЛЭФФ}=1000\div 1500$ В частотой 50 Гц и постоянным напряжением по кабелю связи

Основным достоинством данной системы является простота и высокие массогабаритные показатели подводного аппарата, за счет того, что, по кабелю связи передается постоянное напряжение и отсутствует трансформатор, что создает возможность установки дополнительного оборудования на телеуправляемом подводном аппарате.

Недостатками представленной СЭС ТПА (рис. 3) являются низкие массогабаритные характеристики гаража-заглубителя, так как трансформатор $Тр_{ГЗ}$ работает на переменном напряжении с частотой 50 Гц, а также применение управляемых выпрямителей $УВ1_{ГЗ}$ и $УВ2_{ГЗ}$ с системой управления для обеспечения стабильного постоянного напряжения 300 В и 600 В для нагрузок гаража-заглубителя и ТПА.

На рис. 4 приведена СЭС ТПА с обеспечивающего судна, которая позволяет улучшить массогабаритные показатели подводной части системы за счет передачи энергии по кабель-тросу постоянным напряжением, а по кабелю связи переменным напряжением повышенной частоты 1000 Гц.

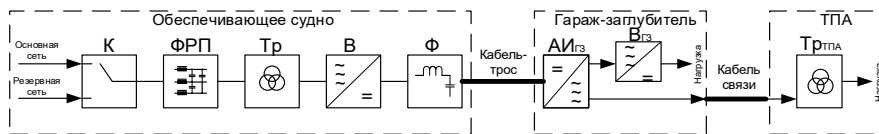


Рис. 4. Система энергоснабжения телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу постоянным напряжением и трехфазным переменным напряжением с частотой 1000 Гц по кабелю связи

В этом случае, как и в варианте СЭС ТПА (рис. 2), за счет повышенной частоты, существенно снижаются массогабаритные параметры трансформатора, установленного на ТПА, а также за счет передачи по кабель-тросу постоянного напряжения, обеспечиваются более низкие потери мощности в кабель-тросе.

В настоящее время, наилучшим образом, отвечающая всем требованиям, предъявляемым к современным СЭС ТПА, является система энергоснабжения телеуправляемого подводного аппарата, представленная на рис. 5.

Бортовая часть СЭС ТПА содержит коммутатор сети К, вход которого соединен с судовой сетью. С коммутатора К напряжение через фильтр радиопомех ФРП поступает на выпрямитель В, затем через фильтр Ф на трехфазный автономный инвертор АИ, который повышает частоту питающего напряжения до 1000 Гц. Выход инвертора АИ соединен с первичными обмотками повышающего трехфазного трансформатора Тр, который в свою очередь повышает напряжение до величины $U_{ЛЭФФ}=1000\div 1500$ В, а вторичные обмотки которого соединены с кабель-тросом, связанным с первичными обмотками трансформатора $Тр_{ГЗ}$ подводной части установленной на гараже-заглубителе и кабелем связи [4, 5].

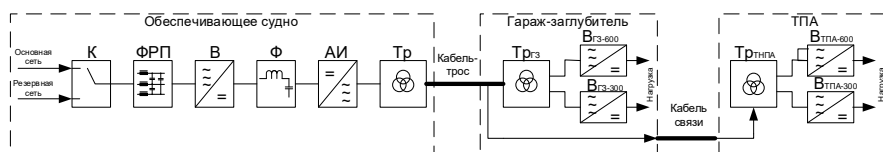


Рис. 5. Система энергоснабжения телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу переменным напряжением повышенной частоты

Вторичные обмотки согласующего трансформатора $Тр_{ГЗ}$ соединены с выпрямителями $В_{ГЗ-600}$ и $В_{ГЗ-300}$, формирующими питающие напряжения для гаража-заглубителя 600 и 300 В. С выхода кабеля связи напряжение поступает на первичные обмотки согласующего трансформатора $Тр_{ТПА}$, расположенного на телеуправляемом подводном аппарате. Вторичные обмотки согласующего трансформатора $Тр_{ТПА}$ соединены с выпрямителями $В_{ТПА-600}$ и $В_{ТПА-300}$, формирующими питающие напряжения для ТПА 600 и 300 В.

Достоинствами данной системы являются: высокие массогабаритные показатели трансформатора $Тр_{ГЗ}$ первой подводной части системы, установленной на гараже-заглубителе и трансформатора $Тр_{ТПА}$ подводного аппарата за счет повышения частоты питающего напряжения инвертором АИ до 1000 Гц; простота и надежность системы электропитания подводной части.

В «НИИ АЭМ ТУСУР», на базе предложенной структурной схемы (рис. 5), был разработан, изготовлен и успешно внедрен модельный унифицированный ряд систем энергоснабжения для глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов мощностью 15, 30 и 60 кВт с длиной кабель-троса до 8000 метров.



Рис. 6. Системы энергоснабжения телеуправляемого подводного аппарата мощностью 15, 30 и 60 кВт

Каждая система энергоснабжения (рис. 6) снабжена промышленным компьютером и специальным программным обеспечением, посредством которого обеспечивается:

- ◆ измерение параметров выходного напряжения тока, сопротивление изоляции и температуры внутри прочного корпуса подводного аппарата;
- ◆ диагностика аварийных состояний: пропадание сети, снижение уровня сети ниже допустимого, обрыв фаз сети, обрыв/отсутствие кабеля заземления, срабатывание термозащиты, срабатывание защит от превышения допустимых значений токов и значений напряжений, пропадание сети Ethernet;

♦ протоколирование данных каждые 10 секунд и по изменению режима управления;

♦ работа в автономном и дистанционном режимах.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенная работа показала, что в настоящее время для выполнения геологических, научно-исследовательских, спасательных и других видов работ на предельных глубинах до 6000 м целесообразно использовать СЭС с передачей энергии по кабель-тросу переменным трехфазным напряжением повышенной частоты.

2. Принцип построения СЭС с передачей энергии по кабель-тросу переменным трехфазным напряжением повышенной частоты позволяет обеспечить высокие массогабаритные показатели подводной части системы, а также простоту и высокую надежность подводного аппарата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатова А.М.* Подводные аппараты для геологических исследований. – Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990. – 92 с.
2. *Мишин В.Н., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г.* Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 163-167.
3. *Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B., Kuleshova E.O., Shandarov S.M., Vasilyeva Yu.Z.* Mathematical model for the power supply system of an autonomous object with an AC power transmission over a cable rope // Tomsk: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 177 (1). – Paper № 012073.
4. *Рулевский В.М., Правикова А.А., Ляпунов А.А., Букреев В.Г.* Математическая модель системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 131-135.

УДК 621.314

А.Л. Береснев, М.А. Береснев

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТОНАЦИИ В ХОДОВОМ ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В работе исследуется возможность повышения энергетической вооружённости подвижных объектов различного базирования, которые используют в качестве ходового двигателя - двигатель внутреннего сгорания. Рассматривается возможность использования детонационного сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе внутреннего сгорания как полезной части рабочего процесса. Использование дефлаграции наряду с детонацией умеренно увеличивает нагрузку на детали двигателя и позволяет использовать узлы и агрегаты с незначительными изменениями. В начале проведен обзор имеющихся решений в данной области, затем рассмотрены особенности работы двигателя с использованием детонационного сгорания. Рассмотрен процесс горения топливно-воздушной смеси в детонационном режиме, затем предложены подходы к разработке математической модели для такого двигателя. В заключение высказаны предположения по изменению характеристик параметров горения топливовоздушной смеси и намечены последующие этапы для изучения возможности использования части топлива в режиме детонации.

Двигатель внутреннего сгорания, детонация, горение.

Введение. В 1940 году советский физик Я.Б. Зельдович предложил идею детонационного двигателя в статье «Об энергетическом использовании детонационного сгорания». Огромное преимущество такого двигателя заключается в том, что процесс детонационного горения на два порядка быстрее дефлаграции. В результате при постоянном объеме быстро возрастает давление. Выделение полученного таким образом количества энергии к сожалению вполне способно разрушить двигатель автомобиля, поэтому такой процесс часто ассоциируется со взрывом. Работы в данном направлении ведутся во всем мире с переменным успехом, над перспективной идеей работали многие учёные из разных стран, вперёд выходили то США, то Германия, то наши соотечественники. В настоящее время использование детонации достигло конкретных результатов, в августе 2016 года российским учёным удалось создать впервые в мире полноразмерный жидкостный реактивный двигатель, работающий на принципе детонационного сгорания топлива.

В котором в действительности вместо постоянного фронтального пламени в зоне сгорания, образуется детонационная волна, несущаяся со сверхзвуковой скоростью. В волне сжатия детонируют топливо и окислитель, этот процесс, с точки зрения термодинамики **повышает КПД двигателя на порядок**, благодаря компактности зоны [1].

В двигателях внутреннего сгорания существуют два различных режима распространения горения топливо воздушной смеси (ТВС). В режиме медленного горения ТВС сгорает во фронте пламени, скорость которого определяется процессами переноса, теплопроводностью и диффузией и скоростью химических реакций. В режиме детонационного горения сжатие и нагрев горючей смеси, приводящие к её воспламенению, осуществляются в ударной волне вызывающей взрывную реакцию [2].

Наиболее близко к решению задач работы бензинового ДВС без подачи искры, хотя и не относящихся напрямую к детонационному горению, подошли фирмы работающие над двигателями Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), принцип действия которых основан на технологии воспламенения от сжатия однородной смеси [3].

Работают над циклом HCCI Daimler, Volkswagen и Nissan, наиболее известна работа компании Mazda [4, 5]. Возможно HCCI мотор будет установлен на автомобиле Mazda 3 следующего поколения, который поступит в продажу в 2019 году.

Воплощенный в разработке цикл HCCI пока далек от идеала и использование системы зажигания до сих пор не определено. В настоящий момент в реальном ДВС вполне возможно будут использованы разная степень сжатия нового мотора, вплоть до очень высокого показателя 18:1. Предполагается, что внедрение таких двигателей позволит снизить расход топлива примерно на 30 %, и значительно снизит содержания в выхлопных газах окислов азота и сажи.

Особенности рабочего процесса детонационного двигателя. ДВС работающий в режиме детонационного сгорания в настоящее время изучены недостаточно. Известно, что возможность детонации зависит от геометрии камеры сгорания, состояния и состава ТВС [6].

Существуют несколько изобретений, например: патент РФ «поршневой двигатель внутреннего сгорания» [7] и патент РФ «двухтактный детонационный двигатель» [8], а так же и другие, позволяющие работать в режиме детонации и требующие кардинальной замены узлов и агрегатов ДВС.

С точки зрения перекисной теории распространение «холодного» пламени по рабочей смеси осуществляется диффузией в свежую смесь активных частиц, радикалов, образующихся при распаде перекисей [9] [После периода индукции полученная активная смесь подвергается дальнейшему окислению с взрывным распадом перекисных соединений.

Возникающий в этом процессе тип пламени назван А.С.Соколиком [10] «вторичным холодным пламенем». Реакция во «вторичном холодном пламени» идет не до конечных продуктов, а лишь до угарного газа, при этом степень разогрева значительна и соответствует половине полной энергии сгорания. Это вызывает расширение пламени с большой скоростью за счет диффузии активных центров и дополнительно за счет теплопередачи. При наличии достаточного количества активных центров далее происходит цепочно-тепловой взрыв смеси CO и O₂.

Вместе с новым фронтом горячего пламени возникает новый фронт ударной волны в одном или нескольких местах несгоревшей рабочей смеси. Следует отметить, что скорости распространения обеих волн приближаются к 2000–2500 м/сек.

Процессы окисления углеводородов с образованием перекисей происходят всегда и если в смеси накапливается перекисных соединений свыше критического, происходит взрывной распад. В случае, если энергия холодного пламени составляет незначительную часть теплоты сгорания ТВС (менее 5–10 %), увеличение температуры незначительно.

Когда амплитуда волны достаточна для самовоспламенения в некоторых местах еще не сгоревшей части ТВС, появляется очаг самовоспламенения. Новый фронт пламени распространяется с большим ускорением, чем фронт основного пламени.

Возникновение детонации и ее продолжительность зависит от возможности пересечения кривых реальной индикаторной диаграммы и критического давления достаточного при возникших условиях для образования локального очага воспламенения. Это условие является вторым необходимым, кроме достаточной концентрации гидроперекисей несгоревшей части смеси.

Вследствие прохождения предпламенных процессов окисления несгоревшая часть смеси становится очень «восприимчивой» к воспламенению. Однако, степень этой восприимчивости неодинакова в разных областях несгоревшей смеси. Если амплитуда проходящей волны сжатия достаточна для того, чтобы вызвать самовоспламенение, то в местах наибольшей «подготовленности» несгоревшей части смеси к воспламенению волна сжатия образует очаг воспламенения.

От этого очага новый фронт пламени распространяется по среде химически очень активной, и, поэтому, с гораздо большим ускорением, чем основной фронт пламени. По этой причине рождаются вторичные, более мощные, волны сжатия. При отражении от стенок ударные волны сжатия превращаются в детонационные, если проходят по несгоревшей части смеси.

Значение амплитуды, при которой в несгоревшей части смеси образуется новый очаг воспламенения, называется волной критического сжатия. На рис. 1 приведен характер изменения фактического перепада давления Δp в волне сжатия и характер протекания критического давления $\Delta p_{кр}$, достаточного при данных условиях для образования локального очага воспламенения в части смеси с последующей детонацией.

При этом действует правило: если в течение всего процесса сгорания перепад давления в первичной волне сжатия меньше критического, то детонация по этой причине не может возникнуть.

Для возникновения детонации необходимы два условия:

1. Высокая концентрация гидроперекисей в несгоревшей части смеси;
2. Первичная волна должна иметь достаточно высокую амплитуду.

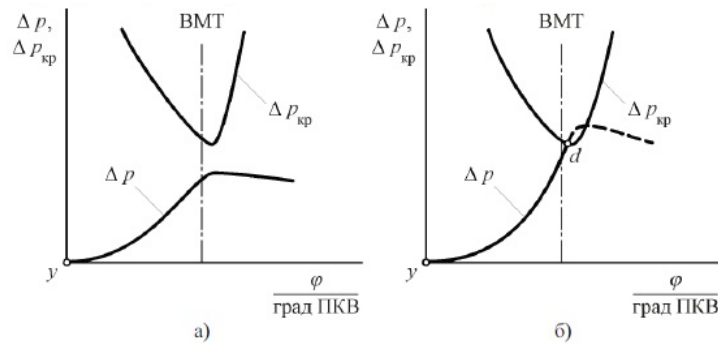


Рис. 1. Критериальные диаграммы детонации: а – детонация отсутствует; б – двигатель детонирует (d – момент возникновения детонации)

Горение ТВС при детонации. Анализ режимов медленного и детонационного горения по аналогии со скачками и ударными волнами удобно производить на плоскости адиабат (рис. 2), связывающих давление и удельный объем (величина обратная плотности) при различных режимах горения в предположении, что протяженность фронта горения мала и может быть заменена бесконечно тонким экзотермическим скачком [11, 12].

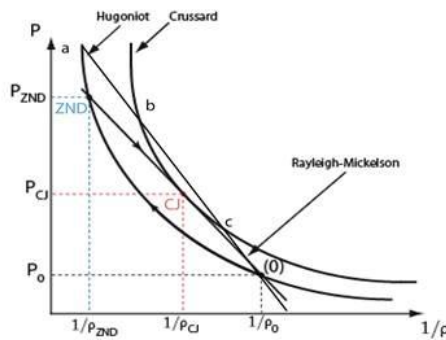


Рис. 2. Детонационная адиабата

Исходное состояние вещества до ударной волны и зоны горения характеризуются параметрами p_0 , ρ_0 . Прямая, проведенная через точку, соответствующую исходному состоянию смеси с параметрами p_0 , ρ_0 , и какую-либо точку на адиабате Гюгоню, называется прямой Михельсона или прямой Рэля. Перемещение из исходной точки по прямой Михельсона в какую-либо точку на кривой Гюгоню соответствует сжатию топливной смеси в лидирующей ударной волне. Процесс сжатия показан на рис. 2 стрелкой на кривой Гюгоню.

Следует отметить, работа ДВС с детонацией не сразу приводит к значительным разрушениям. Из результатов исследований [13] на шести цилиндрических двигателях при условии детонации в трех цилиндрах (рис. 3).

Из которого можно делать вывод, что при непродолжительной детонации самый высокий износ δ в верхнем поясе по высоте цилиндра с расстоянием от верхней кромки S (20 м) и в тоже время без детонации износ в этом уровне минимален. Далее разница в износе не столь значительна из этого можно сделать предположение: не продолжительная не сильная детонация в которой участвует ограниченное количество ТВС, не приведет к существенному уменьшению срока службы цилиндропоршневой группы.

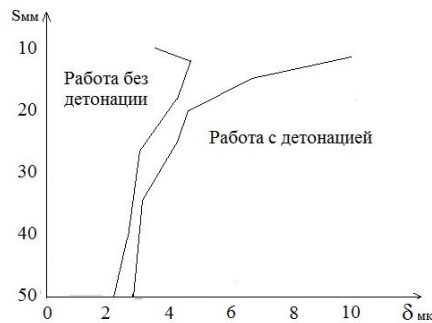


Рис. 3. Износ цилиндра

Кроме того для получения повторяемости результатов следует учитывать большое значение флуктуации процессов сгорания, которая будет приводить к сложности поддержания и стабилизации процесса. Даже в установившемся режиме процесс горения в цилиндрах ДВС отличается, как в последовательных циклах, так и между цилиндрами. Это хорошо видно на снятых индикаторных диаграммах [13]. Следует отметить, что работа двигателя на богатых смесях уменьшает флуктуацию, а использование менее обогащенных ТВС приводит к увеличению отклонений в процессе горения. Для улучшения повторяемости процессов необходимо предпринимать меры для повторяемости циклового наполнения цилиндров, как воздухом, так и топливом и обеспечения гомогенности ТВС. А так же поддерживать стабильность параметров системы зажигания и температуры ДВС.

Параметры головной ударной волны изменяются периодически под воздействием волн сжатия, формирующихся фронтом пламени. Согласно расчетам, автоколебательный процесс [14, 15] развивается в том случае, когда величина энергии взрыва превосходит критическое значение. В противном случае детонационная волна затухает, распадаясь на ударную волну и волну медленного горения. Если энергия взрыва близка критической, но все же меньше, то затухания детонации происходит после нескольких колебаний.

Графики уравнений выгорания и отвлеченной скорости сгорания соответствующие различным топливам и значениям параметра m , представлены на рис. 4.

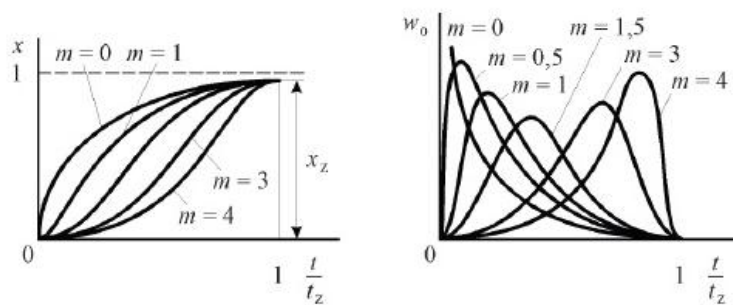


Рис. 4. Графики уравнений выгорания и отвлеченной скорости сгорания

Опыт исследования двигателей показывает, что для дизелей $m = 0...1,0$, $p_z = 60... 100$ град ПКВ и более; для двигателей с внешним смесеобразованием $m = 3...4$, $p_z = 45...60$ град ПКВ. Где p_z - продолжительность сгорания, выраженная в градусах поворота коленчатого вала (ПКВ).

Результаты специальных исследований позволяют заключить, что оптимальные величины показателя характера сгорания и условной продолжительности сгорания отвечают значениям примерно равным 1,5 и 40...60 град ПКВ соответственно. На данном этапе невозможно определить достоверно указанные параметры, но можно высказать предположение, что диапазон изменения $m = 1,0...3,0$ будет зависеть от доли топлива участвующего в детонации и соответственно продолжительность сгорания будет уменьшаться.

Моделирование детонационного горения. Из сказанного совершенно ясно, что возможности получения стабильной детонации с параметрами не приводящими к значительному износу связаны с возможностью достоверно определить начальные условия, организовать одинаковое наполнение по цилиндрам и провести процессы горения, как в циклах, так и по цилиндрам с заранее определенными параметрами. Следует учитывать, количество подведенной к ТВС энергии должно превышать определенный минимум, необходимый для получения возможности нужного режима горения.

Для поддержания кратковременного режима детонации, который позволит проводить эксперименты без значительной модернизации двигателя следует провести моделирование внутрицилиндровых процессов в двигателе внутреннего сгорания с помощью математической модели, что позволит описать эффективные показатели ДВС при работе в двух режимах сгорания. Полученная модель будет использоваться в дальнейшем для создания алгоритма расчета угла опережения зажигания и схемы регулирования состава ТВС, возможно с применением бинарного топлива [18].

Уровень модели должен соответствовать требованию: по возможности простая и по необходимости сложная. Простая для того, что бы успевать обрабатывать полученные от датчиков параметры и сложная для адекватности проведения рабочего цикла.

Сложность модели определяется ее принадлежностью к одному из классов: однозонная, двухзонная и многозонная [16, 19]. Самые простые модели – однозонные. Они строятся на следующих предпосылках: изменение нестационарных давления и температуры рабочего тела в объеме камеры сгорания (КС) не имеют локального характера, т.е. их мгновенные значения одинаковы для любой произвольной точки в пространстве КС; в цилиндре двигателя рабочее тело гомогенно; продукты сгорания полностью перемешанные с общим зарядом цилиндра, находятся в состоянии химического равновесия. Однако в реальных условиях значения локальной температуры рабочего тела в камере сгорания различаются. Для учета этого обстоятельства был создан класс многозонных моделей самые простые из которых – двухзонные, в основе которых лежат следующие предпосылки: полный объем, занимаемый рабочим телом, условно поделен на зону с еще не успевшей сгореть смесью и зону с продуктами сгорания, который имеют каждая свою температуру и разделены фронтом пламени; в каждой из зон в произвольный момент времени рабочее тело рассматривается как гомогенная смесь, значения локальной температуры которой внутри каждой зоны не различаются; давление в объеме КС и внутри обеих зон в произвольный момент времени одинаково и локальные значения давлений одинаковы.

Из сказанного выше можно предположить, что наиболее точное описание процессов и получение индикаторной диаграммы будет получено в следствии использования много зонной модели учитывающей особенности воспламенения ТВС, как от свечи зажигания, так и в объеме КС. Но на современном этапе разви-

тия микроэлектроники подобные расчеты не могут быть выполнены за время обусловленное работой ДВС. В то же время, как следует из [16, 17] современные электронные блоки управления позволяют адекватно рассчитывать управляющие параметры для однозонных и двухзонных моделей.

Определение способа расчета тепловыделения является одним из важнейших этапов создания математической модели, поскольку от этого зависит точность и адекватность рассчитываемых параметров. Обзор работ не выявил известного способа расчета для сгорания части топлива в детонационном режиме.

Существует несколько различных подходов к расчету процесса горения в двигателях с воспламенением от электрической искры. В основу первого направления положена аппроксимация линии сгорания индикаторной диаграммы, т.е. линии давления газов в функции изменения объема или угла поворота коленчатого вала, математическим уравнением. Недостаток способов этого направления заключается в том, что поскольку форма линии сгорания определяется не только скоростью и полнотой сгорания, но и закономерностями термодинамики и отчасти теплопередачи, а также значениями углов опережения зажигания, то теоретическое выявление раздельного влияния каждого из этих факторов на линию сгорания и, следовательно, на весь цикл и его показатели в рамках данного подхода является весьма затруднительным.

Другой подход основывается на уравнениях термодинамики и скорости тепловыделения. Раскрыть закономерности протекания тепловыделения в двигателе довольно проблематично, поскольку линия сгорания является сложной кривой, характер которой обусловлен взаимодействием факторов, разных по своей природе. Это и механика для учета характера подвода теплоты и изменения объема газов, и химическая кинетика для рассмотрения процесса превращения химической энергии в тепловую и, в какой-то степени, законы теплопередачи, учитывающие потерю части тепла в стенки. Но этот подход позволяет анализировать изменение скорости сгорания во времени и учитывать влияние на него различных факторов, что необходимо для проведения всестороннего математического анализа. Описанные два подхода являются распространенными, но не единственными.

Вибе И.И. предложил способ расчета скорости сгорания в двигателях с воспламенением от электрической искры без использования понятия линейной скорости пламени, а основанный на том, что горение топлива в двигателе является одним из основных процессов, определяющих качество его работы, в т.ч. мощность, удельный расход топлива, долговечность и экологические показатели.

Закономерности развития процессов сгорания во времени представлены Вибе полуэмпирическим уравнением общего характера, которое может быть использовано для широкого спектра условий, т.к. при его выводе не делалось никаких предположений относительно специальных средств, регламентирующих систему (природа исходных веществ и их физическое состояние, конкретный механизм реакции, температура, давление, вихревые движения газов, теплопередача, зарождение эффективных центров в разных точках объема и т.д.)

Уравнения Вибе позволяют описать физическое развитие процесса сгорания во времени как в бензиновых двигателях, так и в газовых, и в дизельных. Из чего можно сделать предположение, что в случае использования жидких, газообразных топлив с воспламенением от искры, а также описать родственные воспламенению дизельного топлива процессы детонации. Таким образом можно не только построить диаграмму цикла и его показатели, но и провести исследования по выявлению зависимостей показателя цикла от характеризующих их параметров. Формула Вибе содержит два определяющих параметра процесса сгорания m и φ_z , или t_z от правильного подбора которых зависит степень соответствия экспериментальных и

расчетных параметров рабочего процесса. Для подбора параметров формулы Вибе может использоваться как статистический материал по тепловыделению в двигателях, так и особенности физико-химических процессов в цилиндре.

В рассматриваемой ситуации можно предположить, что уравнение сгорания топлива примет вид (при условии выгорания 99,9%): $x = 1 - e^{-6.908\left(\frac{t_1}{t_{21}}\right)^{m_1+1}} + 1 - e^{-6.908\left(\frac{t_1}{t_{22}}\right)^{m_2+1}}$, где индексом «1» обозначены параметры, относящиеся к обычному горению, а индексом «2» детонационному.

Заключение. Из описанного выше можно сделать выводы о перспективности разработки ДВС работающего в некоторых режимах с использованием детонации для части ТВС. В связи с уменьшением надежности и увеличением износа необходимо определить количество топлива необходимое для существенного увеличения параметров ДВС не приносящее значительного износа.

В отличие от основных известных подходов, когда увеличение мощности и крутящего момента влечет за собой увеличение расхода топлива выявлена возможность уменьшения количества потребляемого топлива. Задача может решаться путем расчета модели, который обеспечит максимальное давление в цилиндре в нужном диапазоне поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки, что позволяет получить от сжигания заряда максимальную работу и, следовательно, крутящий момент.

Следует изучить возможности управления процессом детонации и определения, как продолжительности времени детонации, момента возникновения и окончания детонации, а также соотношение углеводородов участвующих в детонации и дефлаграции.

В дальнейшем необходимо разработать экспериментальный стенд с возможностью фиксации внешних скоростных характеристик, наблюдения за детонацией и регулирования соотношения доли топлива подвергшегося детонации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang Z., Liu H., Reitz R.D. Knocking combustion in spark-ignition engines // Progress in Energy and Combustion Science. – 2017. – Т. 61. – С. 78-112.
2. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации (1955).
3. Gowthaman S., Sathiyagnanam A.P. Performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition engine—a review // International Journal of Ambient Energy. – 2017. – Т. 38, №. 7. – С. 672-684.
4. Kalghatgi G. Knock onset, knock intensity, superknock and preignition in spark ignition engines // International Journal of Engine Research. – 2017. – С. 1468087417736430.
5. Caton J.A. The interactions between IC engine thermodynamics and knock // Energy Conversion and Management. – 2017. – Т. 143. – С. 162-172.
6. Митрофанов В.В. Теория детонации. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 1982.
7. Патнт РФ 95106076/06 кл. F02B 10.11.97.
8. Патент РФ RU2498095 27.07. 2011.
9. Hall C., Warren I. SAE Trans., 63 (1955).
10. Соколик А.С. Сгорание в транспортных поршневых двигателях. Изд. АН СССР 1951.
11. Булат П.В., Упырев В.В. Детонация и её инициирование – история экспериментального, теоретического и численного исследования // Технические науки – от теории к практике: Сб. ст. по матер. XLVIII-XLIX междунар. науч.-практ. конф. – № 7-8(44). – Новосибирск: СибАК, 2015.
12. Булат П.В. Ударная и детонационная волна с точки зрения теории интерференции газодинамических разрывов – геометрический смысл уравнений газовой динамики сверхзвуковых течений // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 1951-1954.

13. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004.
14. Аронов Д.М., Маст В.С. Автомобильный транспорт. – 1956. – № 12.
15. Левин В.А., Марков В.В. Исследование возникновения детонации при концентрированном подводе энергии // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 2, № 4. – С. 623-629.
16. Левин В.А., Марков В.В., Осинкин С.Ф. Инициирование детонации поршнем в смеси водорода с воздухом // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 258, № 2. – С. 288-291.
17. Береснев М.А. Метод определения угла опережения зажигания для управления ДВС на бинарном топливе: дисс. ... канд. техн. наук. Волгоградский государственный технический университет, 2013. – 150 с.
18. Nazoktabar M. et al. Developing a multi-zone model for a HCCI engine to obtain optimal conditions using genetic algorithm // Energy Conversion and Management. – 2018. – Т. 157. – С. 49-58.

Секция технологического обеспечения систем управления, в т.ч. группового, и моделирования РТК морского базирования

УДК 551.46.077:629.584

Л.В. Киселев, А.В. Медведев

ПАТРУЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ РУБЕЖЕЙ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Рассматривается задача маршрутизации движения группы АНПА при патрулировании морских рубежей. Постановка задачи и ее решение зависят от способа задания границы охраняемой акватории, характера навигационного обеспечения, динамики АНПА при осуществлении заданных поисковых и обследовательских миссий. Представлены два варианта поиска и обследования границы акватории. В первом варианте граница акватории задана горизонтальными сечениями с известными координатами вершин. В другом варианте граница определена изобатами на батиметрической карте, которые соответствуют контуру заданной области обследования. Каждый из аппаратов, входящих в группу, выполняет индивидуальную задачу в рамках общего сценария. Для исследования динамики АНПА при маршрутизации движения используется имитационная модель, организованная на основе программных средств комплекса Simulink Matlab и StateFlow Simulink.

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), навигация и управление движением, батиметрия, рельеф дна, картографирование.

L.V. Kiselev, A.V. Medvedev

PATROLLING OF THE SEA BORDERS OF AUV GROUP

The routing task of AUV group motion when patrolling of the sea borders is considered. The formulation of the problem and its solution depend on the determination method of the protected water area boundary, navigation support features, AUV dynamics during the implementation of the specified search and survey missions. There are two options for searching and discovery of the water area boundaries. In the first option the water area boundaries by horizontal sections with known coordinates of the vertices are given. In another variant, the boundary by the isobaths on the bathymetric chart is determined. Isobaths corresponds to the contour of the given survey area. Each other of the group vehicles performs an individual task by the general scenario. To study the AUV dynamics during the routing of motion imitation model is used. The model on the basis of Simulink Matlab and StateFlow software is organized.

Autonomous underwater vehicles (AUV), navigation and motion control, bathymetry, bottom relief, mapping.

Введение. Патрулирование границ морских акваторий входит в число одной из основных задач при оперативном мониторинге водной среды и морского дна в охраняемых территориях. При обследовании больших областей в морских глубинах целесообразно использовать группу АНПА, работающую по единому сценарию. Задача состоит в организации группового движения АНПА вдоль границы и наблюдении за полводной обстановкой. Оперативный мониторинг подводной сре-

ды осуществляется путем гидролокационной, фототелевизионной съемки дна и донных объектов, гидроакустических и геофизических измерений внешних полей [1–5]. Аппараты могут осуществлять движение по принципу «ведущий-ведомые» и в процессе скоординированных действий производить комплексную съемку в широкой полосе относительно обследуемой границы. Исходная задача разбивается на ряд подзадач:

- ◆ задание границы обследуемой акватории с помощью географических или иных данных для формирования программы движения АНПА,
- ◆ организацию навигационного обеспечения с минимальным объемом данных, достаточным для организации группового движения,
- ◆ поиск границы акватории из произвольного начального положения и определение направления движения вдоль протяженной границы, заданной как плоское сечение пространственной фигуры или изолиния на карте,
- ◆ стабилизацию группового движения вдоль границы с изменением направления движения в зависимости от формы задания границы с помощью навигационных данных,
- ◆ оконтуривание заданной области с возможным переходом на другой уровень программы обследования.

В простейшем варианте обследуемая область водного пространства может быть задана геометрически в виде вертикально расположенного параллелепипеда с координатами вершин на карте местности. Плоские горизонтальные сечения параллелепипеда служат границами для формирования траекторий подводного робота с курсовыми углами, соответствующими ориентации сторон прямоугольного сечения. При наличии батиметрической карты плоскими границами для выбора маршрутов АНПА могут служить изобаты, соответствующие определенным глубинам моря.

При точном задании границы рабочей области в навигационном обеспечении может быть использована система с одним донным гидроакустическим маяком с известными координатами и расположенным в геометрическом центре плоского сечения пространственной области. В этом случае для выработки программы движения «ведущего» подводного робота относительно заданной границы достаточно знание дальности до маяка и пеленга на маяк или курсового угла в системе координат, связанной с маяком.

Поиск заданного рубежа из точки старта осуществляется либо с произвольным начальным направлением движения в сторону границы, либо кратчайшим путем (ортогональным спуском). Алгоритм поиска строится на основе критерия, контролирующего положение аппарата относительно границы с использованием минимального набора навигационных данных. При достижении заданной границы осуществляется переход к её отслеживанию с курсовым углом, определяемым ориентацией данного участка границы в географической системе координат либо в локальной системе координат, связанной с маяком. Отслеживание границы происходит со сменой курсового угла при переходе на другой (ортогональный) участок границы. В процессе поиска и отслеживания рубежа осуществляется стабилизация движения в вертикальной плоскости (по глубине) и по курсу с использованием навигационно-пилотажных данных.

При движении по замкнутой границе происходит оконтуривание области с захватом определенной полосы обследования в зависимости от характера съемки и заданной схемы группового движения.

В работе рассматриваются два варианта организации движения АНПА при поиске и обследовании рубежа. Первый вариант связан с заданием области в виде совокупности плоских сечений с известными координатами вершин и представле-

нием программных траекторий в виде замкнутых циклических контуров по периметру заданного сечения. Другой вариант предполагает использование батиметрической карты и формирование программных траекторий АНПА по изобатам, огибающим заданную область обследования. При моделировании группового движения предполагается, что каждый из аппаратов контролирует выделенный ему рубеж и организует движение по контуру, плоского сечения, решая индивидуальную задачу, что в целом позволяет обследовать всю акваторию в диапазоне заданных глубин.

Рассмотрим возможные варианты решения задачи.

1. Патрулирование рубежа с заданной геометрией области обследования.

Определим область обследования с помощью батиметрической карты акватории путем задания координат (локальных или абсолютных) вершин параллелепипеда, плоские сечения которого образуют границы для формирования маршрутов движения АНПА по замкнутым траекториям. Местоположение АНПА относительно заданной границы определяется с помощью бортовых автономных и гидроакустических навигационных средств. Будем считать, что в области обследования расположен донный гидроакустический маяк-приемоответчик (МО), местоположение которого определено с необходимой точностью. Знание дальности АНПА-МО и углового положения МО (угла места и пеленга) позволяет корректировать местоположение АНПА в выбранной системе координат. Рассмотрим возможные варианты определения ориентации АНПА относительно заданного плоского горизонтального сечения обследуемой области (рис. 1).

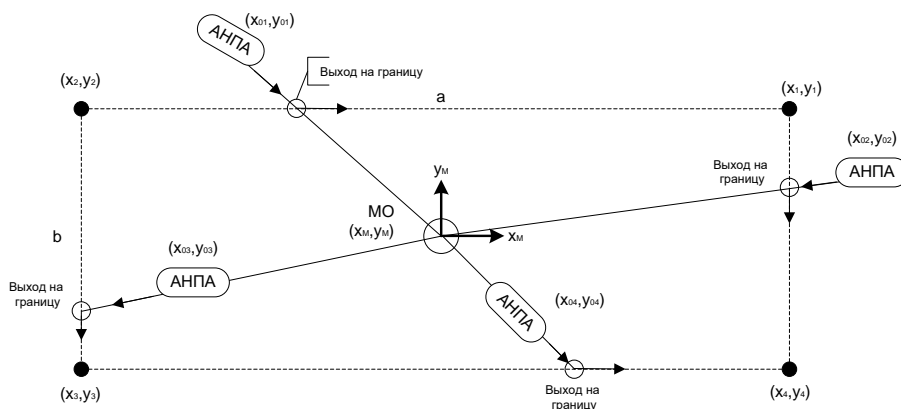


Рис. 1. Схема взаимного положения АНПА и МО

Если D_n – наклонная дальность от АНПА до МО с углом места γ , то горизонтальная дальность АНПА-МО в плоскости сечения $D_r = D_n \sin \gamma$. Будем считать, что проекция МО на плоское прямоугольное сечение с вершинами, имеющим координаты (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , расположена в центре сечения с координатами (x_m, y_m) . Направление на МО из точки с текущими координатами АНПА (x, y) определяется курсовым углом $\varphi_m = \arctg [(x - x_m)/(y - y_m)]$ или пеленгом β при наличии акустической связи с МО.

Сценарий работы АНПА представлен схематично в виде, показанном на рис. 2.

Пусть стороны фиксированного прямоугольного сечения, служащего основанием для формирования программной траектории АНПА, имеют размеры:

$$a = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]^{1/2}, \quad b = [(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2]^{1/2}.$$

Процедура поиска границы зависит от положения АНПА относительно маяка и самой границы. Справедливы следующие неравенства для определения положения АНПА:

АНПА вне заданной области:

$$\begin{cases} D_r \cos \beta > \frac{b}{2}, \text{ движение в направлении ближайшей стороны } a \\ D_r \sin \beta > \frac{a}{2}, \text{ движение в направлении ближайшей стороны } b \end{cases}$$

АНПА внутри области:

$$\begin{cases} D_r \sin \beta < \frac{a}{2}, \text{ движение в направлении ближайшей стороны } a \\ D_r \cos \beta < \frac{b}{2}, \text{ движение в направлении ближайшей стороны } b \end{cases}$$

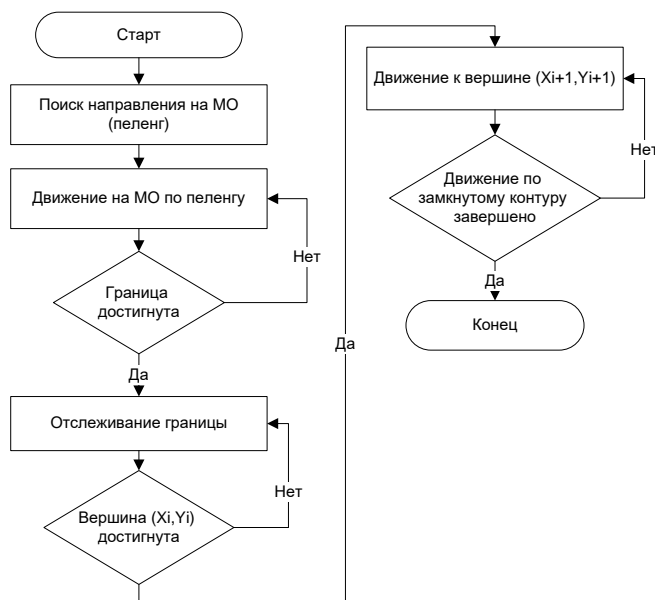


Рис. 2. Схема алгоритма выполнения сценария патрулирования

Контролируя данные неравенства, можно определить условия попадания АНПА на границу обследуемой области. Определим положение обследуемой границы и движение АНПА относительно МО в системе координат $(x_m, y_m) = (0, 0)$ и ориентированной параллельно сторонам прямоугольника. В этом случае координаты вершин прямоугольного сечения принимают значения, соответственно: $\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}\right), \left(-\frac{a}{2}, \frac{b}{2}\right), \left(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}\right), \left(\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}\right)$. Движение АНПА в выбранной системе координат без учета динамики (переходных процессов) определим в виде:

$$\dot{X}_M = v \sin \varphi, \quad \dot{Y}_M = v \cos \varphi,$$

где φ – «курс» аппарата (угол между направлением вектора скорости v и осью Ox), равный либо пеленгу на маяк при поиске границы, либо принимает значения $(0, \pm 90^\circ, \pm 180^\circ)$ при движении по замкнутой границе. Представленные данные ил-

люстрируют геометрию выполняемой АНПА миссии без учета особенностей навигационного обеспечения и динамических свойств системы управления движением. Рассмотрим более детально модель движения АНПА при поиске и отслеживании границы заданной области с учетом указанных особенностей.

Модель динамики АНПА при движении в горизонтальной плоскости (X, Y) представим в связанной с аппаратом системе координат (x, y, z) уравнениями [1–3]:

$$\begin{aligned} m_x \dot{v} &= R_x(v, \beta) + T_x \cos \beta - T_y \sin \beta, \\ m_y v \dot{\chi} &= R_y(v, \beta, \dot{\varphi}) + T_y \cos \beta + T_x \sin \beta, \\ I_{zz} \ddot{\varphi} &= M_z(v, \beta, \dot{\varphi}) + M_{z \text{ ynp}}, \\ \dot{X} &= v \cos \chi, \quad \dot{Y} = v \sin \chi, \quad \varphi = \chi + \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где приняты обозначения: v – скорость относительно потока, m_x, m_y, I_{zz} – массы и момент инерции корпуса по соответствующим осям с учетом присоединенной жидкости, $T_x, T_y, M_{z \text{ ynp}}$ – проекции управляющих сил и момента в системе координат, связанной с корпусом аппарата, φ – курс, χ – угол поворота траектории, R_x, R_y, M_z – гидродинамические силы и моменты, выраженные через их производные по углу дрейфа и угловой скорости, X, Y – координаты в неподвижной системе отсчета. Внешние возмущения в виде постоянно действующих течений здесь не учитываются, их влияние исследовано в указанных выше работах.

В большинстве случаев угловое движение относительно центра масс можно рассматривать независимо от движения центра масс, если пренебречь его динамикой и принять установившееся значение скорости $v = (T_x^{\max} / \tilde{R}_x)^{1/2}$, где \tilde{R}_x – отнесенная к величине v^2 сила лобового сопротивления R_x .

Управление движением при наведении на цель, заданную координатами (X_u, Z_u) , заключается в создании управляющих воздействий $T_x, T_y, M_{z \text{ ynp}}$, определяющих величину и направление вектора скорости при движении к цели. При известных координатах АНПА и цели направление движения аппарата задается курсовым углом $\varphi_{ц} = \arctg [(Z - Z_u)/(X - X_u)]$, и при этом может быть сформировано линейное управление по курсу в виде:

$$T_y = k_{\tau} U_{\varphi}, \quad M_{z \text{ ynp}} = k_{\text{м}} U_{\varphi}, \quad U_{\varphi} = k_1 \Delta\varphi + k_2 \dot{\varphi}, \quad |U_{\varphi}| \leq 1, \quad (2)$$

где $k_{\tau} = T_y^{\max} (m_y v)^{-1}$, $k_{\text{м}} = M_{z \text{ ynp}}^{\max} (I_{zz})^{-1}$, k_1, k_2 – коэффициенты усиления,

$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{\text{зад}}$ – курсовое рассогласование.

Для исследования динамики АНПА в процессе патрулирования рубежа использовалась вычислительная модель, функциональная структура которой показана на рис. 3.

Симулятор построен на основе программного пакета Simulink Matlab. Сценарий патрулирования представлен блоком в нотации StateFlow Simulink. При моделировании динамики использовались данные для малоразмерного АНПА, проект которого разработан в ИПМТ ДВО РАН. Ниже приведены основные характеристики АНПА, соответствующие уравнениям динамики (1):

- ◆ массы m_x, m_y и момент инерции I_{zz} с учетом присоединенной жидкости – 85 кг, 153 кг, 36,5 Нм²;
- ◆ объем (водоизмещение) – 0, 13 м³;
- ◆ коэффициенты лобового и поперечного сопротивления – 0,12, 1,7;
- ◆ максимальные значения продольного упора и управляющего момента – 37 Н, 14 Нм.

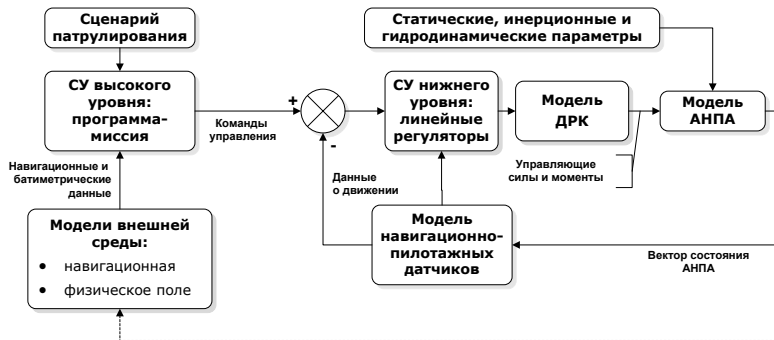


Рис. 3. Функциональная структура вычислительной модели

На рис. 4, 5 показаны примеры траекторий АНПА при различных положениях точки старта и параметры движения, полученные при моделировании в соответствии с описанным сценарием. Пространственный масштаб модели выбран произвольно с возможностью масштабирования всех процедур при анализе реальных процессов.

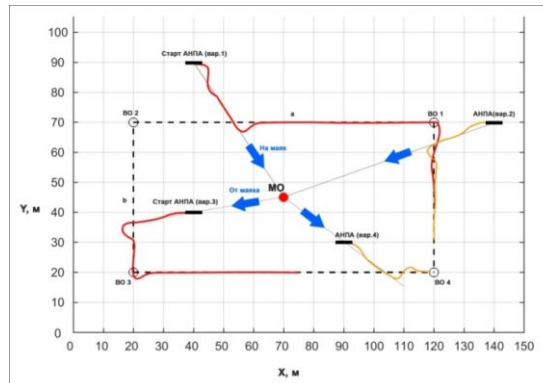


Рис. 4. Траектории АНПА при различных положениях точки старта

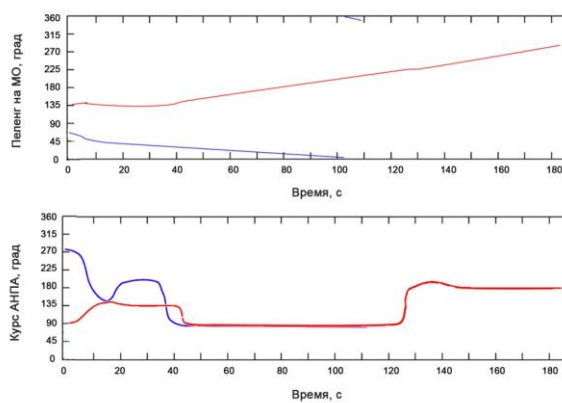


Рис. 5. Параметры движения АНПА: пеленг на маяк и курс аппарата для двух вариантов исходного положения (вар. 1 – красный цвет, вар. 3 – синий цвет) Пеленг и курс определяются в системе координат, соответствующей системе уравнений (1)

2. Патрулирование рубежа по заданной изобате. При наличии батиметрической карты морской акватории рубеж для патрулирования может быть задан в виде изобаты, соответствующей характерной глубине моря или особенностям рельефа дна. Для поиска заданной изобаты и ее последующего отслеживания необходимо определять ориентацию и положение АНПА относительно изобаты. Если изобата задана в координатном виде массивом цифровых данных, а координаты АНПА определяются средствами его навигационного обеспечения, то для решения задачи требуется измерять или вычислять величину градиента поля, представленного в виде батиметрической карты.

Представим батиметрические данные в выбранной системе координат (X, Y) величиной глубины моря $H(X, Y)$ и, соответственно, изобаты $H(X, Y) = const$. Имеет место очевидное равенство: $H(X, Y) = H_a(X, Y) + h(X, Y)$, где $H_a(X, Y)$ – рабочая глубина аппарата, $h(X, Y)$ – высота над грунтом. Если величину H включить в расширенный вектор состояния системы, то получим дополнительное уравнение:

$$\dot{H} = \nabla H_x(X, Y) v \cos \chi + \nabla H_y(X, Y) v \sin \chi,$$

где $\nabla H_x, \nabla H_y$ – проекции вектора градиента на оси системы координат.

Определим «расстояние» D_H от точки с текущим значением поля (глубины моря) до заданной изолинии со значением H_0 и проекцию вектора градиента на направление движения выражениями:

$$D_H = |H - H_0| / |\nabla H|, p = \text{Pr}_v \nabla H = |\nabla H| \cos \gamma,$$

где $\gamma = \beta + \arctg(\nabla H_y / \nabla H_x)$.

Выбор направления движения при выходе на изолинию в соответствии с направлением градиента должен удовлетворять условию: $(H - H_0)p < 0$. В противном случае требуется выполнить поисковое движение, ориентирующее вектор скорости нужным образом.

При движении по изолинии $H(X, Y) = H_0$ составляющие вектора скорости должны удовлетворять «в среднем» кинематическому условию:

$$\nabla H_x v_x + \nabla H_y v_y = 0.$$

Последнее выражение дает значения для программного курса

$$\text{tg} \varphi_{np} = (\nabla H_x v_x + \nabla H_y v_y) / (\nabla H_x v_y - \nabla H_y v_x),$$

зависящие от проекций градиента на связанные с аппаратом оси.

Функции управления ориентацией, положением и скоростью можно разделить, если ввести в качестве цели ориентир с координатами:

$$X_H = D_H \cos \varphi, Y_H = D_H \sin \varphi.$$

Движение по изобате организуется путем задания «трубки», ширина которой изменяется в зависимости от величины градиента. В целом закон управления, обеспечивающий выход на изолинию и движение в заданной трубке Δ_0 , будет иметь вид:

$$U_H = (U_x, U_y), \text{ если } |\Delta H| > \Delta_0,$$

$$U_H = K_\varphi(\varphi - \varphi_s) + K_\dot{\varphi}\dot{\varphi} + K_H D_H \text{sign}(p \Delta H), \text{ если } |\Delta H| \leq \Delta_0,$$

где (U_x, U_y) – линейное управление с ориентацией на цель, $K_\varphi, K_\dot{\varphi}$ – параметры управления при отслеживании изолинии.

На рис. 6,а приведен модельный пример движения по изобате со значением 20 м, оконтуривающей область с максимальным значением глубины моря в акватории. Особенностью данной изобаты является то, что она проходит через районы

с разным уровнем градиента рельефа дна. На рисунке показаны точки, по которым должен перемещаться аппарат в «трубке», планируя свой маршрут в зависимости от ширины «трубки», т.е. величины градиента рельефа дна. При достаточно большом градиенте и малой ширине «трубки» точки маршрута распределены равномерно вдоль изобаты. При увеличении ширины «трубки» (уменьшении градиента) точки маршрута распределяются неравномерно, и осуществляется движение по изобате «в среднем».

Использование маяка-ответчика в системе навигации АНПА позволяет упростить процедуру выхода на заданную изобату и последующего ее отслеживания. В этом случае алгоритм управления аналогичен алгоритму, рассмотренному в разделе 1, и основан на выборе маршрута движения по пеленгу на маяк до попадания на заданную изобату. Модельный пример подобного движения показан на рис. 6,б.

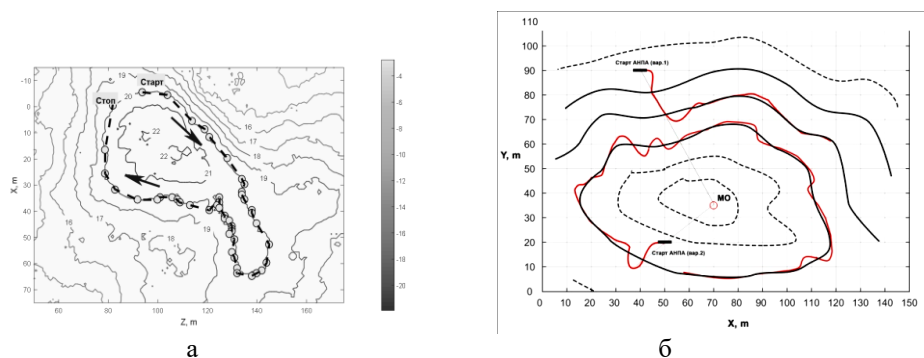


Рис. 6. Примеры движения по изобатам, оконтуривающим характерную область рельефа дна

Очевидно, что модельное представление достаточно сложных процессов дает лишь обобщенную идеализированную картину, позволяющую оценить возможность осуществления процесса патрулирования рубежа на основе имеющихся исходных данных о характере обследуемой морской акватории. В реальной работе необходимо учитывать ряд таких существенных факторов, как ошибки измерительных устройств, ошибки обработки данных, динамические ошибки управления при сложном характере пространственного движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука. 2005. – 400 с.
2. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В. О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 2. – С. 13-26.
3. Киселев Л.В. Управление движением автономного подводного робота при траекторном обследовании физических полей океана // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 4. – С. 141-148.
4. Киселев Л.В., Медведев А.В. Траекторное обследование физических полей океана и их аномалий с помощью АНПА // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – № 1 (11). – С. 24-31.
5. Inzartsev A.V, Kiselev L.V, Medvedev A.V, Pavin A.M. Autonomous Underwater Vehicle Motion Control during Bottom Objects and Hard-to-Reach Areas Investigation/In book "Motion Control", InTech, Vienna, Austria, 2010. – P. 207-228.

УДК 623.952

Ю.Б. Аллакулиев**КОНЦЕПЦИЯ БЕРЕГОВОГО ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ РОБОТАМИ ДАЛЬНОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ**

В работе представлена концепция постоянно действующего, единого по структуре для мирного и военного времени берегового центра управления автономными роботами дальнего радиуса действия для организации управления и связи с ними. Береговой центр управления созданный на ее основе обеспечит устойчивое, непрерывное, оперативное управление робототехническими комплексами в море в любых условиях обстановки, сбор, обработку, анализ и отображение данных обстановки по ним, возможность передачи управления на другой (корабельный, авиационный) пункт управления. Концепция создана на основе современных достижений и требований к системам управления и связи с автономными необитаемыми аппаратами и может быть использована при проектировании и создании Берегового центра управления автономными роботами дальнего радиуса действия.

Береговой центр управления, центр управления АНПА-глайдерами, управление БЦУ, центр управления АНПА, береговая база АНПА, узел связи АНПА.

Yu.B. Allakuliev**THE CONCEPT OF THE COASTAL CONTROL CENTER FOR AUTONOMOUS LONG-RANGE ROBOTS**

The concept of the Coastal permanently operating control center for autonomous long-range robots, that would have a unified in peace and war time structure, is presented in this paper. A Coastal control center created according to the concept will provide the stable operational control of the robotic systems in all conditions at sea; data collection, fusion, analysis, and display; transfer of control to another (ship or aviation) control point. This concept is based on the modern achievements and requirements to AUV (autonomous underwater vehicle) control and communication systems. It can be used in the projection and creation of a Coastal control center for autonomous long-range robots.

Coastal control center, AUV-glanders control center, AUV control center, AUV coastal base, AUV communication center.

Складывающаяся геополитическая картина мира и определяемые ею вызовы обуславливают актуальность развития различных видов технических средств, в том числе и средств робототехники.

Создание подводных робототехнических комплексов (ПРТК) военного и специального назначения требует развития всех без исключения технических наук: гидродинамики; управления; материаловедения; электрохимии; электроники; компьютерных наук и т.д., а так же решение вопроса управления автономными роботами дальнего действия и связи с ними.

Современный этап развития подводных технологий характеризуется существенными достижениями в области энергетических установок автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), системах управления, навигации и связи, что позволяет кардинально увеличить автономность АНПА и обеспечить их способность самостоятельно работать в отдаленных районах Мирового океана [3]. Неотъемлемой частью развития военной и специальной робототехники является разработка автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и комплексов на их основе. Одним из относительно новых направлений является создание АНПА дальнего радиуса действия. Например фирма *Boeing* представила крупнотоннажный АНПА *Echo Voyager* (рис. 1), который способен автономно двигаться под водой на протяжении нескольких месяцев. Длина аппарата составляет 15,5 м,

предельная глубина погружения 3353 м. Аппарат имеет энергетическую установку, подробности о которой не уточняются. Для обслуживания АНПА *Echo Voyager* не требуется специального обеспечивающего судна (ОС), как для других подводных роботов.



Рис. 1. АНПА *Echo Voyager*

Термин «АНПА дальнего радиуса действия» подразумевает, что данный, довольно дорогостоящий, аппарат большого водоизмещения (10–30 т) будет действовать автономно в океанской зоне без оперативного сопровождения (ОС).

Длительная работа таких АНПА по сути является технологическим процессом функционирования Автоматизированной Системы (АС) (в военном лексиконе боевым дежурством). Аппарат является лишь ее элементом, что с необходимостью требует разработки организационной структуры этой АС. В США уже отработывают эти вопросы на глайдерах. Эксперименты по изучению циркуляции океана конца 90-х WOCE и др. проводимые на базе десятков дрейфующих буев, получили развитие в проекте Argo создания и поддержания глобальной сети из 3000 буюв-измерителей. Проект стартовал в 2000 г., на полную мощность вышел в 2007 г., ежегодно добавляется ~800 буюв по \$20 тыс. за ед., ежегодные расходы ~ \$20 млн. В год делается 100 тыс. профилей до глубины 1–2 км.

Примерами реализованных межконтинентальных маршрутов являются переходы АНПА – глайдеров. В 2009 г. глайдер R27 (США) пересек Атлантический океан за 221 сутки, пройдя маршрут (рис. 2) дальностью 7400 км. В этом же году АНПА – солнечный глайдер за 41 сутки прошел от Гавайских островов до г. Сан-Диего, пройдя маршрут дальностью 4000 км. Для управления такими аппаратами в США прорабатываются вопросы создания специальных центров управления АНПА-глайдеров (рис. 3).

Однако, в настоящий момент, как у нас в Российской Федерации, так и в развитых странах мира в связи с недостаточными наработками в перспективном использовании ПРТК в составе различных групп, не прорабатываются вопросы управления автономными обитаемыми аппаратами при выполнении ими поставленных задач. Работы большинства организаций занимающихся созданием робототехнических комплексов (РТК) в основном направлены на создание самих РТК, а вопросы управления и связи с ними рассматриваются недостаточно, ограничиваясь использованием отдельных АНПА с места оператора осуществляющего об-

служивание этого аппарата. Автоматизированное рабочее место оператора, осуществляющего управление АНПА как правило комплектуется всего одним персональным переносным компьютером позволяющим кроме планирования операции, ввода данных и др. отображать на дисплее с цветовым кодированием информации форму и размеры гидролокационного изображения объекта, контур его акустической тени передавать эффекты акустического контраста объекта по отношению к окружающему фону.



Рис. 2. Маршрут глайдера R27 (США)



Рис. 3. Центр управления АНПА – глайдерами в университете Rutgers – прообраз БЦУ

Данную проблему необходимо решить, так как управлять большим количеством подводных аппаратов, занимающихся выполнением разнообразных задач одновременно, с поста оператора работающего на каждый отдельный аппарат невозможно.

С этой целью необходимо создать такой орган управления, который одновременно занимался бы решением вопроса управления робототехническими комплексами и организацией связи с ними. То есть возникла необходимость создания постоянно действующего, единого по структуре для мирного и военного времени органа оперативного управления – Берегового центра управления (БЦУ).

Береговой центр управления автономными роботами дальнего действия – это элемент Территориального центра вышестоящего органа управления. Он должен обеспечивать: устойчивое, непрерывное, оперативное управление робототехническими комплексами в море в любых условиях обстановки, сбор, обработку, анализ и отображение данных обстановки по ним, возможность передачи управления на другой (корабельный, авиационный) пункт управления.

Исходя из определения [5], что пункт управления это место, оборудованное необходимыми средствами управления, откуда командир руководит действиями личного состава подчиненных ему подразделений, применением оружия, использованием технических средств и борьбой за живучесть, а также поддерживает связь со старшим командиром и взаимодействующими подразделениями, Береговой центр управления (рис. 4) должен решать задачи:

1. Обеспечения управления подводными робототехническими комплексами;
2. Обеспечения управления, координация и контроль походов ПРТК РФ;
3. Обеспечения управления повседневной деятельности группировки подводных робототехнических комплексов;
4. Сбора, обобщения и анализа информации по военно-политической обстановке в мире, на стратегических направлениях действия по предназначению группировок ПРТК и по общественно-политической обстановке в Российской Федерации в мирное и военное время.

В составе БЦУ должны быть развернуты и нести дежурство штатные оперативные дежурные смены, предназначенные для круглосуточного управленческого воздействия на все сферы деятельности применения и обеспечения АНПА с условным делением на боевую (Центр управления АНПА) и повседневную составляющие Береговая база и Узел связи.

Силы и средства Центра управления АНПА и Узла связи могут размещаться как в стационарных помещениях, так и в подвижном варианте.

Подвижный вариант БЦУ АНПА более предпочтителен так как, он обладает высокой живучестью и разведывательной защищенностью, которые характеризуют, способность выполнять поставленные задачи в условиях воздействия средств поражения, используемых противником и ведения им активной разведки с помощью технических средств.

В состав БЦУ входят Центр управления АНПА, Береговая база АНПА и Узел связи, которые решают следующие задачи.

Центр управления АНПА:

- ◆ устойчивое непрерывное, оперативное, управление АНПА в море в любых условиях обстановки;
- ◆ устойчивое непрерывное, оперативное управления АНПА при выполнении специальных задач;
- ◆ сбор, обработку, анализ и отображение данных обстановки по АНПА;
- ◆ возможность передачи управления на другой – мобильный (корабельный, авиационный) пункт управления.

Береговая база АНПА:

- ◆ поддержание потенциала АНПА в готовности их использования на необходимом и достаточном уровне готовности;
- ◆ планирование похода с учетом оценки и прогнозирования обстановки по маршруту (надводной, подводной, воздушной, донной);
- ◆ планирование оперативного оборудования маршрута;
- ◆ планирование всех видов, обеспечения (навигационного, гидрографического, гидрометеорологического, спасательного и др.);
- ◆ планирование и управление подготовкой АНПА к походу (в том числе и технической);
- ◆ материальное и техническое обеспечение всеми видами довольствия по присвоенной им номенклатуре материальных средств.
- ◆ охрану и оборону места размещения АНПА.

Береговая база организационно входит в состав БЦУ, имеет необходимый комплект подразделений для материального обеспечения и охраны группировок АНПА в основном пункте базирования и при выполнении поставленных задач.

Узел связи АНПА.

Связь является основным средством обеспечения управления АНПА. Потеря связи есть потеря управления. Потеря управления неизбежно ведет к срыву выполнения поставленных задач.

Управление АНПА, при их использовании по назначению необходимо организовывать комплексным использованием всех элементов основной (стационарной) системы связи и резервной системы связи организации, в чьих интересах они используются, наращивая ее при необходимости средствами других министерств и ведомств (Ростелеком и другие коммерческие структуры).

Основная и резервная системы связи организации осуществляющей управление АНПА должны обеспечить:

- ◆ доведение указаний и распоряжений до АНПА;
- ◆ прием информации от АНПА и доставку их адресатам;
- ◆ обмен информацией АНПА с взаимодействующими силами.

Береговой центр управления ПРТК для управления подчиненными силами должен иметь, как указывалось, ранее пункт управления, силы и средства связи. При разработке рекомендаций по созданию БЦУ учитываем, что управление будет осуществляться через мобильный узел связи БЦУ, путем привязки его к узлу связи или кораблю, находящемуся в районе работы ПРТК, или непосредственно с ПРТК.

Исходя из этого, необходимо организовать следующие виды связи:

- ◆ *связь на сверхдлинных радиоволнах.*

При использовании для передачи информации на ПРТК на сверхдлинных волнах возможен прием на глубине, так как сверхдлинные волны обладают свойством проходить через слой воды.

- ◆ *связь на УКВ (ультракоротких волнах).*

Обеспечивает связь на расстоянии прямой видимости. Организуется для передачи и приема информации с узлом связи имеющим непосредственную связь с ПРТК, или для организации связи непосредственно с ПРТК при нахождении последнего в зоне видимости

- ◆ *радиорелейную связь с УС, имеющим связь с ПРТК;*

Радиорелейная связь сочетает в себе одновременно многие положительные свойства радио- и проводных средств связи. Радиорелейная связь осуществляется на основе специальных средств радиосвязи в диапазоне УКВ. Эти средства устанавливаются на высоких мачтах (башнях), имеют антенные устройства, обеспечивающие остронаправленный характер излучения и обладают большой пропускной способностью.

- ◆ *непосредственную связь с ПРТК по каналу связи «Гонец»;*

Низкоорбитальная система спутниковой связи «Гонец» предназначена для обеспечения подвижных и стационарных абонентов персональной связью в глобальном масштабе с использованием малогабаритных пользовательских терминалов.

Низкоорбитальная система связи "Гонец" обеспечивает персональной связью пользователей, которые могут находиться практически в любой точке земного шара. Система состоит из космического и наземного сегментов и ориентирована как на предоставление услуг связи индивидуальным пользователям, так и на создание корпоративных систем. Основные области применения и возможности системы связи "Гонец":

- ◆ создание выделенных ведомственных (банковских, медицинских, административных) сетей связи;
- ◆ обеспечение связи с удаленными территориями России со слабо развитой инфраструктурой (Крайний Север, Сибирь, Дальний Восток и др.);
- ◆ контроль состояния и местоположения транспортных средств, определение координат с помощью систем (GPS/Глонасс);
- ◆ контроль грузоперевозок с передачей трассы движения в диспетчерский центр, дистанционный мониторинг;
- ◆ экологический и промышленный мониторинг, сбор научной информации (геодезической, гидрологической, от сейсмодатчиков и др.);
- ◆ передача/прием текстовых или файловых сообщений произвольного формата (до 200 кбайт);
- ◆ передача информации от датчиков, расположенных на удаленных объектах, в автономном режиме или по групповым опросам диспетчерского центра;
- ◆ сопряжение с почтовыми службами корпоративной сети или сети Internet.

Донесения на БЦУ с ПРТК должны передаваться, как правило, по радиоканалу космической связи, обеспечивающему наибольшую вероятность приема донесения после первой передачи. Для передачи донесений ПРТК могут использовать любые сеансы связи системы «Гонец», в том числе и не совмещенные с сеансами радиосвязи.

При нахождении ПРТК на больших расстояниях или при возникновении чрезвычайных ситуаций для организации связи с ними предусмотреть возможность использования кораблей-ретрансляторов и самолетов-ретрансляторов.

Для выполнения данных мероприятия предназначен Узел связи, который является важнейшей составляющей БЦУ и должен обеспечить:

- ◆ планирование организации связи и связь с АНПА;
- ◆ поддержание технических средств связи в постоянной готовности к применению и обеспечению связи с АНПА.

Рассмотрим тактико-специальные требования к узлу связи.

При определении требований к узлу связи необходимо учитывать два положения:

- ◆ узлы связи – важнейшие элементы системы связи;
- ◆ на узлах связи пунктов управления (ПУ) выполняются задачи по обеспечению связи, то есть должны выполняться требования к связи, как процессу передачи информации (сообщений).

С этих позиций к УС БЦУ можно предъявить следующие требования:

- ◆ постоянная готовность к немедленной передаче (приему) информации в заданные сроки с требуемой достоверностью и безопасностью;
- ◆ обеспечение максимальных удобств пользования средствами связи и автоматизации должностным лицам БЦУ;
- ◆ высокие живучесть, разведзащищенность и надежность;
- ◆ возможность широкого маневра средствами, каналами и видами связи;
- ◆ удовлетворение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) всех радиоэлектронных средств (РЭС), развернутых в составе Узла связи (УС).

Требование постоянной готовности УС к немедленной передаче (приему) информации (обеспечению переговоров) в заданные сроки с требуемой достоверностью и безопасностью охватывает несколько составляющих:

- ◆ своевременное установление запланированных связей;
- ◆ обеспечение своевременного прохождения сообщений (ведения переговоров) с требуемой достоверностью и безопасностью;

- ♦ пропускную способность УС, рассчитанную на передачу (прием) заданного потока сообщений (переговоров).

С целью выполнения стоящих перед Береговым центром управления задач он должен состоять из (рис. 4):

1. Управления БЦУ.

2. Центра управления АНПА в составе:

- ♦ группа оперативного управления;
- ♦ группа контроля технического состояния АНПА в ходе реализации маршрута выполнения поставленных задач.

3. Береговой базы АНПА в составе:

- ♦ группа планирования применения АНПА;
- ♦ группа планирования оперативного оборудования акватории и взаимодействия с обеспечивающими силами (группа управления обеспечивающей подсистемой);
- ♦ группа планирования подготовки АНПА к применению (группа управления обслуживающей подсистемой);
- ♦ группа оперативного управления и контроля технического состояния АНПА в ходе реализации маршрута;
- ♦ подразделения охраны.

4. Узла связи в составе:

- ♦ группа обеспечения связи;
- ♦ группа планирования связи;
- ♦ группа обеспечения и поддержания технического состояния средств связи в исправном состоянии.

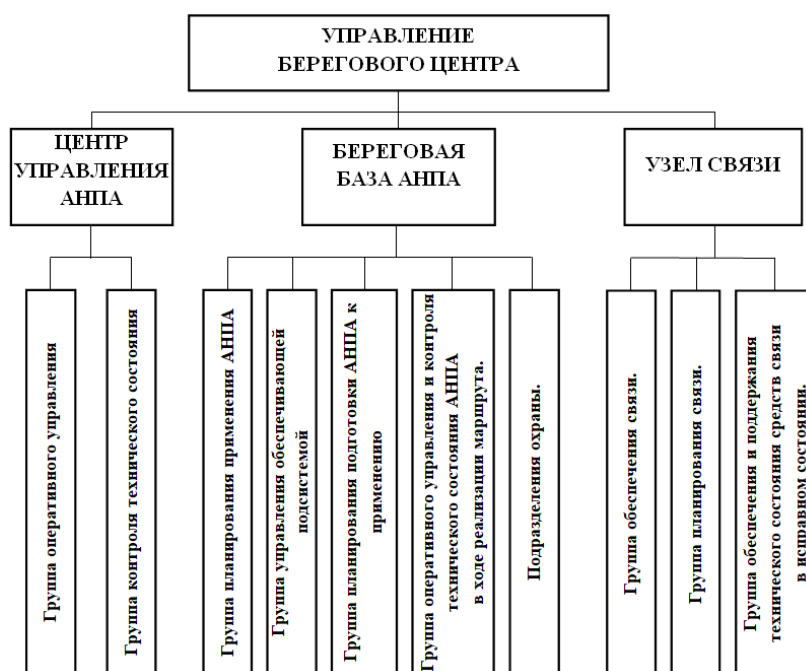


Рис. 4. Береговой центр управления

Береговой центр управления совместно с органами управления взаимодействующих структур должен заниматься вопросами планирования океанских маршрутов и управлением АНПА на всех этапах выполнения маршрута. Работа БЦУ в общем случае должна включать в себя следующие направления:

- ◆ оперативное управление АНПА на всех этапах похода (выход из базы, движение по маршруту, непосредственное выполнение задания и возвращение в базу), включая взаимодействие с обеспечивающими силами и средствами;
- ◆ планирование похода с учетом оценки и прогнозирования обстановки по маршруту (надводной, подводной, воздушной, донной);
- ◆ планирование оперативного оборудования маршрута;
- ◆ планирование всех видов, обеспечения (навигационного, гидрографического, гидрометеорологического, спасательного и др.);
- ◆ планирование и управление подготовкой АНПА к походу (в том числе и технической);
- ◆ планирование связи и связь с АНПА.

При проектировании БЦУ необходимо учесть возможность выполнения им следующих требований. Береговой центр управления должен:

- ◆ - обеспечить управление подводными робототехническими комплексами в соответствии с заданными требованиями;
- ◆ удовлетворять требованиям своевременной и достоверной передачи сообщений и безопасности связи, а также электромагнитной совместимости всех радиоэлектронных средств, развертываемых в районе узла связи;
- ◆ обеспечивать максимальные удобства пользования средствами связи и автоматизации управления;
- ◆ иметь возможность широкого маневра средствами, каналами и видами связи;
- ◆ обладать высокой живучестью и разведывательной защищенностью.

БЦУ это действующий в круглосуточном режиме механизм управления сферами применения и обеспечения АНПА. Он должен обеспечить готовность и способность подводных робототехнических комплексов к выполнению поставленных задач, обеспечить их деятельность необходимыми финансовыми и материально-техническими ресурсами, осуществлять медицинское обеспечение, контроль выполнения гособоронзаказа по кругу своего ведения, комплектовать кадрами и организовывать их подготовку, решение других вопросов.

Новизна подхода при создании БЦУ состоит в том, что сверху донизу, создается структура непрерывного мониторинга, оперативного анализа обстановки и подготовки предложений руководству по организации выполнения первоочередных мероприятий при возникновении нештатных или кризисных ситуаций на использование АНПА.

Наличие такой структуры сводит к минимуму время принятия решений для адекватного реагирования на любую ситуацию по применению АНПА.

Созданный механизм позволит в кратчайшие сроки включить в совместную работу органы военного управления, исполнительной власти и местного самоуправления для выполнения принятых решений.

Помимо постоянной готовности выдать предложения по реагированию на ситуации, Береговой Центр Управления и его структуры на местах смогут обеспечивать органы управления необходимой информацией для текущего и перспективного планирования, подготовки и принятия решений на применение АНПА, их доведение до исполнителей и контроль исполнения.

Важно, что структура оперативных дежурных смен и содержание деятельности БЦУ не будет меняться при различных ситуациях по применению АНПА. Меняется объем информации, интенсивность ее обработки и подготовки необходимых материалов для доклада. То есть наработанные и отлаженные взаимосвязи и алгоритмы продолжают действовать в любых условиях обстановки.

С созданием БЦУ будет обеспечено целенаправленное преобразование системы управления ПРТК, на основе системного использования современных и перспективных возможностей информационных технологий, достигнут совершенно новый уровень управления всеми видами деятельности группировок АНПА, взаимодействия с другими органами исполнительной власти.

Наличие Берегового центра управления группировок АНПА обеспечит возможность в кратчайший срок принять руководством решение на их подготовку и применение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины XXI век. – Хабаровск: Хабаровская краевая типография, 2011. – 277 с.
2. *Лопота А.В., Николаев А.Б.* Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения. – Санкт-Петербург: Государственный научный центр Российской Федерации ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2016. – 47 с.
3. *Наумов Л.А., Илларионов Г.Ю., Лантев К.З., Бабак А.В.* К вопросу о принципах планирования и особенностях формирования глобальных маршрутов автономных подводных роботов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 11: в 2 ч. Ч. 2. – 219 с.
4. Корабельный устав ВМФ. militera.lib.ru Дополнительная обработка: Noaxer (noaxer@mail.ru).
5. Национальный центр управления обороной Российской Федерации. – URL: http://structure.mil.ru/structure/ministry_of_defence/details.htm?id=11206@egOrganization.
6. Long Term Autonomous Ocean Remote Sensing Utilizing the Wave Glider. – Режим доступа: https://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/dbcp/Dbcp45-Workshop-2012/presentations/DBCP-28-Wrk-06-Griffith-Wave-Gliders_Article.pdf.
7. Slocum Glider Expanding the Capabilities UUST 2011/Электронный ресурс. – Режим доступа: http://auvac.org/uploads/publication_pdf/Jones-UST11%20Slocum%20Glider.pdf.
8. The Trans-Atlantic Slocum Glider Expeditions: A Catalyst for Undergraduate Participation in Ocean Science and Technology. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/233645696_The_Trans-Atlantic_Slocum_.

УДК 681.5:623.9:007.5

В.А. Серов, С.А. Устинов, В.И. Максименко

БОРТОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассматриваются вопросы схемотехники основных блоков бортовой системы управления подводных и амфибийных мобильных роботов специального назначения, построенной полностью на российской электронной компонентной базе.

Система управления, схемотехника, микроконтроллер, электронная компонентная база, мобильный робот.

V.A. Serov, S.A. Ustinov, V.I. Maksimenko

ONBOARD CONTROL SYSTEM OF THE SPECIAL MOBILE ROBOTS

The circuitry of the onboard control systems of submarine and amphibious special mobile robots, made completely on the Russian electronic components are considered

Control system, circuitry, microcontroller, electronic component base, mobile robot.

В настоящее время большинство систем управления мобильными роботами [1–4] строятся с применением импортной электронной компонентной базы, что для ряда роботов специального применения является неприемлемым. Кроме того, разрешенная к применению в отдельных образцах специальных изделий импортная компонентная база промышленного (industrial) назначения по ряду показателей (стойкость к внешним воздействиям, наработка на отказ и др.) значительно хуже импортной компонентной базы специального (military) назначения не поставляемой в нашу страну.

Целью исследования являлось создание основных узлов бортовой системы управления подводных и амфибийных роботов специального назначения на новейшей элементной базе российского производства категории качества «ВП» с расширенными функциональными возможностями и включенной в действующие ограничительные перечни.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- ◆ анализ российской электронной компонентной базы категории качества ВП;
- ◆ разработаны схемы электрические принципиальные и конструктивы унифицированного модуля микроконтроллера модуля интерфейса входного, модуля интерфейса выходного, модуля Ethernet, модуля индикации;
- ◆ разработано тестовое программное обеспечение системы управления;
- ◆ разработаны макетные и опытные образцы разработанных узлов;
- ◆ проведены испытания на стойкость к механическим и климатическим воздействиям, а также расчеты по стойкости к специальным факторам;

На рис. 1–3 представлены функциональные электрические схемы унифицированного модуля микроконтроллера, модуля интерфейса входного, модуля интерфейса выходного.

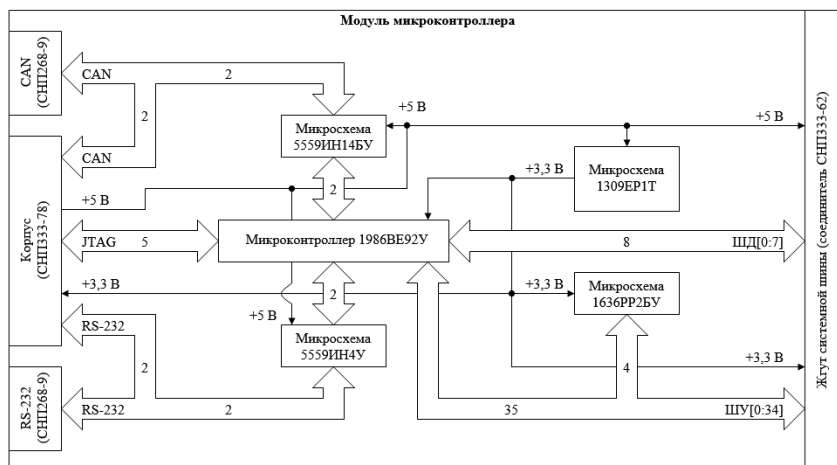


Рис. 1. Модуль микроконтроллера. Схема электрическая функциональная

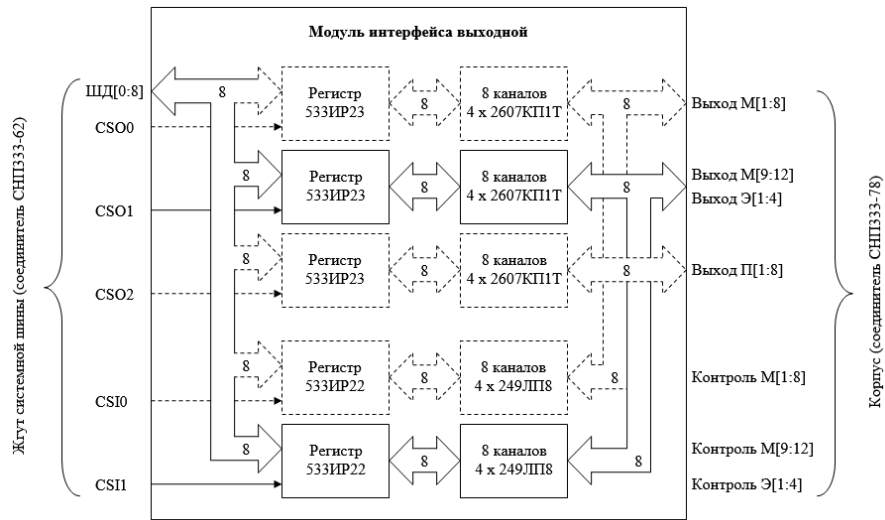


Рис. 2. Модуль интерфейса выходной. Схема электрическая функциональная

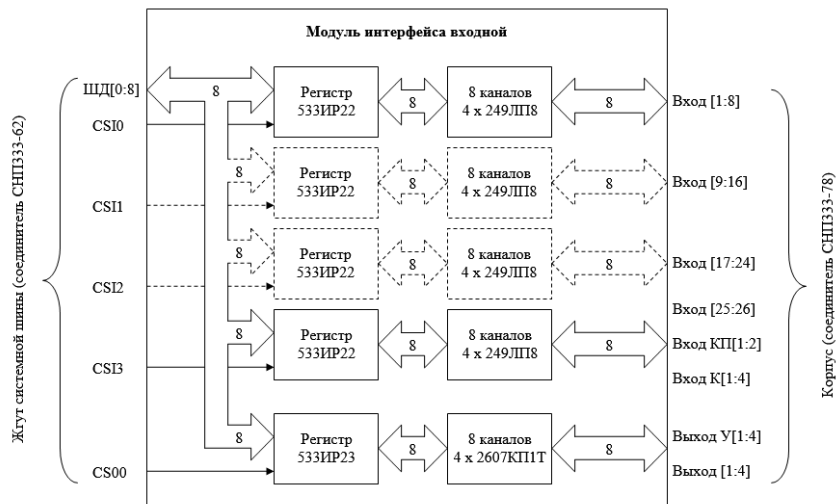


Рис. 2. Модуль интерфейса входной. Схема электрическая функциональная

Основными преимуществами разработанных схмотехнических решений, обеспечивающими возможность их применения в мобильных роботах специального назначения, являются:

- ◆ обеспечение к стойкости к внешним воздействиям согласно комплексу стандартов «Мороз-6» [5];
- ◆ обеспечение стойкости к специальным воздействиям;
- ◆ реализация полностью на отечественной элементной базе категории качества «ВП», включенной в соответствующие ограничительные перечни.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Design and underwater tests of subsea walking hexapod МАК-1 / В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев, А.Е. Гаврилов, Я.В. Калинин, Н.Г. Шаронов // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 (Busan, South Korea, June 19-24, 2016) / Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OOAE) Division of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Pusan National University. – [Busan], 2016. – 9 p
2. The Architecture of the Control System for the Mobile Process Robot with Walking Movers / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, С.Е. Терехов, В.А. Беликов // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2017. – Vol. 11, No. 5 (Special Issue on «Advances in Modern Mechanical Engineering Research»). – С. 337-342.
3. Мироненко К.Б. Архитектура системы управления шагающей машины со спаренными ортогональными двигателями «Ортоног» // Прогресс транспортных средств и систем – 2013: матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2013 г. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – С. 332-333.
4. Минаев Д.Д., Зезюлин Д.В., Куркин А.А., Беляков В.В., Малашенко А.Е., Зайцев А.И. Амфибийное транспортное средство для проведения исследований в прибрежной зоне // Седьмая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (2-6 октября 2017 г.): матер. конф. / ФАНО Российской Федерации, РФФИ (грант № 17-08-20517), ФГБУН «Ин-т проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН (ИПМТ ДВО РАН)». – Владивосток, 2017. – С. 65-69.
5. ГОСТ РВ 20.39.304-98 Комплексная система технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М.: Госстандарт России, 1999. – 54 с.

УДК 551.46.077

А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеенко

**КОНТРОЛЬНО-АВАРИЙНАЯ СИСТЕМА ВЫСОКОГО УРОВНЯ
ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ**

Контрольно-аварийная система (КАС) является одним из основных компонентов информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата-робота (АНПА). КАС обеспечивает как безопасность робота под водой, так и его устойчивость к сбоям подсистем, что повышает вероятность выполнения задания. Основной информацией для распознавания неисправностей являются сигналы, вырабатываемые средствами самодиагностики подсистем робота, а также измеряемые датчиками параметры. Ключевым моментом при реализации КАС является технология создания и сопровождения таблиц, определяющих поведение КАС. Таблицы содержат списки контролируемых параметров, условия наблюдения за ними, а также возможные действия по локализации аварий. В данной работе рассматривается метод динамического построения таблиц КАС, который позволяет настраивать работу КАС с помощью конфигурационного файла. В качестве базы используется программная платформа, разработанная в ИПМТ ДВО РАН.

Автономный подводный робот, аварийная ситуация, реконфигурируемая контрольно-аварийная система.

A.V. Inzartsev, A.M. Pavin, G.D. Eliseenko

**HIGH-LEVEL CONTROL ALARM SYSTEM FOR MULTIFUNCTIONAL
UNDERWATER ROBOTS**

Control alarm system (CAS) is one of the main components of autonomous underwater robot's (AUV) control system. CAS provides both robot safety under the water, and its tolerance to subsystems' failure. It increases the probability of the autonomous underwater vehicle (AUV) mission completion. The key information for recognizing the faults is the signals produced by the self-diagnosis

facilities of vehicle subsystems as well as parameters measured by various AUV sensors. The key moment in the implementation of the CAS is the technology of creating and maintaining tables that determine the behavior of CAS. The tables contain lists of monitored parameters, conditions for monitoring them, and possible actions for localizing accidents. In this paper, we consider the method of dynamic construction of CAS tables, which allows you to configure the operation of the CAS using a configuration file. As a base, a software platform developed at the IMTP FEB RAS.

Autonomous underwater vehicle, emergency situation, reconfigurable control alarm system.

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) находят всё более широкое применение для выполнения длительных океанологических исследований или технологических операций. При осуществлении таких работ крайне актуальна надёжность функционирования робота, и его способность в максимальной степени выполнить предусмотренные задачи.

АНПА можно рассматривать как устройство для генерации целенаправленного и адекватного поведения. Целенаправленность означает, что поведение робота ориентировано на решение поставленных перед ним задач, которые описываются миссией (программой-заданием). Адекватность его поведения определяется способностью разумным образом реагировать на события, происходящие как во внешней среде (например, возникновение препятствий и способность к их обходу), так и на события, возникающие во внутренней среде (например, возникновение неисправностей отдельных устройств аппарата), сохраняя целенаправленность поведения.

Адекватность поведения АНПА поддерживается контрольно-аварийной системой (КАС), которая входит в состав информационно-управляющей системы (ИУС). КАС тем или иным образом проводит диагностику робота и предпринимает необходимые действия при возникновении аварийных ситуаций. Основной информацией, которой оперирует КАС, являются сигналы, вырабатываемые средствами самодиагностики функциональных модулей аппарата (внутренняя информация), а также параметры, измеряемые датчиками внешней среды и навигационной системой АНПА (внешняя информация). К числу основных задач, решаемых КАС, можно отнести:

- ◆ диагностику состояния АНПА на основе анализа внутренних и внешних событий и измеряемых параметров;
- ◆ локализацию аварийных ситуаций путём выполнения действия по восстановлению, использованию альтернативных режимов движения или работы бортового оборудования;
- ◆ трансформацию миссии при невозможности выполнить её целиком.

В настоящее время КАС строится на базе агентно-ориентированной архитектуры ИУС АНПА, а её работа основана на гипотезе об изолированности сигналов и событий. Иными словами, КАС реагирует на эту информацию реактивно – при появлении того или иного сигнала выполняется связанный с этим сигналом программный модуль [1, 2]. Такое поведение аварийной системы оправдано в подавляющем большинстве случаев. Проблема нескольких квазидновременных сигналов, вызванных единичной аварией, разрешается путём настройки временных задержек на реакцию по каждому сигналу.

Для организации работы КАС использует связанные списки, в которых каждой предусмотренной аварии поставлена в соответствие группа контролируемых параметров, а также список возможных действий по локализации аварии (рис. 1). Описание аварии содержит следующие сведения:

- ◆ набор контролируемых параметров (имена, допустимые пределы изменения значения параметра);
- ◆ набор реакций на аварию (ссылка на агентов КАС, допустимое время сохранения причины аварии).

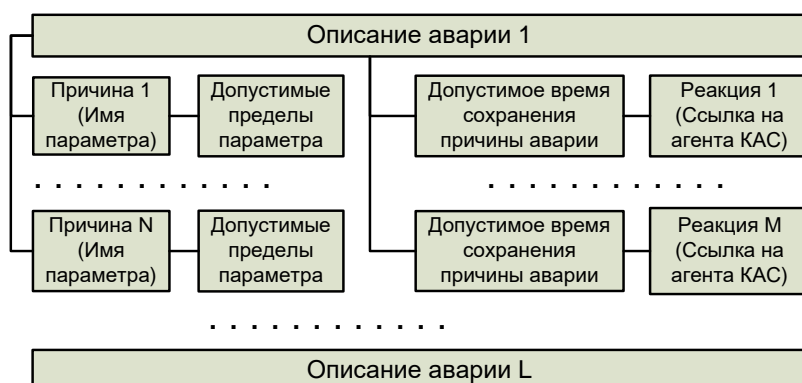


Рис. 1. Организация таблицы КАС

Идентификация аварийной ситуации осуществляется по каждому из контролируемых параметров. Считается, что авария имеет место, если любое из этих несогласований в течение установленного времени превышает заданные пределы. Допустимое время превышения заданных пределов выбирается из списка, связанного со списком возможных действий по локализации. Первоначально выбирается наименьшее допустимое время, а при его превышении инициируется работа связанного агента-обработчика. При сохранении аварийной ситуации далее инициируется агент, связанный с большим допустимым временем и т.д.

Ключевым моментом при реализации КАС является технология создания и сопровождения таблиц, а также поддержка требования открытости и реконфигурируемости системы.

Списки аварийных параметров могут создаваться «вручную», существовать в виде статических таблиц КАС и изменяться только при перекомпиляции исходного кода ИУС. К достоинствам такого подхода можно отнести то, что вся таблица аварий представляет собой цельносвязанный список, позволяющий в процессе настройки и эксплуатации работа легко включить или отключить отслеживание любой аварии КАС. Однако это означает, что при изменении состава модулей системы необходимо также обеспечить изменение (настройку) таблицы КАС в соответствие с новыми структурами данных. Как следствие, такой подход плохо поддерживает требование открытости и реконфигурируемости системы. Немаловажно также влияние субъективного фактора при сопровождении таблиц.

Альтернативой может выступать децентрализованная контрольно-аварийная система. Особенность такого подхода заключается в отсутствии таблицы КАС как таковой, и размещении локальных контрольно-аварийных функций в каждом модуле системы. Иными словами, подход ориентирован на поддержку децентрализованной и реконфигурируемой системы управления, при этом каждый из модулей системы создается одновременно с контрольно-аварийными функциями обработки присущих ему аварийных ситуаций. При подключении или отключении программного модуля к системе связанные с ним аварийные функции также подключаются или отключаются автоматически. Недостатками подхода является сложность изменения условий отслеживания конкретных аварий (что весьма актуально в процессе настройки системы), а также формирование команд управления для обеспечения безопасности аппарата в целом, поскольку контрольно-аварийные действия отдельных модулей нуждаются в координации для управления аппаратом как системой.

Решением проблемы может являться подход, основанный на автоматическом (динамическом) создании таблиц КАС при реконфигурировании системы.

Для реализации КАС используется программная платформа ИУС АНПА разработанная в ИПМТ ДВО РАН, в которой применен единый механизм информационного обмена между программными модулями аппарата [3, 4]. Для динамического построения таблицы аварий, при разработке каждого модуля системы составляется полное описание всех входных и выходных данных (измеряемые параметры имеют установленные пределы, логические параметры и именованные списки имеют значения, которым соответствует авария).

Подключение любого модуля к системе начинается с этапа инициализации, когда головной модуль КАС запрашивает описание всех сообщений от каждого запущенного модуля в системе, а также при появлении (подключении) нового модуля. При этом головной модуль КАС перестраивает свою таблицу аварий и подписывается на получение всех отслеживаемых сообщений.

Работа КАС регулируется конфигурационным файлом. В конфигурационном файле содержатся списки игнорируемых и отключенных параметров, а также список возможных действий (завершение миссии, пропуск фрагмента миссии, запуск агента-обработчика аварии и т.д.).

```
{
  "ignore": ["par1", "par2", ... "parN"],
  "off":    ["par1", "par2", ... "parN"],
  "stage": {
    "parameter": "msg_control_mission_stage_t.stage",
    "stages": {
      "wait_mission": 1,
      "wait_water" : 2,
      .....
      "mission_completed": 14
    }
  },
  "actions": {
    "surface_safe_ballast": {
      "title": "Завершение миссии без сброса балласта"
    },
    "surface_drop_ballast": {
      "title": "Завершение миссии со сбросом балласта"
    },
    .....
  },
  "parameters": {
    "msg_echosounder_state_t.device_ok": {
      "max_counter": 15,
      "stage_ignoge": ["wait_mission", "wait_water", ... ],
      "action": "surface_safe_ballast"
    },
    .....
  }
}
```

Рис. 2. Пример конфигурационного файла КАС

По умолчанию действием на аварийную ситуацию является завершение миссии. Описание действий, связанных с конкретной аварией, можно изменить в файле конфигурации. Действия можно разделить на две группы: требующие приостановки выполнения миссии и не требующие этого. В первом случае вместо миссии начинает функционировать программный агент, выполняющий какие-либо действия (например, перезапуск ИНС в условиях отсутствия движения АНПА). Второй случай может быть связан, например, с пропуском текущей задачи. Кроме того, действия КАС в одной и той же аварийной ситуации могут зависеть от текущей стадии миссии, что находит свое отражение в конфигурационном файле. По умолчанию все параметры отслеживаются на всех стадиях миссии, но при необходимо-

сти в конфигурационном файле могут быть указаны стадии актуальности для любого параметра или группы параметров.

Конфигурационный файл представлен в формате JSON (рис. 2) и содержит массивы с названиями игнорируемых сообщений и параметров, а также массив с названиями отключенных параметров. Имеется также указатель на сообщение, содержащее информацию о текущей стадии миссии, и массив, соотносящий значения этого параметра со стадией миссии. Кроме того, файл содержит описание массива возможных действий на аварийные ситуации. Отдельно описываются параметры, у которых область отслеживания или выполняемое действие отлично от стандартного.

Таким образом, детальная настройка работы КАС осуществляется с помощью конфигурационного файла, и не связана с перекомпиляцией исходного кода ИУС. В настоящее время описанный вариант КАС реализован в одном из проектов ИПМТ ДВО РАН и находится в стадии тестирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – № 1 (23). – С. 4-13.
3. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference & Exhibition, Monterey, California, USA, September 19-23.
4. Павин А.М., Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д. Реконфигурируемая распределенная система для группового управления АНПА // Материалы седьмой всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-7), Владивосток, 2–6 октября 2017 г. – С. 263-269.

УДК 681.51

Д.А. Андриков

МАТРИЧНЫЙ ПОДХОД И ТЕОРИЯ ХАОСА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В работе поставлена цель – задать совпадающее на практике движение автомобиля с теоретическими расчетами при его торможении. Торможение понимается как вращательный процесс с блокировкой одного или двух колес. Для формализации сначала предлагается развить аппарат метода принятия решений. В частности метод анализа иерархий. Далее для обработки временных рядов при торможении автомобиля применяются странные аттракторы, что позволяет понять куда движется, мог двигаться автомобиль или никогда не будет он не сможет попасть.

Автомобиль, устойчивость, матричный подход, странный аттрактор.

D.A. Andrikov

THE MATRIX APPROACH AND THE THEORY OF CHAOS FOR THE ANALYSIS OF VEHICLE STABILITY

The goal is set in the work - to set the traffic of the car coinciding in practice with theoretical calculations during its braking. Braking is understood as a rotational process with the locking of one or two wheels. For formalization, it is first proposed to develop the apparatus of the deci-

sion-making method. In particular, the method of analyzing hierarchies. Next, for processing time series when braking a car, we use strange attractors, which allows us to understand where the vehicle is moving, whether the car could move or never it will not be able to get.

Car, stability, matrix approach, strange attractor.

Актуальность работы. Современное транспортное средство (автомобиль, подвижный гусеничный робот, электрокар и др.) в XXI веке уже представляет сложную кинематико-информационную систему, использующую все современные достижения интеллектуальных систем управления (СУ) для реализации целевого и безопасного движения.

От теоретической информатики СУ используют для контроля состояния машины и оцувствления объектов внешней среды модели и информационно-измерительные средства обработки изображений, методы принятия решений и распознавания подвижных образов, интеллектуальные датчики и сенсоры, принципы адаптивного обучения, машинный анализ массивов данных, модели знаний и др. Вопросы управляемого детерминированного движения ТС рассматриваются в рамках кинематических законов движения и управления. Они основаны на физико-механических законах поступательного, инерционного и вращательного движений подвижных агрегатов, узлов, подсистем. Тем не менее, более пятисот тысяч человек в мире ежегодно травмируется в результате ДТП от неуправляемого движения ТС.

Одна из важных причин неуправляемого движения ТС связана с динамическим возникновением временных условий и технических характеристик у ТС, в результате чего оно способно совершать непоступательное и неуправляемое движение, а человек – лицо, принимающее решение (ЛПР), выступает статистом в этом процессе.

Выходом из сложившейся ситуации неуправляемого движения является интеллектуализация всех стадий и режимов движения с учетом характеристик окружающей среды. Это значит, что все действия по анализу объектов внешней среды, планированием маршрута, контроля текущей обстановки и др. связываются с построением и анализом метасистемы (суперсистемы) «ТС- внешняя среда - водитель». Оригинальность данного подхода состоит в трактовке водителя и его решений, изначально понимаемых как субъект управления и конечные управленческие решения, как элемента метасистемы, имеющей еще одного активного ЛПР. В этих условиях представляется перспективным применение и развитие математического аппарата, ориентированного на обработку знаний и учет недетерминированных нестационарных процессов.

Описание решаемой задачи. Одним из критических видов движения и соответственно оценки качества и эффективности управления ТС в динамике изменения дорожной ситуации является движение в условиях торможения. С одной стороны, при торможении по известным кинематическим законам в силу различного сцепления колес с дорожным покрытием возникают краткосрочные, но большие по энергетике моменты вращений, приводящие к неуправляемому движению. С другой стороны, действия водителя до и после торможения носят субъективный характер, как правило не поддающейся накоплению и обработке. В результате ТС при переходе и осуществлении некорректного торможения не всегда подчиняется воле и командам водителя. Как это ни странно, оно подчиняется в рамках метасистемы целевым установкам другого ЛПР – дорожного покрытия.

Далее рассматривается метод для бортовой интеллектуальной СУ, применяемый для оценки и стабилизации движения ТС, прежде всего в условия торможения. За основу взят ирразвит информационно-кинематический подход в виде матричного описания ТС. Несмотря на то, что в современном автомобиле реакция

на сложившуюся дорожную опасную ситуацию осуществляется автоматически по принципу отрицательной обратной связи, формируемые коалиционные пары в метасистеме и не всегда подчиняются закону сохранения энергии. В результате бесконечно малые возмущения отдельных характеристик внешней среды или состояния ТС резонансно приводят к неуправляемому движению ТС.

В работе на основе матричного подхода формализована модель анализа условий появления взаимодействия «ТС– Дорожное покрытие» (рис. 1). Здесь k1, k2, k3, k4 – линейные номера колес (абсолютная нумерация), ω_{11} , ω_{12} , ω_{21} , ω_{22} – угловые скорости колес в относительной нумерации по двум осям. Величины D, L – длина диагонали, ширина машины соответственно.

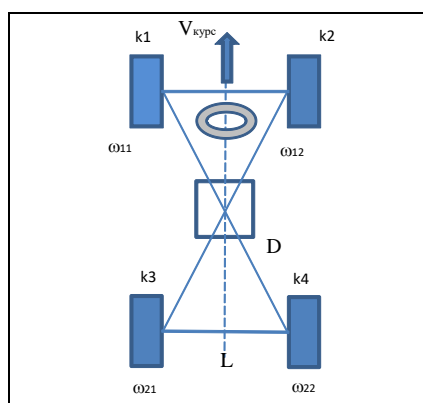


Рис. 1. Информационно-кинематическая схема ТС

Согласно данной схемы колеса автомобиля имеют линейную нумерацию (k1, k2, k3, k4) и относительную нумерацию по осям (11,12, 21,22) соответственно.

Известно, что в процессе торможения автомобильное колесо, вступая в сцепление с дорожным покрытием, замедляет свое вращение от текущего значения (свободного качения) до полной блокировки колеса, что является первым признаком неуправляемого движения. Матричный подход основывается на том, что автомобиль является геометрически протяженным объектом. Он не точечный, так как расстояния между колесами, расстояние между осями влияют на возникающий момент вращения при блокировании колеса. Блокированное колесо выступает в колебательной модели как точка опоры, вокруг которой начинают по некоторой кривой двигаться остальные колеса, уменьшая или увеличивая свою угловую скорость.

Для описания взаимных влияний колес движущегося ТС и оценки последствий блокировки некоторых из колес вводится матрица 4x4 соотношения угловых скоростей пар колес в их абсолютной нумерации в ТС: 1 - 2 - 3 - 4.

$$MATRIX_W = \begin{pmatrix} - & \Delta w_{12} & \Delta w_{13} & \Delta w_{14} \\ \Delta w_{21} & - & \Delta w_{23} & \Delta w_{24} \\ \Delta w_{31} & \Delta w_{32} & - & \Delta w_{34} \\ \Delta w_{41} & \Delta w_{42} & \Delta w_{43} & - \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для полноприводного автомобиля наиболее опасной является ситуация блокировки двух продольно расположенных колес, так как остальные неблокированные колеса поддерживают в продольной оси процесс вращения и усиливают его. Для этого случая вводится матрица весов взаимного влияния блокируемых колес следующего вида.

$$MATRIX_K = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 8 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 8 \\ 8 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 8 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

В отличие от стандартной кинематической модели движения ТС предлагается подход вычисления разворачивающего момента силы ТС с учетом матричных взаимосвязей угловых скоростей между всеми колесами независимо от их состояния. Матрица $MATRIX_W$ является количественной оценкой управляемости движения ТС. Согласно кинематической схемы (рис. 1) блокируемое колесо ij ($i=1-2, j=1-2$) обязательно входит в два контура вращения – поперечный и продольный контуры. В связи с этим, момент силы вращения M_{ROTATE} предлагается оценивать через отношение произведений моментов в продольной и поперечной осях к силе тяги:

$$\begin{aligned} M_{ROTATE} &= F_{CAR} \times \max(R1, R2) \times [\det(MATRIX_W) * MATRIX_K] = \\ &= M_{CAR} V_{CAR} \times \max(R1, R2) \times [\det(MATRIX_W) * MATRIX_K] = \\ &= M_{CAR} \times \max(R1, R2) \times V_{CAR} \times [\det(MATRIX_W) * MATRIX_K] \end{aligned} \quad (3)$$

где F_{CAR} – сила тяги автомобиля, $R1, R2$, – плечи вращения ТС в продольной и поперечной осях, $R1 = \varphi1(L, D, W)$, $R2 = \varphi2(L, D, W)$, M_{CAR} – масса автомобиля, V_{CAR} – линейная скорость автомобиля, $\det()$ – собственное число матрицы.

Главная особенность вычисления M_{ROTATE} заключается в отделении индивидуальных характеристик ТС ($L, D, M_{ТС}, V_{CAR}$ и др.), от соотношения угловых скоростей и взаимосвязи между колесами в виде собственного числа от произведения двух матриц. Собственное число является интегральной характеристикой управляемости, устойчивости **любого** ТС, через который можно выделить ряд дорожно-опасных состояний и далее задать правила переходов между ними и соответственно модель прогноза движения ТС.

Из формулы определения M_{ROTATE} выделяется самостоятельное выражение количественной оценки скоростных характеристик ТС, существенных для возникновения вращения при экстренном торможении – K_{SPEED}

$$K_{SPEED} = V_{CAR} \times [\det(MATRIX_W) * MATRIX_K] \quad (4)$$

Другой подход к оценке устойчивости ТС связан с описанием движения автомобиля через аппарат нестационарных процессов. В условиях неблагоприятной внешней среды (неоднородное дорожное покрытие) возникает задача прогнозирования состояния матесистемы «Транспортное средство – Внешняя среда – Водитель» на основе хаотических процессов. (ТС + ВС + ВД). Неустойчивые состояния описываются хаотическими процессами, которые как правило сложно поддаются анализу в классическом понимании причинно-следственных зависимостей. Динамика таких процессов запутана и сложно прогнозируема. Медленный равномерный рост сменяют большие скачки амплитуды и периода колебаний параметров системы. В общем случае у системы имеется «коридор» возможных траекторий, которые определяются состояние внешней среды (дорожное покрытие, неблагоприятные метеорологические условия и т.п.). Для описания таких «сложных» систем эффективным математическим аппаратом является теория катастроф и динамического хаоса, а соответствующий инструмент – странные аттракторы.

Странный аттрактор – это некоторая область фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности

Оригинальный подход к представлению, оценке и визуализации временных рядов изменения угловых скоростей колес является их аппроксимация математическими моделями странных аттракторов (рис. 2, 3).

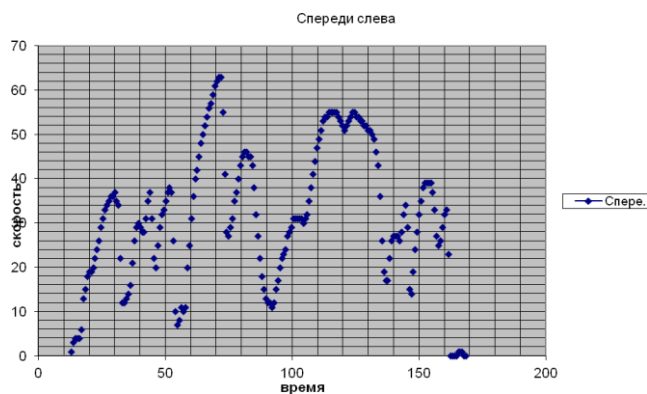


Рис. 2. Визуализация временного ряда изменения угловой скорости левого переднего колеса

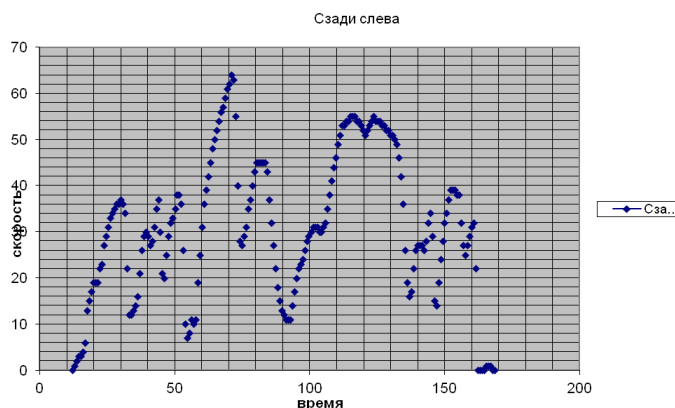


Рис. 3. Визуализация временного ряда изменения угловой скорости левого заднего колеса

Обработка всех участков временных рядов (рис. 2, 3) не имеет успешной аппроксимации. Напротив, данная траектория является одной из уникальных траекторий в фазовом пространстве, генерируемом аттрактором.

Заключение. С позиции общей теории систем в работе неуправляемое движение ТС предлагается описывать на основе матричного подхода и достаточно близкого аппарата анализа иерархий. Кроме того, в случае статистической неопределенности поведение ТС при торможении может описываться в рамках теории катастроф. Наиболее подходящим инструментом выступают модели странных аттракторов, проходящие по некоторой траектории и никогда больше в нее попадающие. Новизна применения теории катастроф определяется тем, что если поведение метасистемы не поддается статистической формализации, то следует считать такую траекторию частью работы странного аттрактора. Знание параметров странного аттрактора позволит в рамках определенной области понять каким может быть курс автомобиля, и каким он точно никогда не будет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соснин Д.А., Яковлев В.Ф. Новейшие автомобильные электронные системы. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.
2. Гзовский М., Милешкин К. Водитель свободен // За рулём. – 2013. – № 8. – С. 42-46.
3. Никульчев Е.В. Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов. – М.: МГУП, 2007. – 162 с.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеев, М.А. Панин

АЛГОРИТМЫ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИИ С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащенные гидролокаторами бокового обзора (ГБО) и фотосистемами могут применяться для автоматического обнаружения и обследования локальных донных объектов. ГБО позволяет эффективно распознавать донные объекты на значительном удалении, в то время как фотосистема используется для детального документирования состояния объектов в ближней зоне. При этом для выполнения мониторинга возможны сценарии использования как одного универсального АНПА, циклически выполняющего этапы обнаружения и фотосъемки, так и группы специализированных АНПА, выполняющих эти действия одновременно (параллельно). В докладе рассматривается модельное решение задачи мониторинга, включающее исследование алгоритмов распознавания объектов и управления АНПА при одиночном и групповом использовании. Эксперименты производились с использованием интегрированной управляющей и моделирующей системы АНПА, что позволяет применять разработанные программные модули на реальных аппаратах. Обсуждаются результаты моделирования, отмечены направления дальнейших работ.

Автономный необитаемый подводный аппарат, автоматический мониторинг акваторий, гидролокационные изображения, выделение и распознавание объектов на изображениях, планирование миссии, моделирующий комплекс.

A.V. Inzartsev, A.M. Pavin, G.D. Eliseenko, M.A. Panin

ALGORITHMS OF WATER AREAS MONITORING BY THE GROUP OF SPECIALIZED AUV

AUV with SSS (side-scan sonars) and photosystems could be used for automatic detection and exploration of local bottom objects. SSS permits effective bottom objects detection at significantly remote distance, whereas photosystem might be used for detailed document of objects state at near distance. Having such circumstances, it's possible to perform different scenarios of using both one universal AUV, which doing cyclic stages of detection and photographing, and the group of AUVs, which doing that actions simultaneously (parallel). This report deals with model solution of monitoring problem, additionally with investigation of AUV detection and control algorithms for individual AUV and group of AUVs. Experiments were made with integrated control and modeling framework for AUV; it leads to the fact that implemented program modules can be used at real vehicles. The results of modeling are discussed; directions of the further works are marked.

Automated underwater vehicle, automated monitoring of water areas, SSS-images, objects detection and recognition, mission planning, simulation framework.

Гидролокатор бокового обзора (ГБО) [1] является эффективным средством для обнаружения донных объектов при выполнении мониторинга акваторий с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов-роботов (АНПА). При проведении таких работ важнейшей задачей является повышение их эффек-

тивности, уменьшение затраченного времени и, соответственно, стоимости. Классическая технология применения АНПА для мониторинга предполагает циклическое повторение запусков, включающих этапы обзорной съемки (акустической, фото, электромагнитной и др.), постобработки полученной информации с целью выявления объектов для обследования и планирования последующих обзорных запусков в районах с уточненными координатами. Перенос функций обработки информации обзорно-поисковых систем на борт АНПА и организация адекватной реакции на обнаруженные в реальном времени объекты позволяет получить желаемый результат за счёт радикального сокращения упомянутой выше технологической цепочки, поскольку миссия (задание для АНПА) может автоматически корректироваться при обнаружении искомым объектов [2]. Один из вариантов автоматического мониторинга подразумевает выполнение поиска заданных объектов с помощью ГБО и их последующего обследования с использованием фотосистемы.

Для проведения мониторинга могут быть использованы как отдельные АНПА, так и их группировки. Сценарий выполнения мониторинга с использованием одного универсального АНПА (оснащенного ГБО и фотосистемой) предполагает циклическое выполнение аппаратом этапов поиска и обследования обнаруженных объектов. Обнаружение объектов в реальном времени на основе акустических данных включает следующие этапы [3, 4].

Предварительная фильтрация. Для подавления шумов используется пространственная взаимосвязь элементов акустического изображения (пикселей). Фильтр не меняет значения точек на границе объектов, но избавляет изображение от локальных (однопиксельных) экстремумов. К достоинствам подобной фильтрации можно отнести низкую ресурсоемкость алгоритма, а также то, что фильтрация оставляет без изменений пиксели на границах даже очень тонких и малоразмерных объектов.

Построение карты градиентов и выделение границ объектов. Для вычисления градиента в каждой точке используется оператор Щарра как обладающий наилучшей круговой симметрией. Проекция акустического изображения на поверхность дна обладает неравномерной решеткой, поэтому значение градиента в каждой точке эхограммы корректируется с учетом высоты и скорости движения АНПА. Отбор наиболее контрастных точек (точек-претендентов на то, чтобы быть границами искомым объектов) производится путем построения гистограммы распределения полутонов для карты градиентов.

Выделение объектов. Для обнаружения заранее неизвестного количества малоразмерных объектов на акустическом снимке используются методы и алгоритмы анализа структуры многомерных данных. При этом применяются процедуры объединения или разделения кластеров (пикселей границ объектов), относящихся к методам иерархического группирования. Для решения задачи объединения пикселей в группы (объекты) по необходимости задается минимальная величина расстояния между объектами, которая определяется исходя из масштаба (разрешения) акустического изображения.

Выявление объектов интереса. Для классификации определяются характеристики (вектор признаков) каждого объекта. К характеристикам относятся: длина границ объекта на изображении; габариты (длина и ширина) самого объекта; расположение объекта (его центра масс); направление объекта на карте дна.

Далее робот выполняет этап фотообследования обнаруженных объектов (рис. 1) с последующим возвращением к режиму ГБО-поиска.

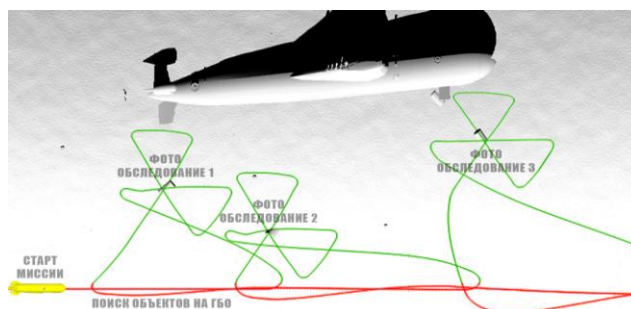


Рис. 1. Результаты модельных экспериментов по поиску и обследованию малоразмерных объектов одним универсальным АНПА (последовательное выполнение этапов поиска и обследования объектов): фрагмент изображения ГБО по левому борту и траектория движения робота

Время выполнения таких работ может быть пропорционально уменьшено за счёт одновременного использования нескольких универсальных АНПА, независимо работающих по описанному сценарию. Как правило, универсальные АНПА являются относительно дорогими и тяжелыми аппаратами, поскольку должны обеспечить как эффективное движение с большими скоростями (что оптимально для ГБО-съемки), так и активное маневрирование вблизи грунта (что необходимо для фотографирования). Кроме того, такое использование АНПА связано с периодическим переходом аппарата от режима ГБО-обнаружения к режиму фотосъемки и обратно. Это обстоятельство значительно ухудшает условия использования ГБО, требующего для работы равномерного и, желательно, прямолинейного движения.

Альтернативным вариантом работы является использование для целей мониторинга групп, состоящих из специализированных роботов. Одни из них являются носителями ГБО и обеспечивают высокопроизводительное покрытие акватории и обнаружение объектов с использованием упомянутых выше алгоритмов. Другие оборудованы фотосистемами и движительно-рулевыми комплексами, позволяющими движение и маневрирование на малых скоростях и высотах. При этом в составе рабочей группы может быть один робот-обнаружитель, и несколько АНПА, обеспечивающих фотографирование. Сценарий работы такой группы приведен ниже.

Один АНПА, оснащенный ГБО для поиска и обнаружения объектов на гидролокационных эхограммах, является «ведущим». Ведущий аппарат обеспечивает формирование обзорно-поисковой траектории. В качестве основной поисковой траектории используется траектория типа «прямоугольный меандр». Такая траектория позволяет получить сплошное покрытие района обследования серией галсов с перекрытием ГБО-эхограмм и гарантирует отсутствие «белых пятен» в обследуемой акватории. Ведущий аппарат должен иметь акустическую информационную связь с другими членами группировки для передачи им координат распознанных объектов и определения дистанции до каждого аппарата в группе.

Другие аппараты, оснащенные фотосистемой для проведения дообследования обнаруженных ведущим аппаратом объектов, являются «ведомыми». Ведомые аппараты следуют за ведущим на некотором удалении, чтобы не создавать помех ГБО-съемке. Распределение аппаратов за ведущим должно быть равномерным вдоль всей полосы покрытия ГБО, с целью минимизации времени подхода к обнаруженному объекту. В случае обнаружения объекта, ведущий АНПА передает координаты и размер объекта ближайшему к цели свободному (не занятому обследованием) ведомому аппарату.

Затем выбранному ведомому посылается специальное сообщение с координатами объекта для исследования; ведомый переключается в состояние «Исследовать точку» и самостоятельно рассчитывает галсы для манёвра подхода к объекту и манёвров для фотографирования.

В свою очередь, после получения команды, ведомый аппарат прерывает миссию следования за ведущим, самостоятельно рассчитывает галсы для манёвра подхода к объекту и манёвров при фотографировании, и производит сплошное фотопокрывание окрестности объекта. После окончания фото-обследования АНПА возвращается к режиму следования за ведущим (рис. 2).

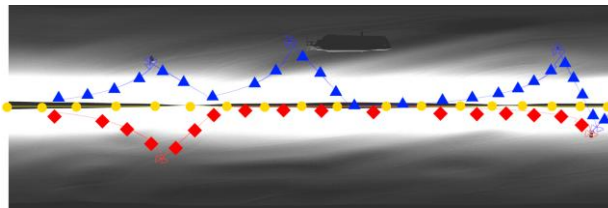


Рис. 2. Фрагмент обследования акватории с помощью группы специализированных АНПА. Нанесены траектории движения «ведущего» (линия с кружками посередине) и двух «ведомых» (траектории с треугольниками и ромбами). В качестве подложки используются ГБО-изображения по обоим бортам «ведущего». Целевыми являются только небольшие донные объекты

Ведущий продолжает следование по намеченной траектории до тех пор, пока:

- ◆ существует хотя бы один ведомый, не занятый фотообследованием;
- ◆ расстояние до самого дальнего ведомого не превышает зоны действия связи.

В противном случае ведущий переходит в режим ожидания («зависания» или «ленивой восьмерки»).

Логика работы ведомого и ведущего аппаратов подробнее показана на рис. 3. В целом, алгоритмы поведения обоих модулей аппаратов представимы в виде конечных автоматов.

Поведение ведущего аппарата описывается двумя основными состояниями. Распознавание объектов и отсылка информации об объектах для ведомых производится в состоянии «Двигаться по программной траектории». Автомат состояний ведомого построен без учёта каких либо сведений о начале или конце миссии. Данное решение продиктовано соображениями потенциальной сменяемости как ведущих, так и ведомых аппаратов в процессе выполнения миссии.

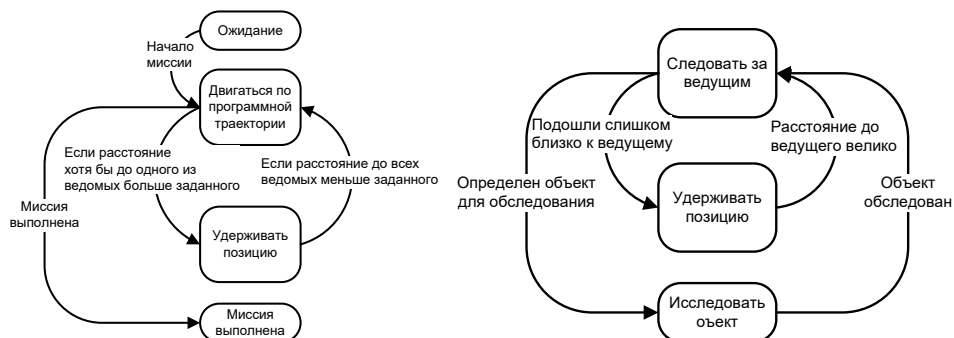


Рис. 3. Автоматы состояний ведущего (слева) и ведомого АНПА (справа)

Одним из определяющих моментов при такой работе являются характеристики используемых акустических каналов (дальность действия и пропускная способность). При небольшой дальности действия канала ведомые вынуждены держаться вблизи ведущего и следовать за ним. При значительной дальности действия канала ведомые могут перемещаться относительно медленно, отслеживая перемещения ведущего «в среднем».

Тестирование алгоритмов, реализующих описанные выше сценарии, проводилось с использованием интегрированной навигационно-управляющей и моделирующей системы АНПА, применяющейся в разработках ИПМТ ДВО РАН [5]. Связующее программное обеспечение системы (middleware) обеспечивает эффективное взаимодействие компонентов, размещенных на различных вычислительных узлах (в том числе, на различных АНПА), объединенных разнородными каналами связи. Исследуемые алгоритмы реализованы и тестировались в виде программных модулей, пригодных для использования в существующих АНПА. Моделировались сценарии работы как для одного универсального АНПА, так и для группы аппаратов, состоящей из одного ведущего АНПА, оснащенного ГБО, и двух ведомых аппаратов, обеспечивающих фотообследование (рис. 1 и 2).

Полученные результаты моделирования подтверждают возможность применения разработанных алгоритмов при выполнении реальных работ. В дальнейшем предполагается исследование поведения группировки АНПА, состоящей из нескольких «ведущих» и «ведомых», и выполняющих одну общую миссию. Кроме того, должен быть разработан механизм идентификации объектов для избегания их повторного обследования разными АНПА. Ряд результатов, использованных в работе, получен при поддержке гранта ДВО РАН программы «Дальний Восток» № 18-5-054 (в части разработки алгоритмов автоматизированного планирования и коррекции обследовательских траекторий движения АНПА при выполнении мониторинга и обзорно-поисковых операций) и гранта РФФИ № 16-07-00350 (в части разработки алгоритмов обнаружения донных объектов с заданными характеристиками на гидролокационных изображениях и организации модельных экспериментов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Золотарев В.В., Золотарев А.В., Федотов Д.Б., Ходоренко М.С.* Обзорно-поисковые гидролокаторы ИПМТ и их применение в составе подводных роботов // Труды VIII международной конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». – М., 2003. – С. 254-256.
2. *Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Рылов Н.И.* Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту АНПА // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 2 (20). – С. 20-27.
3. *Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедеко О.А., Панин М.А.* Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 2 (22), – С. 36-43.
4. *Charles M. Ciany, William C. Zurawski, Gerald J. Dobeck, Dennis R. Weilert* Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment // Proceedings of the OCEANS'03 Conference. San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003. – P. 1119-1125.
5. *Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G.* Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proceedings of the OCEANS'16 Conference. Monterey, USA: MTS/IEEE, September 2016.

УДК 004.032.26:004.932.2

И.В. Сидько, О.Г. Рюмин, А.Д. Ледовской, В.Р. Юшенко**ОБЗОР СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ
АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Выполнен обзор существующих сверточных нейронных сетей (СНС), используемых в системах автономного управления движением беспилотного транспортного средства (БПТС). Управляющий сигнал формируется на основе предсказания СНС по данным с курсовых видеокамер, установленных на кузове. Основными преимуществами использования методов глубокого обучения для решения данной задачи является отсутствие необходимости детектировать отдельные объекты дорожной сцены и применять условные конструкции для формирования управляющего сигнала. Признаки для принятия решения автоматически выделяются в процессе обучения СНС по специальным образом размеченным данным наблюдений. В исследовании рассмотрены архитектуры СНС различных типов: с отсутствием и наличием рекуррентных слоев и остаточных связей. Для исследования эффективности архитектур СНС разработана виртуальная система, моделирующая движение БПТС.

Беспилотное транспортное средство, автономное управление движением, сверточная нейронная сеть, глубокое обучение.

I.V. Sidko, O.G. Ryumin, A.D. Ledovskoy, V.R. Yushenko**SURVEY OF NEURAL NETWORK FOR AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM
OF SELF-DRIVING CAR**

We present a survey in convolution neural networks (CNN) which are currently used for autonomous control system of self-driving car. Data from body mounted front view camera is fed to CNN that predicts a control signal. Primary advantages of applying deep learning methods for this task are reduction the need for detecting separate road scene objects and eliminating conditional statements during control signal generation. Basing on marked observational data features for decision-making are automatically engineered during supervised learning. Different CNN architectures were took into account such as residual and recurrent neural networks. The virtual system that is capable of modeling self-driving cars' movement was developed for estimating CNN accuracy.

Self-driving car, autonomous driving, convolutional neural network, deep learning.

Введение и постановка задачи. СНС нашли широкое применение в задачах автономного управления движением БПТС по данным с курсовых видеокамер, установленных на кузове [1, 2]. Задача управления по данным, поступающим с курсовых видеокамер, состоит в формировании управляющего сигнала с заданной точностью, повторяющего управляющий сигнал, формируемый водителем. Одной из частных задач управления является удержание БПТС в выбранной полосе движения. Данная ограниченная задача успешно решается посредством применения обученных СНС [3–7]. Целью исследования является обзор и оценка эффективности СНС, используемых для решения указанной ограниченной задачи управления. Для обеспечения равных условий для рассматриваемых СНС разработана виртуальная система, позволяющая выполнить оценку эффективности СНС на одинаковом специальным образом сгенерированном наборе обучающих и тестовых синтетических данных.

Актуальные подходы к решению задачи автономного управления движением БПТС. Существующие подходы к решению задачи автономного управления движением БПТС с помощью алгоритмов искусственного интеллекта можно разделить на две группы:

- ◆ подходы, основанные на комплексном восприятии сцены;
- ◆ подходы, основанные на глубоком обучении.

В подходах, основанных на комплексном восприятии сцены, задача делится на подзадачи для выделения отдельных эвристических признаков, влияющих на принятие решения. В качестве отдельных подзадач, например, выступают задачи детектирования пешеходов [8–12], транспортных средств [13–15], дорожных знаков [16–18], линий дорожной разметки [19]. Решения подзадач объединяются и формируется комплексное представление дорожной сцены. Формирование управляющего сигнала в соответствии с комплексным представлением дорожной сцены предполагает разработку решающего правила с помощью условных конструкций. Тем не менее, вследствие значительного разнообразия дорожных сцен, разрабатываемые условия не могут учитывать все возможные ситуации на дороге.

В [3–7] предлагается использование подхода глубокого обучения по обширному набору размеченных данных наблюдений дорожных сцен для учета большего числа событий. Признаки для принятия решения автоматически выделяются в процессе обучения СНС.

В [4] делается особый акцент на востребованности СНС в системах автономного управления движением БПТС. Выдвигается гипотеза, что интеграция алгоритмов глубокого обучения для автономного управления движением в реальные БПТС обоснована, когда предсказание СНС строится на интерпретируемых человеком признаках.

Важно, чтобы пассажиры, страховые компании, правоохранительные органы и разработчики БПТС понимали, чем вызвано поведение системы автономного управления движением БПТС, базирующейся на СНС [4, 20]. С этой целью в [20] описывается метод выделения значимых элементов изображения, близких к интерпретируемым человеком: границ дорожного полотна, полос движения, линий разметки. Значимые элементы соответствуют пикселям, влияющим на итоговое решение СНС. Анализ выделенных значимых элементов осуществляется посредством обратной свертки (convolution transpose) [21], применяемой к картам признаков СНС. Карты признаков каждого сверточного слоя СНС усредняются и приводятся к размерности усредненной карты предыдущего сверточного слоя. Поэлементное умножение полученной карты с усредненной картой предыдущего слоя формирует маску, накладываемую на входное изображение. Таким образом, маска выделяет области изображения, коррелирующие с фильтрами обученной сети и иллюстрирующие пространственное положение выделенных значимых элементов.

Актуальные СНС для решения задачи автономного управления движением БПТС. В исследовании рассматриваются СНС для решения задачи автономного управления движением БПТС с наличием и отсутствием рекуррентных слоев [22, 23] и с наличием и отсутствием остаточных связей [24]: PilotNet [3], ResNet50 [5], LSTM + convLSTM [6], Regr – LSTM [7]. Актуальность данных СНС подтверждается результатами, полученными в [3, 5–7]. Рассмотрим эти СНС более подробно.

СНС с отсутствием рекуррентных слоев представлены в исследовании: PilotNet, ResNet50. Данные СНС принимают на вход в момент времени t_i единственное изображение I_i . Архитектура СНС PilotNet, предложенная компанией NVIDIA, представлена на рис. 1.

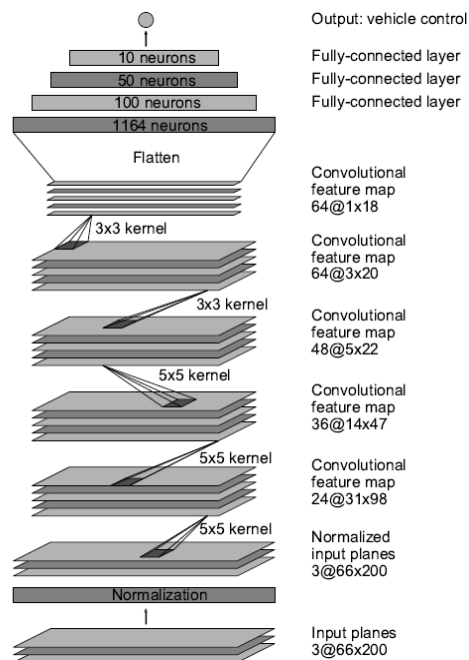


Рис. 1. Архитектура CHC PilotNet из [3]

В [3] CHC PilotNet обучается в режиме реального времени на реальных данных при помощи специально разработанной системы DAVE-2. Изначально обучение производится для выделения признаков дорожного полотна. С этой целью на вход CHC подаются изображения, соответствующие положению автомобиля в центре выбранной дорожной полосы для различных дорожных сцен. Впоследствии обучающий набор дополняется альтернативными вариантами положения БПТС относительно выбранной дорожной полосы для обеспечения обобщающей способности CHC.

В [5] показано, что к задаче автономного управления движением БПТС адаптируется классификационная CHC ResNet50, изначально обученная на наборе данных ImageNet. Архитектура адаптированной CHC ResNet50 представлена на рис. 2. Адаптация CHC ResNet50 к задаче управления движением БПТС производится путем добавления полносвязных слоев и последующим переобучением итоговой CHC.



Рис. 2. Архитектура адаптированной CHC ResNet50 из [5]

СНС с наличием рекуррентных слоев представлены в исследованиях [6, 7] соответственно. Рекуррентные слои предназначены для учета предыдущих состояний СНС при предсказании выходного значения. Основная идея применения рекуррентных слоев для решения задачи автономного управления движением БПТС состоит в извлечении пространственно-временных признаков из входной последовательности изображений для формирования управляющего сигнала. СНС учитывается информация о динамике движения и фиксируются отличия в изображениях для разных значений предсказываемого параметра. Современные СНС в качестве рекуррентного слоя используют слои так называемой длительной кратковременной памяти (LSTM). Преимущество LSTM слоя в сравнении с простым рекуррентным слоем (simple RCC) заключается в предотвращении проблемы затухания градиента [23], что могло бы повлечь увеличение ошибки предсказания СНС при увеличении её глубины.

Архитектура СНС из [6] представлена на рис. 3.

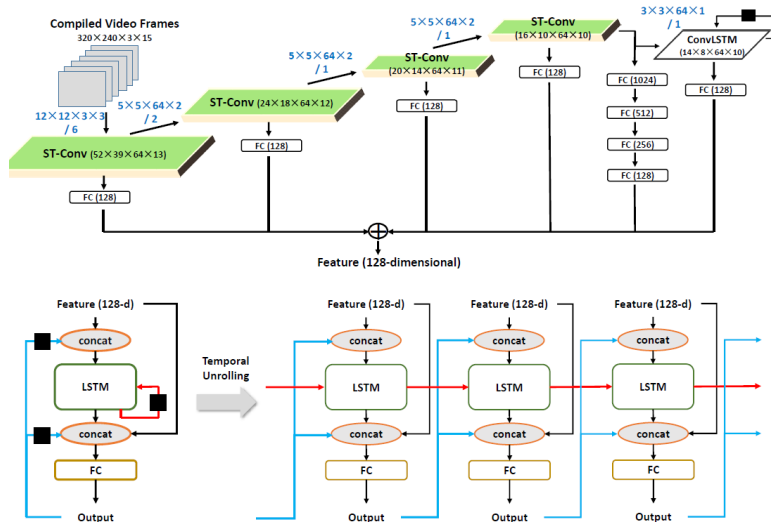


Рис. 3. Архитектура СНС LSTM + convLSTM из [6]

Данная СНС именуется как LSTM + convLSTM. На вход СНС LSTM + convLSTM поступает последовательность изображений I_{i-w+1}, \dots, I_i , где w – заданное число изображений в последовательности. В первом сверточном слое СНС LSTM + convLSTM используется 3D-свертка, применяемая к видеопоследовательности изображений заданной длины. 3D-свертка в совокупности с рекуррентными слоями позволяет СНС учитывать динамику движения БПТС при предсказании управляющего сигнала. Остаточные связи при формировании карт признаков последующих сверточных слоев позволяют напрямую учитывать информацию о картах признаков произвольного набора предшествующих сверточных слоев.

Архитектура СНС из [7] представлена на рис. 4. Данная СНС именуется как Regr-LSTM. Аналогично СНС LSTM + convLSTM на вход СНС Regr-LSTM поступает последовательность изображений заданной длины. Ключевое отличие Regr-LSTM состоит в том, что регрессионная задача сводится к задаче классификации посредством изменения количества нейронов выходного слоя СНС и замены функции активации последнего полносвязного слоя на синусоидальную, для которой предсказываемый управляющий сигнал выступает в качестве значения фазового сдвига.

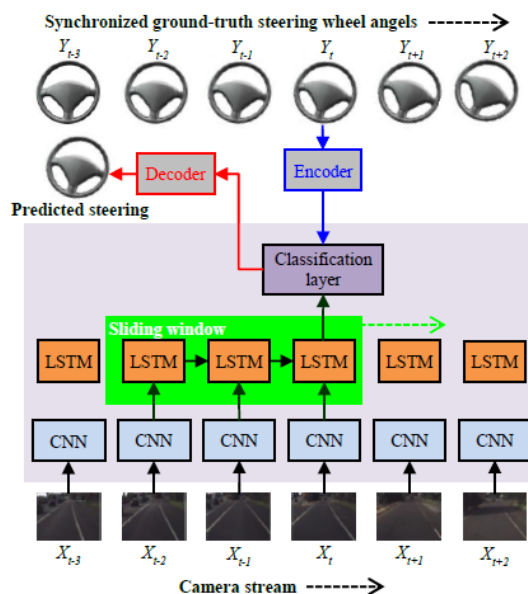


Рис. 4. Архитектура CHC Regr-LSTM из [7]

Для сравнительного анализа эффективности представленных СНС на заданном обучающем наборе данных произведена их реализация с использованием фреймворка глубокого обучения TensorFlow и сконструирована система обучения и тестирования СНС.

Система обучения и тестирования СНС. Для обучения и тестирования рассматриваемых СНС в режиме реального времени на наборе синтетических данных, обеспечивающих равные условия для всех рассматриваемых СНС, по аналогии с системой DAVE-2 из [3] разработана виртуальная система обучения и тестирования СНС. Система включает в себя: 3D-модель дорожной сцены, 3D-модель БПТС, упрощенную физическую модель БПТС. Система моделирует движение БПТС в заданных условиях и генерирует специальным образом подготовленные синтетические изображения с виртуальной курсовой камеры БПТС. Физическая модель БПТС описывает абстракцию, включающую только лишь корпус и колесные пары БПТС. Передняя колесная пара задает направление движения БПТС. Задняя колесная пара задает скорость. Функционал системы включает интерфейс пользователя для выбора одного из двух режимов работы: режима обучения СНС и режима тестирования обученной СНС.

В режиме обучения СНС оператор задается траектория движения БПТС и общее время движения БПТС по заданной траектории T . В каждый момент времени t_i с шагом Δt ($t_i = t_{i-1} + \Delta t$) на вход СНС передается изображение дорожной сцены I_i (или k последних изображений для рекуррентных СНС). Каждому изображению соответствует определенное траекторией значение эталонного управляющего сигнала c_i . Для достижения инвариантности СНС к изменению геометрии кузова БПТС в качестве управляющего сигнала принимается величина $c_i = 1/r_i$, обратная радиусу поворота r_i . Для входного изображения I_i СНС предсказывает значение обратного радиуса поворота p_i на основе весовых коэффици-

ентов W_i . Оценивается ошибка L_i – среднеквадратическое отклонение значений предсказанного управляющего сигнала p_i от эталонного управляющего сигнала c_i . Минимизация ошибки L_i в каждый момент времени t_i ведет к перерасчету весовых коэффициентов W_i для улучшения точности предсказания. В [7] отмечается, что выбор параметра Δt может сказываться на эффективности сети, особенно это актуально в архитектурах с рекуррентными слоями. Этот факт подтвержден в проведенном исследовании. При большем значении параметра Δt , последовательность из w видеоизображений описывает менее устойчивую динамику БПТС на большом участке движения, что может привести к нестабильности сети в прогнозах предсказываемого параметра.

Режим тестирования обученной СНС разработан для сравнительного анализа эффективностей рассматриваемых архитектур. В каждый момент времени t_i система передает изображение дорожной сцены I_i на вход обученной СНС. СНС предсказывает управляющий сигнал p_i . Предсказанный сигнал p_i определяют траекторию движения модели БПТС. Выбранная метрика для оценки эффективности сети – процент времени, при котором модель БПТС автономно управляется на пути следования до заданной точки без вмешательства оператора. Вмешательство (принудительная корректировка виртуального пространственного положения БПТС) происходит, если модель БПТС отклоняется от центра выбранной полосы движения на наперед заданное расстояние. Процент времени автономного управления E рассчитывается по формуле (1):

$$E = \left(1 - \frac{t_c \cdot k}{T}\right) \cdot 100, \quad (1)$$

где t_c – заданное время, необходимое оператору для изменения виртуального пространственного положения БПТС; k – число вмешательств оператора; T – суммарное время длительности движения БПТС.

Размер изображений дорожной сцены, формируемых в системе для моделирования движения БПТС, составляет $1024 \times 768 \times 3$ элементов изображения. Кадровая частота системы 20 Гц. Для повышения эффективности и обобщающей способности архитектур для задачи автономного управления движением БПТС экспериментально выбрано цветовое пространство YUV. Выбор цветового пространства определяет способ хранения цветовой информации изображения, который влияет на процесс выделения признаков и пересчета весовых коэффициентов.

Результаты сравнительного анализа. С помощью описанной системы в режиме реального времени проведено обучение и тестирование архитектур PilotNet, ResNet50, Regr-LSTM и LSTM + convLSTM. Примеры синтетических изображений дорожной сцены, сгенерированных разработанной системой, представлены на рис. 5.

В табл. 1 для каждой из рассматриваемых архитектур СНС приводятся полученные оценки эффективности: ошибка обучения на последней итерации, усредненная ошибка на тестовой выборке, процент времени автономного управления. Среди рассматриваемых архитектур СНС наибольшая эффективность отмечается для: PilotNet, Regr-LSTM, LSTM + convLSTM (предсказание по входным изображениям с предварительно выделенной областью интереса).



Рис. 5. Примеры изображений используемых для обучения и тестирования СНС

Таблица 1

Оценки эффективности рассматриваемых архитектур СНС

Архитектура	Ошибка обучения на последней итерации	Усредненная ошибка на тестовой выборке	Время автономного управления, %
PilotNet	0.054	0.059	87
ResNet50	0.058	0.063	85
Regr-LSTM	0.049	0.065	86
LSTM + convLSTM	0.052	0.056	92

Сравнительный анализ архитектур показал, что наиболее высокий процент времени автономного управления 92 % продемонстрировала архитектура СНС LSTM + convLSTM с наличием сверточного и полносвязного рекуррентных слоев и остаточных связей. На рисунке 6 представлена визуальная интерпретация эталонного управляющего сигнала, генерируемого системой (черный маркер), и формируемого в результате предсказания LSTM + convLSTM (белый маркер). Из рассматриваемых СНС без рекуррентного слоя и остаточных связей наибольшей эффективности достигла PilotNet – 87 % времени автономного управления.

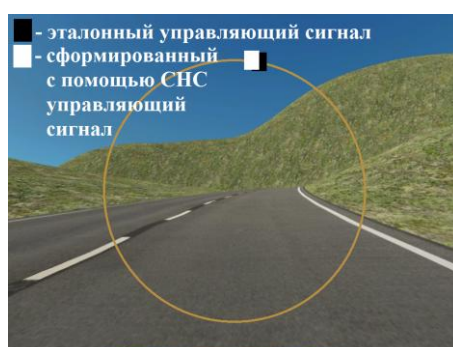


Рис. 6. Интерпретация эталонного управляющего сигнала, генерируемого системой (черный маркер) и формируемого в результате предсказания LSTM + convLSTM (белый маркер)

Заключение. В исследовании выполнен обзор и сравнение эффективности актуальных СНС, используемых в системах автономного управления движением БПТС. Для исследования эффективности СНС разработана виртуальная система, моделирующая движение БПТС. Сравнительный анализ эффективности показал, что СНС, учитывающие динамические признаки БПТС, обеспечивают более высокие характеристики по критерию времени автономного управления. Проведенный анализ также позволяет отметить, что:

♦ интерпретация выделяемых СНС признаков позволяет убедиться в целесообразности применения подхода для формирования управляющего сигнала в реальных условиях;

♦ предварительная нелинейная обработка изображений (использовалась в ряде отдельных тестов) может оказывать существенное положительное влияние на результат выделения признаков СНС.

Подробное рассмотрение данных аспектов является темой дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Xu H., Gao Y., Yu F., and Darrell T.* End-to-end learning of driving models from large-scale video datasets, CVPR, 2017.
2. *Dai J., Li Y., He K., and Sun J.* R-FCN: object detection via regionbased fully convolutional networks, NIPS, 2016.
3. *Bojarski M., Testa D.D., Dworakowski D., Firner B., Flepp B., Goyal P., Jackel L.D., Monfort M., Muller U., Zhang J., Zhang X., Zhao J., and Zieba K.* End to end learning for self-driving cars, CVPR, 2016.
4. *Kim J., Canny J.F.* Interpretable learning for Self-Driving Cars by Visualizing Causal Attention, ICCV, 2017.
5. *Du S., Guo H., Simpson A.J.* Self-driving car steering angle prediction based on image recognition, CVPR, 2017.
6. *Chi L., Mu Y.* Deep steering: end-to-end driving model from spatial and temporal visual cues, CVPR, 2017.
7. *Eraqi H.M., Moustafa M.N., Honer J.* End-to-end deep learning for steering autonomous vehicles considering temporal dependencies, NIPS, 2017.
8. *Zhu Q., Yeh M., Cheng K., and Avidan S.* Fast human detection using a cascade of histograms of oriented gradients, CVPR, 2006.
9. *Dollar P., Wojek C., Schiele B., Perona P.* Pedestrian detection: an evaluation of the state of the art // Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34, No. 4. – P. 743-761.
10. *Oren M., Papageorgiou C., Sinha P., Osuna E., Poggio T.* Pedestrian detection using wavelet templates, CVPR, 1997.
11. *Xu F., Liu X., Fujimura K.* Pedestrian detection and tracking with night vision // in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2005. – Vol. 6, No. 1. – P. 63-71.
12. *P. Dollar, C. Wojek, B. Schiele, P. Perona.* Pedestrian detection: A benchmark, CVPR, 2009.
13. *Sivaraman S., Trivedi M.M.* Looking at Vehicles on the Road: A Survey of Vision-Based Vehicle Detection, Tracking, and Behavior Analysis // Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2013. – Vol. 14, No. 4. – P. 1773-1795.
14. *Tsai L.-W., Hsieh J.-W., Fan K.-C.* Vehicle Detection Using Normalized Color and Edge Map // IEEE Transactions on Image Processing. – 2007. – Vol. 16, No. 3. – P. 850-864.
15. *Hadi R.A., Sulong G., George L.E.* Vehicle detection and tracking techniques: a concise review // SIPIJ. – 2014. – Vol. 5, No. 1.
16. *Fang C.Y., Fuh C.S., Yen P.S., Cheng S., Chen S.W.* An automatic road sign recognition system based on computational model of human recognition processing // Computer Vision and Image Understanding. – 2004. – Vol. 96, No. 2. – P. 237-268.
17. *Garcia-Garrido M.A., Sotelo M.A., Martin-Gorostiza E.* Fast traffic sign detection and recognition under changing lighting conditions, ITSC, 2006.

18. Escalera A de la, Armingol J.M. Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles // Image and Vision Computing. – 2003. – Vol. 21, No. 3. – P. 247-258.
19. Aly M. Real time detection of lane markers in urban streets // Intelligent Vehicles Symposium, 2008.
20. Bojarski M., Yeres P., Choromanska A., Choromanski K., Firner B., Jackel L.D., and Muller U. Explaining how a deep neural network trained with end-to-end learning steers a car, CVPR, 2017.
21. Dumoulin V., Visin F. A guide to convolution arithmetic for deep learning, COPR, 2016.
22. Eigen D., Rolfe J., Fergus R., and LeCun Y. Understanding deep architectures using a recursive convolutional network, ICLR, 2014.
23. Shi X., Chen Z., Wang H., Yeung D., Wong W., and Woo W. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting, NIPS, 2015.
24. He K., Zhang X., Ren S., and Sun J. Deep residual learning for image recognition, CVPR, 2016.

УДК 681.2-2; 629.5.081.2

А.Н. Зиневич, М.В. Китаев

АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

Целью настоящей работы является изложение основных положений и способа автоматизации механического метода контроля и анализа геометрических характеристик гребных винтов. Перечислены типовые работы по восстановлению проектной документации на изготовление гребных винтов, определению отклонений фактических значений основных геометрических характеристик от их проектных значений. Предложена концептуальная модель установки контроля геометрии и автоматизации реинжиниринга гребных винтов.

Гребной винт, реинжиниринг, проектная документация, судоремонт.

A.N. Zinevich, M.V. Kitaev

AUTOMATIZATION OF THE GEOMETRY CONTROL METHOD OF SCREW PROPELLERS

The purpose of this paper is to explain the main features of geometric characteristics of ship's screw propellers control method aimed to the atomization of mechanical measurement method and analyzing algorithm. Typical steps for restoration of ship's screw propellers design documentation for propellers manufacture and are shown. The example of deviations actual values of the main geometric characteristics from their design values determination are shown. The conceptual 3D model of the device for ship's screw propellers geometry control and automation of the reengineering is proposed.

Ship propellers, reengineering, design documentation, ship repair.

Введение. При эксплуатации судна нередки случаи повреждения гребных винтов вследствие посадки судна на грунт, намотки тросов и сетей, кавитации, локальных ударов, не редки случаи потери винтов и др. Часто при ремонте гребных винтов возникает проблема определения отклонений фактических геометрических характеристик винтов от их проектных значений. При отсутствии проектных данных и необходимых чертежей можно рассматривать два варианта решения этой проблемы:

1. Спроектировать новый гребной винт.
2. Воспользоваться технологией реинжиниринга.

Первый вариант является довольно трудоемким и требует выполнения большого количества вспомогательных расчетов, проведения ходовых испытаний, что в условиях срочного ремонта не всегда представляется возможным.

Второй вариант является менее трудоемким, а соответственно и более быстрым, дешевым и позволяет получить необходимые чертежи на основе результатов измерений фактического гребного винта. Реинжиниринг позволяет обойтись без ходовых испытаний и получить гребной винт с геометрическими характеристиками равными проектным значениям.

Таким образом, автоматизация ручных расчетов и механического метода контроля и анализа геометрических характеристик гребных винтов является важной научно-практической задачей.

Автоматизация контроля геометрии гребных винтов. Процесс реинжиниринга исходного винта и подготовки конструкторской документации можно разделить на следующие основные этапы:

1. Проведение замеров фактического гребного винта.
2. Обработка результатов замеров.
3. Разработка документации для изготовления гребного винта.
4. Определение отклонений фактического винта от проектных параметров.
5. Заключение о ремонтпригодности гребного винта.
6. Ремонт или изготовление гребного винта.
7. Контроль качества ремонта/изготовления гребного винта.

Замеры геометрических характеристик гребного винта выполняют с учетом рекомендаций ГОСТ 8054-81 [1], ГОСТ Р 52692-2006 [2], ГОСТ Р 52693-2006 [3].

При измерении геометрических характеристик гребного винта первым делом выбирают базовые плоскости (вертикальная и горизонтальная), относительно которых будут производиться замеры. Геометрические характеристики гребного винта контролируются на радиусах 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 и 0.95. При помощи измерительного оборудования фиксируются следующие параметры: координаты 8–9 точек на каждом расчетном радиусе, включая концевые точки лопасти, в каждой точке фиксируются расстояние от точки до базовой плоскости (по вертикали) и угол (по горизонтали), толщина сечения (оценивается по нормали к засасывающей поверхности), фиксируется положение сечения наибольшей толщины на расчетном радиусе. Схема произведения замеров показана на рис. 1,а, а процесс проведения замеров гребного винта показан на рис. 1,б.

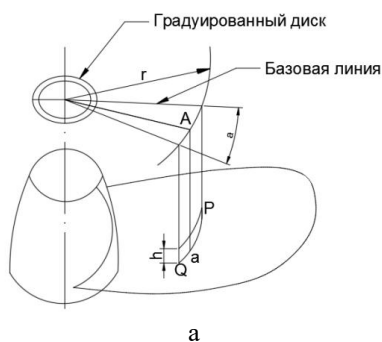


Рис. 1. Измерения геометрических характеристик гребного винта:
а – схема замеров; б – механическая установка

Для гребных винтов с плоской нагнетающей поверхностью шаг гребного винта определяется в соответствии с формулами:

Шаг для точки

$$H_c = \frac{360}{\alpha} h, \quad (1)$$

где, α – угол между расчетной точкой и точкой отсчета, град; h – расстояние от базовой плоскости до расчетной точки, мм.

Шаг для отрезка

$$H_c = \frac{2\pi R_i h}{\sqrt{t^2 - h^2}}, \quad (2)$$

где R_i – расчетный радиус, мм; h – приращение расстояния между расчетными точками, мм; t – длина дуги между двумя точками, мм.

Разношаговость сечений вычисляют в процентном соотношении по формуле

$$H_{\Delta} = \frac{H_{cmax} - H_{cmin}}{H_c} * 100. \quad (3)$$

Если отклонение по шагу в расчетном слишком большое допускается не учитывать его при расчете шага винта.

Шаг лопасти определяется как среднее арифметическое шагов сечений на всех принятых радиусах начиная с 0.5 по формуле:

$$H_{\Delta} = \frac{H_{c0.5R} + \dots + H_{c0.95R}}{n}, \quad (4)$$

где n – количество расчетных сечений.

Шаг гребного винта определяется как среднее арифметическое шагов всех лопастей и рассчитывается аналогично формуле 3.

Относительная толщина лопасти

$$e_{di} = \frac{e_i}{e_{max}} * 100\%. \quad (5)$$

В качестве примера приведем результаты анализа геометрии гребных винтов (показаны на рис. 2) скоростного двухвинтового катера.



Рис. 2. Общий вид сравниваемых гребных винтов: а – оригинальный винт; б – винт-дублер (изготовлен в США)

Результаты оценки шага (правого) гребного винта по разным методам показаны на рис. 3 и в табл. 1.

Обычно для гребных винтов с вогнутой / выпуклой формой нагнетающей поверхности ординаты замеряются в двух крайних точках, для вычисления промежуточных значений вводятся поправочные коэффициенты, приводящие вогнутое / выпуклое сечение к плоской форме. В настоящей работе используются несколько методов, позволяющие оценить деформацию сечения на текущем радиусе.

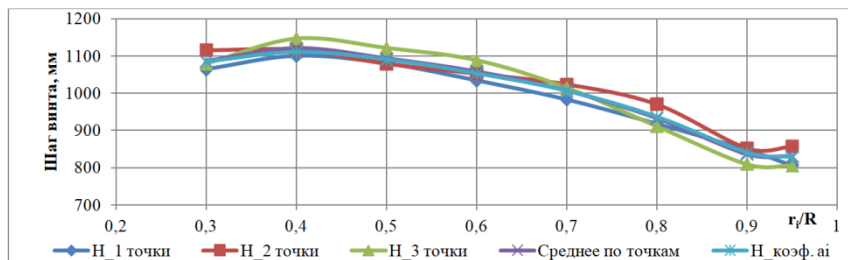


Рис. 3. Оценка шага гребного винта

Таблица 1

Сравнение шага винтов

r_i	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
Оригинал	1085	1111	1091	1053	1007	937	841	829
Дублер	974	1010	1031	1037	1027	1010	969	929
Оценка отклонений шага винтов оригинала и US								
$P_o - P_d$	111	100	60,2	16,4	-19,5	-72,4	-128	-99,9
$\Delta B \%$	10,3%	9,05%	5,52%	1,55%	1,94%	7,72%	15,22%	12,05%

Толщина сечений лопасти измеряется не менее чем на четырех точках, включая положение сечения наибольшей толщины. Толщина измеряется по нормали к нагнетающей поверхности в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.

После проведения замеров гребного винта, в полярной системе координат строятся лопастные сечения.

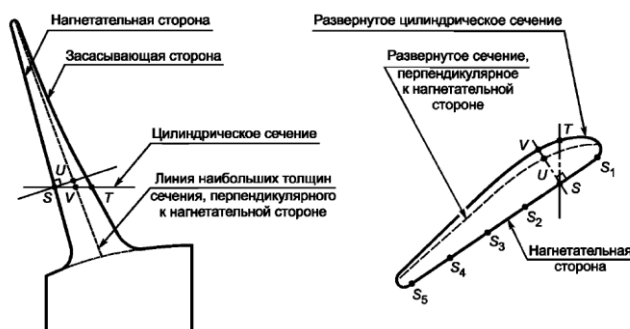


Рис. 4. Измерение толщины лопастного сечения винта

Для разработки чертежа гребного винта необходимо спрямить лопастное сечение и привести к единой системе отсчета. Переход от цилиндрической системы координат к декартовой происходит с использованием стандартных формул.

Следующим этапом происходит построение развертки лопастного сечения на плоскость. В результате получается геометрия гребного винта пригодная для построения чертежа, анализа и сравнения.

После построения сечений исходного гребного винта производится сравнение с винтами стандартных серий. При совпадении параметров анализируемого винта с параметрами стандартной серии рекомендуется исходные (проектные) параметры проектируемого гребного винта принимать на основе стандартных параметров выбранной серии [4].

Представление о форме лопастных сечений дают графики, представленные на рис. 5, 6, где по горизонтали отложены углы, а по вертикали – расстояния до точек лопасти.

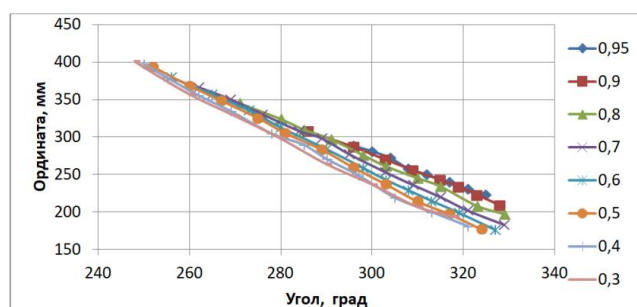


Рис. 5. Анализ формы лопастных сечений (винт правого вращения)

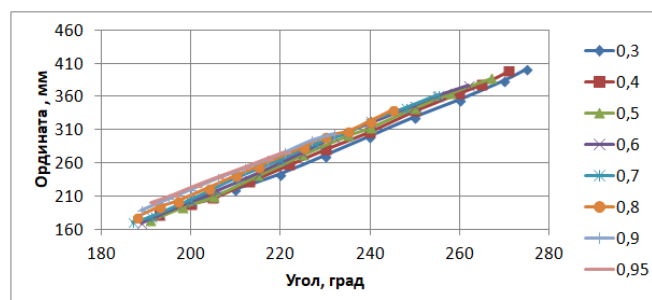


Рис. 6. Анализ формы лопастных сечений (винт левого вращения)

Развертки винтовых линий, показанные на рис. 5, 6 имеют форму прямых и одинаковые углы наклона, т.е. сечения лопасти сравниваемых винтов – плоско-выпуклые без подъема кромок.

Анализ уклона лопасти гребного винта производится относительно конструктивного радиуса $r_i/R = 0,6$. При этом за ось отсчета принимается условная линия, проходящая посередине ширины лопасти на конструктивном радиусе, для чего использовалась формула вида:

$$\alpha_{\text{оси}} = \frac{(\alpha_{\text{вх}} + \alpha_{\text{вых}})}{2}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{вх}}$ – угол входящей кромки, град; $\alpha_{\text{вых}}$ – угол выходящей кромки, град;

Положение условных линий показано на рис. 7.

Численные значения результатов замеров и сравнительного анализа изгиба лопастей сравниваемых винтов для $r_i/R = 0,60$ приведены в табл. 2.

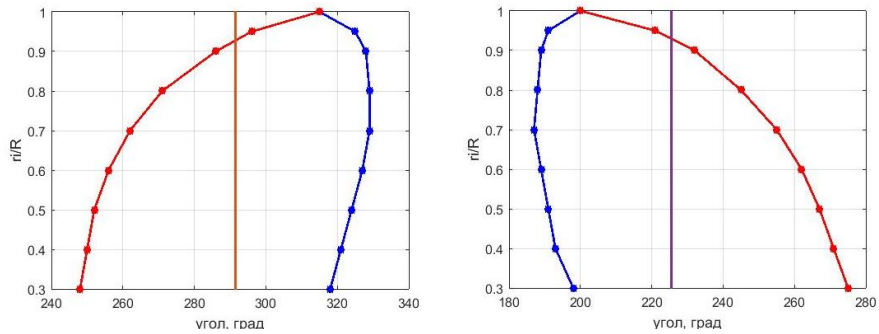


Рис. 7. Анализ уклона лопастей (положение условных осей)

Таблица 2

Анализ уклона лопастей h_i (фактические значения)

Относительный радиус	Оригинал	Дублер	$\Delta = h_1 - h_2$, мм
	Положения условной оси, град.		-
	291,5	225,5	-
	Значения ординат h_i		-
0,3	259,7	258	1,7
0,4	266	267	-1
0,5	274	273,5	0,5
0,6	280	276,6	3,4
0,7	289,6	281,8	7,8
0,8	295,8	284,5	11,3
0,9	297	288,8	8,2
0,95	-	-	-

В графическом виде результаты сравнительного анализа, полученные для положения условных осей, как показано на рис. 7, приведены на рис. 8.

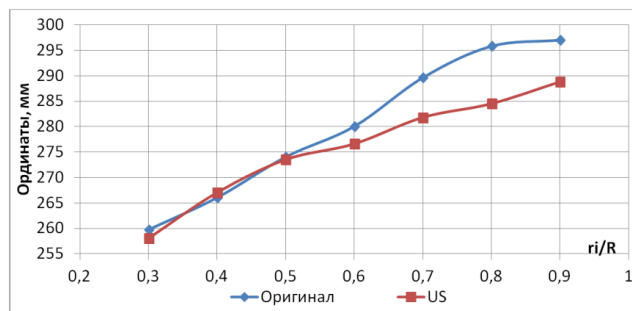


Рис. 8. Уклон лопастей на относительном радиусе $r_i = 0.60$

Ручной метод проведения замеров геометрических характеристик гребного винта является довольно трудоемким. Исходя из общей тенденции к автоматизации проектно-конструкторских работ, авторами работы предложена установка для автоматизации замеров геометрических характеристик гребных винтов.

Концепция установки для контроля геометрии и реинжиниринга гребных винтов показана на рис. 9.

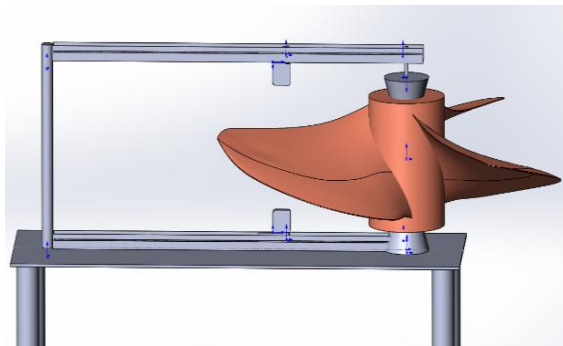


Рис. 9. Концептуальная модель установки контроля геометрии гребных винтов

Принцип работы установки. Два датчика линейных перемещений устанавливаются на заданном радиусе и производят замеры расстояния от базы до засасывающей / нагнетающей поверхности, при повороте гребного винта фиксируется приращение угла поворота по отношению к базовой вертикальной плоскости.

В результате замеров получается электронная модель гребного винта, приближенная с сканированной 3D модели. В отличие от технологии 3D сканирования в данной установке используется принцип минимального и достаточного объема информации, что позволяет уменьшить время на последующую обработку модели. На выходе генерируется файл, содержащий следующую информацию: относительный и фактический радиус, расстояние от базовой плоскости до засасывающей / нагнетающей поверхности, угол поворота лопасти относительно базовой вертикальной плоскости. Обработка полученной информации происходит в программном комплексе. Алгоритм обработки представлен на рис. 10.

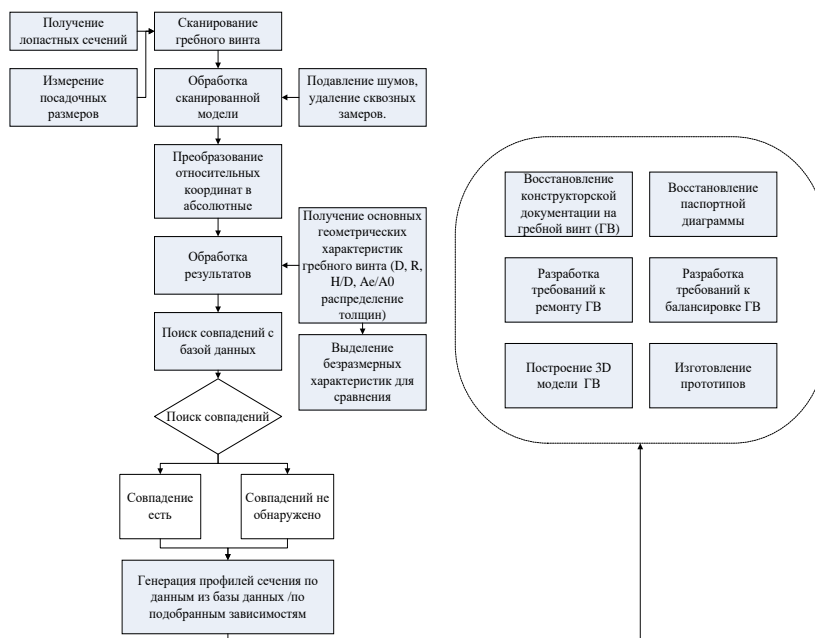


Рис. 10. Алгоритм обработки результатов замеров гребного винта

На выходе генерируется отчет, в котором указаны рекомендации для ремонта гребного винта, РКД на изготовление нового гребного винта и данные необходимые для модернизации пропульсивной установки судна.

Заключение. Применение автоматизированного программно-аппаратного комплекса позволяет значительно сократить время проведения ремонтных и проектных работ. Повышается точность измерений, уменьшается роль человеческого фактора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 8054-81. Винты гребные металлические. Общие технические условия // ИПК издательство стандартов. – 1981 – С. 12.
2. ГОСТ Р 52692-2006. Судовые гребные винты. Допуски на изготовление. Ч. 1 // Стандартинформ. – 2007. – С. 16.
3. ГОСТ Р 52693-2006. Судовые гребные винты. Допуски на изготовление. Ч. 2 // Стандартинформ. – 2007. – С. 16.
4. *Кацман Ф.М., Кудреватый Г.М.* Конструирование винто-рулевых комплексов морских судов. – Изд-во «Судостроение», 1974. – С. 376.

УДК 004.896:621.865:623-9

В.К. Абросимов, А.Н. Мочалкин

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГРУППАХ АВТОНОМНЫХ БОЕВЫХ РОБОТОВ*

Рассматривается процесс формирования области ситуационной осведомленности и взаимодействия боевых роботов при выполнении коллективной миссии в конфликтной среде. Анализируется понятие ситуационной осведомленности и строится облачная модель для ее формирования. Взаимодействие роботов обеспечивается построением специальной сервис-ориентированной архитектуры, в которой функционал, ресурсы и возможности роботов по воздействию на источники угрозы представляются как внешние сервисы. Робот при необходимости может запросить и получить помощь в виде сервисов других роботов и предоставить свои сервисы для автоматического использования другими роботами по запросам в режиме on-line при необходимости. Предлагаемая сервис-ориентированная архитектура взаимодействия роботов используется для совместного формирования области ситуационной осведомленности на основе оркестровки сервисов и оказания помощи друг другу в процессе выполнения коллективной миссии для разрешения конфликтных ситуаций, связанных с влиянием агрессивной среды, на основе хореографии сервисов. Приведены примеры реализации разработанного подхода. Посредством оркестровки сервисов информационных систем три робота оказывают помощь в определении степени угрозы движения четвертому роботу, возможности которого ограничены. Посредством хореографии сервисов информационных, функциональных и активных сервисов систем разнотипных роботов решается задача снижения опасности движения по маршруту за счет воздействия на источник угрозы.

Боевой робот, агрессивная среда, группа, миссия, стратегия, коллективизм, сервис-ориентированная архитектура, модель.

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 16-08-00832-а.

V.K. Abrosimov, A.N. Mochalkin

SERVICE-ORIENTED MODEL OF INTERACTION IN GROUPS OF AUTONOMOUS MILITARY ROBOTS

The article considers the process of formation of situational awareness and interaction of military robots performing collective mission in a conflict environment. The concept of situational awareness for military robots is analyzed and a cloud model for its formation is constructed. Interaction of robots is provided by means of building a special service-oriented architecture. The functionality, resources and capabilities of robots on the impact on threat sources are presented as external services. The robot can request and receive help in the form of services of other robots and provide his own services for automatically using by other robots via online requests when needed. Such approach realizes the principle of collectivism. The service-oriented architecture of the interaction of robots is used to jointly form the field of situational awareness based on the orchestration of services and helping for each other in the process of performing a collective mission to resolve conflict situations related on the basis of service choreography. Some examples of the approach implementation are given. Three robots assist for the fourth whose possibilities are limited to determine the degree of threat by means of orchestrating the information systems services. Information, functional and active services of robot's systems reduce the danger along the route through the services choreography and attack the source of the threat.

Military robot, aggressive environment, group, mission, strategy, collectivism, service-oriented architecture model.

Введение. В современных условиях расширение функциональных возможностей автономных боевых роботов связано с решением таких новых теоретических сложных задач как задачи автономного управления, автономной навигации, связи, сбора и накопления информации о среде с активным обменом информацией, обеспечения безопасности и др. Поле современного сухопутного боя, акватории океанов, морей и рек как среды морских боевых действий являются крайне сложной средой для функционирования боевых роботов в силу существенной изменчивости условий решения задач и активного противодействия противника. Обязательным условием является необходимость учета воздействия случайных факторов среды, происходящих в среде событий и самостоятельного принятия решений в складывающихся ситуациях. Поэтому ведущим трендом в настоящее время является построение боевых систем сетцентрического типа с включением в состав таких сетей боевых сил и средств групп боевых роботов [1]. В правильно построенной сетцентрической боевой системе по мере развития происходит постепенное накопление опыта и знаний, в котором участвуют все элементы системы.

В силу влияния негативных как пассивных, так и активных факторов среды различной природы заранее определенные и согласованные в рамках группы планы действий роботов практически никогда не выполняются. Ошибки действий, в ситуациях, которые до конца не осознаны, могут иметь критический характер. Во всех случаях построения стратегий поведения боевых роботов необходимо получение информации о среде движения. Поэтому необходимым условием функционирования боевых роботов является ситуационная осведомленность об условиях движения в среде. Формирование ситуационной осведомленности пока еще тесно связано с фактором наличия человека в контуре управления. Максимальное исключение человека из процесса получения и обработки информации, придание интеллектуальных свойств боевым роботам – четкий тренд последнего времени. Наиболее перспективным является использование групп полуавтономных и даже полностью автономных роботов, имеющих высокую степень интеллектуальности и снижающих требования к операторам.

В оборонных приложениях модели ситуационной осведомленности сводятся к организационным моделям управления знаниями на поле боя и накоплению поступающей информации об оперативной обстановке в специализированных базах данных. Эти данные поступают в систему ситуационной осведомленности от сил и средств разведки, передовых подразделений, а также вышестоящих и взаимодействующих органов управления, включенных в единую информационную сеть боевого управления. В основу таких систем закладывается высокая оперативность информационного взаимодействия [2].

В понятие «ситуационная осведомленность» согласно модели Endsley [3] выделяются три основных понятийно-образующих элемента:

- ◆ информация об окружающей ситуации во времени и пространстве с главной проблемой возможного нарушения структуры информационно-коммуникационной сети и связей между элементами системы;
- ◆ понимание значения ситуации с главной проблемой погрешности в определении параметров классов ситуаций и ошибок в отнесении ситуации к определенному классу;
- ◆ прогнозирование сценария развития ситуации, собственных действий и действий других участников с главной проблемой отсутствия либо низкого качества моделей прогноза ситуаций.

Очевидно, что для обеспечения высокой степени ситуационной осведомленности все элементы сетевидной сети должны рассматриваться как поставщики информации. Каждый робот как элемент сети может и должен определять, накапливать информацию, производить оценку ситуации и прогнозировать ее. Однако в соответствии со своими ограниченными возможностями он способен действовать лишь в узкой сфере своей ответственности и с ограниченными возможностями по оценке и анализу ситуаций.

Обзор литературы. Комплексы ситуационной осведомленности активно разрабатываются в обеспечение эффективности и безопасности больших систем: в пилотируемой авиации, на транспорте и др. предметных областях. Вопросы построения моделей ситуационной осведомленности рассматриваются в многочисленных работах [4–7 и др.]. К интересным подходам можно отнести построение моделей ситуационной осведомленности на основе моделей неограниченной [8], предлагающих комплексное представление разнородной (общегеографической, навигационной, тактической и т.д.) информации в единой глобальной геоцентрической системе координат.

Ряд интересных идей содержатся в работах [9–11]. Так, в работе [9] отмечается сходство технологий сервис-ориентированных архитектур (SOA) и мультиагентных систем. В частности подчеркивается, что идеи переговоров и онтологий роботов могут дать значительные преимущества в SOA. В работе [10] рассматривается вопрос оптимизации архитектуры построения мультиагентных систем, что облегчает интеграцию распределенных сервисов и приложений. В разрабатываемой архитектуре приложения могут общаться распределенным образом, даже с мобильных устройств, независимо от конкретного языка программирования или операционной системы. Функциональные возможности агентов при этом моделируются как некоторые службы.

Использование облачных технологий для взаимодействия роботов обсуждается в работах [12, 13] и др.

Наиболее близкой к тематике настоящей работы является работа [14]. Авторы предлагают модели проектирования сервис-ориентированных архитектур (SOA) для агентно-ориентированных парадигм. Здесь агенты по сути управляют веб-сервисами с помощью специальных инфраструктур на основе так называемых

"артефактов". Ценно то, что вводимые в рассмотрение когнитивные агенты программируются по своим так называемым "психическим состояниям", имитирующим интеллектуальное поведение, а принципы SOA при этом реализуют гибкое асинхронное соединение ресурсов таких агентов.

Подчеркнем, что во многих работах ситуационную осведомленность предлагается обеспечивать с использованием интерфейса робот-человек. Но в целом можно зафиксировать а) разработка модели ситуационной осведомленности является актуальным направлением б) организация взаимодействия автономных роботов требует активного обмена информацией и ресурсами и в) публикации, рассматривающие использование сервис-ориентированной архитектуры для организации взаимодействия роботов в доступной литературе крайне ограничены.

Сущность понятия «ситуационная осведомленность» для боевого робота.

Понятие "ситуационная осведомленность" содержит три сущности: "информацию", то есть совокупность записей о событии, факте, явлении, зафиксированных на материальном носителе; б) "понимание значения ситуации", то есть модель ее распознавания и "прогнозирование" сценария развития ситуации, то есть некую модель прогнозирования действий [15]. Современная наука не рассматривает информацию как материальный объект; объективная информация рассматривается как "свойство ..", а субъективная – как "смысловое содержание...". Модели же различного вида, как известно, различаются не только глубиной отображения, но также и степенью адекватностью реальности.

Робот выполняет миссию в определенной материальной среде. Это всегда реальное пространство, существующие в четырехмерном измерении (координаты и время), с которым связывается происшедшие, происходящие или будущие события и ситуации, значимые для решения роботом или группой роботов боевых задач. Выполняя миссию в этом пространстве, робот должен иметь, фиксировать факты, события, распознавать ситуации и прогнозировать их дальнейшее развитие. Поэтому, применительно к боевому роботу, его «осведомленность» означает наличие необходимой для выполнения миссии информации на маршруте движения. В состав такой информации должны входить сведения, прежде всего о наблюдаемых или будущих явлениях, происходящих или которые могут произойти в области движения. Суть таких явлений связана с текущим состоянием самого робота, функционированием других роботов, выполняющими коллективную миссию, и фактами противодействия среды.

Совокупность происходящих событий (встреча роботом препятствия, воздействие средств обороны противника, активное воздействие боевого робота на противника, возможность столкновения с другим роботом, трудность распознавания ситуации на близлежащем интервале времени, потеря функциональности, израсходование запаса энергетического ресурса и др.) формирует ситуацию, в которой автономный боевой робот должен принимать решение.

Под областью ситуационной осведомленности боевого робота будем понимать ограниченное пространство, разделенное на сколь угодно малое количество фрагментов, каждый из которых может быть описан координатами положения в области, размерами фрагмента и связанным с ним кортежами информации или информационными матрицами, содержащими сведения относительно ситуации в данном фрагменте (история, текущее состояние, перспектива), в которой боевой робот принимает решение.

Под состоянием области ситуационной осведомленности будем понимать, а) полноту информации о каждом фрагменте области ситуационной осведомленности и б) полноту охвата информацией всех фрагментов области ситуационной осведомленности в сфере ответственности боевого робота.

Целесообразно ввести в научный оборот термин "формирование области ситуационной осведомленности", под которым понимать осуществляемый заблаговременно и/или параллельно с функционированием боевого робота процесс систематизации событий и образования ситуаций, их распознавание и прогнозирование, что по сути наполняет указанную область информацией, необходимой для обеспечения эффективности выполнения боевым роботом или их группой заданных миссий.

Принципиально возможны два основных подхода к формированию области ситуационной осведомленности. В первом вся область пространства, в которой планируется или осуществляется миссия робота, максимально полно заполняется всей заранее имеющейся информацией, которая позже корректируется по результатам выполнения роботом (роботами) миссий. Такой подход является очень напряженным с точки зрения объемов и, что возможно самое важное, обновляемости информации, требует существенных ресурсов для своей реализации, может использоваться лишь для небольших пространств, в которых маловероятно возникновение событий, а возникающие ситуации типовые и достаточно предсказуемые. Во втором подходе информация формируется лишь в тех фрагментах области ситуационной осведомленности, которые необходимы для выполнения индивидуальной (коллективной) миссии и/или требуются по условиям боевой задачи.

В обоих подходах используются два основных режима заполнения области ситуационной осведомленности:

- ◆ режим off-line, в котором информация заполняется по результатам предварительного исследования пространства и имеющегося опыта решения задач в данной области решения боевых задач;

- ◆ режим on-line, в котором информация заполняется (или содержащаяся в области корректируется) непосредственно в процессе движения робота.

При решении боевых задач режим on-line может применяться только в форс-мажорных ситуациях. Для типовых условий функционирования боевых роботов предварительное формирование ситуационной осведомленности обязательно.

Боевой робот как источник информации для формирования ситуационной осведомленности. Четкого определения понятия «боевой робот» пока не сформировано [1]. Вместе с тем, в литературе ему уже придаются определенные черты: многофункциональность, антропоморфность, замещаемость функций человека при решении определенных задач и др. В настоящей работе авторы рассматривают боевой робот через операцию исключения, то есть это не бытовой, не промышленный, не строительный, не антропоморфный, не сельскохозяйственный робот, но представляющий собой техническое устройство, способное занимать и исполнять несколько ролей (лидер, связист, разведчик, логистик, санитар, ударное средство и др.) и обладающее системами: управления (CS-control system), анализа окружающей обстановки («органы чувств» SES, например, система технического зрения), исполнительных механизмов («органы движения»-SRM-System of robot moving) и, для функционирования в противодействующих средах, системой активного воздействия на среду (AS-active system). К датчикам SES отнесем разнообразные технические средства-оптические, ультразвуковые, инфракрасные и др., позволяющие получать информацию о среде. Датчиками SRM являются датчики исполнительных механизмов, активизирующих функции движения робота: перемещение, маневр, остановку и др. Система AS воздействует на источник угрозы со стороны среды, снижая тем самым опасность нахождения робота в заданной области пространства.

Пусть группа таких боевых роботов выполняет коллективную миссию в антагонистической среде. В таких условиях каждый робот должен а) выполнять собственные задачи и б) действовать в рамках коллективной стратегии поведения. Среда

активно противодействует выполнению коллективной миссии так, что часть роботов может потерять возможность выполнения порученных самостоятельных миссий. В этих условиях индивидуальные стратегии поведения роботов часто входят в противоречие с коллективной стратегией. Роботы вынуждены принимать решения о изменении целеполагания, варьировать маршрутами движения в процессе выполнения миссии, реагируя и «подстраиваясь» под складывающиеся условия. Зачастую возможностей систем SES роботов не достаточно для оценки событий и прогнозирования новых ситуаций, то есть робот становится «недостаточно ситуационно осведомлен». Поэтому основная проблема заключается в надежной реализации взаимодействия роботов и договоренностей между ними о совместных действиях.

В условиях конфликтной среды стратегии коллективов людей основаны на сотрудничестве и взаимопомощи. При такой парадигме эффективность решения групповых задач выше. Мы предлагаем распространить такие отношения на группы роботов. Поскольку система управления роботом разрабатывается человеком, то необходимо обучать роботов отношениям сотрудничества и взаимопомощи. Мы называем такую новую парадигму «коллективизмом роботов» [16]. Робот, обученный в такой парадигме, должен быть готов оказать помощь другим роботам в получении необходимой им информации ситуационной осведомленности и решении коллективных задач.

Облачная модель области ситуационной осведомленности. Под моделью ситуационной осведомленности будем понимать формализованное представление области ситуационной осведомленности и методы, используемые для ее наполнения информацией.

Декомпозируем все пространство функционирования роботов на сколь угодно малые пространственные фрагменты. Выделим в интернет-пространстве общий ресурс в виде облака с заданной структурой контента, к которому в режиме on-line могут обращаться все роботы из состава группы как для получения, так и для размещения информации относительно своего состояния, наблюдаемых событий и ситуаций в выбранном и доступном средствам наблюдения робота фрагменте среды. Физически в интернет-облаке формируется база данных (в перспективе с накоплением информации-база знаний) с достаточно универсальной структурой и выделенными постоянно пополняемыми разделами. Среди них как основные можно выделить следующие.

Раздел "Среда". Выделим в облаке раздел E, в котором будем обобщать информацию относительно истории, текущего состояния и будущего состояния различных фрагментов пространства функционирования роботов. При необходимости раздел может включать и отдельные специальные подразделы (так, для функционирования морских боевых робототехнических средств в качестве таких подразделов можно использовать поверхность водной среды, состояние воздушного пространства, состояние подводной среды, состояние берегового пространства и др).

Каждый фрагмент может быть описан характеристиками: координатами, размером, вероятностью появления в нем событий и др. Используем следующее простейшее описание фрагмента

$$s := \{ijk, GPS_s, H_s, \Delta_s, e_s, \varphi_s^e, \beta_s^k(t), g_s^k\} \in S. \quad (1)$$

Здесь:

- ◆ ijk – порядковый номер фрагмента (ниже фрагмент обозначается как «s»)
- ◆ GPS_s – GPS координаты центра s-фрагмента;
- ◆ H_s форма s-фрагмента;
- ◆ Δ_s размеры s-фрагмента;
- ◆ e_s событие, наблюдаемое или прогнозируемое в s-фрагменте;
- ◆ φ_e – вероятность/возможность наступления события e_s в s-фрагменте;

♦ $\beta_s^k(t) \in [0,1]$ – возможность нахождения в момент времени t в s -фрагменте k -того робота или иного объекта,

♦ g_s^k – степень опасности воздействия в s -фрагменте на k -робот со стороны источника угрозы ST

Раздел "Объекты". Выделим в облаке раздел R , в котором будем обобщать информацию о состоянии робота, реализующего миссию. В работе [16] подробно рассматриваются вопросы представления интеллектуальных объектов управления (роботов) как роботов с соответствующими свойствами, возможностями и потребностями.

Представим информацию о k -том роботе R_k в виде кортежа вида:

$$R_k(t) := \{ \text{Role}_k, M_k, \beta_k, sp(t), sp(t + \delta\tau), r_k^\Sigma(t), F_k, \Psi_k, A_k, \mu_k, q_k^\Sigma \} \forall k \in K. \quad (2)$$

Здесь:

- ♦ Role_k – роль, выполняемая роботом;
- ♦ M_k – маршрут движения робота в среде.
- ♦ β_k – ценность робота для группировки;
- ♦ $sp(t)$ – область пространства, где в момент t находится робот;
- ♦ $sp(t + \delta\tau)$ – прогнозируемая точка пространства, в которую перемещается робот к моменту $t + \delta\tau$;
- ♦ $r_k^\Sigma(t)$ – остаток текущие ресурсы робота к моменту времени t ;
- ♦ F_k – множество функций (функционал) робота;
- ♦ Ψ_k – коэффициент, отражающий квалификацию и опыт робота;
- ♦ a_k – признак активности (работоспособности) робота;
- ♦ μ_k – степень готовности робота помощи другим объектам, сформированная при обучении (парадигма поведения робота);
- ♦ q_k^Σ – ресурсы по возможности робота влиять на среду, снижая степень ее враждебности.

В описании (2) представлены основные характеристики боевого робота, отражающие его свойства, обеспечивающие формирование области ситуационной осведомленности.

Выделим в облаке раздел I ("Внешние источники информации"), в котором будем обобщать информацию о состоянии других источников данных для формирования области ситуационной осведомленности. Так, для морских боевых робототехнических средств можно выделить такие подразделы, как космические аппараты слежения за акваторией, технические средства наблюдения кораблей, средства берегового наблюдения, буи и др. Как представляется, по каждому из этих источников можно получить информацию об их наличии, активности, возможности предоставления информации ситуационной осведомленности как в данный момент времени, так и в перспективе. Информация от этих источников также поступает в E -облако.

Все роботы в режиме on-line выкладывают в R -раздел облака свой статус а виде (2) и в E -раздел получаемую средствами собственных SES информацию вида (1). Внешние источники информации также пополняют раздел E . Модель ситуационной осведомленности представляется в виде интернет-облака с R -, E -и I -разделами (REI-облако), которые формируются за счет информации средств SES всех участвующих в выполнении коллективной миссии боевых роботов, а также внешних источников информации. В каждый текущий момент времени в режиме on-line в соответствии с установленным распределением полномочий обеспечивается доступ робота к данным REI облака.

Информационные, функциональные и активные сервисы боевых роботов. Каждому роботу поставим в соответствие сервисы, описывающие его возможности по предоставлению информации для формирования ситуационной осведомленности. Группа информационных сервисов (IS-information service) описывает возможности SES-систем по добытию информации в интересах фиксации происходящих в среде событий и оценки опасности ситуации. Группа функциональных сервисов (SF-function service) описывает задачи, которые можно выполнить с использованием имеющихся на данный момент ресурсов, задействуя системы движения SRM. Группа сервисов активных действий (AS, active action service) описывает возможности по воздействию на источник угрозы.

Каждый сервис из указанных выше групп связывается с соответствующим техническим средством и задается соответствующими атрибутами. Так, система технического зрения SES боевого робота может характеризоваться дальностью действия, точностью распознавания объекта и др. Система SRM боевого робота может характеризоваться запасами энергии (топливо, мощность аккумуляторных батарей и др.) для движения. Система AS – продолжительностью и силой активного огневого воздействия на источник угрозы.

Возможности внешних источников информации из раздела I облака также представляются в виде сервисов со своими атрибутами.

Объединим все сервисы в Каталог сервисов для формирования области ситуационной осведомленности. В структуре Каталога выделим разделы наименование сервиса, средство предоставления сервиса, характеристики сервиса (содержание предоставляемой информации, объем, точность, оперативность предоставления информации и др.).

Необходимым условием построения эффективных стратегий поведения роботов в условиях активного противодействия среды является высокая степень ситуационной осведомленности, которая описывается полнотой и достоверностью информации в области функционирования робота. Индивидуальная стратегия робота по формированию области ситуационной осведомленности заключается в сборе информации, доступной его SES системе по пути следования по заданному маршруту и наполнении соответствующих разделов REI-облака. Если такой информации нет или недостаточно, то робот формулирует запрос всей группе по получению необходимой ему информации. Аналогичные запросы могут быть направлены и внешним сервисам. Остальные роботы, обученные в парадигме «коллективизма», оценивают свои возможности по предоставлению необходимой информации и при возможности предоставляют свои сервисы нуждающемуся роботу.

Коллективная стратегия группы роботов по формированию области ситуационной осведомленности заключается в координации действий отдельных роботов по получению информации в интересующей группу области пространства.

Формирование области ситуационной осведомленности при выполнении коллективной задачи. Для выполнения задачи формирования области ситуационной осведомленности необходимо организовать логику взаимодействия всех систем, имеющих возможности предоставления off-line информации и on-line наблюдения за областью ситуационной осведомленности.

Стратегия совместного формирования области ситуационной осведомленности группой автономных роботов заключается в организации логики взаимодействия технических систем роботов. Такую стратегию предлагается строить на основе принципов сервис-ориентированной архитектуры [14, 17, 18]. Сервис-ориентированная архитектура (SOA) является современным, широко используемым подходом для разработ-

ки и управления сервисов для различных приложений. SOA связано с взаимодействием трех сущностей: разработчика, пользователя и реестра сервисов. Реестр содержит информацию о сервисе и его характеристиках. Основным преимуществом концепции SOA считается так называемая слабая связанность, то есть отсутствие жестких связей между сервисами. Все взаимодействия в SOA осуществляются по схеме «запрос-ответ» с использованием стандартных протоколов обмена информацией.

В рассматриваемом применении SOA разработчик сервисов одновременно является и пользователем, но не своих сервисов, а сервисов роботов группы. Механизм формирования области ситуационной осведомленности предлагается строить на основе оркестровки сервисов роботов. Оркестровка сервисов относится к логике исполняемых бизнес-процессов, которые могут взаимодействовать с внешними и внутренними web-сервисами [19]. В нашем случае оркестровка сервисов заключается в том, что каждый робот, решая собственную задачу в интересах выполнения коллективной миссии, через Оркестратора (в качестве Оркестратора можно назначить одного из роботов) запрашивает и использует информационные сервисы других роботов, а также внешних систем для своего информационного обеспечения и повышения уровня ситуационной осведомленности.

Покажем пример оркестровки информационных сервисов роботов. Рассмотрим ситуацию, когда в противодействующей среде выполняют коллективную миссию четыре разнотипных боевых робота – А,В,С,Д, обладающие различным функционалом и ресурсами SES систем. При выполнении индивидуальных задач каждый робот с использованием собственной системы SES самостоятельно прогнозирует и оценивает ситуацию в планируемой точке маршрута.

Пусть А-робот определяет возможность движения в s-области своими SES средствами, сравнивая существующую p_s^A и допустимую p_s^{k*} величину опасности ($p_s^A \geq p_s^{k*}$). Если возможностей SES А-робота оказывается недостаточно (ограниченная дальность системы технического зрения), то механизм оркестровки сервисов роботов по получению дополнительной информации в этом случае состоит в следующем:

1. А-робот отправляет запрос Оркестратору (назначим на роль Оркестратора робота с максимальным опытом например, D-робота: $\Psi_D = \max_{k=A,B,C} \Psi_k$) по исследованию ситуации в очередной s-области его движения $\{CS_A \rightarrow CS_D : (p_s^A \geq p_s^{k*})\}$.
2. D-робот анализирует информацию R-облака о местонахождении остальных роботов и каталог сервисов группы, и выбирает для решения задачи двух роботов: робота В, в максимальной степени обладающего возможностями по получению информации в s-области (находится ближе всех к s-области) и робота С, имеющего функционал для исследования ситуации в s-области самыми высокоточными техническими средствами SES_C .
3. D-робот отправляет запрос В-роботу по исследованию опасности для А-робота ситуации в s-области $CS_D \rightarrow SES_B : p_s^A ?$.
4. D-робот отправляет запрос С-роботу по исследованию ситуации в s-области $\{CS_D \rightarrow SES_C : p_s^A ?\}$.
5. В-робот, задействуя сенсоры системы SES_B , исследует ситуацию в s-области и определяет величину g_s^{ba} опасности прохождения s-области А-роботом.

6. С-робот, задействуя сенсоры системы SES_C исследует ситуацию в s -области и определяет величину g_s^{ca} опасности прохождения s -области А-роботом.
7. В-робот отправляет ответ D-роботу $\{CS_B \rightarrow CS_D : g_s^k = g_s^{ba}\}$
8. С-робот отправляет ответ D-роботу $\{CS_C \rightarrow CS_D : g_s^k = g_s^{ca}\}$.
9. Если выполняется условие

$$[g_s^{ba} - p_s^{k*}] \leq \varepsilon \quad \text{и} \quad [g_s^{ca} - p_s^{k*}] \leq \varepsilon \quad (5)$$

то D-робот отправляет А-роботу ответ $\{CS_D \rightarrow CS_A : p_s^A \leq p_s^{k*}\}$.

10. А-робот, задействуя систему движения $\{CS_A \rightarrow SRM_A\}$, продолжает движение по маршруту в s -область.
11. Если условие (5) не выполняется, то D-робот отправляет А-роботу ответ о невозможности движения в s -область и необходимости устранения угрозы $\{CS_D \rightarrow CS_A : p_s^A \geq p_s^{k*}\}$

В данном примере в процессе оркестровки сервисов задействовались только информационные системы SES роботов.

Коллективное принятие решения группой роботов в ситуации опасности. Решение задачи по снижению опасности движения по маршруту за счет воздействия на источник угрозы при выполнении коллективной миссии предлагается строить на основе хореографии сервисов роботов. Хореографией («choreography») называется последовательность и логика выполнения нескольких процессов, координируемых при помощи сообщений. В средствах описания хореографии особая роль уделяется поддержке процессов информационного обмена и управления состоянием информационной составляющей каждого участника [18].

В нашем случае хореография включает в себя логику поведения роботов и последовательность выполнения задач на основе обмена сообщениями. Пусть для А-робота возникла угроза движения в s -области. Источник угрозы распознан. Введем дополнительное ограничение: связь с Оркестратором потеряна. В этих условиях центральный процесс координации отсутствует. Поэтому задачу устранения угрозы среды должны решать все роботы группы.

Механизм хореографии сервисов роботов в этом случае состоит в следующем:

1. А-робот оценивает собственные возможности по устранению угрозы в s -области. Если такие возможности есть, то А-робот воздействует на источник угрозы $\{AS_A \Rightarrow ST_{sx} : g_s^A \downarrow\}$ и далее продолжает выполнение поставленного маршрута $\{CS_A \rightarrow SRM_A\}$
2. Если возможностей А-робота недостаточно, либо они исчерпаны, то А-робот запрашивает помощь других роботов группы, формулируя на доске объявлений задачу снижения угрозы в s -области.
3. Агенты группы (В, С, D-роботы и др.) представляют А-роботу ответы на его запрос, предлагая свои сервисы для решения задачи снижения угрозы путем воздействия на источник угрозы ST_s с оценкой их предполагаемой эффективности.

$$\begin{aligned} \{CS_B \rightarrow \text{response } CS_A : g_s^A &:= 0.5 p_s^{k*}\}; \\ \{CS_C \rightarrow \text{response } CS_A : g_s^A &:= 0.1 p_s^{k*}\}; \\ \{CS_D \rightarrow \text{response } CS_A : g_s^A &:= 0.8 p_s^{k*}\} \end{aligned}$$

4. А-робот выбирает помощь С-робота, как обеспечивающего 90 % возможность снижения угрозы движения в s -области. При большем количестве критериев безопасности выполнения индивидуальной миссии выбор такого робота предлагается осуществлять на основе ранговых оценок [20].

5. С-робот открывает А-роботу доступ к его функциональным SRM_C , информационным SES_C и активным AS_C сервисам.
6. А-робот выдает запрос системе SRM_C на перемещение к источнику ST_s угрозы $\{CS_A \rightarrow SRM_C\}$.
7. А-робот выдает запрос системе AS_C на воздействие на источник ST_{sx} угрозы $\{CS_A \rightarrow AS_C\}$.
8. Система AS_C воздействует на источник угрозы, снижая его эффективность до приемлемого уровня $0.1 p_s^{k*}$
 $\{AS_C \rightarrow ST_{sx} : g_s^A := 0.1 p_s^{k*}\}$
9. Система CS_C выдает ответ А-роботу о выполнении задачи $\{CS_A \leftarrow CS_C\}$.
10. А-робот, задействуя систему движения $\{CS_A \rightarrow SRM_A\}$ продолжает движение по маршруту.

В данном примере роботы обменивались сообщениями в интересах выполнения коллективной миссии. В процессе хореографии сервисов задействовались сервисы всех систем всех самостоятельно функционирующих роботов. Возможность использования сервисов роботов друг другом обеспечивалась за счет обучения роботов принципу «коллективизма». Роботы, обученные такой парадигме, при выполнении индивидуальных задач анализируют запросы других роботов о помощи, при возможности демонстрируют готовность решить задачи другого робота за счет своих информационных, функциональных и активных сервисов и, будучи выбранными, открывают доступ к своим сервисам, корректируя при этом собственное целеполагание и маршрут движения.

Заключение. В работе рассматривается процесс функционирования группировки разнотипных роботов в конфликтной противодействующей среде. Предполагается, что каждый робот оснащен системами наблюдения за средой, исполнительными механизмами и активными системами воздействия на источники угрозы среды.

В предлагаемой парадигме робот предоставляет свои сервисы для других роботов, если это необходимо для выполнения коллективной миссии. Все роботы наполняют on-line знаниями интернет-ресурс, содержащий данные о состоянии и исполнении задач роботами, текущую информацию об источниках угрозы и среде выполнения задач группой роботов. Таким образом, а) представление роботов как роботов, обученных в парадигме "коллективизма"; б) функционала робота-робота как сервиса; в) стратегии формирования области ситуационной осведомленности как оркестровки сервисов; г) групповой стратегии как хореографии сервисов образует новое решение по управлению группировкой роботов в агрессивных средах.

В процессе выполнения коллективной миссии создается инфраструктура, включающая в себя совокупность взаимодействующих разнотипных роботов, между которыми все время в различной доле возможности возникают и ликвидируются разнообразные связи. С одной стороны, образование этих связей носит целенаправленный характер, так как решается коллективная задача. С другой – процессы образования новых связей носят спонтанный, заранее неизвестный характер, который определяется все время меняющейся ситуацией в области ситуационной осведомленности. Так, формирование области ситуационной осведомленности может приостановиться вследствие потери связи между роботами или прямого воздействия средств противодействия. Вновь возникающие события, возникновение новых, ранее непроявленных/неразведанных источников угрозы существенно изменяет ситуационную осведомленность и, как правило, требует адаптации к текущей ситуации и оперативной корректировки стратегий поведения роботов. Таким образом, можно говорить о том, что при выполнении коллективной миссии обученных в парадигме коллективизма автономных роботов в группе возникают элементы самоорганизации. Действительно, самоорганизация – процесс, в ходе ко-

того создаётся, воспроизводится или совершенствуется организация сложной динамической системы. Связи между роботами имеют не жёсткий, а вероятностный (возможностный) характер. Процессы самоорганизации происходят за счёт перестройки существующих и образования новых связей между элементами системы. Указанное тем более важно в связи с тенденцией реализовывать многофункциональные робототехнические комплексы на основе группы простых роботов с небольшим набором функций вместо одиночной, но сложной платформы [21].

Ограниченные рамки статьи не позволяют осветить многие связанные с данной тематикой вопросы. Как проводить переговоры роботов? Что делать, когда связь между роботами будет нарушена? Как обеспечить, чтобы робот "согласился" на вспомогательную роль, когда у него есть собственные задачи? Каковы должны быть технические протоколы взаимодействия? Какова эффективность подхода при различных масштабах и силе противодействия? Сколько и какие должны быть уровни в создаваемой сети? Как быть, если информация в области ситуационной осведомленности не вполне достоверна? Указанное является предметом продолжающихся исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рубцов И.В., Бошляков А.А., Лапинов В.С., Машков К.Ю., Носков В.П. Проблемы и перспективы развития мобильной робототехники военного назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2015. – Вып. 05 (41). Свободный режим доступа. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/rmrs/1399.html>.
2. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 73-132
3. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems // Human Factors. – 1995. – Vol. 37, No. 1. – P.32-64.
4. Федунев Б.Е. Бортовые оперативно советующие экспертные системы тактических самолетов пятого поколения (обзор по материалам зарубежной печати). – М.: НИЦ ГосНИИАС, 2002. – С. 123-132.
5. Riley J., Strater L., Chappell S., Connors E., and Endsley M. Situation awareness in human-robot interaction: Challenges and user interface requirements // In Human-Robot Interactions in Future Military Operations, ser. Human Factors in Defence, M. Barnes and F. Jentsch, Eds. Ashgate. – 2010. – P. 171-192.
6. Powell D.N., Gilbreath G., Bruch. M.H. Multi-robot operator control unit // SPIE Proc. 6230: Unmanned Systems Technology VIII Defense & Security Symposium, Orlando, FL, April. 2006.
7. Salas E., Prince C., Barker D. P., Shrestha L. Situation awareness in team performance // Implications for measurement and training. Human Factors. – 1995. – Vol. 37 (1). – P. 123-136.
8. The Digital Arts and Humanities: Neogeography, Social Media and Big Data Integrations and Applications // Springer International Publishing Switzerland. – 2016. Free access: https://www.researchgate.net/publication/308919572_The_Digital_Arts_and_Humanities_Neo_geography_Social_Media_and_Big_Data_Integrations_and_Applications/overview.
9. Ronald L Hartung. Service oriented Architecture and Agents :Parallels and Opportunities // in Agent and Multi-agent Technology for Internet and Enterprise Systems SCI 289. – Springer-Verlag Berline Heidelberg, 2010. – P. 25-48
10. Bonino da Silva L.O., Ramparany F., Dockhorn P., Vink, P., Etter R., Broens T. A Service Architecture for Context Awareness and Reaction Provisioning // In: IEEE Congress on Services. – 2007. – P. 25-32.
11. Anis Koubaa. A Service-Oriented Architecture for Virtualizing Robots // in Robot-as-a-Service Clouds. Free access:<http://www.iroboapp.org/images/3/36/Arcs2014.pdf>.
12. Rajesh Arumugam, Vikas Reddy Enti, Liu Bingbing, Wu Xiaojun, Krishnamoorthy Baskaran Foong Foo Konga, Kang Dee Meng Senthil Kumar, and Goh Wai Kit. Davinci. A cloud computing framework for service robots // In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2010. – P. 3084-3089.

13. Guoqiang Hu, Wee-Peng Tay, and Yonggang Wen. Cloud robotics: architecture, challenges and applications // Network. IEEE, 2012. – Vol. 26 (3). – P. 21-28.
14. Michele Piunti, Alessandro Ricci, Andrea Santi. SOA/WS Applications using Cognitive Agents working in CArtAgO Environments // Proceedings of 10th Joint Conference AI*IA TABOO From Objects to Agents (WOA 2009).
15. Endsley M. R., & Jones D. G. Designing for situation awareness: An approach to human-centered design (2nd ed.). – London: Taylor & Francis, 2012.
16. Абросимов В.К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. – М.: Наука, 2017. – 304 с.
17. Мохаммед И. Мабрук. Краткие основы SOA.-2010. – Свободный режим доступа: URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/edu/ws-soa-ibmcertified/index.html>.
18. Данилин А., Слюсаренко А. Архитектура и стратегия. «Инь» и «Янь» информационных технологий предприятия. – М.: Интернет-Ун-т информ. технологий, 2005. – 504 с.
19. Артамонов И.В. Оркестровка и хореография // в кн. Моделирование бизнес-транзакций. – Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. – С. 39-45.
20. Abrosimov V. Role Allocation in a Group of Control Objects Recent Developments // in Intelligent Nature-Inspired Computing Chapter 10, Publisher: Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, IGI Global, 2017. – P. 206-224.
21. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.

УДК 004.896+004.942+629.58

А.В. Инзарцев, А.В. Багницкий

ПЕРЕПЛАНИРОВАНИЕ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОКРЫТИЯ АКВАТОРИИ НА БОРТУ АНПА

При выполнении мониторинга водной среды и донной поверхности в прибрежных акваториях с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) необходимо решать задачи по предварительному планированию траектории движения АНПА в акваториях произвольной формы, а также действия робота при встрече с неучтёнными препятствиями. При этом речь может идти как об организации обхода препятствия, так и о перепланировании заданной траектории движения. В докладе обсуждается алгоритм, который может использоваться как для предварительного планирования траектории (в режиме off-line), так и для её перепланирования на борту АНПА в реальном времени. В последнем случае в задачи алгоритма входит построение траектории, обеспечивающей реализацию первоначального плана в новых условиях. Обсуждаются модельные результаты работы алгоритма в режиме перепланирования траектории покрытия для района сложной формы в условиях неполноты входных данных.

Автономный подводный робот, мониторинг акваторий, траектория покрытия, обход препятствий, планирование миссии, алгоритм перепланирования, информационно-управляющая система, имитационное моделирование.

A. V. Inzartsev, A. V. Bagnitckii

TRAJECTORY REPLANNING FOR COVERAGE OF WATER AREAS ON BOARD AUV

Autonomous underwater vehicles (AUV) are used for the environmental monitoring, search and exploration works in different water areas. In order to execute them, AUV must plan the coverage path (mission) and be able to correct it if detects unforeseen obstacle during motion under water. So the important problems are: obstacles avoidance and trajectory planning for coverage of arbitrary shaped water areas. The paper proposes the algorithm that can be used both for trajectory preplanning (off-line mode) and for the replanning on board AUV in real time. In the latter

case the main goal of the algorithm is to generate AUV trajectory that implements original motion plan under the new conditions. The paper considers simulation modeling results of trajectory re-planning for coverage of difficult shaped water area when input data are incomplete.

Autonomous underwater vehicle, monitoring of water areas, coverage path, obstacle avoidance, mission planning, replanning algorithm, information and control system, simulation modeling.

Введение. Существует задачи, связанные с использованием автономных обитаемых подводных аппаратов-роботов (АНПА) в ограниченных акваториях. К задачам такого рода относится, например, экологический мониторинг в шельфовой зоне. При выполнении подобных работ АНПА перемещается на небольшом отстоянии от грунта, а траектория движения аппарата представляет собой заранее спланированную композицию из одного или нескольких поисковых меандров [1], вписанных в границы акватории. К особенностям работы АНПА в этих условиях можно отнести наличие неучтённых препятствий как естественного происхождения (береговая линия, отмели и т.п.), так и искусственного происхождения (затонувшие объекты), а также возможные ограничения на манёвры в вертикальной плоскости, выполняемые для уклонения от препятствий. Типы обследуемых акваторий характеризуются глубиной места, формой, рельефом, а также степенью детализации априорной информации об акватории.

В общем случае выполнение мониторинга с помощью АНПА предполагает следующую последовательность операций:

- 1) предварительное (автоматизированное) планирование траектории покрытия, обеспечивающей гарантированный обзор каждого участка дна бортовыми поисковыми средствами [2];
- 2) выполнение запланированной траектории;
- 3) оценка обстановки в случае невозможности продолжения движения по траектории (обнаружение препятствия);
- 4) организация обхода препятствия сверху или перепланирование траектории при невозможности обхода сверху (возврат к пункту 2).

Первая из этих операций выполняется на посту оператора АНПА в режиме off-line, остальные три — на борту робота в реальном времени. Заданная траектория реализуется информационно-управляющей системой (ИУС) робота. Обход ограниченных (локальных) препятствий выполняется на исполнительном уровне ИУС без изменения первоначального плана движения. Если в роли препятствий выступают элементы макрорельефа, которые из-за размеров не могут быть обойдены на уровне коррекции отрезка траектории, то требуется привлечение средств тактического уровня для изменения первоначального плана. При этом необходимым начальным элементом является оценка параметров препятствия, которая затем учитывается в процедуре перепланирования.

Алгоритмы предварительного планирования траектории подробно рассмотрены авторами в работе [2]. Далее в статье обсуждаются алгоритмы ИУС тактического уровня, предназначенные для выполнения оценки ситуации и перепланирования траектории в реальном времени.

1. Особенности алгоритма планирования траектории. Подготовка задания для АНПА производится на посту оператора и может выполняться, как вручную путём компоновки траектории из примитивов движения: галс, меандр, спираль, циклоида [3], так и в автоматическом режиме с использованием алгоритма планирования траектории покрытия [2]. Входными данными для алгоритма являются: исходная область покрытия, границы препятствий и межгалсовая дистанция. На выходе формируется траектория движения АНПА, решающая задачу покрытия. Это означает, что после прохода АНПА по траектории все точки исходной области (или точки из заданного ограниченного набора) гарантированно попадут в зону действия бортовых поисковых устройств.

Пример решения задачи покрытия показан на рис. 1.



Рис. 1. Траектория покрытия акватории, сгенерированная алгоритмом

В качестве основных требований, предъявляемых к алгоритму, можно отнести следующие:

- 1) траектория покрытия должна состоять из минимального количества галсов и переходов между ними при соблюдении требования о заданной межгалсовой дистанции;
- 2) прокладываемые галсы не должны заходить внутрь препятствий;
- 3) в худшем случае алгоритм должен работать не медленнее, чем за полиномиальное время (зависящее от сложности границ района).

Последнее требование продиктовано необходимостью автоматического перепланирования траектории на борту АНПА в следующих случаях:

- ◆ при изменении границ заданного района или при поступлении новых данных об областях, запрещённых для навигации;
- ◆ при изменении параметров и условий работы обследовательского оборудования.

2. Перепланирование траектории на борту АНПА. Перепланирование траектории на борту АНПА при появлении неучтённых препятствий — комплексная задача, которая решается с использованием алгоритмов, объединённых в три функциональных блока (рис. 2), выполняемых последовательно:

- ◆ планирование (составление предварительной траектории);
- ◆ реализация (движение по намеченным путевым точкам);
- ◆ коррекция траектории (сбор и анализ данных от дальномеров с последующим принятием решения по обходу препятствий).

Блок планирования подробно рассмотрен в работе [2]. Блок реализации включает в себя непосредственно управление движением АНПА, а также детектирование и классификацию обнаруженных препятствий. Если обход препятствия сверху возможен, то блок реализации продолжает работу. Если обход сверху неприемлем (т.е. реализовать имеющийся план движения нельзя), то подключается блок коррекции, который включает в себя четыре шага:

- ◆ Сканирование подводной обстановки по курсу следования АНПА, выполняемое с использованием эхолокационной системы либо гидролокатора переднего обзора. Все обнаруженные препятствия наносятся на карту.

- ◆ Обход, выполняемый в направлении ближайшего не пройденного галса (при этом анализируется карта и задаётся таймаут, чтобы исключить долгое движение вдоль протяженного препятствия либо повторное движение по уже пройденному пути).
- ◆ Коррекция границ заданного района покрытия путём исключения пройденной области, найденных препятствий, а также изолированных областей, окружённых со всех сторон препятствиями.
- ◆ Переход к алгоритму планирования (формирование новой траектории движения).

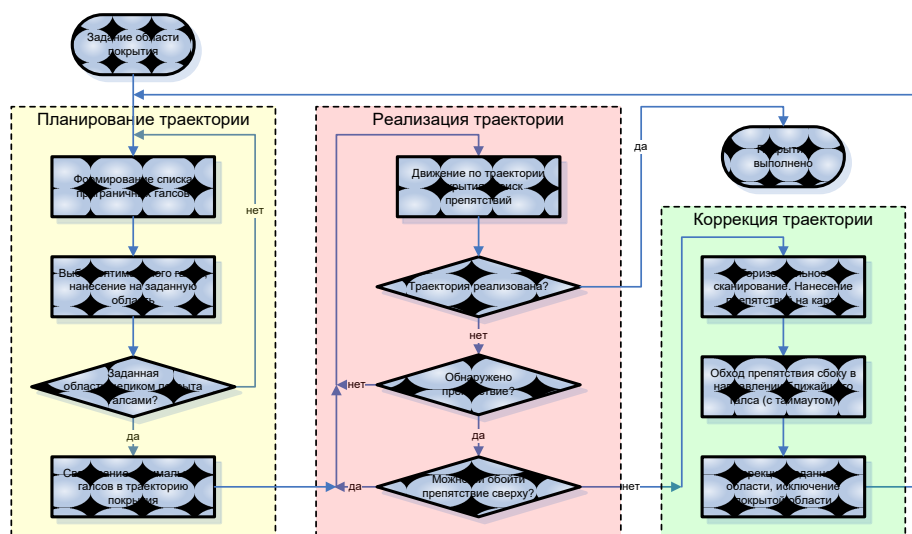


Рис. 2. Блок-схема алгоритма перепланирования траектории АНПА

3. Моделирование работы алгоритма. Для моделирования был выбран район, имеющий форму невыпуклого многоугольника с прямоугольным препятствием в центре (рисунок 3), причём положение и размеры препятствия на этапе предварительного планирования неизвестны. Результаты моделирования показаны на рис. 3. При этом можно выделить семь основных итераций алгоритма:

1. Планируется траектория аппарата (красный цвет) в соответствии с заданием пользователя. Границы препятствия (фиолетовый цвет) не заданы, т.к. оператору неизвестны.
2. Аппарат начинает реализацию траектории (пройденный путь выделен синим цветом). После первого обнаружения препятствия и попытки обойти его сверху (предполагается, что она не удалась) аппарат начинает движение вдоль препятствия в сторону ближайшего непройденного галса (зелёный цвет). Координаты обнаруженных препятствий запоминаются ИУС и наносятся на карту. После начала обхода запланированная траектория (красный цвет) полностью перестраивается с учётом эхолокационных данных.
3. Достигнув ближайшего непройденного галса, аппарат продолжает реализацию траектории, выбрав направление на удаление от препятствия. После повторного обнаружения действия шага №2 повторяются, и маршрут снова перестраивается.
4. АНПА заканчивает покрытие верхней части района.
5. Обход препятствия выполняется с учётом данных, нанесённых на карту, с целью исключить повторный проход АНПА по уже пройденному маршруту.

6. После того, как непокрытыми остались только те галсы, что находятся внутри границ препятствия, АНПА при попытке приблизиться к ним вынужден выполнить оконтуривание препятствия, дабы понять, что данная область является изолированной и внутрь неё невозможно попасть.

7. Галсы, которых невозможно достичь, будут пропущены либо по причине превышения таймаута на обход препятствий либо после оконтуривания и исключения изолированных областей. После этого покрытие считается завершённым.

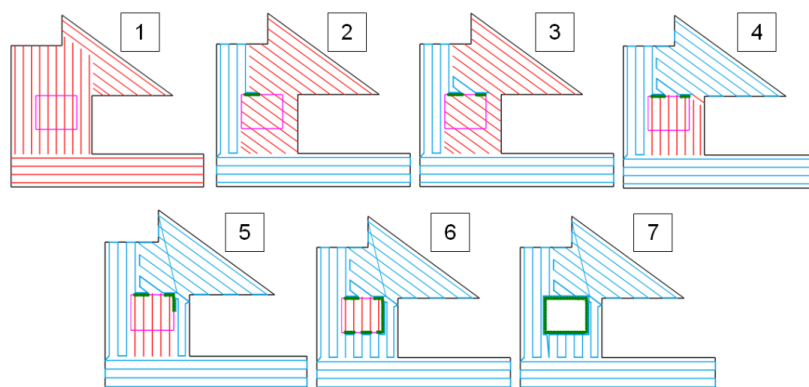


Рис. 3. Последовательность перепланирования траектории при наличии неучтённого препятствия

Заключение. Разработанный алгоритм перепланирования траектории покрытия находится на этапе внедрения в ИУС АНПА. Существует несколько направлений его развития. Повысить эффективность алгоритма возможно путём прогнозирования формы препятствий на базе классификации и экстраполяции данных от бортовых дальнометров. Это позволит уменьшить количество сближений с препятствиями, а также уменьшить время, необходимое для оконтуривания и обхода препятствий. Немалый интерес представляет задача координированного покрытия акватории несколькими АНПА одновременно [4].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-07-00350 (в части разработки алгоритмов покрытия акваторий и организации модельных экспериментов) и Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» № 18-5-014 (алгоритмы коррекции траектории вблизи объектов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов О.Л., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Наумов Л.А. Опыт широкомасштабного поиска потенциально опасного подводного объекта в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. – 2010. – № 2(10). – С. 36-43.
2. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 2 (22). – С. 25-35.
3. Багницкий А.В., Инзарцев А.В. Автоматизация подготовки миссии для автономного обитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. – 2010. – № 2 (10). – С. 17-24.
4. Andrei Bagnitckii, Alexander Inzartsev, Oleg Lebedko, Mikhail Panin, Alexander Pavin. A survey of underwater areas using a group of AUVs // Proceedings of the Underwater Technology (UT), 2017 IEEE: Busan, South Korea, 2017. – 6 p.

Секция противодействия РТК военного назначения

УДК 621.865.8

В.Н. Фролов, В.А. Тупиков, А.Д. Барабанов, Э.Б. Ханов

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ЗАКРЫТОЙ ЗОНЫ ПРОСТРАНСТВА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются концептуальные вопросы создания и функционирования специализированного комплекса средств защиты закрытой зоны пространства особо охраняемых объектов, предназначенного для обнаружения объектов-нарушителей (малогабаритные беспилотные летательные аппараты различных типов и маломерные безэкипажные плавсредства) закрытой зоны пространства и их радиоэлектронного подавления.

Специализированный комплекс, закрытая зона пространства, средства радио- и оптико-электронного мониторинга, средства постановки радиоэлектронных помех.

V.N. Frolov, V.A. Tupikov, A.D. Barabanov, E.B. Khanov

SPECIALIZED COMPLEX OF MEANS FOR PROTECTING CLOSED SPACE ZONE OF SPECIALLY PROTECTED OBJECTS

The authors examine the conceptual issues of creating and functioning of specialized complex of means for protecting closed space zone for specially protected objects intended for detection of object-violators (small unmanned aerial vehicles of various types and small-size unmanned water crafts) of closed zone and for electronic countermeasure.

Specialized complex, closed space zone, radio- and optical-electronic monitoring facilities, means for radio jamming.

В настоящее время защита закрытых зон пространства (ЗЗП) вокруг таких важных и особо охраняемых объектов гражданской и военной инфраструктуры, как АЭС, ГЭС, ТЭС, транспортный узел, аэропорт, морской (речной) порт, военный городок, военный полигон и др., является чрезвычайно актуальной задачей [1, 2]. При этом проблема контроля за надводным и низковысотным пространством вокруг охраняемых объектов обусловлена наличием следующих факторов:

- ◆ значительное увеличение количества малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (мБЛА) различных типов (в т.ч. самолётного, вертолётного и коптерного типов) и различных типов малоразмерных радиоуправляемых плавсредств (МРП), в т.ч. катеров, плотов, яхт и лодок, приобретаемых населением без соответствующей регистрации и применяемых несанкционированно по месту, времени и решаемым задачам;

- ◆ увеличение количества зарегистрированных, а также незарегистрированных частных пилотируемых летательных аппаратов малой авиации различных типов (в т.ч. самолётов типа Cessna, вертолёт типа Robinson R44, автожиров, дельтапланов, дельталётов и парашютов), которые могут применяться несанкционированно по месту, времени и решаемым задачам;

- ◆ невозможность осуществления контроля воздушного пространства традиционными радиолокационными средствами на высотах ниже 450 м, на которых, как правило, совершают полёт вышеперечисленные летательные аппараты.

Особую озабоченность при защите ЗЗП вокруг рассматриваемых объектов инфраструктуры в настоящее время вызывают несанкционированные полеты мБЛА как зарубежного, так и отечественного производства, которые потенциально могут выполнять следующие задачи:

- ◆ ведение воздушной разведки в реальном масштабе времени;
- ◆ слежение за наиболее важными объектами;
- ◆ ведение радиоэлектронной борьбы;
- ◆ совершение террористических актов посредством постановки (сброса) взрывных устройств.

Типовые образцы мБЛА и их характеристики показаны на рис. 1.



Квадрокоптер

Размеры 300x300x150 мм
Высота полета до 500 м
Скорость полета до 65 км/ч
Грузоподъемность 150 г



Мультикоптер

Размеры 1000x1000x1000 мм
Высота полета до 3000 м
Скорость полета до 70 км/ч
Грузоподъемность 20 кг



Легкий беспилотный
ЛА самолетного типа

Размеры 1500x1500x300 мм
Высота полета до 2500 м
Скорость полета до 200 км/ч
Грузоподъемность 25 кг



Легкий беспилотный
вертолет

Размеры 1100x1000x1200 мм
Высота полета до 3000 м
Скорость полета до 220 км/ч
Грузоподъемность 50 кг

Рис. 1. Типовые образцы и характеристики мБЛА

Следует особо отметить, что в ЗЗП вокруг особо охраняемых объектов необходимо не только обнаруживать в реальном масштабе времени надводные и воздушные объекты-нарушители, но и оперативно принимать действенные меры по прекращению их несанкционированного, соответственно, движения или полёта. Решать эти две взаимосвязанные задачи предлагается посредством создания и применения специализированного комплекса средств защиты закрытой зоны пространства (СКСЗ ЗЗП), имеющего в своем составе средства радио- и оптико-электронного мониторинга, а также средства радиоэлектронного противодействия объектам-нарушителям ЗЗП и обеспечивающего решение в реальном масштабе времени следующих задач:

- ◆ обнаружение объектов-нарушителей, как источников радиоизлучений, и их распознавание по радиосигналам бортовых средств;

♦ обнаружение, распознавание и сопровождение в автоматическом режиме объектов-нарушителей по их видеоизображениям в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн;

♦ противодействие объектам-нарушителям посредством постановки радиоэлектронных помех бортовым приемникам каналов управления, передатчикам видеоинформации и приемникам сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

В зависимости от размеров и особенностей охраняемого объекта в состав предлагаемого специализированного комплекса могут быть также включены средства радиолокационного мониторинга, обеспечивающие обнаружение потенциальных объектов-нарушителей на дальних подступах к охраняемым объектам.

Структура специализированного комплекса средств защиты закрытой зоны пространства охраняемых объектов показана на рис. 2.

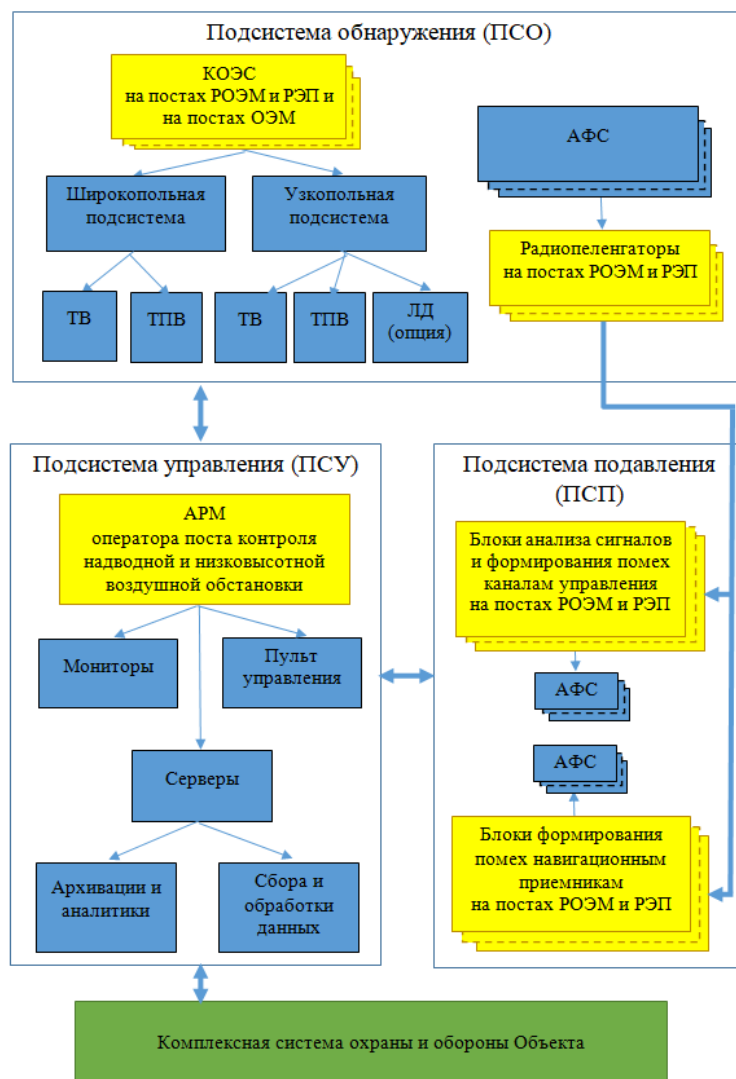


Рис. 2. Структура специализированного комплекса средств защиты закрытой зоны пространства охраняемого объекта

Суть предложений по созданию и функционированию специализированного комплекса заключается в следующем.

По периметру ЗЗП охраняемого объекта предлагается установить вышки (на морской поверхности, при необходимости, специальные буи), на которых предусматривается разместить оборудование постов радио-, оптико-электронного мониторинга и радиоэлектронного противодействия (РОЭМ и РЭП), удаленных один от другого на 2 км, и постов оптико-электронного мониторинга (ОЭМ), устанавливаемых между постами РОЭМ и РЭП (что обусловлено дальностью радиопеленгования и постановки помех до 2 км и дальностью обнаружения средствами оптико-электронного мониторинга до 1 км). В состав оборудования каждого поста РОЭМ и РЭП предусматривается включить следующие средства:

- ◆ радиопеленгатор, аппаратура анализа радиосигналов и комбинированная оптико-электронная система (КОЭС) в составе широкопольной и узкопольной подсистем оптико-электронного мониторинга;
- ◆ аппаратура формирования и постановки помех каналам управления, передачи видеoinформации и спутниковой навигации;
- ◆ антенно-фидерные устройства радиопеленгатора и аппаратуры формирования и постановки помех, приёмно-передающая аппаратура из состава радиорелейной сети, обеспечивающая приём команд управления для оборудования постов и передачу информации (в т.ч. данных радиопеленгования, видеoinформации об обнаруженных объектах и информации об объектах управления) на АРМ оператора поста контроля надводной и воздушной обстановки.

В состав оборудования постов ОЭМ предусматривается включить следующие средства:

- ◆ КОЭС указанного выше состава;
 - ◆ приёмно-передающая аппаратура из состава радиорелейной сети.
- Конструктивное исполнение элементов КОЭС показано на рис. 3.

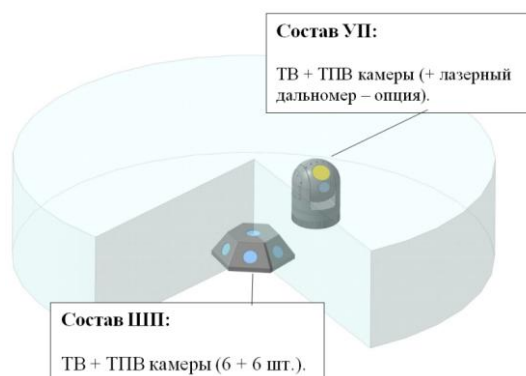


Рис. 3. Конструктивное исполнение элементов КОЭС

Внешний вид комплекта радиотехнического оборудования поста РОЭМ и РЭП показан на рис. 4.

Предусматривается, что управление функционированием всех элементов специализированного комплекса осуществляется с АРМ оператора поста контроля надводной и воздушной обстановки (ПКНВО). При этом решение на включение/выключение аппаратуры постановки радиоэлектронных помех принимается оператором ПКНВО. После включения аппаратуры постановки помех на излучение видеoinформация об объекте-нарушителе передается на монитор АРМ оператора ПКНВО для контроля результата радиоэлектронного противодействия.



Рис. 4. Внешний вид комплекта радиотехнического оборудования поста РОЭМ и РЭП

Вариант размещения АРМ поста контроля надводной и воздушной обстановки в специализированном контейнере показан на рис. 5.

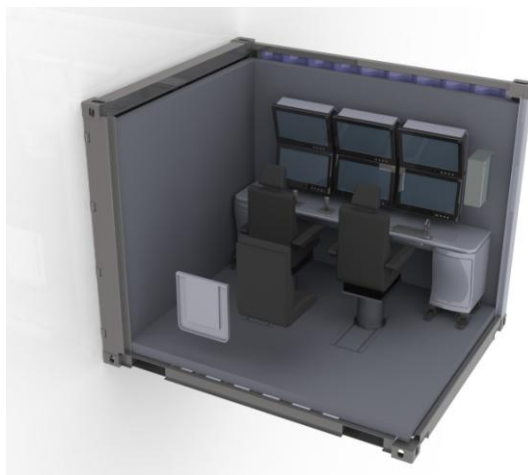


Рис. 5. Вариант размещения АРМ поста контроля надводной и воздушной обстановки в специализированном контейнере

Корпусные конструкции АРМ могут быть выполнены из композитных материалов. Такая конструкция АРМ представляет собой сегментарный набор приборных модулей с встроенным оборудованием под конкретные задачи. При этом предусмотрена единая столешница со сменными панелями под насыщение специальным оборудованием. Приборный модуль является секционным и может стыковаться друг с другом в двух, трех, четырех прямой или панорамный секционный пульт.

Порядок функционирования специализированного комплекса предусматривает последовательное выполнение следующих действий и операций:

1. Обнаружение сигналов потенциальных объектов-нарушителей ЗЗП, пеленгование обнаруженных источников радиоизлучений и пространственная селекция сигналов обнаруженных источников радиоизлучений с помощью радиопеленгатора на дальних подступах к охраняемому объекту (на дальности до 2 км);

2. Распознавание потенциальных объектов-нарушителей ЗЗП по сигналам их бортовых средств, обнаруженных радиопеленгатором, в соответствии с базой эталонов, а также формирование оптимальных (по частоте и мощности излучения) радиоэлектронных помех бортовым приемникам каналов управления и передачи данных с помощью блока анализа сигналов и формирования помех каналам управления (на дальности до 2 км);

3. Формирование радиоэлектронных помех бортовым приемникам сигналов СРНС с помощью блока формирования помех навигационным приемникам (на дальности до 2 км);

4. Обнаружение, распознавание и сопровождение объектов-нарушителей ЗЗП в автоматическом режиме с помощью КОЭС (на дальности от 200 до 500 м в зависимости от размеров объектов-нарушителей);

5. Принятие решения оператором поста контроля воздушной обстановки о постановке помех бортовым приемникам каналов управления и передачи данных объектов-нарушителей ЗЗП и их бортовым приемникам СРНС;

6. Постановка оптимальных (по частоте и мощности излучения) радиоэлектронных помех бортовым приемникам каналов управления и передачи данных и бортовым приемникам СРНС;

7. Осуществление контроля за действиями объектов-нарушителей ЗЗП после постановки радиоэлектронных помех по результатам анализа видеoinформации от КОЭС и данных радиопеленгатора, отображаемых на мониторе оператора поста контроля воздушной обстановки;

8. Доклад оператора поста контроля надводной и воздушной обстановки об обнаруженном объекте-нарушителе ЗЗП и принятых мерах защиты на центральный пост охраны (ЦПО) Объекта.

Результаты проведенных натурных испытаний экспериментальных и опытных образцов комбинированных средств оптико-электронного мониторинга, средств радиомониторинга и постановки радиоэлектронных помех подтверждают возможность создания специализированного комплекса, обеспечивающего защиту особо важных объектов от маломерных надводных безэкипажных и маловысотных воздушных беспилотных объектов-нарушителей.

Приведенные выше практические рекомендации по созданию и функционированию специализированного комплекса средств физической защиты закрытой зоны пространства могут быть уточнены и оптимизированы применительно для конкретного охраняемого объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мясников Е.В. Угроза терроризма с использованием беспилотных летательных аппаратов: технические аспекты проблемы. – Центр по изучению проблем разоружения, энергетики и экологии при МФТИ, Долгопрудный, 2004 г. – 29 с.
2. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 N 60-ФЗ (ред. от 31.12.2015) (с изменениями и дополнениями, вступ. В силу с 01.04.2016).

УДК 621.372(075)

В.В. Абраменков, А.Д. Гаврилов

**ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Рассматриваются два направления реализации требований к скрытности и помехоустойчивости радиолокационных средств обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Обеспечить требуемую скрытность предлагается путем расширения числа комбинаций зондирующих сигналов с различными законами фазовой модуляции. Для обеспечения помехоустойчивости к пассивным помехам предлагается новый подход к построению системы селекции движущихся целей.

Скрытность, помехоустойчивость, помехозащищенность, беспилотные летательные аппараты, шумоподобный сигнал, амплитудно-частотная характеристика, зона режекции.

V.V. Abramenkov, A.D. Gavrilo

**WAYS OF IMPLEMENTATION OF REQUIREMENTS TO JAMMING
IMMUNITY OF RADAR SENSORS OF SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL
VEHICLES**

Two ways of implementation of requirements to reserve and noise stability of radar sensors of small-sized unmanned aerial vehicles are considered. It is offered to provide the required reserve by expansion of number of combinations of the probing signals with various laws of phase manipulation. For ensuring noise stability to passive hindrances new approach to creation of system of selection of moving targets is offered.

Reserve, noise stability, jamming immunity, unmanned aerial vehicles, noise-like signal, amplitude-frequency characteristic, zone of notching.

Робототехнические комплексы военного назначения (РТК ВН) получают все большее распространение во всех видах боевых действий на земле, море и воздушно-космическом пространстве. Среди РТК ВН, применяемых в воздушном пространстве, доминирующее положение занимают малоразмерные беспилотные летательные аппараты (БЛА). Причинами этого являются их высокие боевые возможности и малая уязвимость от существующих средств противовоздушной обороны (ПВО) и другие [1, 2].

Малоразмерные БЛА, как радиолокационные цели, имеют следующие особенности:

- ◆ малая эффективная поверхность рассеяния (ЭПР), составляющая от 0,001 до 0,1 м²;

- ◆ малые высоты полета;

- ◆ относительно невысокие скорости полета.

Малая ЭПР, а значит, и низкая отражательная способность БЛА затрудняют их обнаружение даже в беспомеховой обстановке.

Малые высоты полета приводят к тому, что сигналы, отраженные от подобных летательных аппаратов, маскируются мощными переотражениями от подстилающей поверхности, метеообразований и других пассивных помех. Из-за невысоких скоростей полета БЛА спектры отраженных от них сигналов располагаются близко к главным лепесткам спектров пассивных помех, что усугубляет эффект маскирования и приводит к тому, что в системах селекции движущихся целей (СДЦ) радиолокационных станций (РЛС) происходит подавление полезного сигнала вместе с помеховым.

В свою очередь, РЛС обнаружения малоразмерных БЛА обладают спецификой, заключающейся в том, что они вынуждены работать практически непрерывно. Вызвано это тем, что направления и время появления БЛА в зоне обнаружения непредсказуемы, а эффективных средств предупреждения о возможном их применении в настоящее время нет. Учитывая малую ЭПР БЛА, при прочих равных условиях, единственным путем улучшения возможностей РЛС по их обнаружению в беспомеховой обстановке (после подавления помех) является увеличение энергии зондирующего сигнала. Однако эта мера приводит к ухудшению скрытности РЛС и повышает возможность ее уничтожения вплоть до вероятности достоверного события.

Таким образом, с точки зрения перечисленных выше особенностей малоразмерных БЛА и РЛС их обнаружения, последние должны одновременно удовлетворять требованиям высокого энергетического потенциала, скрытности и устойчивости к воздействию пассивных помех. Простое перечисление этих требований указывает на их сложность и противоречивость, что существенно затрудняет поиск решений, способных обеспечить эти требования.

Исходя из этого, целью статьи является изложение некоторых результатов исследований, выполненных в Военной академии войсковой ПВО, позволяющих в некоторой степени разрешить создавшееся противоречие.

Рассмотрим последовательно возможные пути повышения скрытности и помехоустойчивости РЛС обнаружения малоразмерных БЛА. Скрытность и помехоустойчивость совместно представляют собой помехозащищенность РЛС.

По поводу скрытности РЛС в [3] отмечается, что наилучшей скрытностью обладают те радиолокационные средства, которые имеют дельта-коррелированную пространственно-временную структуру зондирующего сигнала (ЗС). В наилучшей степени этому условию удовлетворяет зондирующий сигнал в виде пространственно-временного белого шума. Однако известные технические трудности не позволяют применять такой сигнал на практике.

Ближе всего к оптимальным ЗС по скрытности приближаются кодофазоманипулированные (КФМ) радиоимпульсы с законом манипуляции в виде кода Баркера или M -последовательности [3]. Однако применение только перечисленных типов шумоподобных сигналов не может в полной мере обеспечить требования скрытности. Дело в том, что для затруднения разведки средствами радиоэлектронной борьбы параметров ЗС целесообразно как можно чаще менять закон фазовой манипуляции. Для этого необходимо иметь достаточно большое количество различных наборов фазовых комбинаций для каждого ЗС с фиксированным числом дискрет S . Бинарные коды Баркера имеют по одной фазовой комбинации для сигналов с различным числом дискрет. Число фазовых комбинаций в M -последовательностях больше, но тоже ограничено, а все наилучшие по критерию минимального уровня боковых лепестков фазовые комбинации M -последовательностей известны, что упрощает определение конкретной из них средствами разведки.

Еще одним недостатком M -последовательностей является невозможность формирования ЗС с произвольным числом дискрет. Количество дискрет M -последовательностей кратно степени числа два. По этой причине область применимости подобных сигналов значительно сужается, поскольку на практике для одновременного удовлетворения требований дальности действия и разрешающей способности по дальности требуются ЗС с различными длительностями и числом дискрет. Так, для обеспечения требуемой дальности действия обнаружения малоразмерных целей выбирают ЗС с определенной длительностью импульса. Длительность одной дискреты определяется требуемой разрешающей способностью по дальности. Отношение длительности импульса к длительности одной дис-

креты определяет число отдельных дискрет в ЗС, и это отношение крайне редко оказывается близким к степени числа два. Известны и другие законы фазовой манипуляции, позволяющие получить минимальный уровень боковых лепестков, однако число их существенно ограничено.

Таким образом, в настоящее время задача одновременного обеспечения требуемого потенциала и скрытности работы РЛС не решена.

В результате ряда исследований, выполненных в Военной академии войсковой ПВО, удалось найти путь повышения скрытности высокопотенциальных РЛС за счет применения инверсной фильтрации протяженных шумоподобных КФМ-сигналов с произвольной длительностью и числом дискрет.

Инверсные фильтры [4] обеспечивают нулевой уровень боковых лепестков для импульсных, в том числе шумоподобных, сигналов с произвольным числом дискрет и произвольным законом фазовой модуляции, а входной сигнал сжимается до длительности одной дискреты. По этой причине инверсный фильтр является оптимальным с точки зрения разрешающей способности по дальности. Оптимальным с точки зрения максимизации отношения сигнал/шум является согласованный фильтр. В общем случае в инверсном фильтре возникают энергетические потери по сравнению с согласованным фильтром, что накладывает ограничения на его практическое использование. Основной причиной потерь являются близкие к нулю значения модуля амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Так, на рис. 1, а, б, в соответственно представлены закон фазовой манипуляции (фазовое распределение), огибающая и АЧХ согласованного фильтра 30-позиционного бинарного КФМ-сигнала со случайным законом манипуляции. Выход инверсного фильтра не представлен, поскольку он имеет один пик и рисунок его не информативен. Из рис. 1 видно, что подобранное фазовое распределение обеспечивает достаточно низкий уровень боковых лепестков, но в АЧХ имеются близкие к нулю значения. Поскольку при инверсной фильтрации выполняется деление спектра сигнала на частотную характеристику фильтра, в области близких к нулю значений АЧХ происходит резкое возрастание шума, приводящее к ухудшению отношения сигнал/шум на выходе инверсного фильтра.

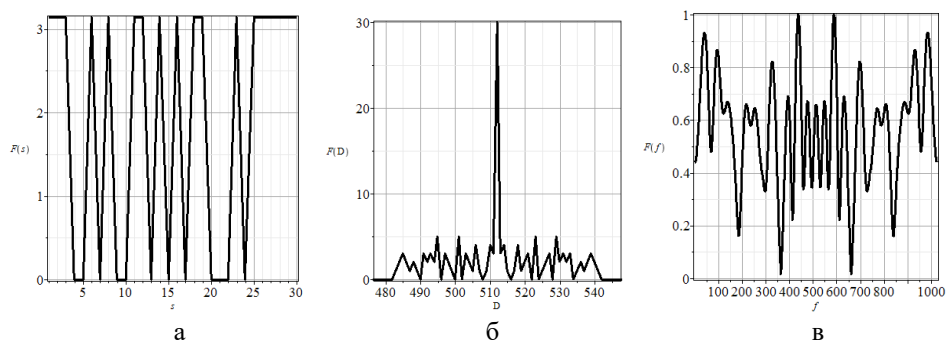


Рис. 1. Фазовое распределение, огибающая сжатого сигнала 30-позиционного бинарного КФМ-сигнала со случайным законом манипуляции и АЧХ согласованного с сигналом фильтра

Так, проигрыш инверсного фильтра с АЧХ, изображенной на рис. 1, в, по отношению к согласованному фильтру составляет 9 дБ, что является недопустимым, поскольку последствиями этого является снижение дальности действия РЛС и точности измерения координат целей.

Для устранения этого недостатка предложено синтезировать КФМ-сигналы с произвольными числом дискрет и законом фазовой манипуляции по критерию минимума дисперсии АЧХ. В табл. 1 в качестве примера представлено 24 варианта кодовых комбинаций, полученных для ЗС с 30 дискретами. Энергетические потери при инверсной фильтрации сигналов с представленными в таблице кодовыми комбинациями не превышают 0,8 дБ, что более чем в десять раз меньше, чем на рис. 1. Учитывая преимущество инверсной фильтрации по сравнению с согласованной, заключающееся в полном отсутствии боковых лепестков, указанные потери можно считать допустимыми. Имеющиеся результаты исследований показывают, что уровень потерь может быть снижен еще в несколько раз, а число различных комбинаций существенно увеличено при использовании многофазных кодовых последовательностей.

Таблица 1

Кодовые комбинации бинарного 30- позиционного КФМ-сигнала

1,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0
0,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0
0,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0
1,0,1,0,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,0,0,0
1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,0,0,0
0,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0
1,1,0,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,1,0,0,1,0,1,0
0,0,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0
1,1,0,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,0
1,1,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0
0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,1,1,0
0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,1,1,0
1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1
1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1
0,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,1
0,0,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,1
1,1,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1
0,0,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1
1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,1,1,0,0,1,1
0,1,0,1,0,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,1
0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,1
1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1
1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1
0,1,1,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,1

На рис. 2,а представлены один из вариантов кодовых комбинаций табл. 1, огибающая сигнала с выхода согласованного фильтра (рис. 2,б) и АЧХ согласованного фильтра (рис. 2,в). Сравнение рис. 1,в с рис. 2,в показывает отсутствие в АЧХ последних, близких к нулю, значений, что и обеспечивает минимизацию энергетических потерь инверсного фильтра по сравнению с согласованным.

Таким образом, представленные результаты исследований позволяют сделать вывод о преимуществах инверсной фильтрации синтезированных специальным образом ЗС в интересах одновременного обеспечения требуемой энергии ЗС, необходимой для обнаружения малоразмерных БЛА и скрытности, обеспечиваемой путем использования большого числа комбинаций, близких к шумоподобным сигналам.

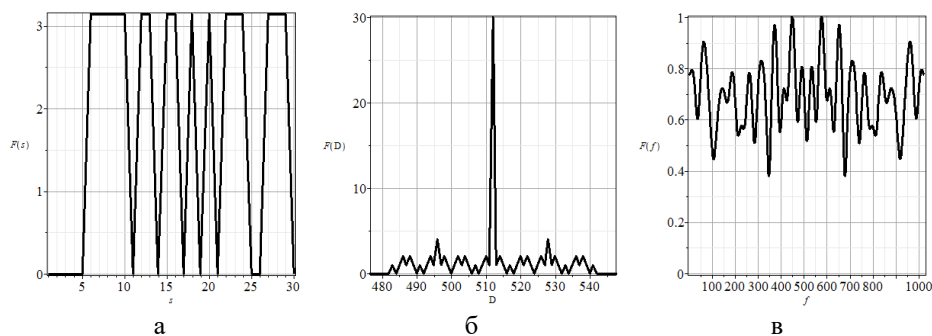


Рис. 2. Фазовое распределение, огибающая сжатого сигнала 30-позиционного бинарного КФМ-сигнала с минимальной дисперсией спектра и АЧХ согласованного с сигналом фильтра

Второй составляющей помехозащищенности РЛС является помехоустойчивость. Вопрос устойчивости РЛС обнаружения малоразмерных БЛА к воздействию активных помех выходит за рамки статьи. Результаты исследований устойчивости РЛС обнаружения малоразмерных БЛА к воздействию пассивных помех излагаются ниже.

Известные результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что основные требования к АЧХ систем СДЦ РЛС обнаружения малоразмерных БЛА заключаются в следующем:

- ◆ в области близких к нулю доплеровских частот АЧХ должна иметь зону режекции, форма которой близка к прямоугольной;
- ◆ глубина зоны режекции должна быть не менее 60 дБ;
- ◆ ширина зоны режекции должна адаптивно изменяться в зависимости от ширины спектра пассивной помехи.

Близкая к прямоугольной форма зоны режекции обеспечит эффективное разделение близкорасположенных спектров полезных сигналов и пассивных помех. Глубина зоны режекции обеспечит подавление пассивных помех до уровня, позволяющего обнаружить полезный сигнал. Изменение ширины зоны режекции необходимо для адаптации к складывающейся помеховой обстановке.

Результаты исследования существующих систем СДЦ приводят к выводу, что в силу различных недостатков они не могут в полной мере отвечать предъявленным требованиям и не позволяют обеспечить необходимую устойчивость РЛС обнаружения малоразмерных БЛА к воздействию пассивных помех.

В течение ряда лет в Военной академии войсковой ПВО были выполнены исследования, позволившие предложить новый тип системы СДЦ РЛС обнаружения малоразмерных БЛА, удовлетворяющий перечисленным выше требованиям. Для подтверждения эффективности разработанной системы СДЦ была выполнена проверка ее работоспособности путем обработки экспериментальных данных. Записи экспериментальных данных были получены и предоставлены для обработки АО «ФНПЦ «ННИИРТ», г. Нижний Новгород. Задача эксперимента состояла в обнаружении малоразмерного БЛА «Banshee» радиолокационной станцией 1Л122, разработанной на этом же предприятии.

Записи отраженных сигналов обрабатывались параллельно в существующей системе СДЦ (СДЦ 1) и разработанной (СДЦ 2). На рис. 3,а представлен спектр входного сигнала, на рис. 3,б – спектр выходного сигнала СДЦ 1, на рис. 3,в – спектр выходного сигнала СДЦ 2. Результаты, представленные на этом рисунке,

получены при нахождении БЛА в помехах слабой интенсивности, что видно из рис. 3,а. На этом рисунке уровень шума превышен только главным лепестком спектра пассивной помехи, который расположен в области нулевой доплеровской частоты. Отношение помеха/шум составляет ≈ 25 дБ. Из этого же рисунка видно, что даже при таком относительно низком уровне пассивных помех отраженный от БЛА сигнал не наблюдается, поскольку в силу малой ЭПР цели находится ниже уровня помех.

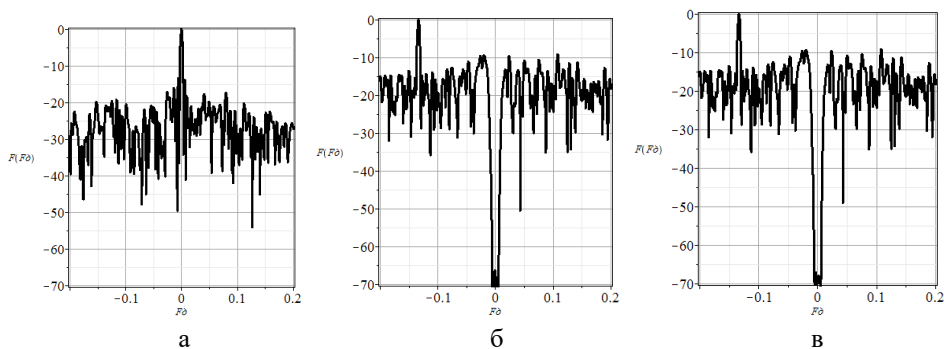


Рис. 3. Спектр входного сигнала (а), выходного сигнала СДЦ 1 (б), выходного сигнала СДЦ 2 (в) в пассивных помехах слабой интенсивности. Узкая зона режекции

В результате обработки в системах СДЦ 1 и СДЦ 2 с узкой зоной режекции пассивная помеха была подавлена и сигнал БЛА обнаруживается в обоих случаях, что видно из рис. 3,б,в. Из этих же рисунков видно, что в выходном спектре обоих типов СДЦ в области расположения главного лепестка спектра пассивной помехи сформировался провал, глубина которого удовлетворяет предъявленным выше требованиям.

На рис. 4 представлены результаты, аналогичные рис. 3, но сигнал БЛА замаскирован отражениями от пассивных помех сильной интенсивности. Отношение помеха/шум составляет ≈ 60 дБ. В этом случае уровень шума существенно превышен не только главным, но и боковыми лепестками спектра пассивной помехи, что видно из рис. 4,а. В этом случае требуется расширение зоны режекции системы СДЦ. Выходной спектр СДЦ 1, работающей в режиме широкой зоны режекции, представленный на рис. 4,б, содержит некомпенсированные остатки помехи во всей полосе частот. Сигнал цели не обнаруживается, что доказывает недостаточную эффективность системы СДЦ 1 при работе в пассивных помехах сильной интенсивности. В спектре выходного сигнала системы СДЦ 2, представленном на рис. 4,в, пассивная помеха подавлена во всей зоне режекции, а полезный сигнал отчетливо выделяется на фоне шума.

Представленные результаты обработки экспериментальных данных подтверждают, что система СДЦ РЛС обнаружения малоразмерных БЛА должна иметь возможность адаптации ширины зоны режекции в зависимости от мощности пассивной помехи и ширины ее спектра. Глубина зоны режекции должна составлять 60 дБ и более независимо от ширины зоны режекции. Известные методы подавления пассивных помех не удовлетворяют этим требованиям. В результате выполненных исследований разработана система СДЦ, удовлетворяющая предъявленным требованиям.

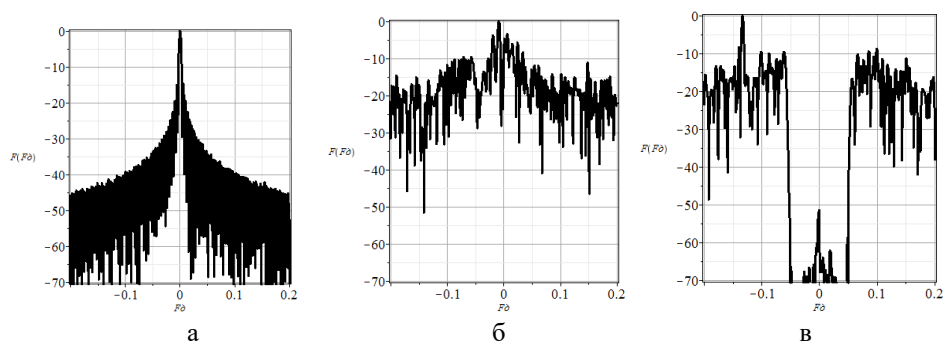


Рис. 4. Спектр входного сигнала (а), выходного сигнала СДЦ 1 (б), выходного сигнала СДЦ 2 (в) в пассивных помехах сильной интенсивности. Широкая зона режекции

Таким образом, представленные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности повышения скрытности РЛС обнаружения малоразмерных БЛА за счет использования инверсной фильтрации синтезированных специальным образом комбинаций шумоподобных ЗС. Повышение устойчивости к воздействию пассивных помех достигается за счет применения разработанной системы СДЦ, обеспечивающей формирование адаптируемой к помеховой обстановке зоны режекции. Одновременное улучшение скрытности и помехоустойчивости обеспечивает рост важной тактической характеристики РЛС обнаружения малоразмерных БЛА – помехозащищенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Арсенал Отечества. – 2014.
2. Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Организация системы борьбы с малоразмерными БЛА // Арсенал Отечества. – 2014.
3. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / под ред. В.Н. Лепина. – М.: Радиотехника, 2017. – 410 с.
4. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов. – М.: Сов. Радио, 1979. – 269 с.

Секция технологического обеспечения систем и средств связи, навигации и наведения РТК морского базирования

УДК 621.396.67

Л.В. Резникова

МЕТАПОВЕРХНОСТНЫЕ ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ, АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

В последнее время тема метаматериалов стала очень актуальна в антенной технике, особенно использование метаматериала в качестве фокусирующей линзы в линзовых антеннах. Линзовая антенна — это микроволновая антенна, в которой диэлектрическая линза размещена перед питающей антенной для концентрирования излучаемой энергии в узкий луч или фокусирования переданной энергии на приемную антенну. Обычно, линзы, работающие в микроволновом диапазоне с изогнутой поверхностью громоздкие, тяжелые, а еще их сложно объединить с другими компонентами антенной системы. Метаповерхности сделали возможным модулировать амплитуду или фазу вторичного источника Гюйгенса на электромагнитный фронт, который может быть использован для управления распределением ЭМ поля и распространения ЭМ волн.

Метаповерхность, линзовая антенна, смещенные на половине единичной ячейки противоположные слои метаматериала, коэффициент преломления, сверхширокополосная линза, 3D принтер, плоская линза Лунеберга.

L.V. Reznikova

METASURFACE LENS ANTENNAS, URGENCY AND APPLICATION PROSPECT

Nowadays the theme of metamaterials has become up-to-date in antenna technology, especially using the metamaterial as a focusing lens in lens antennas. A lens antenna is a microwave antenna in which a dielectric lens is placed in front of the feeding antenna to concentrate the radiated energy into a narrow beam or to focus received energy on the receiving antenna. Generally, at microwave band lenses with curve surfaces are bulky, heavy, and difficult to integrate with other components. Metasurfaces made it possible to modulate the amplitude or phase of the secondary Huygens' source on the electromagnetic (EM) wavefront, which can be used to control the EM field distribution and EM wave propagation.

Metasurface, lens antenna, half unit cell shifted mirrored metasurfaces, refractive index, ultrawideband lens, 3D printer, flat Luneburg lens.

В настоящее время ученые всего мира изучают уникальные свойства метаматериалов, применение которых дает множество возможностей для создания разнообразных структур для применения в антенной технике. В качестве примера можно рассмотреть линзовые антенны. Такие антенны получили широкое применение в антенной технике в СВЧ диапазоне [1]. Линза в этом случае позволяет перевести фронт падающей ЭМ волны из сферического (цилиндрического) в плоский, то есть она преобразует пучок лучей, расходящихся из фокуса, в котором расположен источник излучения, в пучок параллельных лучей на раскрытие линзы (режим пере-

дачи). Недостатками таких антенн являются большие габариты, сложность изготовления и настройки параметров, кроме того, линзы должны иметь малые тепловые потери и быть хорошо согласованными с окружающим пространством [1]. С появлением метаматериалов создание линзовых антенн приобрело совершенно новое направление в антенной технике. Вместо естественных (полистирол, тефлон, полиэтилен, вспененный пенопласт) и искусственных (конструкция из кусков металла и воздушных промежутков между ними) диэлектриков теперь стало возможным использовать метаматериал – композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой [9]. Искусственная периодическая структура изменяет диэлектрическую и магнитную проницаемости исходного материала. Метаматериалы обладают уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Электромагнитные свойства метаматериалов определяются элементами их внутренней структуры, размещёнными по заданной схеме на микроскопическом уровне. Поэтому свойства этих материалов можно изменять таким образом, чтобы они имели более широкий диапазон электромагнитных характеристик, включая отрицательный коэффициент преломления.

Первые работы в изучении метаматериалов относятся еще к 19 веку: в 1898 году Джагадис Чандра Бозе провел микроволновый эксперимент по исследованию поляризационных свойств созданных им структур искривленной конфигурации [4]. В 1914 году Линдман воздействовал на искусственные среды, представлявшие собой множество беспорядочно ориентированных маленьких проводов, скрученных в спираль и вложенных в фиксировавшую их среду. В 1946–1948 гг. Уинстон Е. Кок впервые создал микроволновые линзы, используя проводящие сферы, диски и периодически расположенные металлические полоски, фактически образовавшие искусственную среду со специфичным по величине эффективным индексом преломления [5]. В большинстве случаев история вопроса о материалах с отрицательным коэффициентом преломления начинается с упоминания работы советского физика Виктора Веселаго, опубликованной в журнале «Успехи физических наук» в 1967 году [3].

Линзовая антенна это один из наиболее распространенных типов высоконаправленных антенн, применяемых в радионавигации, радиолокации, радиопротиводействию, а также системах космической и наземной радиосвязи [1]. Как правило, задача любой высоконаправленной антенны заключается в том, чтобы сопровождать какой-либо объект в широком диапазоне углов, для это необходимо иметь систему управления лучом, то есть систему управления ДН. Существует множество видов реализации линзовых антенн, например, линзы из однородного диэлектрика (линзы с одной преломляющей поверхностью, волноводные и металлопластинчатые линзы, линзы из наклонных пластин, зонированные линзы), апланатические линзы из однородного диэлектрика (двупреломляющая диэлектрическая линза, плоско-выпуклая линза, линза в форме шара), линзы из неоднородного диэлектрика (линза Максвелла, линза Лунеберга, линза Микаэляна) и т.д. [1]. В литературе в последнее время предлагается описание и реализация линзовых антенн на основе метаматериала.

Так, авторы в [8] предложили создание сверхширокополосной метаповерхностной линзы на основе смещенных противоположных слоев. Такие линзы находят свое применение в создании направленных антенн для беспроводной связи на высоких частотах, где решетки и фазосдвигающие устройства не являются подходящим решением в силу их высокой стоимости и сложности изготовления и уста-

новки. Метаповерхности являются бюджетным решением для развития направленных антенн на высоких частотах, а одной из перспектив метаповерхности является возможность создания плоских линз. Однако такие линзы обычно работают в очень узком диапазоне частот. Узкий диапазон рабочих частот также влияет на требуемый диапазон коэффициента преломления. В исследовании [8] представлен новый вид метаповерхностей с низкой дисперсией волн, который может быть использован для изготовления сверхширокополосной плоской линзы. Особенность линзы заключается в том, что 2 зеркальные метаповерхности смещены на половину единичной ячейки (рис. 1,е и 1,ф). Такое расположение дает два эффекта: увеличение эквивалентного коэффициента преломления основной моды колебаний и выравнивание его частотной зависимости.

Метаповерхность в данном случае это тонкие слои метаматериала, которые создают особые отражательные характеристики падающей плоской волны или используются для направления поверхностной волны. В первом случае метаповерхности используются в варианте исполнения, который схож с использованием линз Френеля или отражательных решеток для создания направленного излучения (например, диполь, прямоугольная микрополосковая антенна или рупорная антенна). Но в своем исследовании авторы сделали акцент на втором варианте: направление поверхностной волны. Метаповерхность, как частный случай метаматериала, обычно изготавливается в виде периодического повторения единичных ячеек. Изменяя геометрию каждого единичного элемента или его решетки, можно изменить постоянную распространения поверхностной/направляемой моды, тем самым обеспечивают средства для адаптации эквивалентных показателей преломления.

Одни из самых распространенных структур метаповерхностей это периодические решетки или металлические поверхности с отверстиями, расположенными над диэлектрической пластиной или матричным контактным полем. Эти топологии могут быть полностью открыты сверху, или закрыты верхней плоской «поверхностью», которая расположена над воздушным зазором или диэлектрической пластиной. В данном случае, метаповерхности были предложены в качестве альтернативы диэлектрическим пластинам над плоской поверхностью для создания поверхностных волн. Такая реализация, особенно в печатных версиях (решетки и поверхности с отверстиями), имеет более низкую стоимость производства, однако, полоса пропускания узкая. Насколько известно, достичь создания широкой полосы пропускания можно лишь при использовании диэлектрических материалов или нано/микро соединений (сплавов).

Исследовано два случая структур: матричное контактное поле и его дополнительная реализация – металлическая поверхность с отверстиями. Эти исследования были проведены для случая с двумя зеркальными метаповерхностями, смещенных вдоль двух направлений периодичности (вдоль ортогональных осей). Было выявлено, что когда два слоя смещают ровно на половину единичной ячейки, эквивалентный показатель преломления метаповерхности становится выше, но что более важно, ширина полосы пропускания значительно увеличилась. Эти результаты открывают новую возможность для создания сверхширокополосных плоских линз.

На рис. 1,а показана общая структура единичной ячейки контактного матричного поля (квадратная структура, которая изготавливается намного проще, чем круглая структура), на рис. 1,б показана дополнительная структура – периодическое повторение квадратных отверстий в металлической пластине. Высота контактов или отверстий обозначается h . Оба варианта имеют верхнюю плоскую поверхность над воздушным зазором толщиной g . Когда $g = \infty$, можно сказать, что этот случай может быть рассмотрен как случай с открытым верхом. В этой работе представлена новая структура, в которой метаповерхность может быть расположе-

на напротив точно такой же идентичной метаповерхности, как показано на рис. 1,с и 1,д. Кроме того, и самое главное, что обе метаповерхности смещены друг относительно друга на половину единичной ячейки (рис. 1,е и 1,ф).

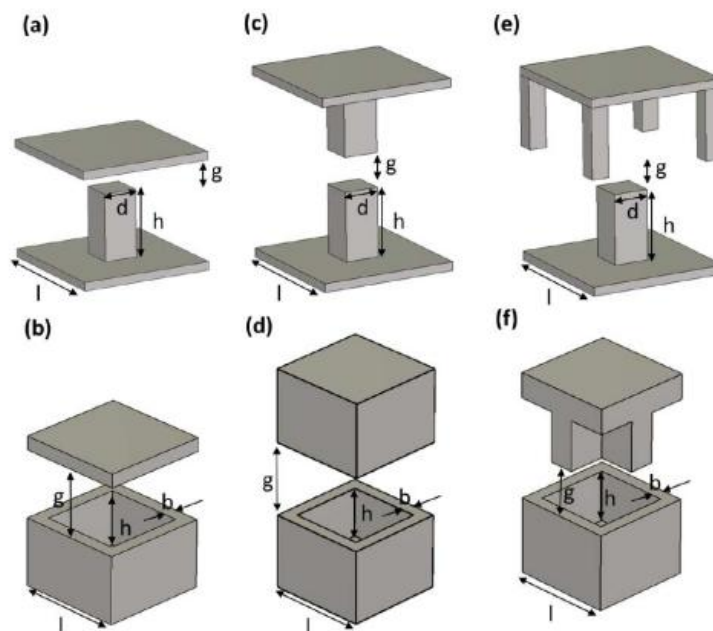


Рис. 1. Метаповерхностные структуры (a и b – одна метаповерхность с металлической крышкой сверху; с и d – две метаповерхности (друг напротив друга); e и f – две метаповерхности, сдвинуты на половину единичной ячейки. a, c, e – матричное поле контактов; b, d, f – квадратные отверстия)

В результате экспериментов был сделан вывод, что на основе предложенных структур можно смоделировать плоскую линзу Лüneберга радиусом 150 мм, которая будет иметь лучшие характеристики с точки зрения полосы пропускания, чем традиционная линза Лüneберга. Такая линза будет создавать высоконаправленный луч на частотах от 4 ГГц до 18 ГГц с уровнем боковых лепестков ниже 10 дБ.

Иная структура линзовой антенны на основе метаматериала представлена в [7]. Представлены субволновые диэлектрические единичные ячейки (примерно $0,3\lambda_0 \times 0,3\lambda_0$, где λ_0 – рабочая длина волны в свободном пространстве) с разной толщиной, которые позволяют достичь фазовый сдвиг $0 \sim 2\pi$. Такие неоднородные элементы структуры используются для создания электрически-тонкой электромагнитной линзы, которая работает на частоте 28 ГГц. Такую линзу можно напечатать с помощью 3D принтера, а затем интегрировать с антенной решеткой для создания системы линзовой антенны со сверхнизким профилем. Отношение фокусного расстояния к апертуре антенны равно 0,15. Проведенное моделирование и эксперимент показали увеличение коэффициента усиления (на 7 дБ) и очень низкий уровень боковых лепестков.

В данном эксперименте в качестве источника излучения использовалась антенная решетка, работающая на частоте 28 ГГц. Фокусное расстояние диэлектрической линзы равно примерно длине волны (10,7 мм). Размер апертуры выбран $[\frac{20\lambda_0}{3} \times \frac{20\lambda_0}{3}]$ для того, чтобы полностью выровнять фазовый фронт ЭМ волн, кото-

рые распространяются от источника излучения. Размер каждой единичной ячейки $[\frac{\lambda_0}{3} \times \frac{\lambda_0}{3}]$, поэтому всего необходимо 400 таких единичных ячеек. В данной работе сравнивались характеристики антенной решетки с линзой из метаматериала и без него. Результаты моделирования таких антенн показали, что коэффициент усиления антенной решетки был увеличен на 8 дБ в направлении максимума диаграммы направленности в то время, как ширина луча на уровне 3 дБ уменьшилась на $23,2^\circ$. На рис. 2 показана имитационная модель антенны, которая была смоделирована с помощью программного пакета Computer Simulation Technology Microwave Studio, а результаты этого моделирования показаны на рис. 3.

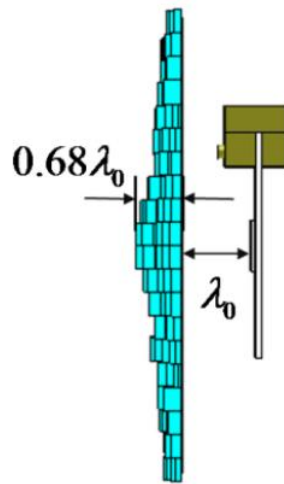


Рис. 2. Имитационная модель антенны

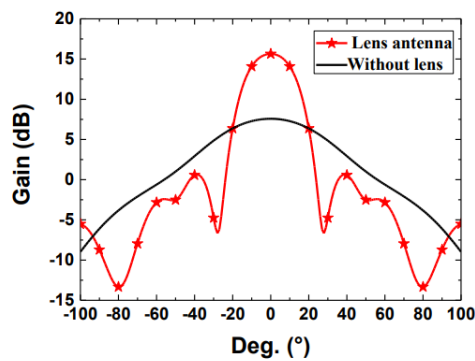


Рис. 3. Коэффициент усиления антенной решетки с диэлектрической линзой и без нее

Для того, чтобы проверить эффективность разработанной антенной системы, была изготовлена электрически тонкая линза с помощью 3D принтера, как показано на рис. 4. Печатным материалом является PLA ($\epsilon_r = 2,6$). На рис. 5 показан график зависимости коэффициента усиления от рабочей частоты антенной решетки с диэлектрической линзой в двух случаях: при моделировании антенны на компьютере и при проведении эксперимента на частотах от 24 ГГц до 30 ГГц линзовой антенны по отношению к антенной решетке.

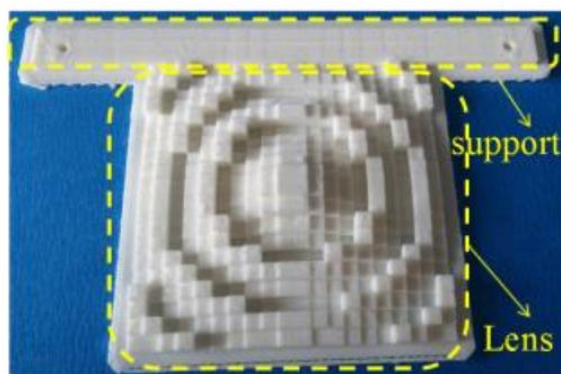


Рис. 4. Изготовленная на 3D принтере диэлектрическая линза

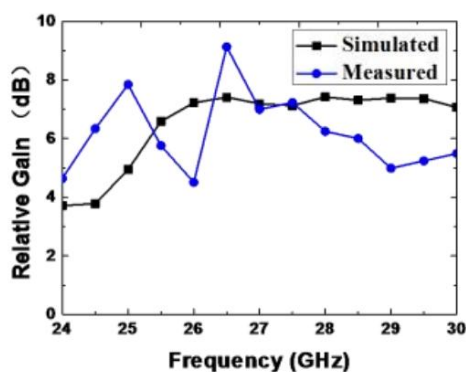


Рис. 5. Смоделированный и измеренный относительный коэффициент усиления антенной системы с линзой по отношению к антенной решетке

На рис. 5 можно увидеть, что между двумя кривыми есть небольшое несоответствие, которое можно объяснить близким расположением антенной решетки к линзе и погрешности печати линзы на 3D принтере.

В [6] предложен еще один вариант модели широкополосной метаповерхностной линзовой антенны с градиентным показателем преломления и высоким коэффициентом усиления. Для градиентного показателя преломления плоской линзы используют англоязычную аббревиатуру GRIN (gradient refractive index). В качестве источника излучения использовалась антиподную (диаметрально-противоположную) экспоненциальную конусную щелевую антенна (ATSA - antipodal exponential taper slot antenna). В качестве составной части такой линзовой антенны предложена нерезонансная единичная ячейка из метаматериала, состоящая из двухслойных тройных прямоугольных колец. В работе показано, что при использовании этого элемента реализуются более сильные емкостные связи между смежными металлическими слоями, что приводит к большому изменению показателя преломления и, следовательно, можно получить тонкую линзу толщиной $0,38\lambda_0$, где λ_0 – длина волны на частоте 9,5 ГГц. Кроме того, поскольку единичная ячейка спроектирована так, чтобы резонировать на более высоких частотах, ее коэффициент преломления плавно увеличивается в широком диапазоне частот, что значительно увеличивает рабочую полосу пропускания линзы.

Структура линзовой антенны из GRIN метаматериала схематично представлена на рис. 6. Она состоит из плоской поверхности размером $d \times d$ и толщиной T , которая облучена по центру излучателем, расположенным на фокусном расстоянии F от поверхности. Эта поверхность состоит из решетки маленьких единичных ячеек с разным показателем преломления, изменяющимся вдоль раскрытия линзы. Чтобы получить диаграмму направленности с выравненным фазовым фронтом и высоким коэффициентом усиления, каждая ячейка спроектирована так, чтобы компенсировать дифференциальную пространственную задержку луча сферической волны, испускаемого из фазового центра излучателя и направленного в центр этой единичной ячейки относительно луча, проходящего через центр раскрытия линзы.

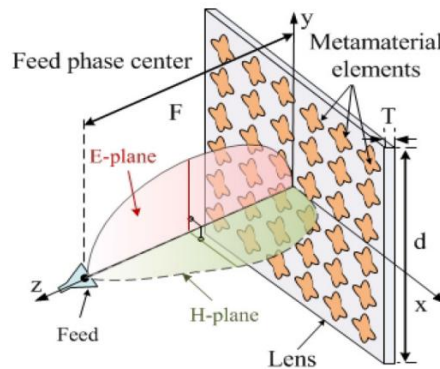


Рис. 6. Схематичное представление предложенной линзы из GRIN метаматериала

Для того, чтобы получить широкополосную высокоэффективную линзовую антенну, требуется сбалансированная полоса частот и стабильная диаграмма направленности излучателя с низкой перекрестной поляризацией уровня боковых лепестков, поэтому в качестве источника излучения в этом случае выбрана плоская антенна ATSA с излучающей структурой в виде широкополосного волновода с интегрированной надложкой (SIW – substrate integrated waveguide), также он оптимизирован для получения почти симметричной диаграммы направленности для ширины диаграммы направленности -10 дБ (73° и 74° в Еи Н плоскостях соответственно). В данной работе проведен ряд измерений при моделировании линзовой антенны, а также спроектирована данная антенна и проведен ряд экспериментов. Результаты экспериментов показали, что при рациональном контроле рассеивающих свойств единичной ячейки из метаматериала ее градиентный показатель преломления может быть значительно увеличен, а толщину линзы можно значительно уменьшить. Более того, путем смещения резонансной частоты единичной ячейки текущая чувствительность разработанной линзы увеличивается. Путем надлежащего выбора излучающей антенны и разумного проектирования структуры линзы была получена диаграмма направленности с низким уровнем боковых лепестков (менее чем -20 дБ). Перекрестная поляризация линзовой антенны по сравнению с источником излучения стала лучше по крайней мере на 8 дБ.

Таким образом, анализ современных источников информации показал, что использование метаматериалов в антенной технике имеет хорошие перспективы развития. С помощью использования метаматериалов можно получить линзовые антенны с улучшенными энергетическими характеристиками, что позволяет использовать их в технике СВЧ, где требуется обеспечить широкоугольное сканирование и достичь высокий коэффициент усиления во всем диапазоне углов для обеспечения спутниковой связи и проведения космических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зелкин Е.Г., Петрова Р.А.* Линзовые антенны. – М.: Сов. радио, 1974. – 280 с.
2. *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: НБТ. – 2009. – № 7. – С. 70-79.
3. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92, № 7. – С. 517-526.
4. *Bose J.C.* On the rotation of plane of polarization of electric waves by a twisted structure // Proc. Roy. Soc. – 1898. – Vol. 63. – P. 146-152.
5. *W.E. Kock.* Metal-lens antennas // Proceedings of Inst. Radio. Engrs. and Waves and Electrons. – November, 1946. – Vol. 34. – P. 828-836.
6. *Elham Erfani, Mahmoud Niroo-Jazi, and Serioja Tatu.* A High-Gain Broadband Gradient Refractive Index Metasurface Lens Antenna // IEEE Transactions on antennas and propagation. – May 2016. – Vol. 64, No. 5. – P. 1968-1973.
7. *Zheng-bin Wang, Hao Wu, Jin-chang Chen, Zhi-hang Wu, and Yi-jun Feng.* An Ultralow-profile Lens Antenna Based on All-dielectric Metasurfaces // 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). – P. 367-368.
8. *Oscar Quevedo-Teruel, Mahsa Ebrahimpouri, Malcolm Ng Mou Kehn.* Ultrawideband Metasurface Lenses Based on Off-Shifted Opposite Layers // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 484-487.
9. *Engheta, Nader, Ziolkowski, Richard W.* Metamaterials: Physics and Engineering Explorations // John Wiley & Sons & IEEE Press, 2006. – P. xv, 3-30, 37. 143-150, 215-234, 240-256. – 440 p. – ISBN 978-0-471-76102-0.

УДК 621.397.13.037.372

П.Н. Анисимов, Д.А. Кузин

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА
ПРИ ПОСТРОЕНИИ СЕТИ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ
СТАНДАРТА DVB-T2**

В данной работе описано применение методики аналитического расчета для снижения необходимого количества экспериментов по определению мощности принимаемого сигнала стандарта DVB-T2 в области планируемого цифрового вещания. Эксперимент подразумевает действие, направленное на создание условий в целях осуществления того или иного явления, по возможности наиболее частого, т.е. не осложняемого другими явлениями. Эксперимент является, как правило, очень трудоемким, его осуществление требует больших временных и финансовых затрат. Для уменьшения необходимого числа натурных опытов существуют методики полнофакторного эксперимента. Кроме того, с помощью методики, основанной на планах Бокса-Бенкена, число необходимых опытов значительно снижается. Для проведения эксперимента по оценке предложенного метода полнофакторного анализа было принято ограничение в виде известной формулы Введенского при условии распространения радиоволны в свободном пространстве. В формуле описывается зависимость мощности излучения передающей антенны от ряда факторов: минимальной напряженности электромагнитного поля, коэффициента усиления передающей антенны, высот подвеса передающей и приемной антенн, коэффициента кривизны земной поверхности, длины волны и радиуса зоны покрытия. В данной работе рассмотрено планирование эксперимента с тремя варьируемыми факторами и тремя уровнями значимости, для которого требуется провести минимум 27 однократных опытов при полнофакторном эксперименте. Также была использована методика, основанная на планах Бокса-Бенкена и, при тех же условиях, потребовалось провести 15 однократных опытов. В результате расчетов проведенных на основании 15 экспериментов были получены 495 значений мощности принимаемого сигнала стандарта DVB-T2 в большем количестве точек, чем было исследовано во время натурных замеров. При этом максимальное отклонение результата от аналитического расчета достигало лишь 4.72 % (для эксперимента, основанного на планах

Бокса-Бенкена) и 5.51 % (для полнофакторного эксперимента), что подтверждает состоятельность применения методов планирования эксперимента для решения задачи по расчету зоны приема сигнала цифрового телевизионного вещания с формированием зон обслуживания при заданном уровне напряженности поля.

P.N. Anisimov, D.A. Kuzin

APPLICATION OF METHODS OF EXPERIMENT PLANNING WHEN BUILDING A NETWORK OF DIGITAL TELEVISION BROADCASTING STANDARD DVB-T2

In this paper, we describe the application of the analytical computation technique to reduce the required number of experiments to measure the received DVB-T2 signal power in the area of planned digital broadcasting. The experiment implies an action aimed at creating conditions for the implementation of a phenomenon, as often as possible. The experiment is a very complicate; its implementation requires a lot of time and financial costs. To reduce the required number of full-scale experiments, there are techniques for a full-factor design. In addition, using a technique based on Box-Behnken's plans, the number of necessary experiments is significantly decreased. To carry out the experiment to evaluate the proposed method of full-factor analysis, a restriction was adopted in the form of the well-known Vvedensky equation, provided the radiowave propagates in free space. The formula describes the dependence of the transmit power of the transmitting antenna on a number of factors: the minimum electromagnetic field strength, the gain of the transmitting antenna, the height of the suspension of the transmitting and receiving antennas, the curvature coefficient of the earth's surface, the wavelength and the radius of the coverage zone. In this paper, we consider the planning of an experiment with three variable factors and three significance levels, for which it is required to perform a minimum of 27 single experiments with a full-factor experiment. A technique based on the Box-Behnken plans was also used and, under the same conditions, it was required to conduct 15 single-shot experiments. As a result of calculations based on 15 experiments, 495 received DVB-T2 received signal strengths in a larger number of points than were investigated during field measurements. At the same time, the maximum deviation of the result from the analytical calculation reached only 4.72 % (for the experiment based on the Box-Benken plans) and 5.51 % (for the full-factor design), which confirms the consistency of the experimental design methods for solving the problem of computation the coverage zone of digital television broadcasting signal with the formation of service areas for a given level of electromagnetic field strength.

Введение. При выполнении задачи по охвату населения регионов вещанием цифрового пакета телевизионных программ сеть цифрового наземного вещания должна обеспечить цифровое эфирное вещание по стандарту DVB-T2 с формированием зон обслуживания при заданном уровне напряженности поля. Для простоты эксперимента по оценке предложенного метода полнофакторного анализа при условиях распространения радиоволны в свободном пространстве было принято ограничение в виде известной формулы Введенского [3, 4], в которой рассматривается зависимость мощности излучения передающей антенны от ряда факторов:

$$P = \frac{(E_m \cdot r^2 \cdot \lambda)^2}{D \cdot (2,18 \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot k_r)^2}, \quad (1)$$

где E_m – напряженность электромагнитного поля, дБмкВ/м; P – мощность излучения передающей антенны, кВт; D – коэффициент усиления передающей антенны, дБи; h_1 – высота подвеса передающей антенны, м; h_2 – высота подвеса приемной антенны, м; k_r – коэффициент кривизны земной поверхности; λ – длина волны, м; r – радиус зоны покрытия, км.

Формальная постановка задачи. Т.к. рассматривается фиксированный прием телевизионного сигнала стандарта DVB-T2, то высота подвеса приемной антенны, согласно ГОСТ Р 54714-2011 [2], 30 метров над уровнем земли.

Предположительно вещание будет вестись на одном из трех каналов:

1. 30-й телевизионный канал, диапазон частот 542-550 МГц;
2. 35-й телевизионный канал, диапазон частот 582-590 МГц;
3. 40-й телевизионный канал, диапазон частот 622-630 МГц.

Высота подвеса передающей антенны должна быть не меньше, чем высота подвеса приемной антенны, следовательно, предположительно, высота подвеса передающей антенны будет от 30 до 40 метров. Необходимо покрыть территорию радиусом 12 км. Обычно в таком случае коэффициент усиления передающей антенны устанавливается в диапазоне от 3 до 5 dBi [5,6]. Минимальный уровень напряженности электромагнитного поля, согласно рекомендациям, должен быть не менее 58 дБмкВ/м. Коэффициент кривизны земной поверхности для данной версии формулы Введенского равен 0,95 [1, 3, 4, 8].

Таблица 1

Результаты проведения аналитического эксперимента по формуле Введенского для расчета мощности излучающей антенны (в Вт) по стандарту DVB-T2

$h_1, \text{ м}$	$f = 626 \text{ МГц}$			$f = 586 \text{ МГц}$			$f = 546 \text{ МГц}$		
	$D, \text{ dBi}$								
	3	4	5	3	4	5	3	4	5
30	1535,63	1151,72	921,38	1768,24	1326,18	1060,94	2017,25	1512,94	1210,35
35	1128,22	846,16	676,93	1299,11	974,34	779,47	1482,06	1111,54	889,24
40	863,79	647,84	518,27	994,63	745,98	596,78	1134,7	851,03	680,82

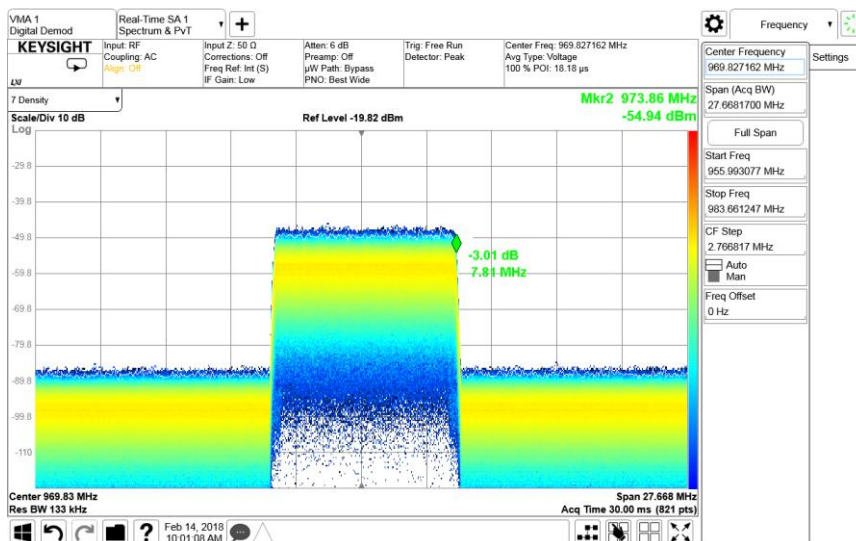


Рис. 1. Сигнал цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T2

При планировании эксперимента необходимо следовать заранее продуманному плану проведения полнофакторного эксперимента [11]. Этот план выглядит следующим образом:

1. Необходимо выбрать уровни варьирования факторов;
2. Закодировать значения факторов в удобные для дальнейших расчетов значения -1,0,+1;
3. Использовать матрицу планирования;

4. Провести дополнительные расчеты для уравнения регрессии в закодированных переменных;
5. Рассчитать коэффициенты регрессии;
6. Провести статистический анализ полученной модели [15, 21].

Параметром оптимизации в нашем случае будет мощность излучения передающей антенны.

Необходимое количество однократных опытов в зависимости от числа уровней варьируемых факторов и количества варьируемых факторов рассчитывается по формуле:

$$N = P^k = 3^3 = 27, \quad (2)$$

где N – количество опытов; P – число уровней факторов; k – количество факторов [10].

Было проведено 3 серии по 27 экспериментов и в каждую из серий были намеренно внесены погрешности, основываясь на том, что полоса частот одного частотного канала по стандарту DVB-T2 составляет 8 МГц и для каждого из экспериментов, в случайном порядке было внесено отклонение от несущей частоты канала от 0 до 4 МГц в положительную или отрицательную сторону. Пример сигнала стандарта DVB-T2 приведен на рис. 1.

Таблица 2

Результаты расчетов по формуле Введенского согласно матрице планирования полнофакторного эксперимента

№ опыта	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_{cp}
1	+1	+1	+1	680,82	690,78	670,94	680,85
2	-1	+1	+1	518,27	524,79	511,8	518,29
3	0	+1	+1	596,78	599,1	582,93	592,94
4	+1	-1	+1	1134,7	1151,3	1118,23	1134,74
5	-1	-1	+1	863,79	874,64	853	863,81
6	0	-1	+1	994,63	998,51	971,55	988,23
7	+1	0	+1	851,03	863,47	838,67	851,06
8	-1	0	+1	647,84	655,98	639,75	647,86
9	0	0	+1	745,98	748,88	728,66	741,17
10	+1	+1	-1	1210,35	1228,05	1192,78	1210,39
11	-1	+1	-1	921,38	932,95	909,87	921,4
12	0	+1	-1	1060,94	1065,08	1036,32	1054,11
13	+1	-1	-1	2017,25	2046,75	1987,96	2017,32
14	-1	-1	-1	1535,63	1554,92	1516,45	1535,67
15	0	-1	-1	1768,24	1775,13	1727,2	1756,85
16	+1	0	-1	1512,94	1535,06	1490,97	1512,99
17	-1	0	-1	1151,72	1166,19	1137,34	1151,75
18	0	0	-1	1326,18	1331,34	1295,4	1317,64
19	+1	+1	0	889,24	902,24	876,32	889,27
20	-1	+1	0	676,93	685,43	668,48	676,95
21	0	+1	0	779,47	782,5	761,38	774,45
22	+1	-1	0	1482,06	1503,73	1460,54	1482,11
23	-1	-1	0	1128,22	1142,39	1114,13	1128,24
24	0	-1	0	1299,11	1304,17	1268,96	1290,75
25	+1	0	0	1111,54	1127,8	1095,41	1111,58
26	-1	0	0	846,16	856,79	835,6	846,18
27	0	0	0	974,34	978,13	951,72	968,06

В полнофакторном эксперименте в качестве уравнений регрессии используются полиномы разных степеней, в нашем случае это полином второй степени:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3)$$

Для данного уравнения необходимо произвести расчет коэффициентов регрессии. В основу расчета коэффициентов регрессии заложен метод наименьших квадратов.

Результатом полнофакторного эксперимента является уравнение регрессии, которое проходит статистический анализ, так как оно получено по ограниченному объему статистического материала. Статистический анализ состоит из:

1. Проверки однородности дисперсий и воспроизводимости опытов сводится к проверке гипотезы о равенстве дисперсий двух случайных величин по расчетному значению критерия Кохрена, который показывает какую долю в общей сумме дисперсий занимает максимальная из них;

2. Проверки статистической значимости коэффициентов модели, поскольку коэффициенты модели b_0, b_1, \dots, b_k найдены лишь по ограниченному числу опытов (число опытов ограничено и ничтожно мало в сравнении с генеральной совокупностью), то они определены с некоторой погрешностью против соответствующих генеральных (истинных) коэффициентов и сами являются лишь их оценками;

3. Проверки модели на адекватность, оценка адекватности характеризуется величинами отклонения между экспериментальными результатами и значениями, рассчитанными по уравнению регрессии [21,23,29].

Итоговое уравнение для расчета мощности в зависимости от длины волны, коэффициента усиления и высоты подвеса передающей антенны по полнофакторному эксперименту:

$$P = 4600,93 + 6710 \cdot \lambda + 9616 \cdot \lambda^2 - 813,6 \cdot D + 67,77 \cdot D^2 - 182,13 \cdot h_1 + 2,58 \cdot h_1^2 - 1053,7 \cdot \lambda \cdot D - 235,8 \cdot \lambda \cdot h_1 + 15,49 \cdot D \cdot h_1, \text{ Вт.} \quad (4)$$

Данное уравнение прошло все 3 проверки статистического анализа и это говорит о том, что результаты, полученные по уравнению регрессии будут достоверными.

Для данного варианта, когда используется 3 варьируемых фактора и 3 уровня варьирования факторов существует методика, основанная на планах Бокса-Бенкена. Главным её отличием от полного факторного эксперимента является сокращение числа опытов, например, при условии трех уровней варьирования факторов и трех варьируемых факторов по методике полного факторного эксперимента необходимо провести $P = 3^3 = 27$ опытов, а для методики в соответствии с планами Бокса-Бенкена необходимо провести всего 15 опытов. Любая методика требует повторения циклов проведенных опытов для повышения точности результатов и исключения статистической ошибки. Если же повторять цикл опытов три раза, то при ПФЭ необходимо провести 81 опыт, а для методики в соответствии с планами Бокса-Бенкена всего 45, а это существенная разница. План эксперимента остается таким же, как и при полнофакторном эксперименте.

Уравнение регрессии также прошло все проверки статистического анализа и в раскодированном виде выглядит следующим образом:

$$P = 4286 + 8029 \cdot \lambda + 7738,8 \cdot \lambda^2 - 818,85 \cdot D + 66,6 \cdot D^2 - 182,76 \cdot h_1 + 2,53 \cdot h_1^2 - 1011 \cdot \lambda \cdot D - 225,77 \cdot \lambda \cdot h_1 + 15,37 \cdot D \cdot h_1, \text{ Вт.} \quad (5)$$

Результаты были получены по двум уравнениям регрессии (по полнофакторному эксперименту и эксперименту, основанному на планах Бокса-Бенкена) для любых значений длины волны в пределах от 0,479 до 0,549 м., коэффициента усиления от 3 до 5 dBi и высоты подвеса передающей антенны от 30 до 40 м. и оценены по величине среднеквадратичного отклонения от результатов, полученных по аналитическому выражению формулы Введенского. Также для оценки результатов были приняты следующие условия: при отклонении результатов от истинных до 1 % – это зона высокой точности результатов, от 1 до 5 % – это зона средней точности результатов и свыше 5 % это зона низкой точности результатов. Всего было проведено по 165 расчетов на каждую из методик.

На основании полученных результатов расчетов относительной погрешности между полнофакторным экспериментом и аналитическим уравнением выявлено:

- ◆ 55,15 % результатов находится в зоне высокой точности результатов;
- ◆ 44,24 % результатов в зоне средней точности результатов;
- ◆ 0,6 % результатов (1 результат) в зоне низкой точности.

На основании полученных результатов расчетов относительной погрешности между экспериментом, основанным на планах Бокса-Бенкена и аналитическим уравнением выявлено:

- ◆ 53,33 % результатов находится в зоне высокой точности результатов;
- ◆ 46,66 % результатов в зоне средней точности результатов;
- ◆ 0 % результатов в зоне низкой точности.

Из полученных результатов относительной погрешности видно, что большая часть расчетов по уравнению регрессии, а именно 55,15 % находится в зоне высокой точности результатов (отклонение результатов от теоретического расчета менее 1 %). В зоне средней точности (отклонение результатов от теоретического расчета менее 5 %) находится 44,24 % расчетов. В зоне низкой точности (отклонение результатов от теоретического расчета менее 10 %) находится 0,6 % результатов расчетов по уравнению регрессии (отклонение результатов от теоретического расчета менее 10 %).

Самое большое отклонение результата расчета при полнофакторном эксперименте составляет 5,51 %. Этот результат получен при высоте подвеса передающей антенны 40 м., коэффициенте усиления передающей антенны 5 dBi и длине волны 0,479 м ($f = 626$ МГц). И при этих условиях достигается минимальное значение мощности передающей антенны ($P = 546,8$ Вт).

Самое большое отклонение результата расчета при методике Бокса-Бенкена составляет 4,72 %. Этот результат получен при высоте подвеса передающей антенны 40 м., коэффициенте усиления передающей антенны 5 dBi и длине волны 0,479 м ($f = 626$ МГц). И при этих условиях достигается минимальное значение мощности передающей антенны ($P = 542,74$ Вт).

Самое большое отклонение результата расчета при полнофакторном эксперименте и при методике Бокса-Бенкена составляет 5,51 % и 4,72 % соответственно. Данный результат получен при одинаковых условиях для двух методик, а именно при высоте подвеса передающей антенны 40 м., коэффициенте усиления передающей антенны 5 dBi, и длине волны 0,479 м ($f = 626$ МГц). Сравнительные графики зависимости мощности передающей антенны от коэффициента усиления и высоты подвеса передающей антенны приведены на рис. 2, 3.

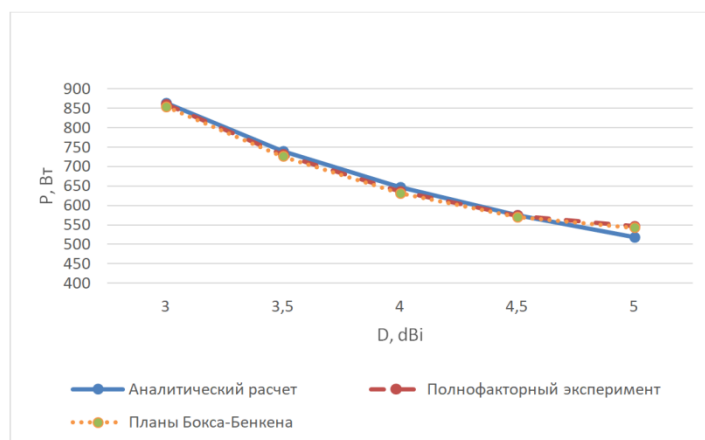


Рис. 2. График зависимости мощности излучения передающей антенны от коэффициента усиления передающей антенны

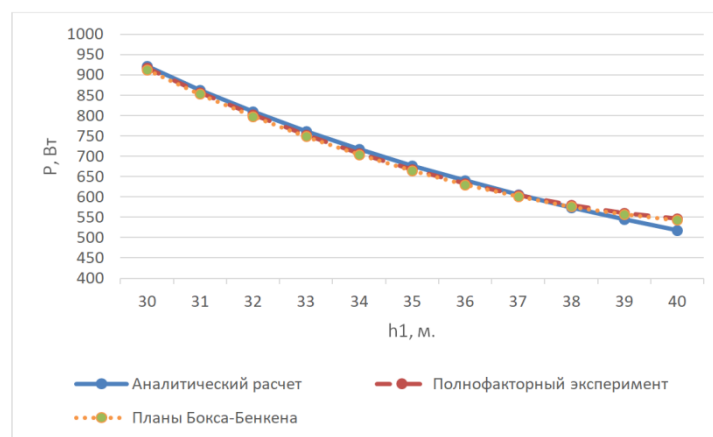


Рис. 3. График зависимости мощности излучения передающей антенны от высоты подвеса передающей антенны

Заключение. В данной работе рассмотрено планирование эксперимента с тремя варьируемыми факторами и тремя уровнями значимости, для которого требуется провести минимум 27 однократных экспериментов при полнофакторном эксперименте. Также была выбрана методика, основанная на планах Бокса-Бенкена и, при тех же условиях, потребовалось провести 15 однократных экспериментов.

Эксперимент был проведен согласно двум методикам: методике полнофакторного эксперимента и методике, основанной на планах Бокса-Бенкена. Было проведено 3 серии по 27 экспериментов и в каждую из серий были намеренно внесены погрешности, основываясь на том, что полоса частот одного частотного канала по стандарту DVB-T2 составляет 8 МГц и для каждого из экспериментов, в случайном порядке было внесено отклонение от несущей частоты канала от 0 до 4 МГц в положительную или отрицательную сторону. Такие же условия были применены для методики, основанной на планах Бокса-Бенкена (3 серии по 15 экспериментов).

На основе полученных согласно методикам уравнений были произведены расчеты, в том числе в точках, в которых изначально эксперимент не проводился и максимальное отклонение результатов составило 5.51 % от рассчитанного по формуле Введенского (притом это лишь в единичном случае). Это доказывает высокую эффективность данных методик и возможность применения их в системах связи. Недостатком данной методики является то, что она рассматривает только эргодичные процессы, т.е. можно с уверенностью говорить о точности результатов в пределах заданных варьируемых параметров, например, высота передающей антенны от 30 до 40 метров, но если высота передающей антенны будет задана уже 50 метров, то данная методика не работает.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быховский М.А., Дотолов В.Г., Лашкевич А.В., Носов В.И., Рихтер С.Г.* «Основы частотного планирования сетей телевизионного вещания»: Учебное пособие для вузов. – 2015.
2. ГОСТ Р 54714-2011 «Телевидение вещательное цифровое. Наземное цифровое телевизионное вещание. Синхронизация одночастотных сетей. Общие технические требования транспортных пакетов, соответствующих нескольким кадрам системы DVB-T». – М.: Стандартинформ, 2012.
3. Рекомендации МСЭ-R P.1546-2 «Метод прогнозирования для трасс связи «точка-зона» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000МГц – 09/2013.
4. Рекомендации МСЭ-R P.1546-3 «Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000МГц – 09/2013.
5. *Ломакин А.Ф., Школьный С.И.* «Моделирование поля DVB-T в условиях городской застройки» // Научно-технический вестник информационных технологий. – 2012. – № 6 (82).
6. *Ломакин А.Ф., Стеценко Г.А., Димидов Р.В.*, Экспериментальная оценка качества зоны обслуживания сети DVB-T г. Владивостока.
7. *Мамчев Г. В.*, Особенности функционирования синхронной региональной сети эфирного цифрового телерадиовещания. 28.02.12 г.
8. Системный проект сеть цифрового наземного вещания на территории приморского края (первый частотный мультиплекс) // ФГУП «РТРС», 2010 г.
9. Методика определения зоны обслуживания одиночной передающей станции наземного цифрового ТВ-вещания стандарта DVB-T. Утверждена решением ГКРЧ от 16 марта 2012 г. № 12-14-09.
10. *Адлер Ю.П.*, Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 1976 г.
11. *Скляр В.В.*, Организация и математическое планирование эксперимента: Учебное пособие. – 2017.
12. *Дрейпер Н.Р.* Прикладной регрессионный анализ. – 1973.
13. *Вознесенский В.А.* Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях // Финансы и статистика. – 1981.
14. *Мусина О.Н.* Основы научных исследований: Учебное пособие для студентов вузов. – 2015.
15. *Хамханов К.М.* Основы планирования эксперимента: Методическое пособие для студентов. – 2001.
16. *Копнин П.В.* Эксперимент и его роль в познании // Вопросы философии. – 1955. – № 4. – С. 29-40.
17. *Ланге К.А.* Организация управления научным исследованием. – Л.: Наука, 1971.
18. *Кожухар В.М.* Основы научных исследований: Учебное пособие. – М.: Издательско-торговая корпорация Дашков и К°, 2010. – 216 с.
19. *Баскаков А. Я., Туленков Н. В.* Методы научного исследования: учебное пособие. – Изд-во МАУП, 2004. – 215 с.
20. *Завьялова М. П.* Методы научного исследования: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 160 с.
21. *Яворский В.А.* Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – М.: Московский физико-технический институт (государственный университет), 2006.

22. *Батрак А.П.* Планирование и организация эксперимента: Учебное пособие к изучению теоретического курса для студентов направления 220500. – Красноярск: ИПЦ СФУ, 2010. – 60 с.
23. *Шенк Х.* Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
24. *Грачев Л.И.* Математические методы планирования эксперимента. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 296 с.
25. *Батунер Л.М. Позин М.Е.* Математические методы в химической технике. – М.: Химия, 1971. – 824 с.
26. *Стаценко В.Н., Карастелев Б.Я.* Основы метрологии, стандартизации и сертификации: учебное пособие. – 2-е изд., доп. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 161 с.
27. *Федоров В.Г., Плесконос А.К.* Планирование и реализация экспериментов в пищевой технологии. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.
28. *Семенов С.А.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии: Учебно-методическое пособие. – М.: ИПЦ МИТХТ, 2001. – 93 с.
29. *Спиринов Н.А., Лавров В.В.* Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекции Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с.
30. *Налимов В.Н.* Логические основания планирования эксперимента: учебник Е.А. Шалыгина. – 2-е изд. – М.: Колос, 2001.
31. *Песков С.Н., Колпаков И.А., Колгатин С.Ю.* Рекомендации по внедрению DVB эфирного вещания. Сетевое планирование // «Теле-Спутник». – 2007. – № 8. – С. 102-106.
32. *Larry B. Barrentine,* An introduction to design of experiments – a simplified approach. – 1999.
33. *Gang Lei, Jianguo Zhu, Youguang Guo,* Multidisciplinary design optimization methods for electrical machines and drive systems. – 2016.
34. *S.L.R. Ellison, Trevor J. Farrant, Vicky Barwick,* practical statistics for the analytical scientist: a bench guide. – 2009.
35. *Linfield C. Brown, Paul Mac Berthouex,* Statistics for environmental engineers, second edition. – 2002.
36. *Scott E. Maxwell, Harold D. Delaney,* Designing experiments and analyzing data: a model comparison perspective. – 2004. – Т. 1.
37. *Jiju Antony,* Design of experiments for engineers and scientists. – 2003.

УДК 621.396.67

Л.И. Куликов, В.В. Щербинин

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМИЗИРОВАННЫХ
ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА В ЗАДАЧЕ
УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ БЛА**

В последние годы наблюдается значительный рост использования беспилотных летательных аппаратов (БЛА), обладающих различной массой, формой, аэродинамической компоновкой и выполняющих различные миссии. Хорошо известно, что большинство летных происшествий происходит на этапах взлёта и посадки. Для того чтобы обеспечить сохранность как самих аппаратов, так и оборудования, установленного на них, необходимо разрабатывать варианты безопасной автоматической посадки БЛА.

Коллектив лаборатории в АО «ЦНИИАГ» разрабатывает вариант аппаратного решения комплекса бортовых и наземных средств, обеспечивающих автоматическую посадку БЛА самолетного типа, основой информационной части которого является радиотехническая система локальной навигации (РТСЛН), позволяющая определять текущие координаты БЛА без использования спутниковой навигационной системы (СНС).

Для решения задачи стабилизации посадочной траектории авторы рассматривают два известных подхода. Первый, традиционный, основан на использовании ПД-регулятора, отслеживающего текущее отклонение от программной траектории. В основе второго лежит метод оптимизированных дельта-преобразований второго порядка, разработанный П.П. Кравченко.

Приводятся результаты моделирования и сравнительный анализ полётов БЛА в вертикальной плоскости при каждом способе управления при наличии ошибок имеющегося навигационного комплекса. Ошибки этого комплекса моделируются при помощи специального блока ошибок.

Посадка БПЛА, алгоритмы управления, стабилизация, математическое моделирование, устойчивость, оптимизированные дельта-преобразования второго порядка.

УДК 004.056: 004.73

Е.С. Басан, О.Б. Макаревич, А.А. Степенкин

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ АКТИВНЫХ АТАК НА ГРУППУ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ*

Целью исследования является определение способов и оценка эффективности проведения активных атак злоумышленника, типичных для группы мобильных роботов. Для проведения исследования было создано два типа моделей. Исследование проводилось с использованием имитационной модели группы мобильных роботов и натурной модели мобильного робота. В первой части исследования описываются атаки, которые проводились на группу мобильных роботов, реализованную средствами системы моделирования NS-2.35. Исследование проводилось с использованием имитационной модели группы мобильных роботов и натурной модели мобильного робота. Данная система позволяет моделировать физические характеристики узла, такие как радиус передачи данных, заряд аккумулятора, перемещение с использованием трехмерной системы координат, а также моделировать поведение робота в сети. В данной системе моделирования реализованы протоколы, которые используются для передачи данных в группе мобильных роботов. Для организации сетевого обмена сообщениями используется топология mesh-сети, при этом каждый узел может общаться с соседними узлами, а управление происходит через лидера группы. Также лидер группы связан с базовой станцией, т.е. только он передает/получает данные во внешнюю сеть. В данной статье проведено исследование атак, которые могут быть реализованы в сети мобильных роботов. Особенностью подобных атак является то, что они, как правило, используют уязвимости беспроводного канала передачи данных и слабости сетевых протоколов обмена сообщениями. Были промоделированы следующие атаки: отказ в обслуживании, атака Сивиллы, атака «Черная дыра», «Серая дыра», прослушивание трафика, «Человек посередине», атака повтора. При этом анализировалось влияние атак на расход энергии устройств, а также оценивалось влияние на трафик сети. Во второй части исследования описаны возможности по реализации атак на натурную модель мобильного робота, созданную для возможности анализа защищенности. Проведена оценка сложности реализации различных типов атак. Выявлены атаки, которые могут нанести максимальный ущерб, если будут реализованы.

Мобильные роботы, групповое управление, беспроводные сети, безопасность, злоумышленник, воздействие, доступность, конфиденциальность.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-07-00106 «Разработка метода и эффективной системы защиты беспроводных сенсорных сетей от активных атак злоумышленников».

Введение. На сегодняшний день достаточно актуальными являются вопросы, связанные с обеспечением безопасности робототехнических систем. Прежде чем исследовать способы защиты необходимо знать, от чего необходимо защищаться. В статье [1] авторами представлена модель угроз и уязвимостях специфичных для систем группового управления мобильными роботами. Данные системы являются достаточно уязвимыми к атакам злоумышленника из-за многих факторов. Это и беспроводная среда передачи и расположение узлов в незащищенных местах и т.п. Но для того, чтобы провести атаку злоумышленник также должен быть подготовлен и иметь значительные ресурсы и возможности. Для того чтобы нанести значительный ущерб сети атака злоумышленника должна быть достаточно интенсивной и быстрой. В данной работе будет проведен анализ эффективности атак, которые возможны в сети мобильных роботов. Проведен анализ параметров, на которые атака влияет и временные затраты злоумышленника. Для оценки атак была разработана модель группы роботов в системе моделирования NS – 2.35, которая включает в себя базовую станцию, лидера группы и 5 узлов-роботов, также для каждого типа атаки добавлен специфичный тип злоумышленных узлов [2]. Кроме того, некоторая часть атак проведена для натурной модели робота, выявлены особенности в реализации атак [3].

Реализация и обнаружение узла, проводящего DoS атаку и атаку, направленную на исчерпание ресурсов. Проводя атаку отказ в обслуживании, злоумышленник создает такую ситуацию, когда узел сети становится недоступным для других узлов и не может отвечать на их запросы и выполнять свою деятельность в штатном режиме. Атака, направленная на исчерпание ресурсов, как правило, создает такие условия для узла, что он начинает терять запас энергии в большем объеме, чем когда атака не проводится. При этом узел быстрее выходит из строя и не может функционировать далее.

Данные атаки рассматриваются вместе, так как являются взаимосвязанными. По сути одной из целей DoS атаки является полное выведение узла из строя, поэтому основной целью злоумышленника может быть исчерпание ресурсов узла [4]. Кроме того, атака отказ в о может быть не мгновенной, а распределена во времени, когда злоумышленник увеличивает количество трафика и это приводит к ускоренному выведению узла из строя. Таким образом, атака отказ в обслуживании, так или иначе, должна влиять на расход энергии узла, если расход энергии изменен не будет, то данная атака может быть просто недостаточно эффективной. Данный фактор необходимо учитывать при выявлении атаки. Было проведено моделирование трех типов ситуаций. В первом случае была проведена оценка расходуемой энергии узлами сети при отсутствии атаки. На рис. 1 данная ситуация представлена графиком синего цвета, помеченным ромбами.

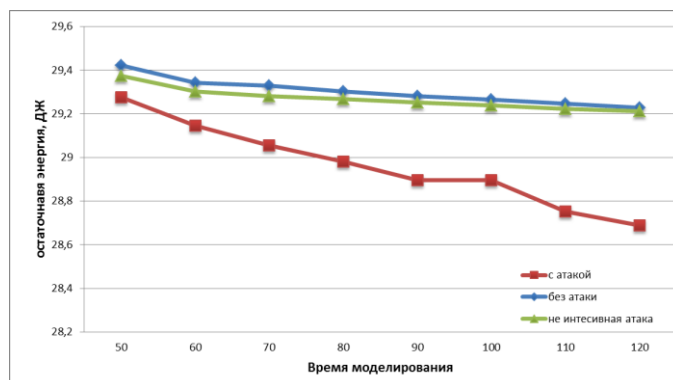


Рис. 1. Изменение уровня остаточной энергии в зависимости от интенсивности трафика узлов сети

Во втором случае на сеть проводилась атака, при этом интенсивность трафика злоумышленного узла $I_t \leq I_m \leq 2I_t$, где I_m – трафик злоумышленного узла, I_t – трафик подлинного узла. Третий график представляет собой ситуацию, когда атака проводится интенсивно и $I_m > 2I_t$.

Из рис. 1 видно, что во время проведения не интенсивной атаки уровень энергии узлов останется практически таким же, как и для случая, когда атака не проводится. То есть в данном случае атаку можно считать не эффективной. На графике, отражающем изменение уровня энергии во время проведения интенсивной атаки видно резкое падение уровня энергии, что подтверждает эффективность атаки. При этом загруженность узла злоумышленника, в более чем в два раза превышает загруженность подлинных узлов.

Реализация и обнаружение узла, проводящего атаку Сивиллы. Атака Сивиллы заключается в том, что злоумышленник представляется несколькими узлами сети и пытается перенаправить большую часть трафика на себя [5]. Обычно данная атака проводится в peer-to-peer сетях, где злоумышленник пытается завладеть идентификаторами узлов. Но данная атака может быть модифицирована и реализована для сети мобильных роботов. Когда злоумышленник также представляется несколькими узлами сети и пытается перенаправить влияние на себя, то есть заставить общаться узлы преимущественно с ним. При этом он может совершать деструктивное воздействие на сеть путем отбрасывания сообщений, перенаправления их не тем узлам, нарушая схему маршрутизации, а может пассивно прослушивать трафик. При проведении экспериментального исследования атака Сивиллы проводилась в двух вариантах с разной степенью интенсивности количеством узлов. В первом случае, злоумышленник пытается захватить влияние только над соседними узлами, во втором случае над всеми узлами сети. При этом злоумышленник располагает тремя узлами-агентами, которые проводят атаку, как показано на рис. 2. Предполагается, что атака Сивиллы проводится в несколько этапов. Для того чтобы трафик от других узлов начал передаваться через злоумышленника, он должен распространить информацию о себе, как о наиболее выгодном «хопе» для передачи пакета. Другим вариантом атаки может являться пассивное прослушивание трафика и получение данных об узлах сети, в частности об идентификаторах [6]. Далее злоумышленник начинает активное общение в сети, пытаясь поддерживать взаимодействие с как можно большим количеством узлов. Чем большим количеством идентификаторов завладел злоумышленник, чем больше злоумышленнику удалось внедрить узлов в сеть, тем меньше на каждый из них будет нагрузка.

Данная атака будет наиболее эффективной в случае, если злоумышленник завладеет большим «вниманием» узлов и ему удастся нарушить работу сети. Перенаправив влияние на себя, злоумышленник может в дальнейшем просто получать ценную для себя информацию, передаваемую между узлами, может перенаправлять сообщения не тем узлам или отбрасывать пакеты. В последних двух случаях атака может нанести значительный ущерб узлам сети, в данном исследовании предлагается рассмотреть вариант, когда злоумышленник не проводит дополнительных деструктивных действий. Данный случай интересен потому, что такую атаку достаточно сложно обнаружить, так как никаких внешних признаков атаки как бы нет.

На самом деле, атака влияет на сеть мобильных роботов. В частности на параметры загруженность – т.е. общее количество трафика узлов и остаточная энергия. Обнаружить данную атаку можно, анализируя данные параметры. В особенности, если злоумышленник использует для проведения атаки небольшое количество узлов.

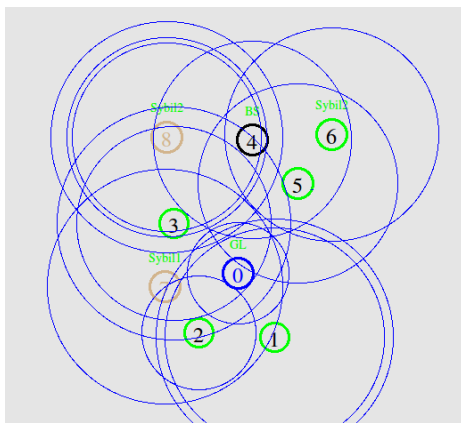


Рис. 2. Сценарий проведения атаки Сивиллы

Рассмотрим вариант высокоинтенсивной и низкоинтенсивной атаки Сивиллы. При реализации низкоинтенсивной атаки злоумышленник пытается добиться того, чтобы только соседние узлы отправляли ему пакеты. Был проведен анализ загруженности и остаточной энергии атакующих узлов, доверенных узлов и узлов, которые не подвержены атаке. На рис. 3 и 4 представлен график распределения этих показателей во времени.

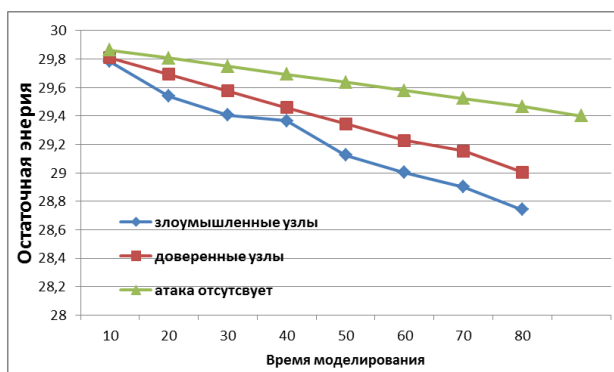


Рис. 3. Расход энергии узла при низкоинтенсивной атаке Сивиллы

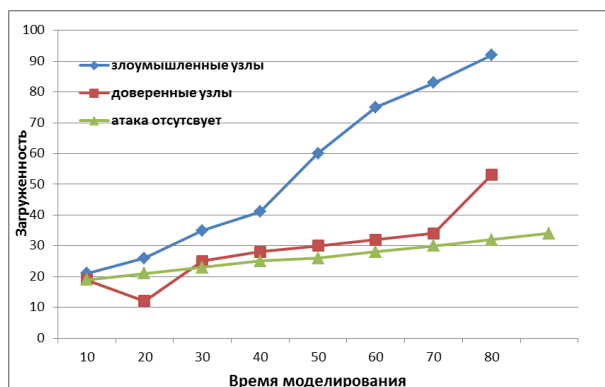


Рис. 4. Загруженность узла при низкоинтенсивной атаке Сивиллы

Из рис. 3,4 видно, что атака, хотя и незначительно, но влияет на доверенные узлы, которые подвержены атаке, наблюдается более интенсивное расходование энергии и уровень загруженности узла, также изменяется, хотя и в незначительной степени. Только на последнем временном интервале уровень загруженности узла возрастает значительно. При этом уровень загруженности злоумышленных узлов значительно выше, так как они пытаются общаться одновременно с несколькими соседними узлами, расход энергии злоумышленных узлов также значительно отличается от расходования энергии доверенных узлов и узлов, не подверженных атаке. То есть уже можно сделать вывод, что атака Сивиллы влияет на показатели загруженности и остаточная энергия узла.

Рассмотрим теперь случай, когда злоумышленник проводит интенсивную атаку и пытается перенаправить влияние на свои узлы, то есть теперь злоумышленному узлу придется общаться с большим количеством доверенных узлов, тем самым расход энергии и загруженность должны увеличиться. Проанализируем данные представленные на рис. 5 и 6.

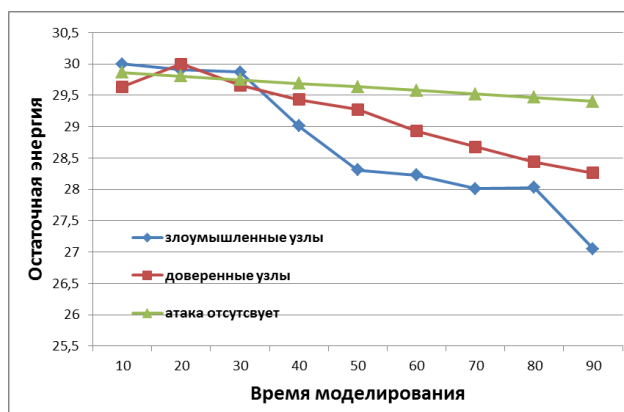


Рис. 5. Расход энергии узла при низкоинтенсивной атаке Сивиллы

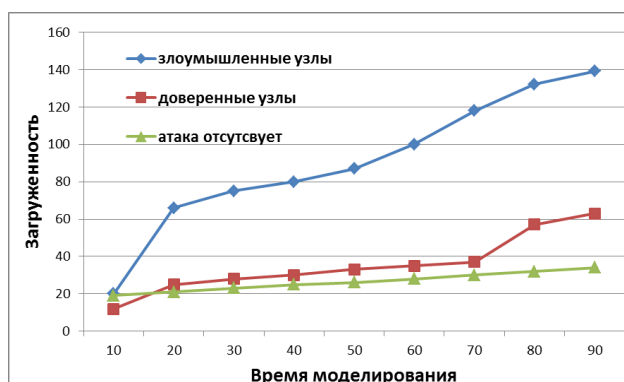


Рис. 6. Загруженность узла при низкоинтенсивной атаке Сивиллы

Из рис. 5,6 видно, что загруженность злоумышленных узлов значительно выросла по сравнению с предыдущей атакой, так как и расход энергии. Кроме того, на графике четко можно проследить два этапа проведения атаки. Видно, что после интервала времени в 50 секунд атака идет более активно, до 50 секунд злоумышленник проводил «разведывательную» и подготовительную деятельность, а

затем начал проведение интенсивной атаки. Расход энергии доверенных узлов также увеличивается, поэтому можно говорить о том, что второй вариант атаки является более эффективным, хотя и требует больших затрат со стороны злоумышленника.

Реализация атаки блокировка узла (Black – hole attack, Grey-hole attack).

На рис. 7 представлена топология сети, которая демонстрирует схему проведения атаки Блокировка узла или «Черная дыра». Суть атаки заключается в том, что злоумышленник располагается между двумя доверенными узлами сети и вместо того, чтобы передавать пакеты отбрасывает их. Под такую атаку, как правило, могут попасть узлы, находящиеся на значительном расстоянии от базовой станции или лидера группы, которые выполняют свою задачу в удаленных и труднодоступных местах. При этом, злоумышленник может отбрасывать не все пакеты, а только пакеты, передаваемые по определенному протоколу или согласно определенным интервалам времени, в таком случае проводится атака «Серая дыра» [7].

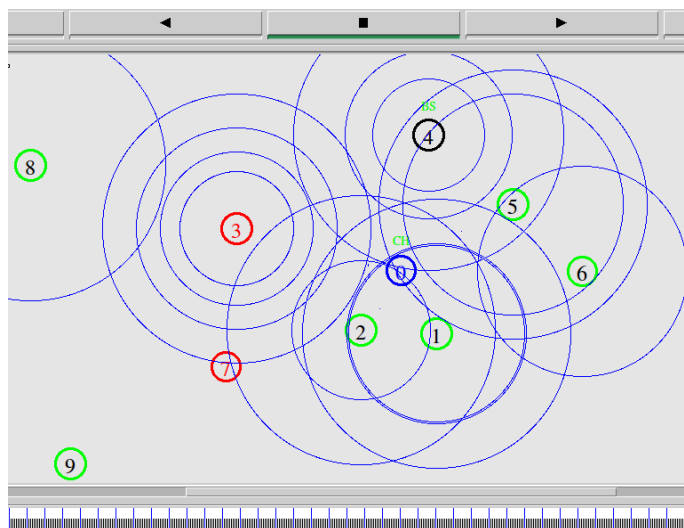


Рис. 7. Схема «Black-hole» атаки

Чтобы оценить эффективность проведения данной атаки, необходимо проанализировать параметры сети и узлов сети, на которые она воздействует. Данная атака, безусловно, направлена на свойство доступности, основанная цель атаки «отрезать» узел от сети и тем самым нарушить работу сети. Если атака направлена на одиночный узел, то она может и не принести большого ущерба работе сети, но если в качестве злоумышленного узла будет выступать, к примеру, лидер группы, то ущерб может оказаться значительным. Таким образом, для достижения максимального эффекта при проведении данной атаки, злоумышленник может либо стать на место лидера группы, либо расположить большое количество своих агентов между доверенными узлами или сегментами сети. Вторым не менее важным фактором, который позволит оценить эффективность проведения атаки это соотношение количества отброшенных пакетов и общее количество пакетов. Безусловно, во время работы сети может возникнуть ситуация, когда пакет будет отброшен (в результате коллизий, во избежание перегрузок в сети). Необходимо определить какое количество отброшенных пакетов может быть допустимо при условии, что корректная работа сети сохраняется.

Для проведения данного экспериментального исследования использовалась топология, представленная на рис. 7, при этом для передачи данных в сети на транспортном уровне был выбран протокол UDP, тип трафика CBR, протокол маршрутизации AODV [8]. Узлы 8 и 9 подвержены атаке, они передают пакеты узлу 0, который является лидером группы, а узлы 3 и 7 являются злоумышленниками и отбрасывают все пакеты, проходящие через них. Остальные узлы также отправляют пакеты лидеру группы, а лидер группы передает данные базовой станции. Для анализа трафика в сети ведется подсчет общего количества пакетов и количества отброшенных пакетов для каждого узла [9]. Злоумышленные узлы отбрасывают пакеты по двум сценариям: узел 3 постоянно отбрасывает пакеты, а узел 7 отбрасывает пакеты в интервале от 10–30 секунд и от 60–100 секунд. Для проведения данной атаки, в файлы NS-2.35 был добавлен злоумышленник, который отбрасывает пакеты, которые проходят через него: `$ns at 0.0 "[${node(4)} set ragent_] malicious"` – для узла 3. Для того чтобы «вернуть» злоумышленнику нормальное поведение, был добавлен доверенный тип поведения, когда узел не отбрасывает пакеты: `$ns at 10.0 "[${node(7)} set ragent_] trusted` – для узла 7.

Доверенные узлы намеренно не отбрасывают пакеты, но в некоторые моменты времени могут появляться отброшенные пакеты из-за возникновения перегрузок в сети. При этом процент отброшенных пакетов для доверенных узлов не превышает 22 % от общего количества пакетов. Кроме того, нормальная работа сети сохраняется при условии, что количество отброшенных узлов пакетов не более 25 % от общего количества передаваемых/принимаемых узлом пакетов. Когда узел отбрасывает более 25 % пакетов можно говорить, о том, что он наносит ущерб работе сети. Таким образом, злоумышленник, проводя атаку по временным интервалам, за первый временной интервал не наносит существенного ущерба работе сети, так как количество отброшенных пакетов не достигает и 20 %. Второй интервал в два раза больше и уже активность злоумышленника может быть зафиксирована.

Разрабатывая метод обнаружения атаки для группы мобильных роботов, необходимо учитывать факт возникновения нежелательных событий, в данном случае отброшенных пакетов еще и по причине аппаратных сбоев в работе оборудования, так как роботы могут быть физически незащищенными, а также могут возникать нестабильности (помехи) в работе каналов связи.

Атаки на беспроводную систему управления мобильным роботом. Часть атак было проведено с использованием натурной модели мобильного робота. Стенд для проведения атак включает в себя управляющий компьютер, узел злоумышленника и непосредственно мобильного робота. При этом для передачи управляющих команд использовался протокол транспортного уровня UDP.

Прослушивание трафика (сниффинг) – сбор сетевого трафика для дальнейшего анализа и изучения протоколов, используемых для управления мобильным роботом [14]. Он не оказывает никакого влияния на систему, из-за чего обнаружить его невозможно, но сохраняется целостность и доступность в системе [10].

Для проведения сниффинга необходимо наличие приемника с параметрами, аналогичными параметрам, применяемым в системе [15].

Атака повтора – переправка полученных ранее сообщений может оказывать значительное воздействие на систему управления и приводить к нарушению целостности. Для атаки повтора не обязательно изучение используемого протокола. Также повтор может быть применен в процессе анализа этого протокола. Данный тип атаки может быть обнаружен статистически или по причине многократного использования в сообщениях меток, таких как номера, счетчик, временные метки и др.

Для проведения атаки-повтора необходимо наличие передатчика с параметрами, аналогичными параметрам, применяемым в системе.

DOS атака – это воздействие со стороны злоумышленника, направленное на нарушение доступности в системе управления мобильным роботом. Реализация атаки может отличаться целевым уровнем взаимодействия, и целью – мобильный робот, управляющее устройство, точка доступа.

По уровню выделим следующие виды атак:

- ◆ DOS физического уровня;
- ◆ DOS канального уровня;
- ◆ DOS прикладного уровня.

Для проведения DOS атаки на физическом уровне требуется генератор помех на используемой системой частоте [13]. В результате его применения может быть частично или полностью нарушена доставка сообщений. Поскольку беспроводная связь может нарушаться по естественным причинам таким, как загруженность используемого канала, препятствия и др. то обнаружения такого вида атаки усложняется.

DOS атака на канальном уровне использует недостатки протокола этого уровня для нарушения работы системы управления мобильным роботом. В отличие от DOS атаки физического уровня, данная атака может быть однозначно направлена на конкретное устройство. Для проведения атаки необходимо иметь приемопередатчик, позволяющий передавать произвольные сообщения в атакуемую сеть. Однако и сложность обнаружения такой атаки снижается. Такая атака может быть обнаружена сигнатурными методами или обнаружением аномалий [16].

DOS атака на прикладном уровне является наиболее сложной для реализации из рассмотренных видов. Данная атака может быть направлена на исчерпание ресурсов устройства, или вывод его из строя за счет эксплуатации уязвимостей его программного обеспечения. Для проведения подобной атаки необходимо иметь полный доступ к целевой сети. Определение подобной атаки может быть затруднительным, для выявления атак могут быть применены методы на основе сигнатурного анализа и определения аномалий.

DOS атака может проводиться как самостоятельно, так и как часть комплексной атаки. Как самостоятельная атака, DOS может быть направлена на любой из компонентов системы управления мобильным роботом. При проведении атаки с целью получения управления мобильным роботом DOS атака может быть направлена на управляющее устройство или точку доступа, для разрыва существующего канала передачи команд.

Атака MITM – наиболее сложная из рассматриваемых атак, как и DOS атака она может отличаться уровнем сети, на котором она реализована [17].

Атака MITM – на канальном уровне требует от нарушителя полный доступ к сети. На основе недостатков используемых протоколов нарушитель должен перенаправить трафик на свое устройство. Сложность обнаружения атаки зависит от используемого метода перенаправления трафика. Например, атака может быть обнаружена по изменениям в ARP-таблиц [12].

Атака MITM – на физическом уровне требует создания полной копии канала передачи команд, например создание подложной точки доступа с аналогичными параметрами. Может также совмещаться с DOS-атакой отдельных компонентов системы. Атака наиболее сложно реализуемая, но и имеет высокую сложность обнаружения.

Вне зависимости от типа MITM, главной особенностью является возможность скрытия факта атаки от пользователя [18]. После успешного проведения атаки нарушитель может получить управление мобильным роботом, но при этом продолжить эмитировать реакцию робота на команды настоящего пользователя [11].

Таблица 1

Анализ атак, проводимых на мобильного робота

Название	Нарушение конфиденциальности	Нарушение целостности	Нарушение доступности	Сложность реализации	Сложность обнаружения
Сниффинг	+	-	-	Низкая	Высокая
Повтор	-	+	-	Средняя	Средняя
DOS (на физическом уровне)	-	-	+	Низкая	Высокая
DOS (на канальном уровне)	-	-	+	Средняя	Средняя
DOS (на прикладном уровне)	-	-	+	Высокая	Средняя
MITM (на канальном уровне)	+	+	+	Высокая	Средняя
MITM (на физическом уровне)	+	+	+	Высокая	Высокая

Наиболее сложно обнаружить атаки, проводимые на физическом уровне. Но для проведения таких атак может требоваться специальное оборудование и длительная подготовка. Более простые в реализации атаки могут быть исполнены одновременно, для оказания воздействия на все свойства безопасности, но в этом случае сложность обнаружения снижается [19].

Заключение. По результатам экспериментального исследования можно отметить следующее. Сеть мобильных роботов имеет ограниченное время работы, так как заряд аккумулятора роботов является достаточно ограниченным [20]. Поэтому проведение распределенных во времени или низкоинтенсивных атак, на такого рода сеть, не будет достаточно эффективным. При проведении атак на сеть мобильных роботов ключевым аспектом является время проведения атаки. Поэтому при разработке средств обнаружения атак и вторжений данный показатель также должен занимать первое место при оценке их эффективности. Кроме того, в результате исследования было выявлено, что атаки, проводимые злоумышленником, воздействуют на показатели количество остаточной энергии и загруженность узла сети. Проводя оценку данных показателей, система обнаружения атак может зафиксировать факт проведения атаки. При этом высокоинтенсивные атаки в большей степени влияют на данные показатели, что позволяет злоумышленнику в короткий срок вывести узлы сети из строя и нарушить работу сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Basan A.S., Basan E.S.* The threat model for the systems of group management of mobile robots // Proceedings of the VIII Scientific Conference System Synthesis and Applied Synergetics. – South Federal University. September 2017. – P. 205-212.
2. *Schoch E., Feiri M., Kargl F., Weber M.* Simulation of Ad Hoc Networks: ns-2 compared to JiST/SWANS SIMUTools // First International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems. – 2008. – P. 34-41.

3. *Basan A., Basan E., Makarevich O.* A Trust Evaluation Method for Active Attack Counteraction in Wireless Sensor Networks // Proceedings of 2017 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. – 2017. – P. 369-372. DOI 10.1109/CyberC.2017.14.
4. *Vasconcelos G., Carrijo G.L., Miani R., Souza J., Guizilini V.* The Impact of DoS Attacks on the AR.Drone 2.0. 2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR). – 2016. – P. 127-132.
5. *Patel S.T., Mistry N.H.* A review: Sybil attack detection techniques in WSN // 4th International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS). – 2017. – P. 184-188.
6. *Wang G., Musau F., Guo S., Abdullahi M.B.* Neighbor Similarity Trust against Sybil Attack in P2P E-Commerce // IEEE transactions on parallel and distributed systems. – 2015. – No. 26 (3). – P. 824-833.
7. *Chadha K., Jain S.* Impact of black hole and gray hole attack in AODV protocol // Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2014. – P. 1-7.
8. *Maheshwaran P., Rajagopal S.* A scheme for detecting the types of misbehaviour and identifying the attacks using reputation mechanism in a mobile ad-hoc network // Published in: Communication and Electronics Systems (CCES), International Conference on. 21-22 Oct. 2016. DOI: 10.1109/CESYS.2016.7889961.
9. *Basan A., Basan E., Makarevich O.* Analysis of Ways to Secure Group Control for Autonomous Mobile Robots // Proceedings of 10th International Conference On Security Of Information And Networks (SIN 2017). 2017. in press.
10. *Basan A.S., Basan E.S., Stepenkin A.A.* Analysis and implementation of threats for mobile robot management systems // Proceedings of XIII - Russian. scientific-practical conference Mathematical methods and information technology means: 2017. – P. 20-23.
11. *Basan A.S., Basan E.S., Makarevich O.B.* Analysis of security problems in mobile robotic systems // Proceedings of Twelfth Russian Scientific conference Perspective systems and management tasks: materials of the and Practical Conference and the Eighth Youth School-Seminar Information Management and Processing in Technical Systems. Southern Federal University. – Rostov-on-Don: Publishing House of Southern Federal University, 2017. – P. 75-81.
12. Банк данных угроз безопасности информации. – URL: [http:// www.bdu.fstec.ru](http://www.bdu.fstec.ru) Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России (дата обращения 18.04.2016).
13. Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. ФСТЭК России, 2008 год.
14. Сайт Aircrack-ng 1.2 RC 4. – URL: <http://www.aircrack-ng.org/> (дата обращения 01.05.2017).
15. Сайт Безопасность в сетях WiFi. WEP, WPA, WPA2 шифрование. – URL: <http://www.getwifi.ru/psecurity.html> (дата обращения 01.05.2017).
16. *Farina P., Cambiaso E., Papaleo G., and Aiello M.* Understanding DDoS Attacks from Mobile Devices // Int. Conf. on Future Internet of Things and Cloud. – 2015. – P. 614-619.
17. *Bau J. and Mitchell J.C.* Security modeling and analysis // IEEE Security and Privacy. – 2011. – Vol. 9, no. 3. – P. 18-25.
18. *Hathaway O.A., Crootof R., Levitz P., Nix H., Nowlan A., Perdue, W. and Spiegel J.* The law of cyber-attack // California Law Review. – 2012. – Vol. 100, no. 4. – P. 817-885.
19. *D'Oleire-Oltmanns S., Marzoff I., Peter K.D., and Ries J.B.* Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco // Remote Sensing. – 2012. – Vol. 4, no. 11. – P. 3390–3416.
20. *Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Тутов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О.* Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – С. 233-270.

Секция технологического обеспечения систем технического зрения РТК морского базирования

УДК 007.52:004.896:004:942

**С.М. Соколов, С.Г. Цариченко, В.В. Демьянов, А.А. Богуславский,
Н.Д. Беклемишев, О.В. Трифонов**

МОБИЛЬНЫЕ МОДУЛИ СТЗ ДЛЯ НАВИГАЦИИ, НАПОЛНЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТ И МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ*

Целью исследований является повышение эффективности использования систем технического зрения для информационного обеспечения мобильных средств с повышенной степенью автономности, подготовка и организация сравнительных испытаний подобных систем. Использование крупномасштабного каркаса программного обеспечения систем технического зрения реального времени позволяет оперативно компоновать зрительные модули для решения навигационных задач и актуализации, привязки объектов к электронным картам и моделям местности. Разделение регистрирующей и вычислительно управляющей частей СТЗ даёт возможность компоновать наиболее эффективные СТЗ для комплектации информационных систем различных РТК и на тех же вычислительных ресурсах организовывать модельные и стендовые испытания алгоритмического обеспечения РТК.

Предложенный подход к формированию на унифицированной основе модулей СТЗ для решения навигационных задач и верификации электронных карт и моделей местности позволяет решать задачу организации сравнительных испытаний программно-аппаратных решений в части информационного обеспечения мобильных РТК.

Результаты экспериментов подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что в ближайшем будущем удастся сформировать унифицированные требования к системам информационного обеспечения мобильных средств с повышенной степенью автономности и создать полигон для модельных и натурных испытаний подобных систем.

* Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2018 г. № 0017-2018-0008, а также при поддержке РФФИ, проект № 16-08-01282.

**Молодежная школа-семинар
«Управление и обработка информации в технических
системах»**

УДК 629.584

**И.В. Шестаков, И.А. Путинцев, К.Н. Сандревская, А.А. Синишин,
М.И. Базанов, В.Р. Смирнов, И.И. Дурягин**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО
АППАРАТА ДЛЯ УЧАСТИЯ В СОРЕВНОВАНИЯХ ПОДВОДНЫХ
РОБОТОВ**

В статье описываются текущие результаты инициативного проекта - создания автономного необитаемого подводного аппарата, предназначенного для участия в соревнованиях по морской робототехнике (сентябрь 2018 г., Владивосток). Разрабатываемый аппарат имеет торпедную гидродинамическую схему, модульную архитектуру, полезную нагрузку, обеспечивающую выполнение задач, предусмотренных регламентом соревнований. Разработку аппарата выполняет студенческое конструкторское бюро Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Участниками проекта выполнены: проектирование всех систем, узлов и механизмов аппарата; разработана управляющая электроника, система автоматического управления; изготовлены корпусные элементы, механические системы, электронные платы, проведены сухие испытания отдельных систем. Испытания аппарата в бассейне запланированы на апрель 2018 года.

АНПА, студенческое конструкторское бюро, программное обеспечение, бортовая электроника АНПА.

**I.V. Shestakov, I.A. Putintsev, K.N. Sandreevskaya, A.A. Sinishin, M.I. Bazanov,
I.I. Duryagin**

**AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE DESIGN FOR PARTICIPATION
IN UNDERWATER ROBOTICS COMPETITIONS.**

The article describes current results of the initiative project - development of an autonomous underwater vehicle for participation in marine robotics competitions (September 2018, Vladivostok). The developed vehicle has a torpedo-like hydrodynamic scheme, a modular architecture, a payload for competition missions. Vehicle design by the student design bureau of the St. Petersburg State Maritime Technical University. Project participants completed: design of all systems, units and mechanisms of the device; developed control electronics, automatic control system; hull elements, mechanical systems, electronic, dry tests of some systems done. Water tests are planned for April 2018.

AUV, students design bureau, software, AUV electronics

В настоящее время Студенческим конструкторским бюро (СКБ) Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ) ведется разработка автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) легкого класса, предназначенного для участия в соревнованиях по морской робототехнике, которые будут проводиться в сентябре 2018 года во Владивостоке.

Исходя из требований, предъявляемых к аппаратам и оговоренных Регламентом соревнований [1], а также условий проведения соревнований (соревнования планируется проводить в бассейне), аппарат проектировался под технические характеристики, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Общие технические характеристики разрабатываемого АНПА

№	Наименование характеристики	Значение
1	Габаритная длина, мм	1300
2	Габаритный диаметр цилиндрической части, мм	100
3	Полная габаритная ширина аппарата (с учетом маршевых движителей и стабилизаторов)	180
4	Количество модулей	9
5	Вес аппарата на воздухе, кг	10
6	Автономность, мин	60
7	Максимальная скорость, уз	2
8	Глубина погружения, м	5

Данная разработка, фактически является ответвлением от проекта АНПА «Акара», разработанного в 2016 г. в СПбГМТУ [2, 3]. Основными отличиями является переработанный под наличие гидролокатора и видеокамеры носовой отсек, добавление горизонтальных подруливающих устройств, отсека полезной нагрузка и изменение состава и схемы соединений электроники.

Для успешного выполнения заданий, предусмотренных регламентом соревнований, АНПА должен обладать достаточной маневренностью, удерживать заданную глубину, перемещаться на этой глубине по произвольной траектории или позиционироваться в определенной точке. Для обеспечения указанной функциональности разрабатываемый аппарат, имеющий торпедную гидродинамическую форму, был оснащен двумя кормовыми маршевыми движителями, двумя модулями системы изменения плавучести – носовым и кормовым, двумя вертикальными и двумя горизонтальными подруливающими устройствами. Совмещение вертикальных двигателей и СИП позволяет экономить энергию и повысить автономность аппарата [4, 5].

Особенностью разрабатываемого АНПА является его модульная архитектура (рис. 1). Она позволяет изменять конфигурацию аппарата исходя из требований выполнения конкретных миссий, а также обеспечивает возможность разборки аппарата на модули для удобства транспортировки.

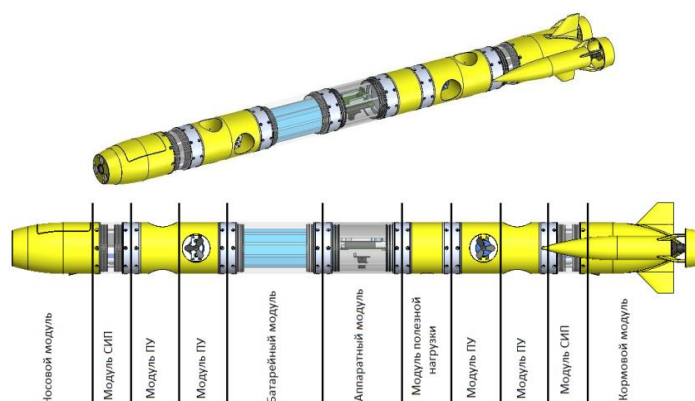


Рис. 1. Общий вид АНПА по модулям

В табл. 2 приведен перечень модулей аппарата и основное оборудование, входящее в их состав.

Таблица 2

Перечень модулей аппарата

№	Модуль	Основное оборудование
1	Носовой модуль	Впередсмотрящий гидролокатор, впередсмотрящая видеочамера, осветитель
2	Модуль СИП	Шаговый электродвигатель, датчик нулевого положения
3	Модуль подруливающего устройства	Бесколлекторный электродвигатель, драйвер двигателя
4	Аппаратный модуль	Центральный вычислитель, внизсмотрящая камера, powerline-модем
5	Батарейный модуль	Аккумуляторная батарея
6	Модуль полезной нагрузки	Система сброса маркеров
7	Кормовой модуль	Два маршевых электромотора, осветитель

Корпусная часть

Конструкция АНПА максимально упрощена с точки зрения изготовления, сборки и дальнейшего обслуживания. Большая часть деталей изготавливается при помощи 3-d принтера, что позволяет быстро, недорого и качественно изготовить сложные по форме детали. Металлические корпусные детали изготовлены из традиционного для морской техники алюминиевого сплава марки Амг-5. Силовые детали (ходовые винты, шестерни) изготовлены из стали 45, часть деталей выполнены из бронзы и нержавеющей стали.

Боковая стенка цилиндрической части корпуса модулей СИП, аппаратного и батарейного модулей изготовлена из прозрачной акриловой трубы. Расчеты показывают, что конструкция удовлетворяет требованиям прочности и жесткости, кроме того, прозрачная стенка позволяет установить внизсмотрящую камеру.

Наибольшие изменения, по сравнению с базовым проектом «Акара», претерпел носовой отсек, в связи с существенным изменением его полезной нагрузки – повышением требований к гидролокатору и впередсмотрящей камере.



Рис. 2: Подготовка модулей к испытаниям

В ходе подготовки к соревнованиям были проведен ряд сухих испытаний модулей (см. рис. 2). Для проверки герметичности уплотнений в модули были установлен беспроводной датчик протечки собственного изготовления. Собранные модули были помещены в емкость с водой, которая, в свою очередь, была помещена в барокамеру. Давление в барокамере поднималось до 1 атмосферы, что примерно соответствует глубине в 10 метров. Протечек в модулях обнаружено не было, таким образом герметичность модулей подтверждена, при этом имеется существенный запас по глубине.

При сборке модулей СИП была проведен ряд испытаний для того, чтобы определить, максимальное давление, при котором поршень модуля сохранит способность выталкивать воду. Испытания проводились сухим методом: на поршень устанавливался груз с последующим запуском системы (см. рис. 2). Эксперименты показали, что СИП сможет успешно работать на глубине до 7 м. Это полностью удовлетворяет заявленным требованиям с существенным запасом. Также необходимо учесть, что при непродолжительной работе возможен запуск СИП и на большей глубине с повышением рабочего тока электромотора. Тогда система сможет работать на глубине до 10 м. Это можно использовать для разработки аварийной системы всплытия в будущем.

Электроника аппарата

Одной из существенных проблем проекта «Акара» была трудность с коммутацией электроники между модулями, вызванная большим количеством электрических соединений, тянущихся в центральный отсек. Способом существенно сократить количество межмодульных соединений могло бы стать расположение в каждом модуле интерфейсных плат, обеспечивающих взаимодействие электроники модуля с другими блоками по общей шине. Такой подход часто применяется и данные шины хорошо известны – CAN, Modbus и т.д. Однако, описанные шины плохо подходят для передачи больших объемов информации (в нашем случае – видеоизображения). Теоретически, эту проблему мог бы решить переход на шину Ethernet, но такой переход сильно бы усложнил интерфейсную плату и увеличил бы ее габарит. В итоге было принято решение использовать гибридный вариант: для обмена данными с основным оборудованием использовать шину Modbus на физическом интерфейсе RS-485, а для видеоизображения отдельно провести провод USB от видеокамеры к центральному процессору.

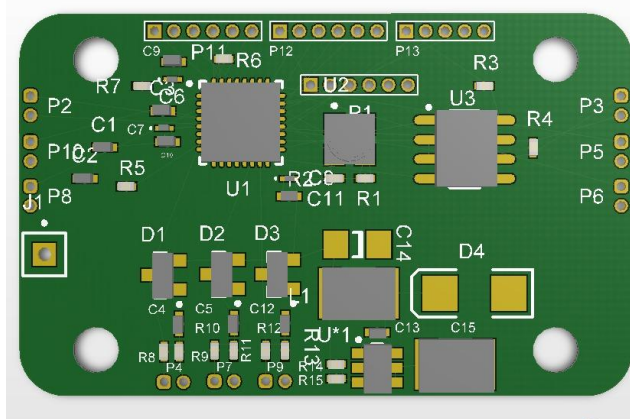


Рис. 3: Внешний вид интерфейсной платы

Для обеспечения коммутации между оборудованием отдельных модулей было принято решение разработать интерфейсную плату на основе микроконтроллера STMSTM32F051K8U6. Разработанная плата (см. рис. 3) обладает следующими характеристиками:

- ◆ размер 40x20 мм;
- ◆ напряжение питания 4.5–42 В;
- ◆ вторичный источник питания: 3.3 В, 0.2 А;
- ◆ интерфейсы:
 - RS-485;
 - UART;
 - SPI;
 - GPIO – 6 шт.;
 - АЦП с защитой входов – 3 шт. (с защитой)
 - ШИМ – 4 шт.;
 - I2C;
 - SWD;
 - опционально – установка датчика давления воды MS5837.

Для иллюстрации принципа построения сети на рис. 4 приведена часть блок-схемы соединений аппарата.

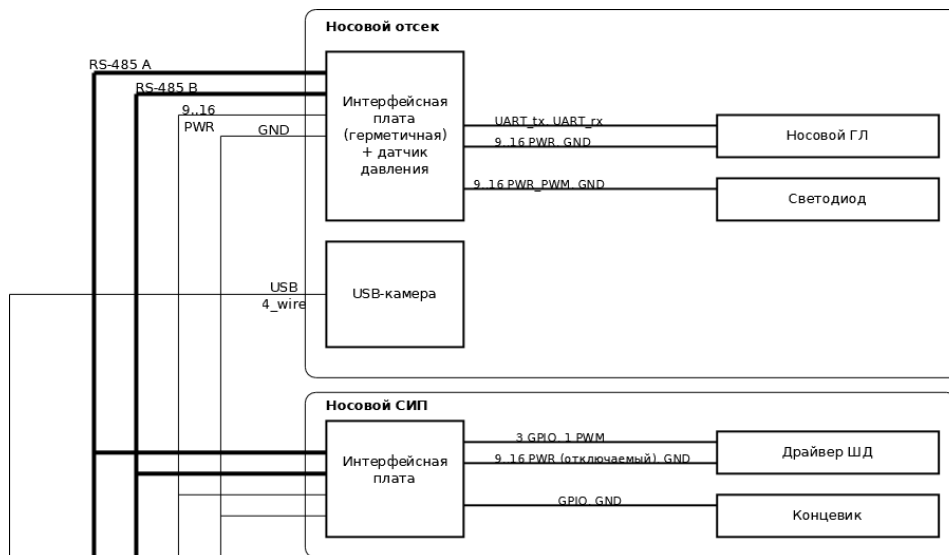


Рис. 4: Пример схемы соединений с использованием интерфейсной платы

Главным вычислителем АНПА является одноплатный компьютер BeagleBone Blue (рис. 5), работающий под управлением ОС Linux. Причинами такого выбора являются:

- ◆ Процессор на основе ядра ARM Cortex-M3.
- ◆ Встроенная поддержка wi-fi 802.11bgn.
- ◆ HighSpeed USB 2.0 клиент и мастер.
- ◆ Наличие встроенных акселерометра и барометра.
- ◆ Два дополнительных программируемых ядра, работающих в режиме реального времени (PRU).

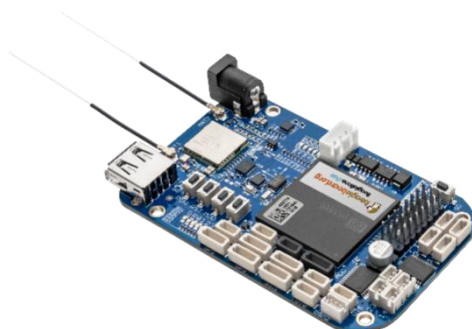


Рис. 5. Микрокомпьютер BeagleBone Blue

Для отладки аппарата используется powerline-модем Tenda 200, обеспечивающий скорость передачи данных до 200 Мбит/с.

В качестве видеокамер используются usb-камеры ELP-USBFHD06H-L36 (рис. 6), позволяющие снимать видео в разрешении 1080p с частотой до 30 кадров.

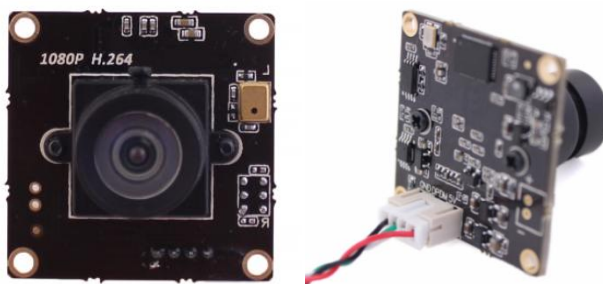


Рис. 6. Видеокамера USBFHD06H-L36

Для освещения пространства перед камерой используются светодиодные модули External Light Cube (рис. 7) с максимальной яркостью 700 лм.



Рис. 7. Светодиодный модуль External Light Cube

Впередсмотрящий гидролокатор аппарата разрабатывается студентами СКБ. Функционал гидролокатора: пассивная фазовая пеленгация источников шума, активная локация препятствий по курсу аппарата. Гидролокатор состоит из трех пьезопреобразователей, а также электронной платы сочетающих как блок усиления сигналов так и блок обработки, выполненный на базе ПЛИС.

Модули системы изменения плавучести построены на шаговых двигателях и датчиках Холла в качестве детекторов нулевого положения.

Используются шаговые двигатели FL35ST28-0504A (рис. 8), обладающие следующими характеристиками:

- ◆ Номинальный ток: 0.5 А.
- ◆ Угловой шаг: 1.8 градуса.
- ◆ Статический крутящий момент при номинальном токе: 1000 кг*см.

Для управления шаговыми двигателями используются драйвера Geckodrive G250X (рис. 9).



Рис. 8. Шаговый двигатель FL35ST28-0504A



Рис. 9. Драйвер шагового двигателя Geckodrive G250X

Каждый модуль подруливающего устройства включает в себя движитель, состоящий из бесколлекторного электромотора и двух гребных винтов, расположенных по обе стороны от мотора, а также драйвера, управляющего этим мотором.

Используются двигатели M100 (рис. 8), обладающие следующим набором характеристик:

- ◆ Максимальный ток потребления: 12.5 А.
- ◆ Максимальная мощность: 135 Вт.
- ◆ Максимальная скорость вращения: 4200 оборот/мин.



Рис. 8. Бесколлекторный двигатель M100

В качестве источника питания используется аккумуляторная сборка из 28 аккумуляторов типоразмера 18650 расположенных в два ряда. Она обеспечивает напряжение 16 В и обладает емкостью 72.8 А*ч.

Пропульсивная установка АНПА состоит из двух движителей 400HFS-L (рис. 10), которые построены с использованием бесколлекторных моторов мощностью 400 Вт и двух драйверов управления этими моторами. Движители обеспечивают упор 2.72 кг.



Рис. 10. Маршевый движитель 400HFS-L

Все бесколлекторные двигатели управляются драйверами Basic ESC R1 (рис. 11).



Рис. 11. Драйвер бесколлекторного двигателя Basic ESC R1

Программное обеспечение аппарата

Для конфигурирования и управления АНПА был разработан программный комплекс, представляющий собой систему управления аппаратом, а также утилиту отладки и переконфигурирования.

Основой управления аппаратом является фреймворк ROS [6] (Robot Operating System), который обеспечивает аппаратную абстракцию и удобный способ построения системы. Он использует идеологию атомарных узлов, обменивающихся сообщениями между собой при помощи специальных объектов – тем. Единицей разработки в данном фреймворке является так называемый пакет.

При выборе фреймворка были также рассмотрены альтернативы [7, 8], однако выбор в пользу ROS был сделан по причине популярности фреймворка и, соответственно, широте поддержке сообщества разработчиков, а также открытости исходного кода фреймворка.

Разработан пакет ROS, обеспечивающий управление АНПА. Языком написания узлов является Python версии 2.7.14. Все узлы поддерживают возможность установления специального режима для взаимодействия с утилитой отладки и переконфигурирования. Последнее возможно потому, что все настройки узла хранятся в файле формата yaml.

Функциональность программно-аппаратного комплекса условно разделяется на два уровня – верхний и нижний. Подпрограммы условного нижнего уровня отвечают за базовые элементы функционирования аппарата обеспечивающие безаварийную работу аппарата, защиту от выхода за допустимые диапазоны работы, а также функционирование высокоуровневых подпрограмм. Основным отличием функциональности нижнего уровня от функциональности верхнего уровня является то, что нижний уровень сам по себе не отвечает за решение задачи, а лишь обеспечивает возможность выполнения задач высокого уровня.

К базовым подпрограммам относятся:

- ◆ удержание заданной глубины;
- ◆ переход между различными эшелонами глубин;

- ◆ удержание заданного дифферента;
- ◆ избегание столкновений с препятствиями прямо по курсу;
- ◆ определение собственных координат;
- ◆ движение к точке с заданными координатами;
- ◆ распознавание объектов на дне;

К подпрограммам высокого уровня относятся:

- ◆ построение маршрута обследования заданной периметром акватории;
- ◆ информирование ПБУ о изменении статуса миссии (объект найден в выделенной зоне, объект не найден);
- ◆ изменение режима работы по команде ПБУ;
- ◆ возвращение аппарата на базу.

В результате была сформирована организация модулей ПО, изображенная на рис. 12.

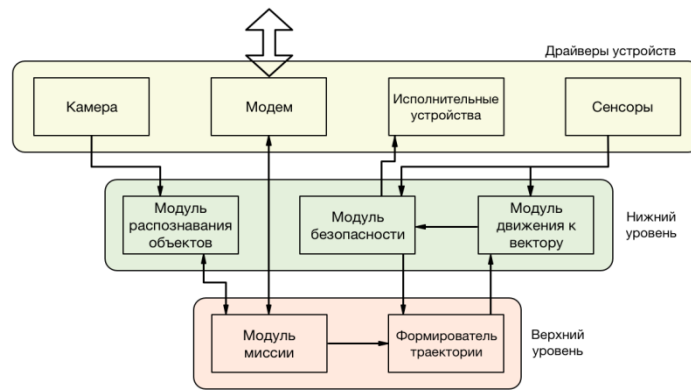


Рис. 12. Организация модулей ПО аппарата

Драйверы устройств – осуществляют низкоуровневое управление устройствами (генерация ШИМ, передача данных по UART и т.д.), предоставляя интерфейс для работы с ними.

Модуль безопасности – является центральным управляющим модулем, следит за изменениями внешней среды, помогает аппарату избежать столкновений с объектами и погружения ниже заданной отметки.

Модуль движения к вектору – ПИД (или другой) регулятор. Данные об абсолютном положении предоставляет модем.

Модуль распознавания объектов – при обнаружении объекта отправляет картинку на ПБУ. Также может использоваться модулем безопасности для избегания столкновений.

Формирователь траектории – должен генерировать оптимальную для выполнения задачи траекторию движения. При получении от модуля безопасности сообщения о невозможности прохождения по какому-либо участку траектории перестраивать её.

Модуль миссии – отвечает за выполнение роботом поставленной задачи, связь с ПБУ, взаимную координацию действий если робот не один.

Для быстрого и удобного переконфигурирования системы создана программа на языке C# с использованием технологии WPF, предоставляющая интерфейс пользователя для отладки работы и настройки отдельных узлов пакета. Она обеспечивает просмотр показателей датчиков и управление системами АНПА с использованием сырых или шаблонизированных данных. Пример работы программы с датчиком положения при использовании шаблонизированных данных представлен на рис. 12.

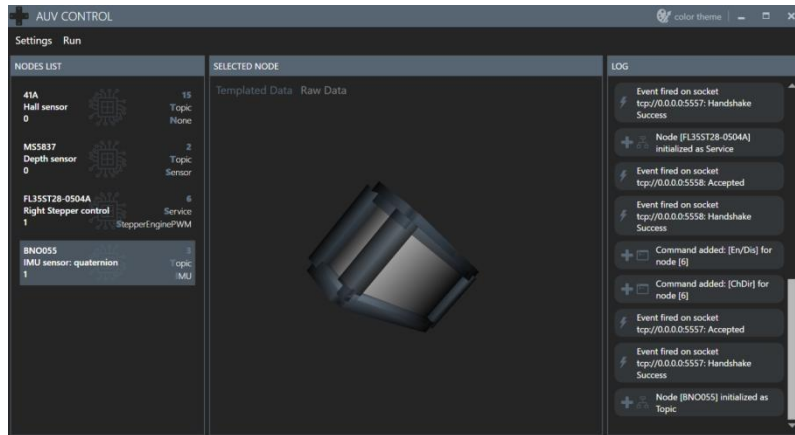


Рис. 12. Утилита отладки и переконфигурирования AUV Control

Выбор языка C# и системы WPF обусловлен тем, что эта комбинация технологий позволяет относительно легко строить эстетически красивые и привлекательные интерфейсы без потери функциональности и удобства.

На старте разработки утилиты, полноценной реализации ROS для языка C# не существовало, поэтому было решено создать новый протокол обмена сообщениями, основанный на идее тем ROS, который также облегчал бы динамическое переконфигурирование системы. Основой взаимодействия являются сокеты, через которые узлы ROS соединяются с отладочной программой. ROS использует статическую генерацию типов сообщений, но так как одной из целей утилиты является простота использования, была реализована динамическая генерация сообщений на основании описания, пересылаемого узлом в момент запуска. Для динамической генерации используется тот факт, что C# компилируется в промежуточный язык IL, что позволяет во время выполнения создать программный модуль на этом языке и скомпилировать его для дальнейшего использования.

Проверка высокоуровневых модулей программного обеспечения, таких как системы технического зрения проводятся на аппарате MUR, чья информационно-управляющая система была перенастроена на использование системы ROS. Примеры отработки элементов миссии прохождения через кольцо приведены на рис. 13.

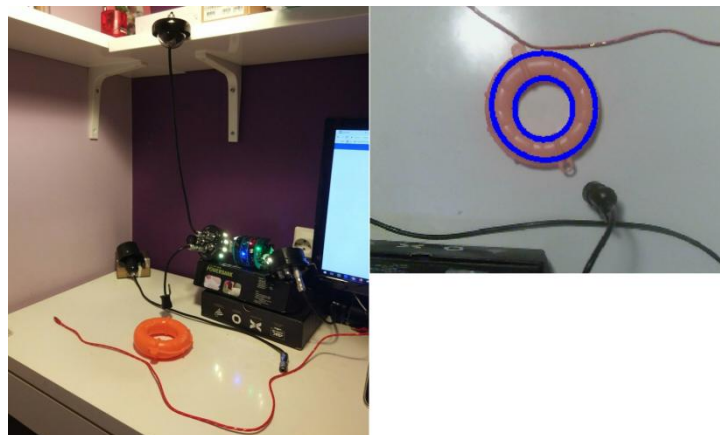


Рис. 13: Отработка системы технического зрения

Заключение. На текущий момент разработана большая часть модулей АНПА, его электроника и базовое программное обеспечение. По мере изготовления частей аппарата, производится их испытание. При этом отдельно проверяются корпусная часть, отдельно, в виде настольного макета – электронная часть и программы нижнего уровня. Программные модули верхнего уровня обрабатываются на платформе АНПА MUR [9]. Бассейновые испытания аппарата запланированы на апрель.

Проект позволил вовлечь в разработку большое число студентов СПбГМТУ, отдельные стороны проекта используются в процесс преподавания предметов, связанных с подводной робототехникой, на различных специальностях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://fpi.gov.ru/files/activities/konkurs/sea_robot/602397966.pdf.
2. *Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Потехин Ю.П., Путинцев И.А., Рыжов В.А., Семёнов Н.Н., Чемоданов М.Н.* Разработка автономных необитаемых подводных аппаратов класса микро с функцией группового управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – С. 55-74.
3. *Kozhemyakin I., Rozhdestvensky K., Ryzhov V., Semenov N., Chemodanov M.* Educational Marine Robotics in SMTU. ICR 2016: 79-88.
4. *Гой В.А., Костенко В.В.* Регулирование плавучести и дифферента автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника – 2016. – С. 4-14.
5. *Костенко В.В., Толстоногов А.Ю.* Регулирование глубины погружения необитаемого подводного аппарата, оснащенного системой изменяемой плавучести // Материалы двенадцатой всероссийской научно-практической конференции «Перспективные задачи и системы и управления» – 2017. – С. 146-157
6. <http://www.ros.org/>.
7. *Боровик А.И.* Разработка и тестирование систем управления АНПА на базе программной платформы RCE // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – С. 146-157
8. *Инзарцев А.В., Павин А.М., Елисеенко Г.Д., Родькин Д.Н., Сидоренко А.В., Лебедко О.А., Панин М.А.* Реконфигурируемая кроссплатформенная моделирования поведения необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 2 (20). – С. 28-34.
9. <http://murproject.com/>.

УДК 621.396.67

И.А. Мажирин, С.В. Глушков

УПРОЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА ИЛИ ПЛАВАТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА С ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ ИЗ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Целью исследования является разработка упрощённой математической модели движения судна (ММДС) с активными элементами управления, которая позволит производить первичную настройку или разработку новых алгоритмов управления для систем автоматического управления (САУ), таких как системы динамического позиционирования (СДП) и системы автоматического управления курсом судна (САУКС). Под активными элементами управления понимаются различного рода подруливающие устройства (ПУ), раздельно-поворотные насадки (РПН), винто-рулевые колонки (ВРК) стандартного типа или специальные такие как АЗИПОД или АКВАМАСТЕР. Упрощение ММДС производится

за счёт отказа расчётов гидродинамических свойств объекта управления в пользу использования значений в расчётах, которые можно измерить легко на практике. В статье приведены полученные графики скоростей и траектории движения объекта управления (ОУ) при выполнении манёвра «Циркуляция».

Математическая модель движения судна; система автоматического управления, система динамического позиционирования, авторулевой.

I.A. Mazhirin, S.V. Glushkov

THE SIMPLIFIED FLAT AND PARALLEL MATHEMATICAL MODEL OF DRIVING OF THE VESSEL OR SWIMMING OBJECT WITH THE PROPULSION AND STEERING COMPLEX WITH THE ACTIVE ELEMENTS OF CONTROL

Research objective is development of the simplified mathematical model of driving of the vessel with the active elements of control which will allow to make primary adjusting or developing of the new algorithms of control of the automatic control systems, such as dynamic positioning systems (DP) and system of automatic control of a course of the vessel (autopilot). The active control elements are different bow-thrusters, the rotary nozzles, the steering columns with screw of standard type or special such as AZIPOD or AquaMaster. Simplification of model is made due to replace of calculations of hydrodynamic properties of an object of controlling with calculations of values in which can be measured easily in practice. The received schedules of speeds and a trajectory of driving of the object of control when performing "Turning circle" maneuver are provided in article.

Mathematical model of driving of the vessel; automatic control system, dynamic positioning system, autopilot.

Введение. Разработка алгоритмов автоматического управления судна или любого плав. объекта проходит этап создания математической модели движения. После испытания алгоритмов управления на модели производится настройка системы автоматического управления до получения требуемых результатов, и только после этого производят испытания системы на реальном объекте. Как правило, сложные системы автоматического управления, такие как системы динамического позиционирования, проектируются одновременно со строительством судна и математическая модель включает в себя гидродинамические описания корпуса, элементов движительно-рулевого комплекса (ДРК), а также описание аэродинамики корпуса. В случае, если объект уже построен и необходимо разработать для него САУ есть два пути решения этой задачи:

1. Создание модели корпуса объекта управления в уменьшенном масштабе и проведение испытаний на нём в опытном бассейне или ротативной установке и в аэродинамической трубе для определения соответствующих коэффициентов для расчётов в математической модели.

2. Построение математической модели на основе полученных значений и коэффициентов с уже проведённых испытаний, с использованием графиков теоретических чертежей, нормограмм.

В первом способе получится наиболее точная математическая модель, которая с наименьшей погрешностью будет отражать действительное перемещение объекта. Такой способ моделирования используется при проектировке САУ в которых мат. модель используется для предсказания поведения ОУ в различных условиях для выработки упреждающего сигнала управления. Такой способ моделирования очень затратный в виду необходимости оборудования для проведения испытаний, создания макетной модели для испытания, а также необходимостью затраты времени на всю эту работу.

Второй способ наиболее доступный, в виду большого множества трудов, посвящённых испытаниям в виде справочников [1–5]. Однако большинство таких трудов проводилось до 80-х годов и сейчас в виду развития судостроения не всегда получится их применить. С того времени появилось множество новых типов ДРК и форм корпусов судна, поэтому модель, построенная таким способом для судна с нестандартным¹ ДРК и отличным типом корпуса, может иметь большую погрешность либо и вовсе не выдавать необходимых значений.

В виду данных особенностей моделирования появилась задача – найти способ построения модели для судна с нестандартным ДРК, избегая расчёт его гидродинамики и аэродинамики.

При выборе различных вариантов был сделан акцент на математическую модель предложенную стандартом IEC 62065 [11]. Данная модель для расчёта берёт на вход значения, которые можно получить либо опытным путем прямо на судне, либо из анализа графика манёвра «Циркуляция», который как правило прилагается к судну в виде технической документации после ходовых испытаний перед сдачей судовладельцу, а также рекомендован множествами сертификационными сообществами для оценки манёвренности судна [12–15]. Модель рассчитывает продольное, поперечное и угловое ускорения с учётом влияния положения руля и заданной тяги движителя, а также учитывает влияние глубоководного течения и волнения моря. Модель не требует расчётов гидродинамики судна и имеет нормированную форму, отталкиваясь от значений скоростей, полученных при конструировании судна и его испытаниях. Данная модель рекомендована стандартом для испытания САУКС, но проанализировав работу СДП и описание математических моделей [7–10], используемые в них, для испытания данных систем она не пригодна по ряду нескольких причин:

1. Модель рассчитана для судов со стандартным ДРК;
2. Не учтено влияние ветрового воздействия на судно;

Рассмотрев данные недостатки, ставится задача изменить модель под судно с ДРК с активными средствами управления. За основу были взяты размерности и мощности многоцелевого судна снабжения «Витус Беринг».

Решение задачи.

Как видно из рис. 1, главное отличие от модели предложенной стандартом IEC62065 – наличие трёх моделей управления мощности элементов управления и двух моделей управления рулевыми устройствами. Данное решение объясняется тем, что на судах-снабженцах по типу судна «Витус Беринг» установлен ДРК следующего типа: две винто-рулевые колонки по типу АЗИПОД и туннельное подруливающее устройство.

Исходя из особенностей конструкции также был изменён расчёт составляющих движения судна. Был добавлен компонент тяги в поперечном движении в нормированном значении, а также изменён расчёт момента, создаваемого ДРК. Нормированное значение тяги и момента при расчёте ускорений используется, что бы не производить расчёта гидродинамических свойств и сил развиваемых ДРК.

¹ Под стандартным имеется в виду ДРК в виде гребной винт-руль.

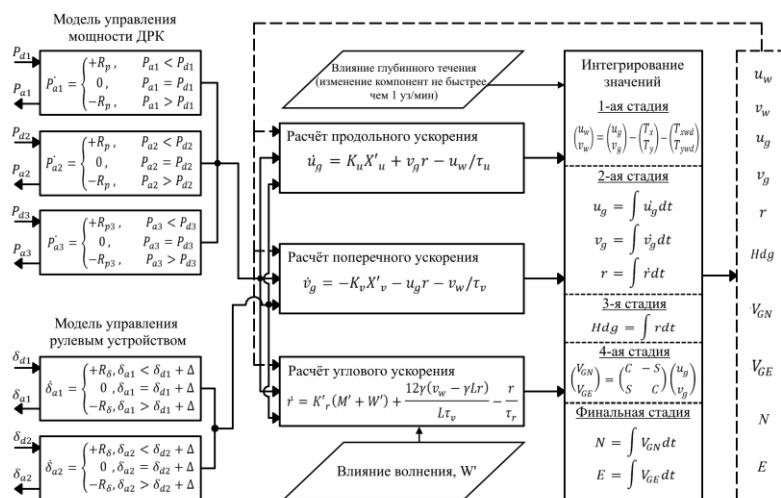


Рис. 1. Общий вид математической модели

где

Индексы:

- 1 – левый аzipод;
- 2 – правый аzipод;
- 3 – носовое подруливающее устройство;

- d – значение уставки;
- a – текущее значение;

- g – относительно земли;
- w – относительно воды;

Обозначения:

- P – значение мощности, потребляемое элементом управления;

- δ – значение угла перекладки аzipода;

- u – скорость продольного движения;

- v – скорость поперечного движения;

- r – угловая скорость;

- X' – нормированное значение тяги, обеспечиваемое ДРК;

- K – скоростной коэффициент;

- M' – нормированное значение момента, обеспечиваемое ДРК;

- γ – коэффициент стабильности (отношение расстояния центра давления боковых сил к длине судна);

- W' – нормированное значение момента, создаваемое волнением;

- T – значение компоненты скорости глубинного течения;

- τ – временная константа;

- Hdg – значение курса судна;

- N, E – значение координат судна относительно севера и востока соответственно;

- E

Из-за особенности конструкции ДРК несколько изменился принцип расчёта. Произошёл частичный отказ от нормированных вычислений, а именно значения мощности и угла перекладки сначала считаются не в процентах, а в натуральных величинах. Сделано это было по нескольким причинам. Во-первых, перекладка осуществляется не пера руля, а аzipода, который может вращаться на 360 градусов и представляет из себя конструкцию винто-рулевой колонки с тяговым винтом. Это означает, что мощности прилагаемые к корпусу судна будут распределяться по осям и необходимо будет рассчитывать проекции этих мощностей согласно углу перекладки. Исходя из этого нормированный вид угла перекладки просто неудобен в расчётах. Во-вторых, при расчёте мощностей в продольном и поперечном движениях, а также вращательного момента, меняются знаки и составляющие расчётов в виду расположения элементов управления и принципов работы ДРК. В виду этого нормированные значения будут рассчитываться по-разному для каждого из видов движений.

Получение нормированного значения тяги получается следующим путём:

$$\frac{P_{ai}}{P_{max}} = \frac{X_{ai}}{X_{max}} = X', \quad (1)$$

где P_{ai} – мощность i -го аzipода или ПУ;
 X_{ai} – тяга, создаваемая i -ым аzipодом или ПУ;
 X' – нормированное значение тяги.

Расчёт нормированных значений тяги для движений определяется следующим путем:

Продольное движение:

$$\begin{aligned} P_{maxu} &= P_1 + P_2 \\ P_{aui} &= P_{ai} \cos \delta_{ai} \\ X'_u &= \frac{\sum_{i=1}^2 P_{aui}}{P_{maxu}} = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{ai} \cos \delta_{ai}}{P_{maxu}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где P_{maxu} – максимальная мощность продольного движения;
 X'_u – нормированное значение тяги продольного движения;
 P_{aui} – текущее значение мощности продольного движения (проекция на ДП).

Поперечное движение:

$$\begin{aligned} P_{maxv} &= P_1 + P_2 + P_3 \\ P_{avi} &= P_{ai} \sin \delta_{ai} \\ X'_u &= \frac{\sum_{i=1}^3 P_{avi}}{P_{maxv}} = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{ai} \sin \delta_{ai} + P_{a3}}{P_{maxv}} \end{aligned} \quad (3)$$

где P_{maxv} – максимальная мощность поперечного движения;
 X'_u – нормированное значение тяги продольного движения;
 P_{avi} – текущее значение мощности продольного движения (проекция на ДП);

Вращательное движение:

$$\begin{aligned} M_{max} &= (P_1 + P_2)l_b + P_3l_a \\ \sum_{i=1}^3 M_{ai} &= (\sum_{i=1}^2 P_{ai} \sin \delta_{ai})l_b + (P_{a1} \cos \delta_{a1} - P_{a2} \cos \delta_{a2})b - P_{a3}l_a \\ M' &= \frac{\sum_{i=1}^3 M_{ai}}{M_{max}}, \end{aligned} \quad (4)$$

- где M_{max} – максимальная вращательный момент, создаваемый ДРК;
 M_{ai} – текущий момент, создаваемый i -ым элементом управления;
 M' – нормированное значение момента, создаваемое ДРК;
 l_a – расстояние носового ПУ от ЦТ;
 l_b – расстояние аzipодов от ЦТ;
 b – расстояние аzipода от ДП;

Расчёт коэффициентов и временных констант остался прежним за исключением коэффициента угловой скорости K_r . Для приближенного расчёта формула, указанная в стандарте уже не подойдёт, но его можно без труда подобрать согласно графику циркуляции судна. Данный способ определения коэффициента также является рекомендованным разработчиками самого стандарта.

Недостаток ветрового воздействия при моделировании можно компенсировать суммированием компоненты скорости течения с компонентой скорости ветра делённый на коэффициент обтекаемости корпуса. Данный коэффициент можно получить опытным путём анализируя снос судна при определённой скорости ветра.

$$\begin{aligned} T_{Nwd} &= U_{wd} \cos(\gamma_{wd}) \\ T_{Swd} &= U_{wd} \sin(\gamma_{wd}) \\ \begin{pmatrix} T_{xwd} \\ T_{ywd} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} c & s \\ -s & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{Nwd}/K_{wdu} \\ T_{Ewd}/K_{wdv} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} u_w \\ v_w \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u_g \\ v_g \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} T_{xwd} \\ T_{ywd} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

- где u_w и v_w – продольная и поперечная составляющая скорости судна относительно сил, действующих на судно;
 c и s – косинус и синус текущего курса судна;
 T_N и T_E – компоненты скорости глубинного течения в северном и восточном направлении;
 T_Y и T_X – компоненты скорости глубинного течения в координатной системе, привязанной к судну;
 T_{Nwd} и T_{Ewd} – компоненты скорости ветра в северном и восточном направлении;
 T_{Ywd} и T_{Xwd} – компоненты скорости влияния ветра на судно;
 K_{wdu} и K_{wdv} – коэффициенты пропорциональности ветрового воздействия для продольного и поперечного движения соответственно;

Для более точного расчёта модели, необходимо хорошо проанализировать движения реального судна и задать функцию определяющий параметр коэффициента стабильности относительно скорости движения, т.к. положения центра давления боковых сил и центра парусности будут меняться в зависимости от скорости его движения.

Используя данную методику расчёта и данные судна «Витус Беринг» были получены следующие графики движения на временном интервале 500 секунд (рис. 2 и 3).

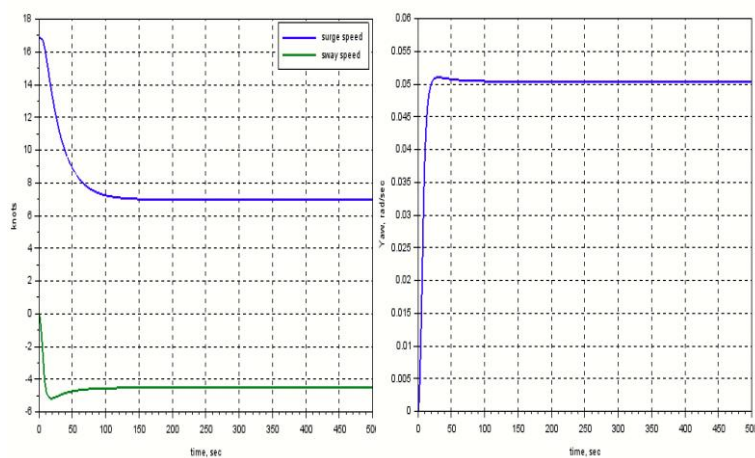


Рис. 2. Графики скоростей движения судна

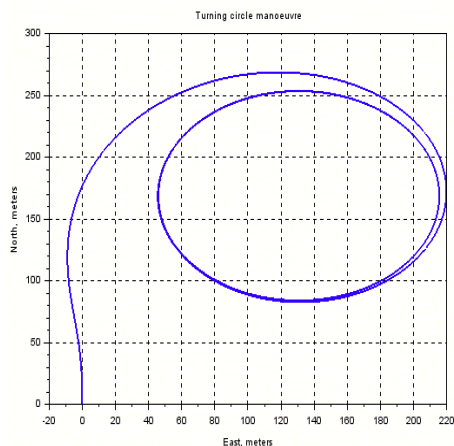


Рис. 3. График установившейся циркуляции судна

Вывод. Проанализировав модель, предлагаемую стандартом ИЕС 62065 для тестирования систем автоматического управления, были выявлены как недостатки, так и бесспорные преимущества модели. Главным недостатком модели является расчётные формулы, привязанные к стандартному строению ДРК. Этот недостаток был устранён поправками в методе расчёта, приведёнными в данной статье. Используя подобную методику, можно преобразовать модель для плавательного объекта любой формы и типа ДРК. Главным преимуществом модели является отсутствие необходимости расчётов гидродинамических свойств. На мой взгляд это преимущество даёт особую ценность данной модели для разработчиков алгоритмов и программ управления для различных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Войткуновский Я.И.* Справочник по теории корабля. Т. 3. / под ред. Я.И. Войткуновского. – Л.: Судостроение, 1984. – 542 с.
2. *Анисимова Н.И.* Расчёт параметров движения одновинтового судна при торможении гребным винтом – Л., Труды НТО СП, 1974. Вып. 221. – С 38-39.

3. Турбал. В.К., Шнаков В.С., Штумпф В.М. Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов. – Л.: Судостроение, 1983. – 304 с.
4. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
5. Шостак В.П. Динамическое позиционирование плавучих объектов: монография. – Чикаго: Мегатрон, 2010. – 130 с.
6. Антонов В.А. Письменный М.Н. Теоретические вопросы управления судном: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. МГУ им. Адм. Г.И. Невельского, 2007. – 78 с.
7. Вагуценко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.
8. Operation Manual, NAVIS NavDP 4000, NAVIS ENGINEERING, 2015. – 208 p.
9. User Manual, Rolls-Royce Icon(TM) Dynamic Positioning System Class 2 Rolls-Royce plc, 2007. – 958 p.
10. Гудков Д.Н., Тихонов И.В. Системы обработки інформації // Системы динамического позиционирования судов как эргатический инструмент повышения безопасности мореплавания. – Киев, КГАВТ им. гетм. Петра Конашевича-Сагайдачного, 2013. – Вип. 8 (115). – С. 32-36.
11. International Standard, Maritime navigation and radio communication equipment and systems – Track control systems – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results, IEC 62065, Edition 2.0, 2014.
12. Testing and Extrapolation Methods/Maneuverability/Validation of Maneuvering Simulation Models. - International Towing Tank Conference, 2002. – 11 p.
13. Guide for vessel maneuverability – American Bureau of Shipping 2006. – 124p.
14. Резолюция MSC.137(176). Стандарты маневренных качеств судов, принята 5 декабря 2002 г.
15. Циркуляционное письмо ИМО MSC/Circ.1053. Пояснения к стандартам маневренных качеств судна, принята 5 декабря 2002 г.

УДК 629.12

К.А. Суров, А.М. Маевский

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ
ОБЪЕКТАМИ ГЛАЙДЕРНОГО ТИПА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
В ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЕ**

В данной статье рассмотрены принципы движения подводных аппаратов глайдерного типа, приведено описание математической модели движения, проведено моделирование в среде MATLAB, а также проведены симуляции различных траекторий движения.

Подводный аппарат, глайдер, математическая модель движения, моделирование, избыточная плавучесть.

К.А. Surov, A.M. Maevskiy

**THE DEVELOPMENT OF UNDERWATER GLIDER CONTROL SYSTEM FOR
MOVEMENT IN THREE-DIMENSIONAL ENVIRONMENT**

This study reviews the principle of glider-type underwater object movement, defines mathematical model of movement, reviews results of modelling in MatLab and simulation of different possible movement trajectories.

Underwater vehicle, glider, mathematical model of movement, modelling, excessive buoyancy.

Введение. Подводный глайдер – это разновидность автономных необитаемых подводных аппаратов, которые используют гидродинамические принципы движения для перемещения в морском пространстве. Зачастую движение объекта

обеспечивается механизмом изменения собственной плавучести для перемещения в вертикальной плоскости, данный эффект подобен принципу поплавок. Дополнительно, для превращения вертикально направленной силы в горизонтальную, глайдер использует подводные крылья, затрачивая при этом меньше энергии по сравнению с электроприводами гребного винта [4]. Глайдеры успешно используются в исследованиях океана, где необходима высокая автономность [9].

В основе традиционной системы изменения плавучести подводных глайдеров применяются, как правило, два принципа: изменение положения центра тяжести аппарат за счет перемещения балластного груза внутри корпуса и изменение плавучести за счет увеличения или уменьшения массы аппарата, что, в свою очередь, достигается набором воды из окружающей среды в балластный резервуар. Такую систему можно назвать активной из-за наличия перемещаемого груза.

В рамках представленной работы предлагается вариант применения «пассивной» системы где, в отличие от активной, функции перемещаемого груза выполняет балластный резервуар, расположенный в носовой части аппарата [2]. В данной модели резервуар разделен на два продольных отсека, что позволяет управлять плавучестью для всплытия/погружения аппарата, контролируя знакопеременное изменение положения точки приложения плавучести z_p , что также позволяет управлять углом крена для бокового движения. Схема системы изменения плавучести и точка приложения избыточной плавучести изображены на рис. 1.

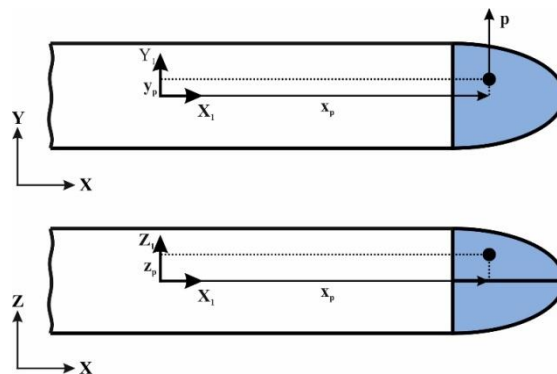


Рис. 1. Структурная схема пассивной системы изменения плавучести

При спуске на воду глайдер находится на поверхности воды, его носовая часть находится выше кормы. При заполнении балластного резервуара плавучесть аппарата уменьшается в результате того, что сила тяжести аппарата становится больше силы Архимеда, действующей на него. Аппарат начинает тонуть. Одновременно с этим, благодаря постепенному набору воды в передний резервуар аппарата, центр тяжести смещается вперед, и носовая часть оказывается ниже кормы. В результате этих двух процессов глайдер обретает вертикальную скорость, часть которой преобразуется в горизонтальную за счет наличия подводных крыльев. Аппарат совершает движение вперед с одновременным погружением.

При достижении заданной максимальной глубины начинается обратный процесс – вода из балластного резервуара выкачивается обратно в окружающую среду, в результате чего глайдер совершает всплытие с движением вперед. Процесс одного цикла погружения и всплытия при продольном движении глайдера показан на рис. 2.

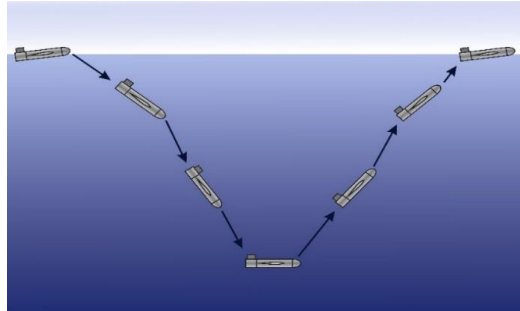


Рис. 2. Схема продольного движения подводного глайдера

Силы, действующие на глайдер во время его движения представлены на рис. 3.

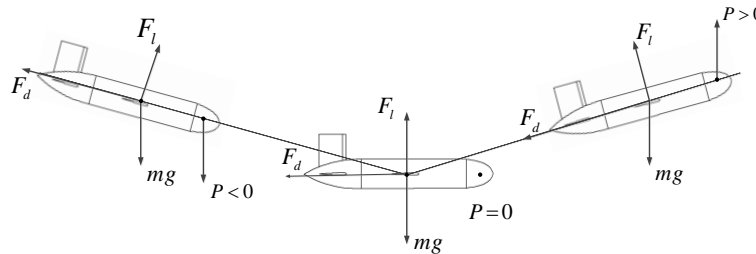


Рис. 3. Силы, действующие на глайдер во время продольного движения

Где F_l – гидродинамическая подъемная сила, F_d – гидродинамическая сила сопротивления, mg – сила тяжести глайдера, P – переменная плавучесть.

Для управления курсом и маневрирования в данной модели используется разделение балластного резервуара на две равные части. При заполнении только одной части плечо избыточной плавучести смещается по оси Z_1 , создается вращающий момент, который изменяет угол крена аппарата. Согласно проведенным ранее исследованиям для глайдеров классической конструкции [10], создание угла крена при ненулевой избыточной плавучести позволяет глайдеру совершать движение по спирали, что можно использовать для маневрирования.

Математическая модель трехмерного движения. Для вывода математической модели глайдера использованы следующие прямоугольные системы координат, показанные на рис. 4:

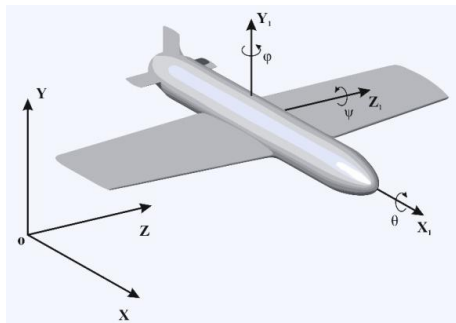


Рис. 4. Системы координат и положительные направления углов ориентации глайдера

1. Система координат связанная с землей $OXYZ$;
2. Система координат связанная с объектом $O_1X_1Z_1Y_1$, расположенная в центре объема глайдера. Ось O_1X_1 направлена вдоль объекта к носовой части, ось O_1Y_1 – к верхней части объекта, а ось O_1Z_1 – к левому борту глайдера.

В модели использованы следующие углы ориентации объекта:

1. Угол крена θ , возникающий при вращении глайдера относительно оси O_1X_1 .
2. Угол курса φ – при вращении относительно оси O_1Y_1 ;
3. Угол дифферента ψ – при вращении относительно оси O_1Z_1 .

Модель динамики пространственного движения глайдера при определённых условиях может быть разделена на две системы, соответствующие боковому и продольному движениям. Уравнения продольного движения подводного объекта (глайдера) в вертикальной плоскости в режиме планирования в проекциях на оси связанной системы OX_1Y_1 имеют следующий вид:

$$(p_w V + \lambda_{11})\dot{v}_{x1} = c_{x1} \frac{p_w v_0^2}{w} V^{2/3} + (p_w V + \lambda_{22})V_{y1}\omega_{x1} + \lambda_{26}\omega_{z1}^2 + p \sin \psi; \quad (1.1)$$

$$(p_w V + \lambda_{22})\dot{v}_{y1} + \lambda_{26}\dot{\omega}_{z1} = c_{y1} \frac{p_w v_0^2}{2} V^{2/3} + c_{y1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V - (p_w V + \lambda_{11})v_{x1}\omega_{z1} + p \cos \psi; \quad (1.2)$$

$$(J_{z1} + \lambda_{66})\dot{\omega}_{z1} + \lambda_{26}\dot{v}_{y1} = m_{z1} \frac{p_w v_0^2}{2} V + m_{z1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{z1} V^{4/3} - p_w V g h \sin \psi - \lambda_{26} v_{x1} \omega_{z1} + p(x_p \cos \psi - y_p \sin \psi); \quad (1.3)$$

где p_w – плотность воды; V – водоизмещение объекта; v_{x1} – проекция скорости объекта на ось OX_1 ; v_{y1} – проекция скорости объекта на ось OY_1 ; v_0 – абсолютная величина вектора скорости объекта; ω_{z1} – угловая скорость вращения объекта относительно оси OZ_1 ; J_{z1} – момент инерции корпуса глайдера относительно оси OZ_1 ; $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ – присоединенные массы корпуса глайдера; λ_{26} – присоединенный статический момент корпуса глайдера; λ_{66} – присоединенный момент инерции корпуса глайдера; c_{x1}, c_{y1}, m_{z1} – коэффициенты позиционных гидродинамических сил и моментов; $c_{y1}^{\omega_{z1}}, m_{z1}^{\omega_{z1}}$ – коэффициенты вращательных гидродинамических сил и моментов; p – избыточная плавучесть; x_p, y_p – плечи избыточной плавучести в связанной системе координат, ψ – угол дифферента.

При решении дифференциальных уравнений (1.1)–(1.3) получаем значения двух составляющих скорости по осям O_1X_1 и O_1Y_1 , а также угловую скорость вращения глайдера относительно оси OZ_1 . Эти значения необходимы для описания продольного движения объекта в проекции на плоскость $O_1X_1Y_1$.

Уравнения динамики для бокового движения глайдера [3] в проекциях на оси связанной системы OX_1Z_1 :

$$(p_w V + \lambda_{33})\dot{v}_{z1} + \lambda_{35}\dot{\omega}_{y1} + \omega_{x1}(p_w V + \lambda_{22})v_{y1} - \omega_{y1}(p_w V + \lambda_{11})v_{x1} = c_{z1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V^{2/3} v_{z1} + c_{z1}^{\omega_{z1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{y1} V - p \cos \psi \sin \theta; \quad (2.1)$$

$$(J_{x1} + \lambda_{44})\dot{\omega}_{x1} + \omega_{y1}\lambda_{26}v_{y1} + v_{y1}\lambda_{35}\omega_{y1} = m_{x1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V \omega_{z1} + m_{x1}^{\omega_{x1}} \frac{p_w v_0}{2} V^{4/3} \omega_{x1} + m_{x1}^{\omega_{y1}} \frac{p_w v_0}{2} V^{4/3} \omega_{y1} - p_w g V h \sin \theta \cos \psi - p(z_p \cos \theta + y_p \sin \theta) \cos \psi; \quad (2.2)$$

$$(J_{y1} + \lambda_{55})\dot{\omega}_{y1} + \lambda_{35}\dot{v}_{z1} - \omega_{x1}\lambda_{26}v_{y1} - v_{x1}\lambda_{35}\omega_{y1} = m_{y1}^{\beta} \frac{p_w v_0}{2} V v_{z1} + m_{y1}^{\omega_{x1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{x1} V^{4/3} + m_{y1}^{\omega_{y1}} \frac{p_w v_0}{2} \omega_{y1} V^{4/3} + p(x_p \cos \psi \sin \theta + z_p \sin \psi); \quad (2.3)$$

где v_{z1} – проекция скорости объекта на ось OZ_1 ; ω_{x1} – угловая скорость вращения объекта относительно оси OX_1 ; ω_{y1} – угловая скорость вращения объекта относительно оси OY_1 ; J_{x1} – момент инерции корпуса глайдера относительно оси OX_1 ; J_{y1} – момент инерции корпуса глайдера относительно оси OY_1 ; λ_{33} – присоединенная масса корпуса глайдера; λ_{35} – присоединенный статический момент корпуса глайдера; $\lambda_{44}, \lambda_{55}$ – присоединенные моменты инерции корпуса глайдера; $c_{z1}^\beta, m_{x1}^\beta, m_{y1}^\beta$ – коэффициенты позиционных производных гидродинамических сил и моментов; $c_{z1}^{\omega_{x1}}, m_{x1}^{\omega_{x1}}, m_{y1}^{\omega_{x1}}, m_{y1}^{\omega_{y1}}$ – коэффициенты вращательных производных гидродинамических сил и моментов; h – метацентрическая высота; z_p – плечо избыточной плавучести в связанной системе координат; θ – угол крена; φ – угол курса.

Аналогично системе дифференциальных уравнений для продольного движения, уравнения (2.1)–(2.3) позволяют найти значение скорости в проекции на ось O_1Z_1 , а также значения двух угловых скоростей вращения относительно осей OX_1 и OY_1 .

В совокупности, уравнения (1.1)–(2.3) описывают полную модель динамики движения глайдера.

Управление в модели производится путем изменения двух переменных: p (избыточная плавучесть) и z_p – (плечо избыточной плавучести в связанной системе координат).

Показатель избыточной плавучести изменяется в пределах от $-0.2p_w Vg$ (при заполненном балластном резервуаре) до $+0.2p_w Vg$ (при пустом резервуаре).

Плечо избыточной плавучести z_p по оси OZ_1 при моделировании может изменяться от -0.445 до $+0.445$.

Для построения траектории движения объекта необходимо привести кинематическую модель подвижного объекта, определяющей его положение и ориентацию относительно выбранной системы отсчета. Данная модель включает в себя кинематические уравнения вращательного и поступательного движения относительно земной системы координат.

Кинематические уравнения вращательного движения:

$$\dot{\theta} = \omega_{x1} - \tan \psi (\omega_{x1} \cos \theta - \omega_{z1} \sin \theta); \quad (3.1)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\omega_{x1} \cos \theta - \omega_{z1} \sin \theta}{\cos \varphi}; \quad (3.2)$$

$$\dot{\psi} = \omega_{z1} \cos \theta + \omega_{y1} \sin \theta; \quad (3.3)$$

Кинематические уравнения поступательного движения:

$$\dot{x} = \cos \varphi \cos \psi v_{x1} + (\sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) v_{y1} - (\sin \varphi \sin \theta) v_{z1}; \quad (4.1)$$

$$\dot{y} = \sin \psi v_{x1} + \cos \varphi \cos \theta v_{y1} - \cos \varphi \sin \theta v_{z1}; \quad (4.2)$$

$$\dot{z} = \sin \varphi \cos \psi v_{x1} + (\cos \varphi \sin \theta + \sin \varphi \sin \psi \cos \theta) v_{y1} + (\cos \varphi \sin \theta - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) v_{z1}; \quad (4.3)$$

При решении систем дифференциальных уравнений (3.1)–(3.3) и (4.1)–(4.3) находятся значения углов ориентации и координат объекта.

Моделирование в программном комплексе MatLab. Для проверки адекватности модель была симулирована в среде MatLab, используя значения переменных и коэффициентов, представленных в табл. 1. Значения гидродинамических параметров рассматриваемой модели были найдены ранее в работах [7, 8]

Таблица 1

Значения переменных для моделирования в MatLab

Переменная	Значение	Переменная	Значение
$V, \text{ м}^3$	0.022	c_{z1}^β	-1.66
$\rho_w, \text{ кг/м}^3$	1000	m_{x1}^β	-0.34
$J_{x1}, \text{ кг}\cdot\text{м}^3$	0.1	m_{y1}^β	-1.10
$J_{y1}, \text{ кг}\cdot\text{м}^3$	0.1	m_{z1}	3.71
$J_{z1}, \text{ кг}\cdot\text{м}^3$	0.167	$c_{y1}^{\omega_{z1}}$	0.664
$\lambda_{11}, \text{ кг}$	1.0120	$c_{z1}^{\omega_{z1}}$	-5.31
$\lambda_{22}, \text{ кг}$	24.9480	$m_{z1}^{\omega_{z1}}$	-0.522
$\lambda_{33}, \text{ кг}$	22.0880	$m_{x1}^{\omega_{x1}}$	-0.96
$\lambda_{44}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0.1100	$m_{x1}^{\omega_{y1}}$	-0.72
$\lambda_{55}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0.1170	$m_{y1}^{\omega_{x1}}$	-0.75
$\lambda_{66}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0.1378	$m_{y1}^{\omega_{y1}}$	-7.27
$\lambda_{26}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	-0.2343	$h, \text{ м}$	0.05
$\lambda_{35}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	1.3315	$x_p, \text{ м}$	0.4
c_{x1}	-0.061	$y_p, \text{ м}$	0
c_{y1}	1.28		

В результате моделирования были получены различные траектории движения. На рис. 5.1.–5.3. изображен пример спиралевидной траектории, данный маневр демонстрирует погружение глайдера на определенную глубину при постоянных значениях параметров $p = -0.2\rho_w Vg$, $z_p = 0.445$, время симуляции $t = 500$.

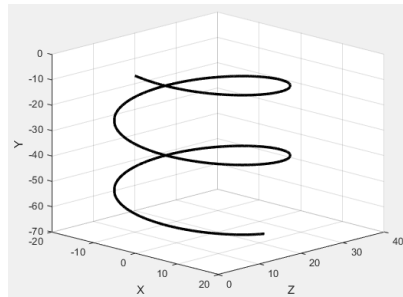


Рис. 5.1. Пример спиральной траектории движения



Рис. 5.2. Проекция траектории на плоскость OXZ

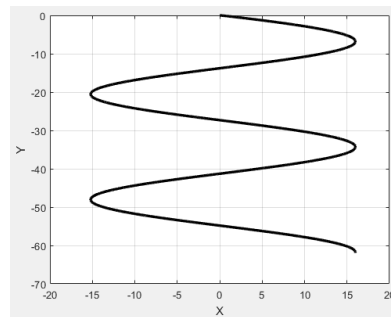


Рис. 5.3. Проекция траектории на плоскость OXY

Такую траекторию возможно усовершенствовать, добавив управление параметрами в нижней точке спирали. В момент времени $t = 550$ параметры принимают значения $p = +0.2p_w Vg$, $z_p = -0.445$, общее время симуляции $t = 1100$. Результат приведен на рис. 6.1–6.3.

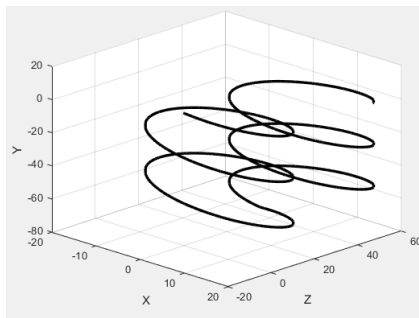


Рис. 6.1. Пример траектории с двойной спиралью

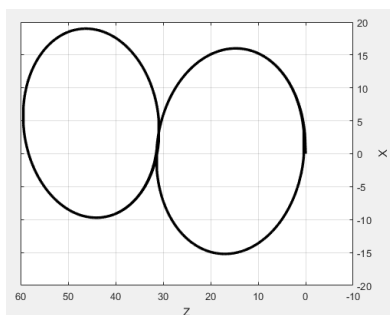


Рис. 6.2. Проекция траектории на плоскость OXZ

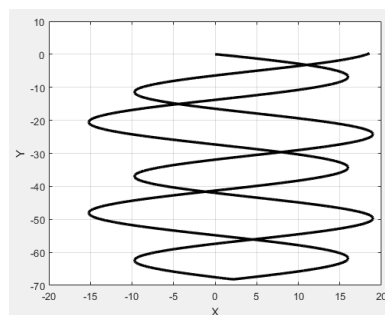


Рис. 6.3. Проекция траектории на плоскость OXY

Аппарат совершает погружение по спиральной траектории в левую сторону, а в нижней точке начинает всплывать в правую сторону. Такую траекторию можно использовать, например, для исследований дна водоема с поверхности.

Следующим примером является продольное движение глайдера с постоянной средней глубиной. В таком случае параметр $p = \pm 0.2p_w Vg$, где знак меняется с периодом $T=30$, что имитирует попеременный набор и спуск воды из балластного резервуара. Параметр $z_p = 0$ – остается постоянным. Время симуляции $t = 200$. Результат построения траектории показан на рис. 7.1.–7.3.

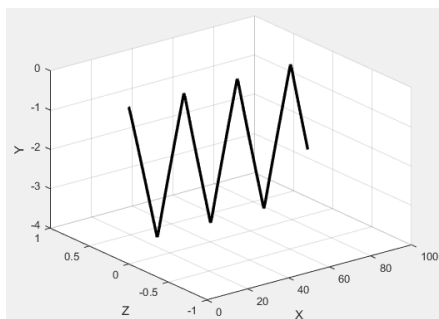


Рис. 7.1. Пример продольного движения

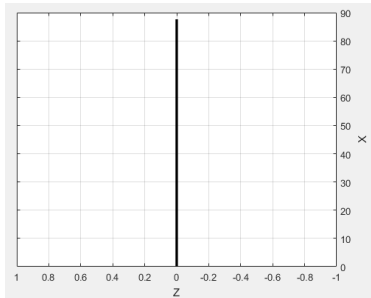


Рис. 7.2. Проекция траектории на плоскость OXZ

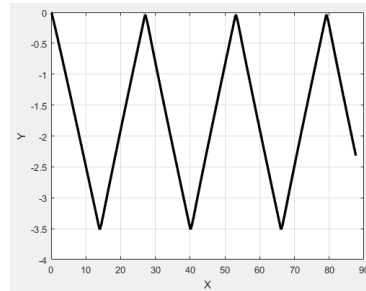


Рис. 7.3. Проекция траектории на плоскость OXY

Объединяя принцип продольного движения с управлением параметром z_p , можно получить траекторию для режима маневрирования глайдера. Пример такой траектории показан на рис. 8.1–8.3. Время симуляции $t = 500$.

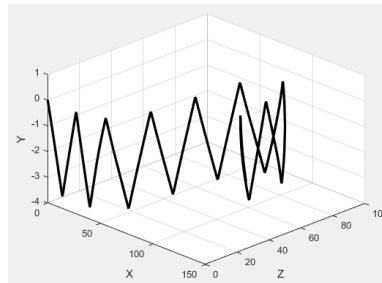


Рис. 8.1. Пример маневрирования глайдера

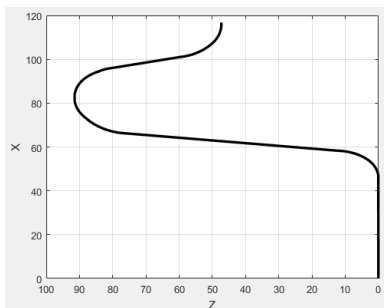


Рис. 8.2. Проекция траектории на плоскость OXZ

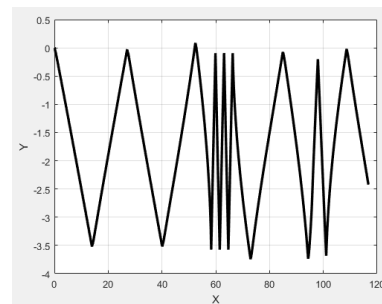


Рис. 8.3. Проекция траектории на плоскость OXY

В результате работы была разработана математическая модель движения морских объектов глайдерного типа в трехмерной среде, была произведена оценка ее адекватности, определен отклик модели на изменения регулируемых параметров движения. Продемонстрированы примеры работы разработанной модели при различных управляющих параметрах.

Для данного устройства уже разработана модель продольного движения на основе позиционно-траекторного регулятора [1]. Данный тип регулятора находит широкое применение для управления морскими подвижными объектами [6]. В рамках дальнейших работ, планируется разработка системы управления на позиционно-траекторного регулятора для движения в трехмерной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Maevskiy A., Gurenko B., Kulchenko A., Beresnev M.* The Structure of Automatic Control Systems for Underwater Gliders //Proceedings of the 4th International Conference on Control, Mechatronics and Automation. – АСМ, 2016. – С. 88-91. – Doi: 10.1145/3029610.3029640.
2. *Сухоруков А.Л., Тутов М.А.* Об использовании эффекта планирования для движения подводных аппаратов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* – 2012. – № 4. – С. 88-101.
3. *Сухоруков А.Л., Тутов М.А.* Об устойчивости подводного планера-глайдера на балансирующих режимах движения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* – 2016. – Т. 9, № 3.
4. *Рождественский В.В.* Динамика подводной лодки. – Изд-во «Судостроение», 1970.
5. *Joshua Grady Graver.* Underwater gliders: dynamics, control and design. Princeton University, 2005.
6. *Пищухов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009.
7. *Гуренко Б.В., Назаркин А.С.* Реализация и идентификация параметров автономного обитаемого подводного аппарата типа глайдер // *ИВД.* – 2015. № 4-1. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-i-ident..> (дата обращения: 17.04.2017).
8. *Маевский А.М.* Методы исследования гидродинамики подводных объектов. Материалы 6-й школы-семинара «Молодежно-студенческие разработки и творческие проекты для исследования и освоения прибрежно-шельфовых зон юга России». – Геленджик: Филлал ЮФУ в г. Геленджике, 2015. – С. 38-43.
9. *Кожмякин И.В., Блинков А.П., Рождественский К.В., Рыжов В.А., Мелентьев В.Д., Занин В.Ю.* Перспективные платформы морской робототехнической системы и некоторые варианты их применения // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2016. – № 1 (174).
10. *Graver J.G.* Underwater gliders: dynamics, control and design; K. Lei, Z. Yuwen, F. Hui, Y. Wugang, C. Zhikun – MATLAB-Based Simulation of Buoyancy-Driven Underwater Glider Motion.

УДК 620.90

Ф.М. Рахимов

**ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК
ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Работа посвящена проблеме энергообеспечения мало мощных "портативных" потребителей. Предлагается применение мобильных ветроэнергетических установок в качестве возобновляемого источника энергии для энергообеспечения мало мощных потребителей. Рассматривается конструкция вертикально - осевой ветроустановки карусельного типа специальной конструкции.

Возобновляемые источники энергии, мобильные источники, ветровые энергетические установки, эксплуатация, транспортировка.

F.M. Rahimov

APPLICATION OF MOBILE WIND POWER PLANTS FOR ENERGY SUPPLY OF SMALL CONSUMERS

The paper is devoted to the problem of power supply to low-power "portable" consumers. It is proposed to use mobile wind power plants as a renewable energy source for energy supply to low-power consumers. The design of a vertical - axial wind-driven carousel type of a special design is considered.

Renewable energy sources, mobile sources, wind power plants, operation, transportation.

В современном мире уровень развития техники и цифровых технологий достаточно высок. Практически все сферы жизни человека и общества оснащены новейшими разработками. Все большую популярность набирают портативные цифровые аппараты и устройства различного назначения, которые питаются от встроенных или внешних источников – аккумуляторных батарей. Аккумуляторные батареи имеют свойство разряжаться, это вызывает необходимость наличия внешнего источника питания для их подзарядки.

Технология мобильных (портативных) источников энергии развивается параллельно с технологией портативных цифровых аппаратов и устройств. В последнее время активно развиваются мобильные источники энергии на базе таких устройств возобновляемой энергетики, как солнечные панели, микрогидроэлектростанции, ветровые энергоустановки, а также аккумуляторные батареи небольшого размера. Наибольшую популярность получили солнечные фотоэлектрические панели (ФЭП) и аккумуляторные батареи (АБ) различного типоразмера. Однако обе имеют очевидные недостатки, связанные с надежностью и эффективностью. Работа первых полностью зависит от наличия солнечного света, вторые же имеют ограниченный цикл использования. Альтернативным вариантом для решения данной задачи могут стать мобильные ветровые энергетические установки малой мощности.

Мобильные ветровые энергоустановки (ВЭУ) могут стать хорошим решением в тех случаях когда необходимо решить проблему портативного электроснабжения, например, на территориях, пострадавших в результате стихийного бедствия, при полевых геолого-разведывательных исследованиях, при мониторинге окружающей среды, в туристических лагерях, для подсветки дорожных знаков и т.п.

Лидерами по производству ВЭУ малой мощности являются Китай, Дания, Германия, США и ряд других стран. На сегодняшний день широкое распространение получили в основном горизонтально-осевые ветродвигатели, мощность которых зависит от ометаемой площади ветроколеса и направления ветра. В то же время в последние два десятилетия наблюдается интерес к использованию вертикально-осевых ветродвигателей, обладающих рядом преимуществ перед горизонтально-осевыми ветродвигателями. Основными преимуществами вертикально-осевых ветродвигателей являются независимость от направления ветра и работа при турбулентности ветрового потока [1].

Мобильную ветровую энергоустановку проще и выгоднее транспортировать, чем обычные солнечные панели и аккумуляторных батареи, объем мощности которых прямо пропорционален их габаритам и весу.

Среди всего многообразия конструктивных вариантов исполнения ВЭУ вертикальной оси, конструкция установки карусельного типа в качестве мобильной версии является наиболее подходящей (рис. 1 [2]).

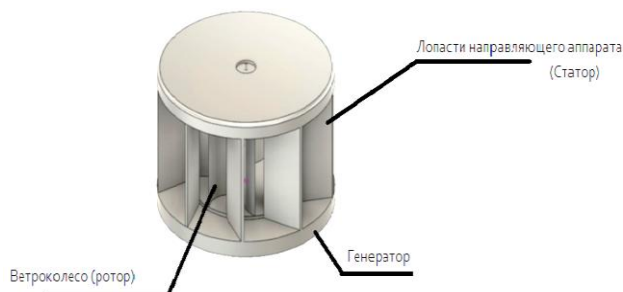


Рис. 1. Общий вид мобильной ветровой энергетической установки вертикальной оси [2]

Мобильная ветровая энергетическая установка, разработанная авторами [2], решает задачи обеспечения компактности установки, простоты эксплуатации, мобильности и скорости развертывания ВЭУ для работы.

Техническим результатом, получаемым совокупностью приведенных признаков, является снижение массивности и громоздкости ветровой энергоустановки до уровня, обеспечивающего возможность транспортировки одним человеком. Также лопасти внешнего контура имеют механизм, обеспечивающий функцию развертывания и свертывания. При необходимости транспортировки лопасти внешнего контура (статора) свертываются, что уменьшает ширина (диаметр) турбины в зависимости от типоразмера на 17–25 %, тем самым позволяя удобно перевозить. Порядок приведения в рабочее состояние ВЭУ происходит быстро с помощью специального механизма с рукояткой (на рисунке не показан): лопасти статора развертываются в рабочее положение и фиксируются.

В зависимости от материала и технологии изготовления, вес мобильной ВЭУ ниже равномогной генерирующей установки, использующей другие виды источников энергии. При использовании технологии изготовления лопастей статора из гибких материалов предполагается сокращение веса мобильной ВЭУ на 5–8 % [2].

Предполагается, что разработанная мобильная ВЭУ найдёт применение для электроснабжения портативных (маломощных) устройств в таких сферах, как полевые геолого-разведывательные исследования, мониторинг окружающей среды, туристические лагеря, дорожных знаков и т.п.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фатеев Е.М.* Ветродвигатели и ветроустановки. – М.: Сельхозиздат, 1957. – 536 с.
2. Патент РФ на полезную модель №174578 / Кончаков Е.И., Таскин А.В., Рахимов Ф.М., Силин Н.В. Мобильная ветровая энергоустановка. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений РФ 02.02.2017, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
3. *Кончаков Е.И.* Исследование гибкой лопатки с изменяемой геометрией / Е.И. Кончаков, Н.С. Дружинин // Сб. материалов науч. конф. «Вологдинские чтения». – Владивосток: ДВФУ, 2012. – С. 139-140.

УДК 62-5

А.П. Панфилов

ВИРТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ*

Целью исследования является разработка виртуальной системы управления беспилотными летательными, наземными и подводными аппаратами. Использование графических сред разработки позволяет существенно облегчить моделирование беспилотных систем, для людей не знакомых с программированием при помощи императивных языков программирования. Примерами таких сред разработки являются Labview и SketchUp. Дана формальная постановка задачи построения моделей в представленных средах разработки, на основе данных моделей необходимо создать работающий прототип. Предложено данную задачу разбить на четыре подзадачи и решать ее поэтапно. Сначала разрабатывается модель беспилотного аппарата в SketchUp. Вторым этапом будет создание модели управляющего устройства в LabView. Следом на основе результатов моделей будет построен беспилотный аппарат и проведены полевые испытания системы. В конце, по ито-

* Работа выполнена в рамках диссертации на тему «Стабилизация характеристик полета малогабаритного квадрокоптера».

гам полевых испытаний, будут введены корректировки в моделях. Успешным выполнение данных задач будет считаться точное следование по проложенному курсу с учетом влияния внешних сил, таких как ветер, подводные течения и т.д. На данный момент разработана система управления двигателями в среде Labview и построена модель мультироторного летательного аппарата в SketchUp.

Виртуальная система управления, графическая среда разработки, беспилотная система, летательные и подводные аппараты, модель.

A.P. Panfilov

VIRTUAL SYSTEMS OF MODELING OF UNBEATURAL APPARATUS

Goal of this research is to develop virtual guidance system for airborne, land and underwater unmanned vehicles. Usage of the graphical design environment allows to considerably simplify modelling of unmanned systems for users not familiar with imperative programming languages. Such examples are Labview and SketchUp. Formal statement of the problem is building models in these programming languages and based on those models producing a working prototype. To solve that problem proposed to divide it into four subtasks and settle them step by step. Firstly, we develop vehicle model in SketchUp. Secondly, we create control unit model in LabView. Next, based on these models is built prototype and conducted field testing. At last, according to the results of aforementioned testing in the models will be added necessary adjustments. Final goal is exact following of the laid course with account for external influence such as wind, undercurrent, etc. Currently, we developed engine guidance system in LabView and built a model of multi rotation aircraft in SketchUp.

Virtual guidance system, graphical design environment, unmanned system, airborne and underwater vehicles, model.

Введение. В настоящее время растет необходимость использования автономных робототехнических системам. Основными задачами, такими системами, являются: разведка, патрулирование, съемка и т.п. Однако проектирование данных систем очень сложный процесс. И для упрощения этого процесса необходимы эффективные системы компьютерного моделирования. Графические среды разработки наиболее удобны и понятны, и именно по этому их стоит использовать, при моделирование. Данная работа посвящена разработке программы для создания моделей беспилотных аппаратов.

Формальная постановка задачи. Допустим, что нам необходимо разработать модель беспилотного летательного аппарата, например квадрокоптера. Для этого необходимо разобраться в его устройстве. В состав разрабатываемого нами квадрокоптера должны входить: полетный контроллер, четыре бесколлекторных двигателя с регуляторами оборотов для каждого двигателя, источник питания, приемник.

Для построения такого квадрокоптера была создана модель в SketchUp, рис. 1.

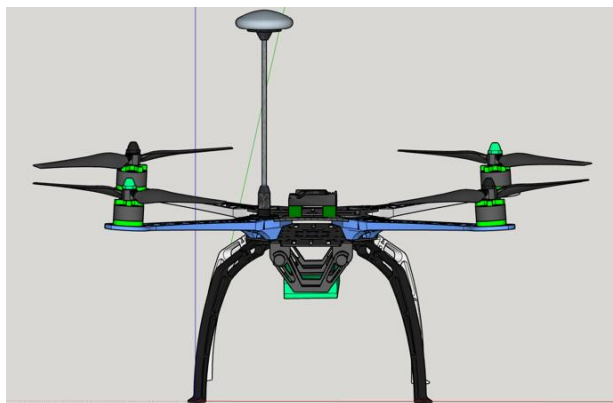


Рис. 1. Модель квадрокоптера в SketchUp

На основе данной модели были выбраны следующие материалы, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Материалы для построения квадрокоптера

ArduPilot Mega или APM	Arducopter v2.8
Двигатели	Readytosky RS 2212-920kv
Регуляторы оборотов	Readytosky SIMONK30A
Приёмник	Flysky FS-ia6b
Источник питания	ZOP Power 11.1V 3300MAH 3S 35C Lipo Battery XT60 Plug
GPS модуль	G-model UBLOX NEO-7M

Полетный контроллер ArduPilot Mega является полноценным решением БПЛА (Беспилотного Летающего аппарата UAV), который позволяет помимо радиоуправляемого дистанционного пилотирования – автоматическое управление по заранее созданному маршруту, т.е. полет по точкам, а так же обладает возможностью двухсторонней передачей телеметрических данных с борта на наземную станцию (телефон, планшет, ноутбук, DIY) и ведение журнала во встроенную память.

Он основан на автопилоте APM 2.x, разрабатываемым сообществом DIY Drones и базирующийся на open-source проекте, позволяющий превратить любой аппарат в автономное средство и эффективно использовать его не только в развлекательных целях, но и для выполнения профессиональных проектов.

Маленькие качественные высокооборотистые двигатели Readytosky RS 2212-920kv подходят как для небольших самолетов, так и для коптеров. Скорость вращения 2300 оборотов на вольт. Два мотора прямого вращения и два обратного.

Регуляторы Readytosky SIMONK30A имеют внутри программный и аппаратный фильтры, сглаживающий реакцию на резкие скачки управляющего воздействия. Принцип стабилизации мультироторных аппаратов основан на изменении тяги каждого ротора в отдельности. Чем более отзывчив будет регулятор, тем лучше будет стабилизация, меньше колебания, и т.п.

Flysky FS-ia6b 6-канальный приемник отлично подходит к любой модели квадрокоптера. Дальностью приема и передачи более 500 метров.

GPS модуль с встроенным компасом помогут квадрокоптеру ориентировать в пространстве и идти по проложенному курсу.

На данный момент идут работы по построению данного квадрокоптера.

Подзадача разработки системы управления в Labview. Для решения данной подзадачи была разработана программа для управления двигателями квадрокоптера, представленная на рис. 3. и 4.

Представленная программа позволяет генерировать сигнал управления несколькими двигателями в режиме реального времени. Программа была испытана и работает с любыми двигателями, что делает ее очень универсальной. Она очень проста и может использоваться в учебных целях.

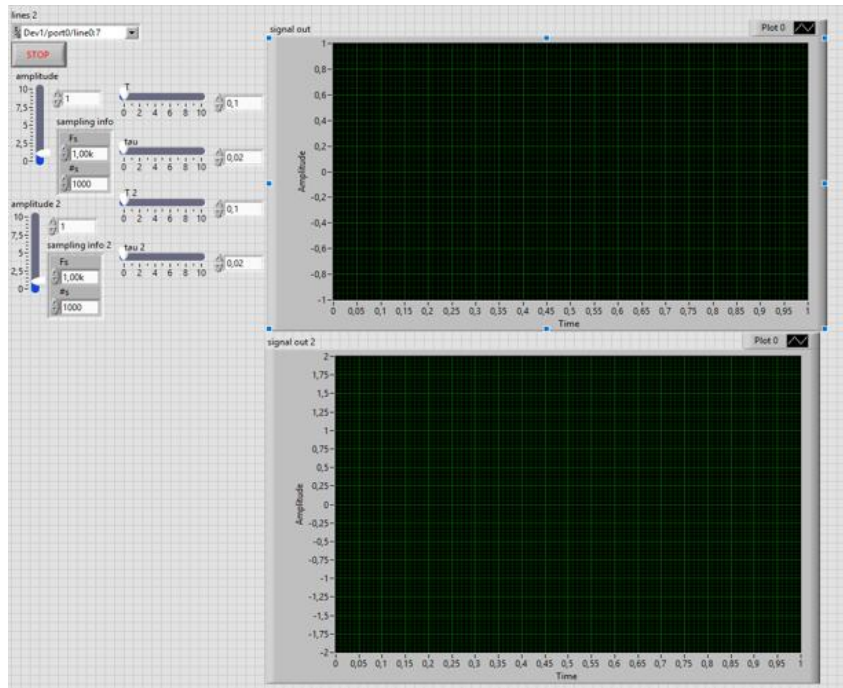


Рис. 3. Система управления двигателями квадрокоптера. Лицевая панель

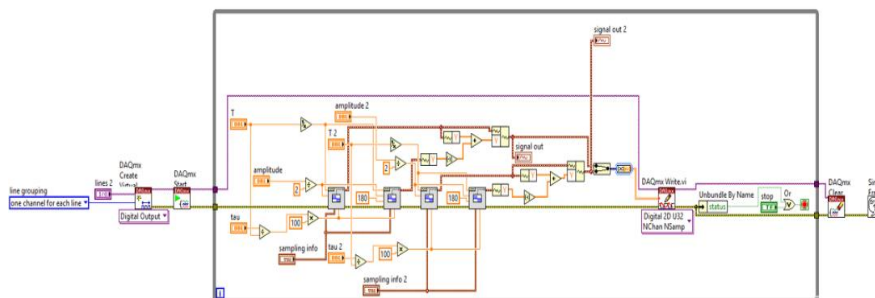


Рис. 4. Система управления двигателями квадрокоптера. Схема устройства

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

Предложенная в работе виртуальная система очень простая и понятная, что делает ее очень удобной для разработки таких сложных систем как беспилотные аппараты. Данная система позволит разработчику, не углубляясь в тонкости программирования, создать летательный, наземный или подводный аппарат.

На данный момент виртуальная система моделирования беспилотных аппаратов еще находится на стадии разработки, но уже показывает себя, как очень удобный инструмент моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prof. Dr. Christoph Ament. Robotics and Autonomous Systems // 2015 Published by Elsevier B.V. – 2015. – № 2. – С. 1-2.
2. Lorenzo Migliorinia, Tommaso Santanielloa, Yunsong Yana, Cristina Lenardia, Paolo Milani 0925-4005/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved. – 2016. – 0925-4005– С. 758-766.

3. *Eleni Kelasidi, Pal Liljebäck, Kristin Y. Pettersen, and Jan Tommy Gravdahl.* IEEE Robotics and Autonomous Systems // 2015 Published by Elsevier B.V. – 2016. – 10.1109/MRA.2015.2506121. – C. 44-62.
4. *Chunfeng Yue, Shuxiang Guo, Liwei Shi* *Microsyst. Technol* // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2015. – DOI 10.1007/s00542-015-2471-1. – P. 831-840.
5. *Stefano Mintchev, Raffaele Ranzani, Filippo Fabiani, Cesare Stefanini.* Towards docking for small scale underwater robots // 2014 Published by The BioRobotics Institute, Auton Robot. – 2014. – DOI 10.1007/s10514-014-9410-3. – C. 283-299.
6. *Fossen T.I.* Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
7. *Kelasidi E., Pettersen K.Y., Gravdahl J.T., and Liljebäck P.* Modeling of underwater snake robots // in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Hong Kong, China, May 31–June 7, 2014. – P. 4540-4547.
8. *Liljebäck P., Pettersen K.Y., Ø. Stavdahl, and Gravdahl J.T.* Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control. Berlin, Germany: Springer-Verlag, Advances in Industrial Control, 2013.
9. *Liljebäck P., Pettersen K.Y., Ø. Stavdahl, and Gravdahl J.T.* A review on modelling, implementation, and control of snake robots // Robot. Autonomous Syst. – 2012. – Vol. 60, no. 1. – P. 29-40.
- A. *Transeth A. and Pettersen K.Y.* Developments in snake robot modeling and locomotion // in Proc. 9th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Dec. 5–8, 2006. – P. 1-8.
10. *Gray J.* Studies in animal locomotion // J. Exp. Biol. – 1933. – Vol. 10, no. 1. – P. 88-104.
11. *Hirose S.* Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 1993.
12. *Casbeer D.W. [et al.].* Forest fire monitoring with multiple small UAVs // Proceedings of the 2005 American Control Conference. – 2005. – P. 3530-3535.
13. *Puri A., Valavanis K.P., Kontitsis M.* Statistical Profile Generation for Traffic Monitoring Using Real-time UAV based Video Data // Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on. IEEE, 2007. – P. 1-6.
14. *Tonetti S., Hehn M., Lupashin S., D'Andrea R.* Distributed control of antenna array with formation of UAVs // In World Congress. – 2011, August. – Vol. 18, No. 1. – P. 7848-7853.
15. *Hirose S. and Yamada H.* Snake-like robots [tutorial] // IEEE Robot. Automat. Mag. – 2009. – Vol. 16, no. 1. – P. 88-98.
16. *Crespi R., Badertscher A., Guignard A., and Ijspeert A.J.* Amphibot I: an amphibious snake-like robot // Robot. Autonomous Syst. – 2005. – Vol. 50, no. 4. – P. 163-175.
17. *Liljebäck P., Pettersen K.Y., and Stavdahl Ø.* A snake robot with a contact force measurement system for obstacle-aided locomotion // in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Anchorage, AK, May 3–7, 2010. – P. 683-690.
18. *Acosta G.G.; Calvo Ibanez O.A.; Curti H.J.; Rozenfeld A.F.* Low-cost autonomous underwater vehicle for pipeline and cable inspections // In Proceedings of the Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, Tokyo, Japan, 17–20 April 2007. – P. 331-336.
19. *Diercks A.R., Asper V.L., Highsmith R., Woolsey M.* MIUST—Deepwater horizon oil spill response cruise. In Proceedings of the OCEANS, Seattle, WA, USA, 20–23 September 2010. – P. 1-7.
20. *Kaninski C., Crees T., Ferguson J., Forrest A.* 12 days under ice—an historic AUV deployment in the Canadian high arctic. In Proceedings of the 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Monterey, CA, USA, 1–3 September 2010. – P. 1-11.

СОДЕРЖАНИЕ

В.Г. Довгань РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВЗЯТИЯ И ДОСТАВКИ НА ЗЕМЛЮ ЛУННОГО ГРУНТА.....	7
СЕКЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РТК МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ, В Т.Ч. ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ДРУГИМИ ВИДАМИ РТК И ТРАДИЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ ВВСТ	
Ю.В. Матвиенко, А.Ф. Щербатюк КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОБИЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ.....	33
Е.М. Апполонов, А.А. Бачурин, А.И. Горохов, Л.О. Пономарев О ВОЗМОЖНОСТИ И НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ СВЕРХБОЛЬШОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА.....	34
К.З. Лаптев, А.Г. Квашнин МИНИ-ТОРПЕДЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	42
А.И. Машошин, И.В. Пашкевич ОБЛИК ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ	46
А.В. Багницкий, А.В. Воронцов, Г.Ю. Илларионов, С.В. Мальцева, Д.М. Сонькин, Ю.А. Чурсин АНПА "ПЛАТФОРМА" – МНОГОЦЕЛЕВОЙ НОСИТЕЛЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	52
А.И. Боровик, С.Б. Гудименко, Л.А.Наумов СВЕРХМАЛЫЙ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ «ГОЛОВАСТИК».....	57
И.О. Артамонов, Р.А. Дурнев, А.Ф. Шаклеин ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ БОЕВОЙ ЭКИПИРОВКИ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ .	60
А.А. Борейко, А.В. Воронцов, Д.Н. Михайлов, Ю.В. Матвиенко, В.В. Негода, А.Ф. Щербатюк СОВРЕМЕННЫЙ ОПЫТ ВЫПОЛНЕНИЯ МОРСКИХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ, РАЗРАБОТАННЫХ В ИПМТ ДВО РАН	65
А.К. Насонов, М.И. Панкратов, Ю.А. Чурсин РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕЗЭКИПАЖНОГО КАТЕРА ПРОМЕЖУТОЧНОГО КЛАССА	66
В.А. Шурыгин, В.А. Серов, И.В. Ковшов, С.А. Устинов КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ШАГАЮЩИХ ПЛАТФОРМ	69
Б.А. Скороход ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ ПЛАВАНИИ СУДНА В АВТОНОМНЫХ РЕЖИМАХ	73
Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин, Ю.А. Хворостов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЁМНИКОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	79
Г.Ю. Илларионов, А.А. Карпачёв, А.В. Матвиенко МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В КОНФЛИКТНОЙ СРЕДЕ.....	83

А.С. Болдырев, Л.С. Веревкина, А.Л. Вережкин АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО БЕСПИЛОТНИКА НА БАЗЕ РАКЕТЫ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ.....	90
Н.А. Рудянов, В.С. Хрущев ФОРМИРОВАНИЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К РАЗРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РОБОТИЗИРОВАННОГО ВООРУЖЕНИЯ.....	99
Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ - ШОЛТЕ В ПРОБЛЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОШУМНЫХ ОБЪЕКТОВ В МЕЛКОМ МОРЕ	108
В.В. Горбачкий, Д.И. Дудко, Е.С. Лебедева, Н.Н. Шпилёв ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ АНПА В ОТКРЫТОМ ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ КГНЦ	112

**СЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ
ЭНЕРГЕТИКИ И ПРИВОДНОЙ ТЕХНИКИ РТК МОРСКОГО
БАЗИРОВАНИЯ**

С.Д. Лихоносов, Н.А. Проценко, В.П. Кулыга, А.Н. Петров, И.В. Горбачева, С.И. Щеколдин ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПАО «САТУРН» В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ.....	117
В.М. Рулевский, Р.В. Мещеряков РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ.....	126
А.Л. Береснев, М.А. Береснев УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТОНАЦИИ В ХОДОВОМ ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.....	131

**СЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ, В Т.Ч. ГРУППОВОГО, И МОДЕЛИРОВАНИЯ РТК
МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

Л.В. Киселев, А.В. Медведев ПАТРУЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ РУБЕЖЕЙ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ.....	140
Ю.Б. Аллакулиев КОНЦЕПЦИЯ БЕРЕГОВОГО ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ РОБОТАМИ ДАЛЬНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ.....	148
В.А. Серов, С.А. Устинов, В.И. Максименко БОРТОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	156
А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеев КОНТРОЛЬНО-АВАРИЙНАЯ СИСТЕМА ВЫСОКОГО УРОВНЯ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ	159
Д.А. Андриков МАТРИЧНЫЙ ПОДХОД И ТЕОРИЯ ХАОСА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.....	163
А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеев, М.А. Панин АЛГОРИТМЫ МОНИТОРИНГА АКВАТОРИИ С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ	168

И.В. Сидько, О.Г. Рюмин, А.Д. Ледовской, В.Р. Юшенко ОБЗОР СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.....	173
А.Н. Зиневич, М.В. Китаев АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ	181
В.К. Абросимов, А.Н. Мочалкин СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГРУППАХ АВТОНОМНЫХ БОЕВЫХ РОБОТОВ	188
А.В. Инзарцев, А.В. Багницкий ПЕРЕПЛАНИРОВАНИЕ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОКРЫТИЯ АКВАТОРИИ НА БОРТУ АНПА.....	200
СЕКЦИЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ РТК ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
В.Н. Фролов, В.А. Тупиков, А.Д. Барабанов, Э.Б. Ханов СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ЗАКРЫТОЙ ЗОНЫ ПРОСТРАНСТВА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ	205
В.В. Абраменков, А.Д. Гаврилов ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	211
СЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ И СРЕДСТВ СВЯЗИ, НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ РТК МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ	
Л.В. Резникова МЕТАПОВЕРХНОСТНЫЕ ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ, АКТУАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ.....	218
П.Н. Анисимов, Д.А. Кузин ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ СЕТИ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T2.....	225
Л.И. Куликов, В.В. Щербинин ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ БЛА.....	233
Е.С. Басан, О.Б. Макаревич, А.А. Степенкин АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ АКТИВНЫХ АТАК НА ГРУППУ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ	234
СЕКЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РТК МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ	
С.М. Соколов, С.Г. Цариченко, В.В. Демьянов, А.А. Богуславский, Н.Д. Беклемишев, О.В. Трифионов МОБИЛЬНЫЕ МОДУЛИ СТЗ ДЛЯ НАВИГАЦИИ, НАПОЛНЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТ И МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ.....	244

**МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР
«УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ»**

И.В. Шестаков, И.А. Путинцев, К.Н. Сандревская, А.А. Сенишин, М.И. Базанов, В.Р. Смирнов, И.И. Дурягин ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ УЧАСТИЯ В СОРЕВНОВАНИЯХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ	245
И.А. Мажирин, С.В. Глушков УПРОЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА ИЛИ ПЛАВАТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА С ДВИЖИТЕЛЬНО- РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ ИЗ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ.....	255
К.А. Суров, А.М. Маевский РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ГЛАЙДЕРНОГО ТИПА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЕ.....	262
Ф.М. Рахимов ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ	270
А.П. Панфилов ВИРТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ	272

Научное издание

**«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ
И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ»**

**МАТЕРИАЛЫ XIII ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

И IX МОЛОДЁЖНОЙ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА

**«Управление и обработка информации
в технических системах»**

Подписано в печать 27.03.2018.

Формат 70×108 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 35,0. Уч.-изд. л. 31,7.

Тираж 300 экз. Заказ № .

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863) 247-80-51.