

Государственный научный центр Российской Федерации  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
Санкт-Петербург

4-6 октября 2022 г.

# 15 МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (15 МКПУ-2022)



**МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ РЯД КОНФЕРЕНЦИЙ,  
ОБЪЕДИНЕННЫХ ОДНОЙ ИДЕЕЙ:**

XXXIII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА  
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н.Н.ОСТРЯКОВА

«МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ» (МТУИП-2022)

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ» (ИТУ-2022)

«УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ИМ. АКАДЕМИКА Е.А.МИКРИНА» (УАКС-2022)

«УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2022)

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ «УПРАВЛЕНИЕ  
В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2022)**

# 15-я МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ



4–6 октября 2022 г.  
ГНЦ РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»  
Санкт-Петербург

МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ РЯД КОНФЕРЕНЦИЙ,  
ОБЪЕДИНЕННЫХ ОБЩЕЙ ИДЕЕЙ:

- XXXIII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова
- «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2022)
- «Математическая теория управления и ее приложения» (МТУИП-2022)
- «Управление в аэрокосмических системах» (УАКС-2022) имени академика Е.А. Микрина
- «Управление в морских системах» (УМС-2022)

## **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2022)**

**4–6 ОКТЯБРЯ**

Санкт-Петербург  
2022

УДК 681.51

Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2022). СПб.: АО  
«Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022, 166 с.

В настоящий сборник вошли тексты расширенных рефератов докладов, состоявшихся на  
конференции «Управление в морских системах» (УМС-2022).  
Тексты публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-91995-087-5

© Государственный научный центр Российской Федерации  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022

## **ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ГРУППА РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ» ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
- УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РАН
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А.ТРАПЕЗНИКОВА РАН
- ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВМФ «ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ АДМИРАЛА ФЛОТА СОВЕТСКОГО СОЮЗА Н.Г.КУЗНЕЦОВА»
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ («ГОСНИИАС»)
- РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ «ЭНЕРГИЯ» ИМЕНИ С.П.КОРОЛЁВА
- АО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

## **ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:**

- ОТДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ»
- ЖУРНАЛА «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»

## **ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРЕЗИДИУМА**

15-Й МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ  
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»  
АКАДЕМИК РАН **В.Г. ПЕШЕХОНОВ**

### **XXXIII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ Н.Н.ОСТРЯКОВА**

Председатель программного комитета  
Академик РАН **В.Г. Пешехонов**

Заместители председателя программного комитета:  
Член-корреспондент РАН **О.А. Степанов**  
к.т.н. **А.В. Соколов**

### **КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ» (МТУиП-2022)**

Сопредседатели программного комитета:  
Академик РАН **Д.А. Новиков**  
Член-корреспондент РАН **Н.В. Кузнецов**

### **КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ» (ИТУ-2022)**

Сопредседатели программного комитета:  
Член-корреспондент РАН **В.Н. Васильев**  
д.т.н., проф. **В.Н. Шелудько**  
Член-корреспондент РАН **Р.М. Юсупов**

### **КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УАКС-2022)**

Сопредседатели программного комитета:  
Академик РАН **С.Ю. Желтов**  
Академик РАН **В.А. Соловьев**  
Член-корреспондент РАН **М.В. Сильников**

### **КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2022)**

Сопредседатели программного комитета:  
Академик РАН **Е.И. Якушенко**  
Академик РАН **С.Н. Васильев**  
Член-корреспондент РАН **А.Ф. Щербатюк**

СОДЕРЖАНИЕ

Секция №1. Робототехнические комплексы.

<b>Волкова Т.А., Каретников В.В.</b> Система управления движением автономных судов, эксплуатируемых на внутренних водных путях, строящаяся на основе нейронной сети.....	8
<b>Митин О.В., Сагадеева М.А., Загребина С.А.</b> Исследование возможности уточнения результатов эмпирических моделей ионосферы локальными данными, получаемыми в режиме реального времени .....	11
<b>Корякин А.В., Ланцов В.В., Мартынова Л.А.</b> Формирование комплекса обнаружения беспилотного летательного аппарата – элемента морской роботизированной системы .....	20
<b>Ланцов В.В., Корякин А.В., Мартынова Л.А.</b> Мультиагентный подход в задаче определения параметров движения обнаруженного объекта .....	24
<b>Тимошенко А.А., Зуев А.В., Мурсалимов Э.Ш., Грибова В.В., Инзарцев А.В.</b> Подход к описанию и диагностированию неисправностей в автономных подводных роботах на основе онтологий .....	28
<b>Козик С. В., Сибилев В. А.</b> Совершенствование средств навигации по небесным светилам .....	32
<b>Смоленцев Л.Б.</b> Взаимодействие агентов в задаче расхождения безэкипажных судов .....	36
<b>Лаговский Б.А., Рубинович Е.Я.</b> Экстраполяция сигналов как метод достижения углового сверхразрешения.....	40
<b>Быкова В.С., Машошин А.И.</b> Цифровой полигон для отработки системы управления автономного необитаемого подводного аппарата.....	44
<b>Быкова В.С., Машошин А.И., Смирнов А.С.</b> О подходе к распознаванию донных объектов с использованием средств мониторинга дна, работающих на разных физических принципах.....	47
<b>Машошин А.И., Пашкевич И.В., Шафранюк А.В.</b> Эмулятор гидроакустического канала для оценки характеристик гидроакустических модемов .....	51
<b>Николаев А.С., Колесников М.П.</b> Определение положения подводного аппарата относительно группы гидроакустических маяков.....	55
<b>Пелевин А.Е., Зайцев О.В.</b> Автоматическая посадка автономного необитаемого подводного аппарата на платформу в заданную позицию .....	59
<b>Скорородумов Б.А., Фатеев С.И., Стаценко А.В., Жилыков П.В., Ляшко А.Д.</b> Анализ эффективности алгоритмов предобработки и выделения ключевых точек в задаче подводной видео одометрии .....	63
<b>Мальшкин Г.С.</b> Эксперимент по обнаружению и элементам классификации гидроакустических сигналов на основе анализа адаптивно сформированных траекторий источников .....	66
<b>Мельканович В.С.</b> Адаптивная реализация корреляционного приёма сигналов для многоэлементных гидроакустических антенных решеток .....	70
<b>Скородумов Ю.М., Лукоянов Е.В., Торопов А.Б., Мухин Д.А.</b> Результаты разработки и испытаний макета аппаратно-программных средств сетевой гидроакустической связи .....	74
<b>Мельканович В.С.</b> Подавление локальных помех малой мощности для многоэлементных гидроакустических антенных решеток .....	79
<b>Шафранюк А.В., Тарановский Д.О.</b> Обзор методов прокладки траектории АНПА для решения различных задач.....	83
<b>Шафранюк А.В., Добриков Д.А.</b> Имитационное программное обеспечение для расчёта сигнала гидроакустического модема при его прохождении через водную среду .....	87

Секция №2. Управление морскими объектами и их скрытностью.

<b>Гурьев Ю.В., Михайлов Е.Н., Слуцкая М.З.</b> Прогнозирование гидродинамических реакций в задачах управления движением морских подводных объектов.....	92
<b>Бузиков М.Э., Васильев С.Н., Галяев А.А., Лысенко П.В., Самохин А.С., Самохина М.А., Залетин В.В., Якушенко Е.И.</b> Модель группового противодействия системе самонаведения.....	95
<b>Мартынова Л.А., Корякин А.В., Ланцов В.В.</b> Управление системой безопасности морского обитаемого объекта .....	98
<b>Босомыкин Д.В., Сарьян В.К., Захарова А.А., Мещеряков Р.В.</b> Повышение эффективности управления жизненным циклом морских систем за счет использования информационно-управляющих систем .....	103
<b>Дерябин В. В.</b> Использование нейронных сетей для прогноза скорости дрейфа судна .....	107
<b>Федотов Г.А.</b> О влиянии конфигурации и ориентации системы датчиков давления на точность измерения плотности морской среды гидростатическим методом .....	110
<b>Гусев Л.Б., Самычко Ю.С.</b> Интеллектуальная система управления процессом проектирования ядерных энергетических установок.....	114
<b>Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Жирабок А. Н., Проценко А.А.</b> Самонастраивающееся корректирующее устройство для электроприводов подводных манипуляторов.....	119
<b>Быков Д.В., Горбачёв В.А., Иванов Б.Г., Липидус А.Я.</b> Алгоритм автоматической классификации потенциальных рисков эксплуатации судовых энергетических установок.....	123
<b>Быков Д.В., Горбачёв В.А., Иванов Г.В., Шульган В.А.</b> Методические основы управления прогнозированием характеристик энергетических установок перспективных кораблей и судов .....	129
<b>Быков Д.В., Колесник В.А., Ануфриев В.И., Бабичев В.С.</b> Исследование передаточных функций устройств гашения гидравлического удара различного принципа действия.....	136
<b>Калиничев К.И., Светличный В.А.</b> Использование модели дипольных источников в задачах низкочастотной электромагнитной защиты морских объектов .....	143
<b>Гусев Л.Б., Белов А.В., Горшков А.А.</b> Учет отказов по общей причине при проектировании корабельных ядерных энергетических установок .....	147
<b>Бородин И.К., Кулаков К.С., Залетин В.В.</b> Управление мощностью двигателя корабля на основе результатов компьютерного моделирования движения в многофазной среде.....	151
<b>Юсупов А.Н., Попов Д.С., Кулаков К.С., Якушенко Е.И.</b> Интеграция риск-ориентированных технологий в систему интеллектуального управления роением беспилотных аппаратов.....	155
<b>Сильников М. В., Лазоркин В. И.</b> Модель оптимизации состава и характеристик объектов базирования, тылового и технического обеспечения соединения кораблей .....	158
<b>Васильев С.Н., Галяев А.А., Залетин В. В., Кулаков К.С., Савицкий О.А., Сильников М.В., Якушенко Е. И.</b> Применение электрогидравлического эффекта для формирования периодических импульсных гидроакустических сигналов для зондирования геосреды .....	161
<b>Васильев С.Н., Галяев А.А., Залетин В.В., Кулаков К.С., Савицкий О.А., Сильников М.В., Якушенко Е.И.</b> Совместное использование подводных мехатронных систем для повышения эффективности сейсмоакустического зондирования донных структур .....	164

## СЕКЦИЯ 1. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ



Т.А. ВОЛКОВА, В.В. КАРЕТНИКОВ  
(ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»,  
Санкт-Петербург)

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ СУДОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ, СТРОЯЩАЯСЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

*В работе рассматриваются предложения по организации системы управления движением автономных судов, предназначенных для эксплуатации на внутренних водных путях. Применение таких судов осуществляется в сложных с навигационной точки зрения условиях, что предъявляет особые требования к их системам управления. В таком случае одним из конструктивных решений может считаться применение нейронных сетей в качестве основного элемента системы управления. Однако для обучения подобных нейронных сетей требуется достаточно большое количество данных, что может вызвать определенные трудности.*

**Введение.** В настоящее время у специалистов, в области обеспечения безопасности судоходства вызывают вопросы, связанные с интеграцией безэкипажных, беспилотных, а также автономных судов [1] в единую систему. Такое включение подразумевает прямое взаимодействие указанных типов судов с традиционными, причем это взаимодействие будет происходить на реальных водных акваториях. Для этого необходимо гармонизировать достаточно большое количество условий, одним из которых является система управления движением. Из анализа данной предметной отрасли [2] видно, что одним из наиболее активно развивающихся направлений является применение нейронных сетей в качестве основного узла системы управления движением. Такое решение обусловлено быстротой принятия решения нейронной сетью, по сравнению с существующими методами принятия управленческого решения. В тоже время, как известно, [3] для того, чтобы получать качественные решения от нейронной сети с приемлемой точностью для ее обучения необходимо иметь большое количество данных, получаемых из различных источников. Также для обучения требуется использование достаточно большого количества вариаций управленческих решений.

**Компоновка текстового материала.** Таким образом для создания работоспособной системы управления движением автономных судов, строящейся на основе нейронных сетей вопрос обучения, а значит и данных, необходимых для проведения обучения представляется крайне важным. Набор таких данных должен включать скорость, курс и координаты местоположения судна, а также, направление и скорость ветра, уровень реки и скорость течения. Здесь необходимо отметить, что статистические данные необходимые для обучения нейронной сети должны отвечать множеству критериев [4], например: вариативность, структурированность и достоверность.

Зная о данной проблеме, еще на этапе проектирования были определены требования к качеству и формату исходных данных для обучения нейронной сети. Река Нева с навигационной точки зрения представляется достаточно сложным районом. В качестве наиболее тяжелых участков реки Нева можно выделить: мосты, расположенные в черте города Санкт-Петербурга, Кошкинский фарватер, Ивановские пороги и кривое колено. Кроме того, река Нева обладает достаточно высокой скоростью течения, в отдельных местах скорость течения может достигать 16-18 км/ч. Таким образом, обучение нейронной сети системы управления автономных судов, позволяющей обеспечить достаточный уровень безопасности плавания по реке Нева представляется непростой, но крайне интересной научной задачей.

На первом этапе был определен необходимый формат и перечень статистической информации, необходимой для обучения нейросети. В качестве основного источника поступления данных используется информационный канал АИС (автоматической идентификационной системы). В данном канале, суда находящиеся в акватории передают три типа информации: статическую, динамическую и информацию о рейсе. Расшифровка сообщений и последующая обработка, передаваемых судовыми транспондерами АИС данных позволяет четко идентифицировать тип судна, определить параметры и траекторию его

движения. Здесь необходимо отметить, что в информационном канале АИС динамическая информация не содержит «сырые» данные позиционирования, поэтому в полной мере применить методы постобработки навигационных спутниковых измерений не представляется возможным. Однако в рассматриваемом регионе береговые базовые станции АИС в информационном канале передают корректирующую информацию, что позволяет с достаточным уровнем точности строить траектории движения судов, двигающихся по акватории реки Нева. В качестве дополнительного источника поступления данных может выступать, во-первых, автоматическая метеостанция, во-вторых, автоматический уровневый пост. Одиночно установленная автоматическая метеостанция позволяет определить направление и силу ветра в месте установки, таким образом в остальных точках, относящихся к рассматриваемой акватории эти значения будут считаться относительно достоверными. С этой точки зрения получение данных от сети автоматических метеостанций выглядит гораздо предпочтительнее. Известно, что скорость течения на реке Нева может изменяться, в зависимости от внешних воздействий. Одним из параметров, позволяющим оценивать эти изменения, является уровень воды. Поэтому получение данных от автоматического уровневого поста является весьма желательным условием.

На втором этапе определены места размещения приемников АИС. Так, например, для получения информации о движении судов в наиболее сложных участках реки Нева достаточно всего четырех приемников АИС типа Т-55. В зоне действия первого приемника находится акватории Морского канала от Кронштадта, Малая Нева и Большая Нева, а также нижняя часть реки Нева до Троицкого моста. Расчетная действия второго приемника должна охватить акваторию реки Невы от Благовещенского моста до кривого колена. Третий приемник охватит акваторию от кривого колена до н.п. Павлово. Четвертый приемник позволит получать данные от н.п. Кировск до приемного буя, расположенного в бухте Петрокрепость, Ладожское озеро.

Приемники АИС, «собирают» сообщения, передаваемые судовыми транспондерами АИС в зоне их действия. Каждый приемник АИС подсоединен к одноплатному компьютеру, на котором происходит первичная обработка, а именно, проверка на целостность полученных данных, и расшифровка принятых сообщений. После чего данные поступают на удаленный сервер. Здесь необходимо отметить, что питание АИС приёмника осуществляется от порта одноплатного компьютера, который в свою очередь подключен к сети через источник бесперебойного питания. В случае нарушения энергоснабжения системы первично обработанная информация записывается во внутреннюю память малогабаритного компьютера. При возобновлении энергоснабжения, аккумулированная информация будет незамедлительно передана на удаленный сервер. Первично обработанные данные, поступающие от четырех приемников АИС подвергается классификации и размещению в базу данных. На данном этапе отсеиваются дублирующие сообщения АИС, такая ситуация может иметь место если судовой транспондер находится в зоне действия двух соседних приёмников цепи. После чего происходит идентификация судна, чтобы определить его основные характеристики. Эта операция позволяет в дальнейшем найти данные о маневренных и инерционных характеристиках конкретного судна. Далее может происходить обработка динамической информации, направленной повышения точности построения траектории движения. После чего в базу должна поступать синхронизированная по времени и месту информация от автоматической метеостанции и автоматического уровневого поста. В настоящее время программные средства позволяют осуществлять аккумуляцию гидрометеорологической и гидрологической информации в базе данных, однако отсутствие собственных аппаратных средств, осложняет общий процесс. Указанные данные в настоящее время собираются из открытых источников. Здесь необходимо отметить, что размещение сети автоматических промерных постов в сочетании с использованием профилографа, позволит разработать модель течения реки Нева. Интеграция данного решения, несомненно, позволит повысить качество обучения нейросети. Начало работ по данному направлению планируется осенью 2022 г.

**Заключение.** Промежуточные результаты обучения нейронной сети, системы управления движением автономного судна, произведенного на основе статистических данных траекторий движения судов в акватории реки Нева свидетельствуют о достаточно высокой эффективности данного подхода. Для обучения нейронной сети использовалась выборка, полученная в ходе наблюдений продолжительностью более 1 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rong, H.; Teixeira, A.P.; Guedes Soares, C.**, Data mining approach to shipping route characterization and anomaly detection based on AIS data. *Ocean Eng.* 2020, 198, 106936.
2. **Volkova, T.A.; Balykina, Y.E.; Bespalov, A.**, Predicting Ship Trajectory Based on Neural Networks Using AIS Data. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 254. <https://doi.org/10.3390/jmse9030254>
3. **Zhijun Chen, Jie Xue, Chaozhong Wu, LingQiao Qin, Liqun Liu, Xiaozhao Cheng.** Classification of vessel motion pattern in inland waterways based on Automatic Identification System, *Ocean Engineering*, Volume 161, 2018, Pages 69-76, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.072>.
4. **Xu, H.; Rong, H.; Guedes Soares, C.**, Use of AIS data for guidance and control of path-following autonomous vessels. *Ocean Eng.* 2019, 194, 106635.

**T.A. Volkova, V.V. Karetnikov** (FGBOU VO "State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov", St. Petersburg). **Traffic control system for autonomous vessels operating on inland waterways built on the basis of a neural network**

The paper considers proposals for organizing a traffic control system for autonomous ships intended for operation on inland waterways. The use of such vessels is carried out in difficult navigational conditions, which imposes special requirements on their control systems. In this case, one of the constructive solutions can be considered the use of neural networks as the main element of the control system. However, for training such neural networks, a sufficiently large amount of data is required, which can cause certain difficulties.

О.В. МИТИН, М.А. САГАДЕЕВА, С.А. ЗАГРЕБИНА  
(Южно-Уральский Государственный Университет, Челябинск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТОЧНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЛОКАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ, ПОЛУЧАЕМЫМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

*Авторами работы проведен ряд экспериментальных исследований по корректировке медианных значений параметров ионосферы эмпирической модели IRI локальными данными радионаблюдений, осуществляемых в диапазоне коротких волн в реальном времени с помощью технологии Software-Defined Radio.*

*Анализ временных рядов вариаций отношения “сигнал/шум”, полученных в процессе мониторинга характера распространения радиосигнала образцового источника, показал приемлемое соответствие параметров моделируемых и реальных условий распространения радиоволн в условиях “спокойного Солнца”, а также возможность корректировки модельных данных в условиях вспышечной активности Солнца.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные способы цифровой передачи данных существенно расширили возможности построения распределенных систем мониторинга и управления в различных областях человеческой деятельности, однако, не отменили полностью проверенных временем традиционных приемов информационного обмена.

Одним из активно используемых классических способов передачи сообщений на большие расстояния до сих пор является коротковолновая радиосвязь, традиционными сферами применения которой считаются оперативный обмен информацией, а также системы резервной и экстренной связи.

Коротковолновой традиционно принято считать радиосвязь в диапазоне длин волн от 200 до 10 метров (1.5-30 МГц). Отличительной особенностью распространения радиосигналов в этом диапазоне является способность радиоволн, излучаемых под определенными углами к горизонту, отражаться от ионизированных слоев атмосферы (в дальнейшем ионосферы) без значимых потерь для качества передаваемого радиосообщения, что делает технически возможным осуществление радиосвязи на большие расстояния (сотни и тысячи километров), существенно превышающие расстояние прямой видимости корреспондентов. Проведение связей в этом диапазоне радиоволн до сих пор признается экономически целесообразным, так как не требует капитальных затрат на организацию искусственных магистральных систем передачи данных (в виде кабельных и оптоволоконных каналов, например), а использует естественную (природную) среду передачи в виде радиоэфира. В условиях морской навигации, где использование наземных физических каналов скоростной передачи данных невозможно, а применение современных спутниковых систем радиосвязи не всегда доступно, радиосвязь на коротких волнах остается основным способом обмена информацией между корреспондентами. При этом, основным препятствием на пути к использованию коротких волн как надежной (отказоустойчивой) и прогнозируемой среды передачи данных является достаточно высокая степень зависимости качества прохождения радиосигналов от состояния ионосферной ионизации, носящей характер периодического процесса (в силу изменения количества солнечной радиации, выпадающей на освещенную сторону Земли в ходе суточного вращения), и, кроме этого, спонтанной вспышечной активности Солнца.

Суточные закономерности вариации параметров ионосферного распространения коротких радиоволн исследованы достаточно подробно. Традиционно, для удобства прогнозирования ионосферу принято делить на несколько условных слоев (в соответствии с высотой), для которых с достаточной степенью приближения известен уровень ионизации в зависимости от времени суток (электронная концентрация). В соответствии с этим делением, коротковолновый диапазон условно разделен на несколько поддиапазонов, для которых характерно наиболее устойчивое радиопрохождение в утренние/дневные/вечерние/ночные часы. Таким образом, корреспондентам приходится переключаться между частотными поддиапазонами, обеспечивая, таким образом, устойчивую радиосвязь в течение суток.

Критерием применимости того или иного радиодиапазона в конкретный момент времени принято считать такие параметры, как минимально- и максимально применимая частота. За пределами этого отрезка радиосвязь в данный момент времени для данной геолокации не гарантирована. Кроме того, суточная динамика распространения радиоволн коротковолнового диапазона осложняется локальными естественными (геолого-геофизическими) особенностями (естественное затухание и отражение радиосигнала), уровнем природных (грозовые разряды) и промышленных (электрические и электромагнитные) помех, осложняющих проведение сеанса радиосвязи, а кроме этого, подвержена влиянию периодических изменений солнечной активности.

Среди оказывающих наиболее существенное воздействие на характер распространения коротких волн выделяют 22-летний цикл солнечной активности, имеющий собственные точки экстремумов в виде минимума и максимума. Так, в ближайшей окрестности минимума солнечной активности снижен уровень собственного шума радиозфира, при этом практика длительных многолетних наблюдений показывает, что частота встречаемости радиосвязей между наиболее удаленными корреспондентами растет по мере движения к 11-летнему пику максимума солнечной активности. Таким образом, прогнозирование условий распространения радиоволн на радиотрассах различной протяженности в разное время года и различное время текущих суток представляет собой многопараметрическую зависимость, нуждающуюся в систематической корректировке.

Традиционно, в качестве математической модели, позволяющей осуществлять прогнозирование прохождения радиоволн для данной геолокации в данное время года и суток, используется эмпирическая ионосферная модель IRI (international reference ionosphere)<sup>1</sup>, позволяющая получать набор прогнозных параметров в виде значений концентрации электронов, электронных и ионных температур для областей D, E, F1 и F2 ионосферы. При этом, как уже указывалось выше, реальное состояние ионосферы для данной точки зависит, в том числе, от большого количества внешних факторов, ключевая роль среди которых принадлежит вспышечной активности Солнца, оказывающей существенное влияние на характер радиопрохождения. В связи с этим, в условиях решения практических (прикладных) задач радиосвязи становится актуальной задача корректировки полученных справочных (модельных) значений ионосферных параметров результатами получаемых в режиме реального времени актуальных данных о состоянии радиопрохождения [2, 3].

Авторами настоящей работы был осуществлен ряд экспериментальных исследований возможности корректировки модельных значений IRI путем решения «обратной задачи» с использованием локальных технических средств регистрации состояния ионосферного радиопрохождения в диапазоне коротких волн. В качестве инструментальной основы для построения программно-аппаратного комплекса исследования состояния ионосферного радиопрохождения в локальных условиях использовалась техника проектирования программно-аппаратных радиоприемников (SDR, software-defined radio), позволяющая осуществлять компьютерную обработку принимаемых данных в режиме реального времени [4]. Характерным показателем, отражающим состояние среды передачи радиосигнала, является соотношение «сигнал/шум», описывающее превышение уровня полезного сигнала над уровнем помех среды передачи данных:

1 Rawer K., Ramakrishnan S., Bilitza D. International Reference Ionosphere. URSI, 1978

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}, \quad (1)$$

где мощность полезного сигнала и, соответственно, мощность шума представлены как среднее арифметическое суммы квадратов значений исследуемого ряда:

$$P(x) = (1/n) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2. \quad (2)$$

Для удобства использования, величину соотношения «сигнал/шум» принято представлять в децибелах:

$$P_{db} = 10 \cdot \log_{10}(P). \quad (3)$$

Или, что то же самое:

$$10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 10 \cdot \log_{10}(P_{signal}) - 10 \cdot \log_{10}(P_{noise}). \quad (4)$$

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве источника опорного сигнала (далее «радиомаяк») использовались синхронизированные с атомным эталоном времени ВНИИФТРН радиосигналы передатчика эталонного времени группы «Москва» (подводимая мощность 8 кВт), осуществляющего круглосуточную радиопередачу в диапазоне коротких волн (9996 кГц) под радиопозывным RWM. В ходе непрерывного радионаблюдения 24 раза в сутки (ежечасно) фиксировалось состояние радиозфира в период молчания передатчика радиомаяка, и в период передачи немодулированной несущей частоты (NON).

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялось оценочное радионаблюдение вариаций прохождения радиосигнала на трассе «Москва-Нидерланды». Радиоприем осуществлялся SDR-приемником радиостанции PI4THT (University of Twente, Enschede, NL) посредством удаленного доступа (рисунок 1).

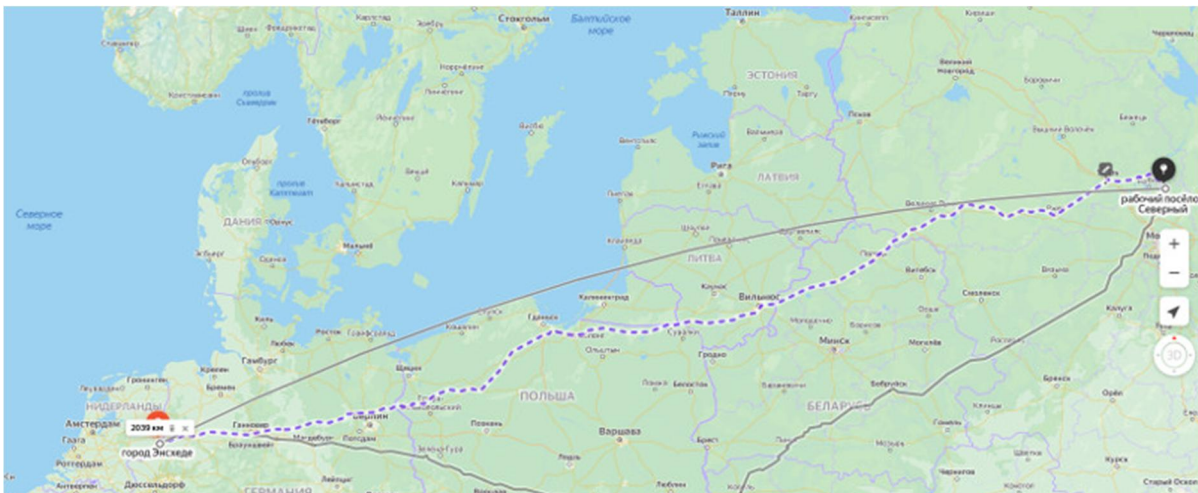


Рис. 1. Радиотрасса «Москва-Нидерланды» оценочного этапа экспериментального исследования (протяженность трассы 2039 км).

Для осуществления основного этапа экспериментальных наблюдений был спроектирован прототип программно-аппаратного автоматизированного комплекса наблюдения за условиями прохождения радиосигнала маяка на частоте 9996 кГц, включающий аппаратную часть, реализованную в виде SDR-приемника, и программный комплекс приема и обработки результатов радионаблюдений в виде свободно-распространяемого пакета HSDR,

осуществляющего взаимодействие с аппаратной частью комплекса посредством драйвера ExtIO, а также пакет специализированных программ обработки и анализа данных, реализованных на ЯП Perl и Python. Радиоприем осуществлялся на вертикальную коротковолновую антенну Diamond CP-6 из пункта, удаленного от радиопередатчика маяка на расстояние 76.4 км (рисунок 2), что позволило предположить, что эксперимент осуществлялся в условиях NVIS (Near Vertical Incidence Skywave) распространения радиоволн.

Принимаемые радиосигналы сохранялись в виде несжатых аудиофайлов, по два на каждое наблюдение (файл собственного шума радиоэфира и файл сигнала радиомаяка) и обрабатывались в последующем для получения временного ряда (набор экспериментальных значений соотношения «сигнал/шум»).

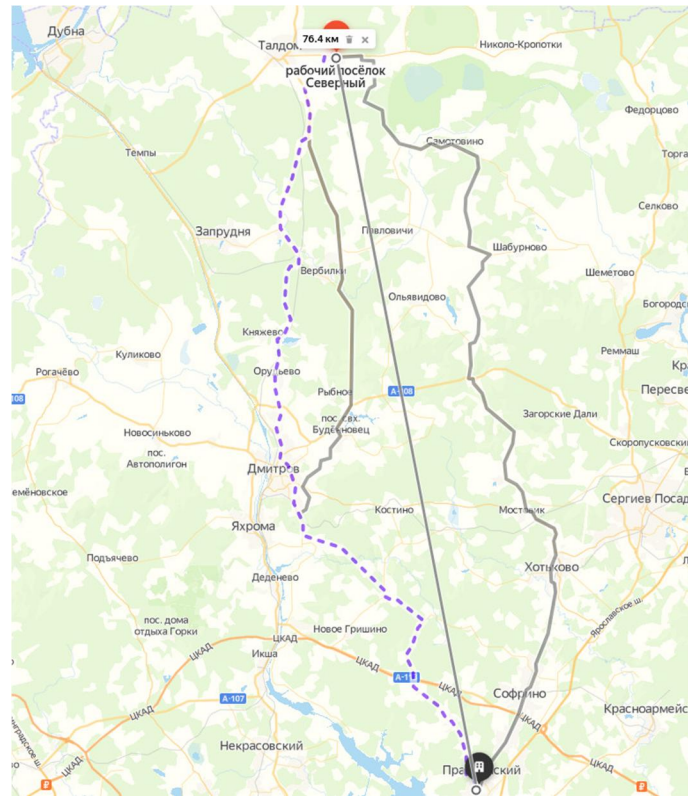


Рис. 2. Радиотрасса основного этапа экспериментального исследования (протяженность трассы 76.4 км).

Временные ряды параметров солнечной активности (индексы активности геомагнитного поля  $K_p$ ) были получены из открытых источников (SWPC, Space weather prediction center).

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Первичный анализ полученных путем опытного радионаблюдения экспериментальных данных оценочного этапа исследования показал присутствие суточной вариации как в «сырых» данных, так и в ряду вычисленных значений отношения «сигнал/шум», что подтверждает факт наличия именно ионосферного радиопрохождения (рисунки 3, 4, 5).

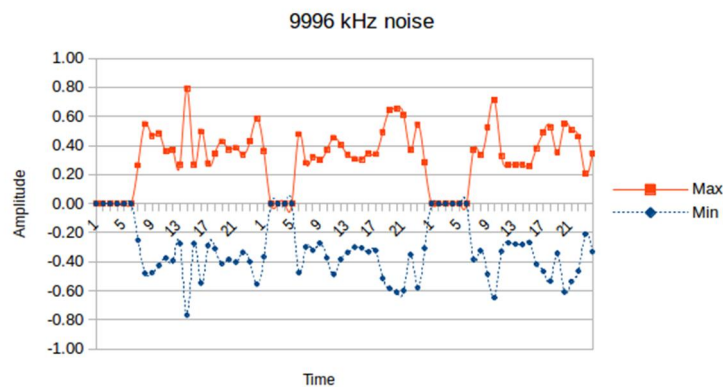


Рис. 3. Суточные вариации собственного шума эфира на частоте приема радиомаяка (9996 кГц) оценочной радиотрассы «Москва-Нидерланды».

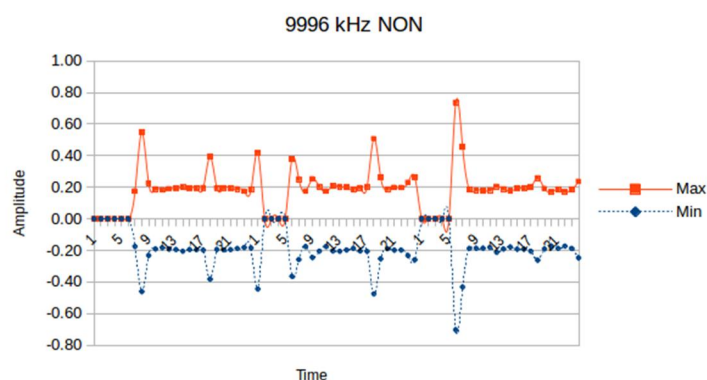


Рис. 4. Суточные вариации амплитуды принимаемого немодулированного сигнала радиомаяка для оценочной радиотрассы «Москва-Нидерланды».

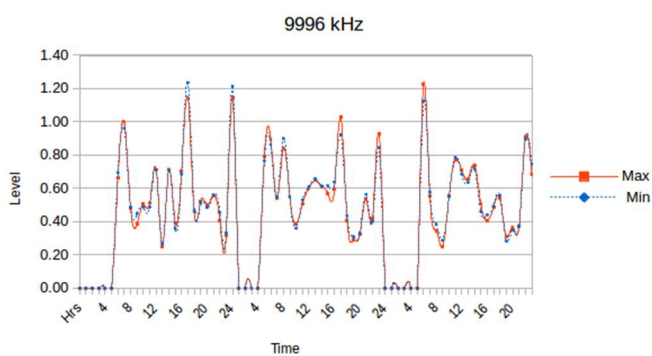


Рис. 5. Вариации величины отношения «сигнал/шум» принимаемого маяка для оценочной радиотрассы «Москва-Нидерланды» (нулевые значения объясняются отсутствием наблюдений в соответствующие часы).

Дальнейший анализ опирался на временные ряды отношения «сигнал/шум», полученные на этапе основного исследования (рисунок 6).



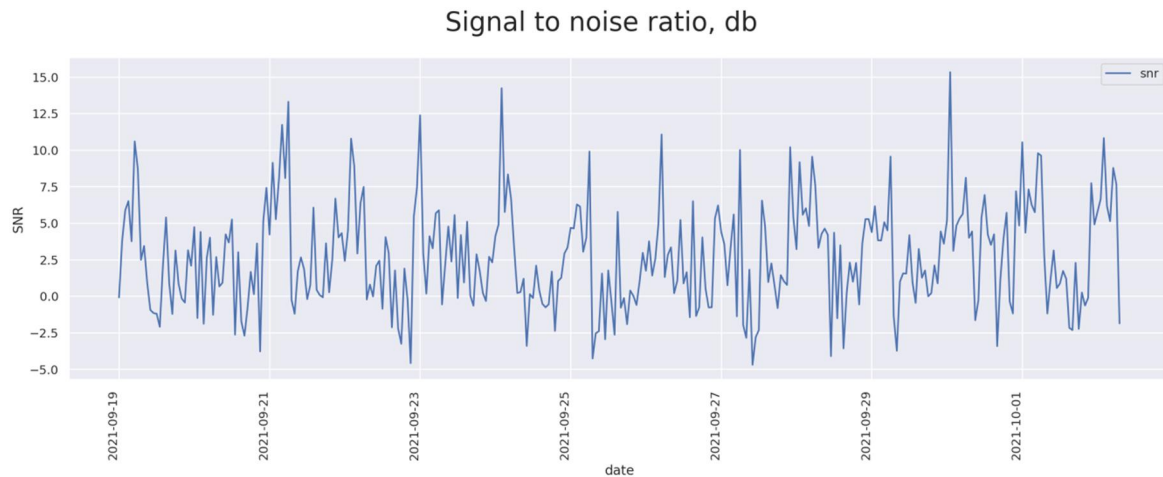


Рис. 6. График изменения соотношения «сигнал/шум», полученный в результате наблюдения радиосигнала маяка в диапазоне 9996 кГц за период с 19/09/21 по 01/10/21.

Для удобства использования величина соотношения «сигнал/шум» представлялась в децибелах. Полученный временной ряд отношения «сигнал/шум» был дополнен вспомогательным бинарным признаком «отсутствие/наличие» («различимость») полезного радиосигнала, благодаря чему стала доступной возможность автоматического оценивания качества радиопрохождения в текущий момент времени.

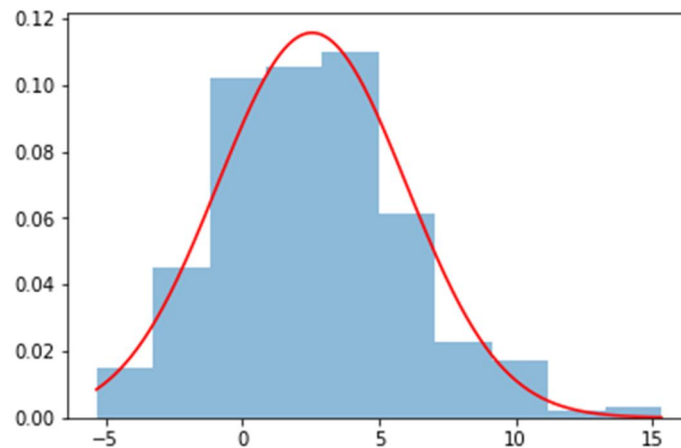


Рис. 7. Гистограмма рассеяния значений соотношения «сигнал/шум», полученных в ходе экспериментального наблюдения радиосигнала маяка в диапазоне 9996 кГц за период с 19/09/21 по 01/10/21.

Корреляционный анализ полученных значений временных рядов измеренного соотношения «сигнал/шум» и вариаций индекса геомагнитной активности (рисунок 8) показал наличие заметной корреляционной связи ( $0.67$ ,  $\rho=9.96e-05$ ,  $t=4.37$ ) между исследуемыми параметрами, что говорит в пользу применимости избранного подхода (рисунок 9, 10). Фактически невысокое полученное значение коэффициента корреляции является, по-видимому, следствием недостаточной чувствительности приемного тракта прототипа программно-аппаратного комплекса, что, привело к работе на границе соотношения «сигнал/шум». Тем не менее, полученные результаты позволяют в дальнейшем внести коррективы в конструкцию SDR-приемника в последующей итерации исследований.

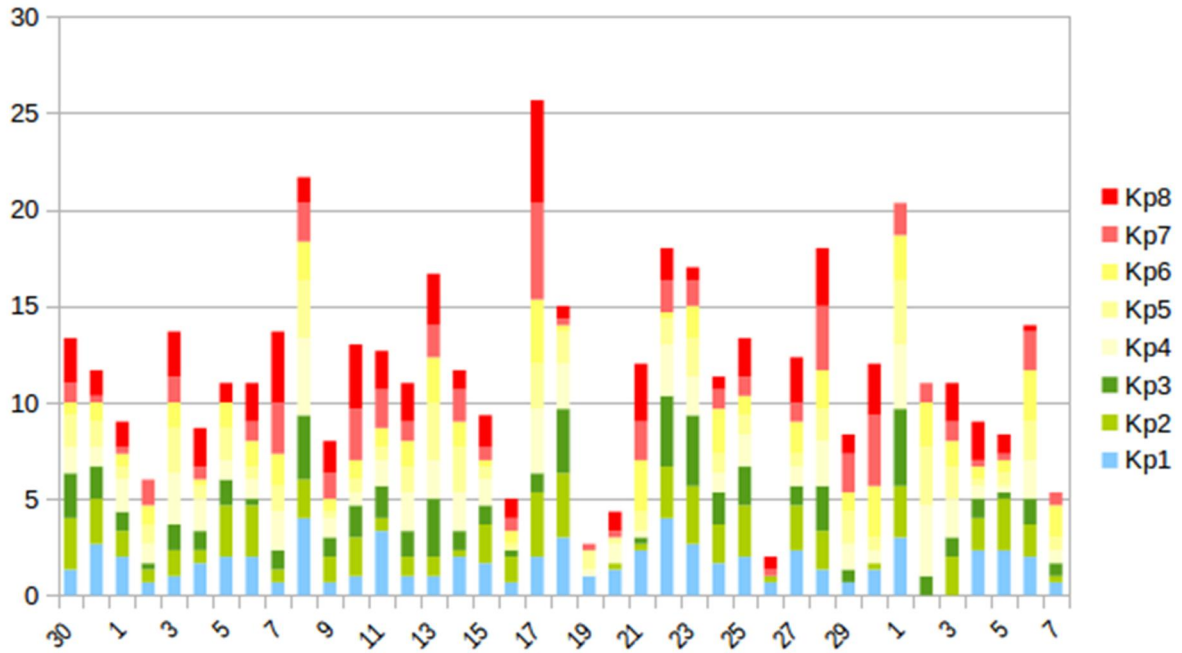


Рис. 8. Гистограмма вариаций индекса геомагнитной активности Кр за период с 1/09/21 по 10/10/21.

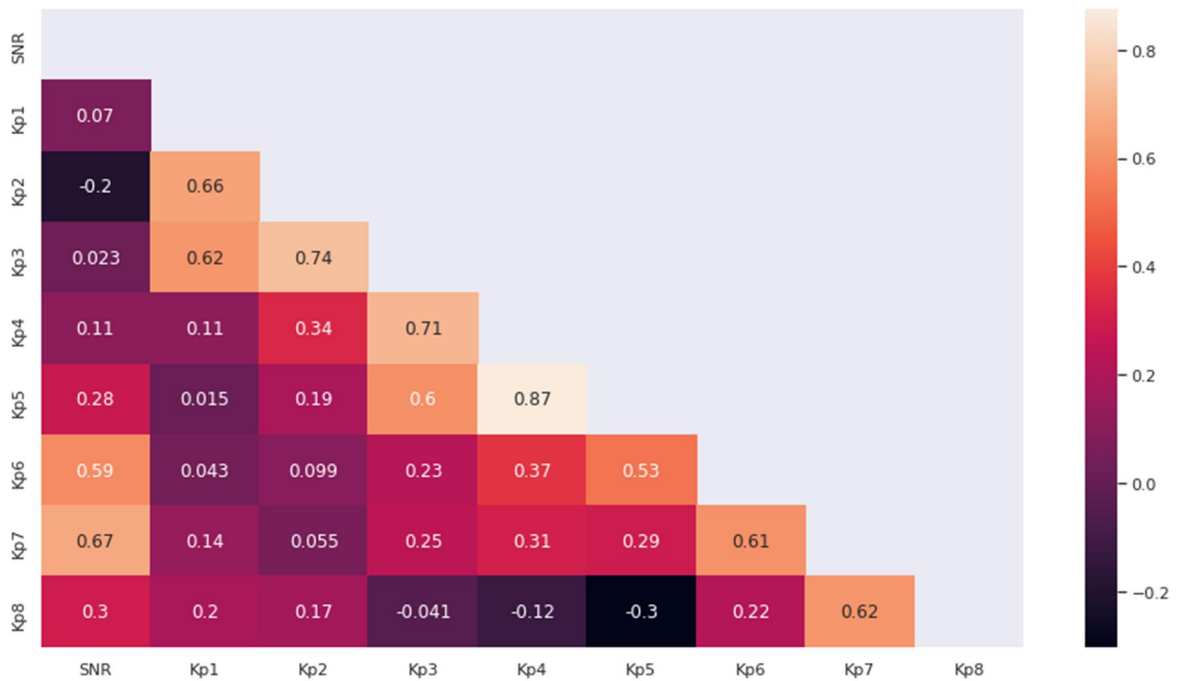


Рис. 9. Диаграмма корреляции величины отношения «сигнал/шум» и значений индекса геомагнитной активности за период экспериментальных наблюдений.



Рис. 10. Диаграмма рассеяния значений отношения «сигнал/шум» и индекса геомагнитной активности Кр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных в результате экспериментального наблюдения значений отношения «сигнал/шум» в условиях NVIS распространения радиоволн показал, что медианные значения программной модели IRI могут уточняться посредством автоматизированного мониторинга в режиме реального времени. В условиях сильно возмущенной магнитосферы во время событий солнечной активности, когда эмпирическая модель дает слабо соответствующие реальной обстановке значения, данные мониторинга могут использоваться как основа для принятия решений о смене частоты передачи информации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2020-0022 (2020072ГЗ)).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rawer K., Ramakrishnan S., Bilitza D., International Reference Ionosphere. URSI, 1978
2. Черняков С.М., Создание адаптивной модели ионосферы на основе данных по полному электронному содержанию //Сборник научных трудов физико-математического факультета Мурманского государственного педагогического университета, изд-во МГПУ, 2003
3. Крашенинников И.В., Модель IRI в задаче оценки энергетических характеристик волнового поля в ионосферном распространении радиоволн //Гелиогеофизические исследования, вып. 17, 1-6, 2018
4. Software defined radio : architectures, systems, and functions. Dillinger, Madani, Alonistioti. Wiley, 2003
5. Austin, B.A., Evolution of near vertical incidence skywave communications and the Battle of Arnhem. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?tp=&arnumber=997794&isnumber=21521](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?tp=&arnumber=997794&isnumber=21521)
6. Morrow R., K5CNF. Near Vertical Incidence Skywave Communications. <http://www.antennex.com/shack/Jan02/nvis.html>

**O.V. Mitin, M.A. Sagadeeva, S.A. Zagrebina (South Ural State University, Chelyabinsk). Research into the possibility of applying real-time local data to refining the ionosphere empirical modelling findings**

A series of experimental studies have been carried out to correct the median ionosphere parameter values, obtained through the empirical modelling (IR 2016), on the basis of the real-time short-wave radio propagation data observation facilitated by the Software-Defined Radio technology. The analysis of the time-series of the signal-noise ratio, obtained through monitoring the short-wave propagation, has shown an acceptable correlation between the simulated parameters and the real conditions of radio wave propagation in the quiet Sun period as well as the possibility of correcting the model values by the results of local measurements during periods of solar activity.

А.В. КОРЯКИН, В.В. ЛАНЦОВ  
(ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем»  
ГосНИИПП, Санкт-Петербург),  
Л.А. МАРТЫНОВА (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА – ЭЛЕМЕНТА МОРСКОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

*Поскольку обнаружение малых беспилотных воздушных судов невозможно традиционными методами радиолокации, разработан пространственно-распределенный комплекс обнаружения беспилотников, средства обнаружения которой размещены на сверхмалых безэкипажных катерах. Определен размер зоны, запрещенной для вторжения беспилотника, проведена оценка требуемой дальности обнаружения беспилотника, определены состав, количество и топология размещения средств обнаружения для эффективного обнаружения малых беспилотников. Разработанный комплекс обнаружения может быть использован для защиты надводных обитаемых/необитаемых объектов от вторжения беспилотников.*

**Введение.** В настоящее время в составе морской роботизированной системы широко используются легкие беспилотные воздушные суда (БВС) [1], например, для освещения обстановки. При этом присутствие БВС может угрожать безопасности людей и техники (далее – объекты), например, при катании на прогулочных катерах и яхтах, в ходе которых возможно падение БВС из-за разряда аккумулятора или потери управляемости [2]. В связи с этим актуальной задачей является обнаружение БВС там, где возникает угроза или опасность жизнедеятельности людей в акватории океана.

Традиционные методы обнаружения БВС, например, средствами радиолокационных станций, не пригодны из-за малой эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) БВС и из-за больших массогабаритов радиолокационных станций. Существующие для обнаружения БВС средства [3] могут быть размещены на самом объекте, однако дальность обнаружения БВС ввиду его визуальной невидимости, бесшумности и малой ЭПР существенно меньше по сравнению с требуемой для обеспечения безопасности объекта.

В связи с этим для повышения дальности обнаружения БВС над морской поверхностью предлагается использовать эшелонированное размещение средств обнаружения (СО) вокруг объекта, например, на волновых аппаратах типа Wave Glider, AutoNaut [4] или с использованием эффективно функционирующей [5] группы сверхмалых безэкипажных катеров (СМБК), способных одновременно вести подводное наблюдение [6]. Функционирование СМБК осуществляется в соответствии с заложенным в его систему управления маршрутом [7,8]. При этом возникает задача определения топологии размещения СО БВС, поскольку существующие многочисленные отечественные и зарубежные публикации по обозначенной теме посвящены преимущественно описанию самих СО [3,4].

**Цель работы** – обеспечить увеличение дальности обнаружения БВС путем разработки морского пространственно-распределенного комплекса обнаружения БВС, включающего в себя разнотипные СО, размещенные на СМБК.

**Постановка задачи.** В связанной с охраняемым объектом системе координат  $Ox$  рассмотрим тактический эпизод, схема которого приведена на рис.1. Вокруг подвижного объекта, движущегося курсом  $Q_a$  и скоростью  $V_a$ , сформируем критическую зону в виде круга радиуса  $R_{KZ}$ , вторжение БВС в которую недопустимо. Имеется  $N$  СО, которые характеризуются дальностью обнаружения  $D_{CO}$  и координатами своего положения  $x_{CO_i}, y_{CO_i}$ ,  $i=1, \dots, N$ . Пусть по направлению к объекту движется БВС со скоростью  $V_b$  и курсом  $Q_b$ . Пусть на начальном участке навигация БВС осуществляется по сигналам спутниковых навигационных систем (СНС), и приблизившись к объекту на некоторое расстояние  $R_{OZ}$ , БВС, противодействуя средствами борьбы с БВС [9], переходит на навигацию по бортовой инерциальной навигационной системе (БИНС). Вследствие накопления погрешности  $\delta_b$  определения своего

местоположения [10] БВС оказывается в стороне от объекта на расстоянии  $D_b$ . Для обеспечения требуемого отклонения БВС от объекта необходимо, чтобы погрешность  $D_b$  превышала радиус критической зоны  $R_{KZ}$ , и, как следствие, чтобы дальность обнаружения БВС превышала  $D_{об}$ .

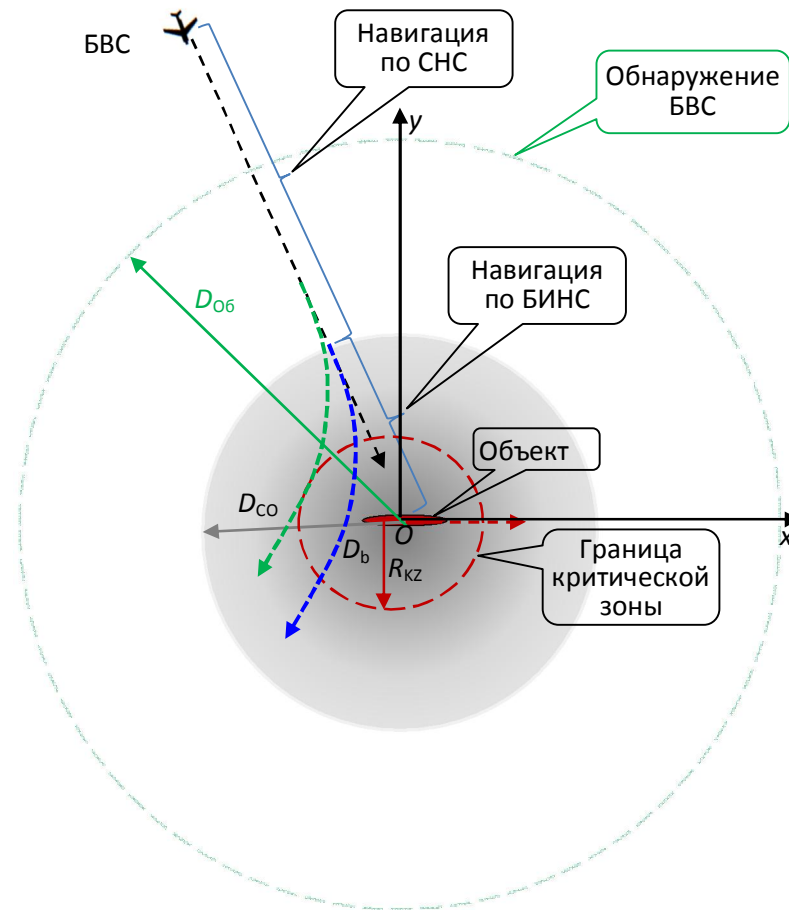


Рис. 1. Схема тактического эпизода

На основе оценки размера критической зоны вокруг подвижного объекта [11] и требуемого отклонения БВС от положения объекта  $D_b$  определено время, необходимое для формирования требуемой погрешности БИНС. В качестве БИНС рассмотрена малогабаритная ИСНС NV216С-IMU [5]. Точность определения координат составляет за 60 сек 8,5м, что позволило рассчитать время  $t_b$ , необходимое для ухода показаний БИНС на заданную погрешность  $D_b$ :  $t_b = R_{KZ}/D_b$ . За это время  $t_b$  БВС, двигаясь со скоростью  $V_b$ , преодолет расстояние:  $S_b = V_b \cdot t_b$ . Т.о. для отклонения БВС на  $D_b$  необходимо его обнаружить на дальности  $D_{об} = S_b$ .

Для определения топологии размещения СО учтены дальности обнаружения существующих СО [3,12,13,14].

В общем случае количество эшелонов  $M$  будет определяться выражением:

$$M = [(D_{об} - D_{со}) / (2 \cdot D_{со})] + 1, \text{ где запись } [x] \text{ означает «целая часть числа } x\text{»}.$$

Радиус окружности, соответствующий  $j$ -му эшелону, определяется выражением:

$$R_{Ej} = 2 \cdot j \cdot D_{со}.$$

Размещение СО в соседних эшелонах должно примерно соответствовать шахматному порядку. Количество СО на  $j$ -м эшелоне с учетом ограничений определяется выражением:  $N_j = [2\pi \cdot R_{Ej} / (2 \cdot D_{со})]$ . Угол дуги окружности, через который будут размещены СО на  $j$ -ом эшелоне, определяется выражением:  $\alpha_j = (2 \cdot D_{со}) / 2\pi \cdot R_{Ej}$ . Тогда координаты  $x_i, y_i$  положения  $i$ -го СО определяются выражениями:

$$x_i = R_{Ej} \cdot \cos \alpha_j,$$

$$y_i = R_{Ej} \cdot \sin \alpha_j.$$

**Результаты.** При изменении скорости движения БВС от 65 км/ч (DJI Mavic 2 Pro [15]) до 105 км/ч (Элерон Т23Э [16]) проведенные исследования с использованием специально разработанной математической модели, по аналогии с [17,18], показали, что при радиусе критической зоны 200м и дальности обнаружения БВС 5 км потребуется 2 эшелона и 18 СО для скорости БВС до 90 км/ч и 3 эшелона и 36 СО для скорости БВС свыше 90 км/ч.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-08-00130.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Классификация БВС по летным характеристикам // Электронный ресурс: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>. (Дата обращения 13.05.2022).
2. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. Т.28. №2(109). 2020. С. 131-146.
3. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // Электронный ресурс: <http://robotrends.ru/robotpedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov>. (Дата обращения 13.05.2022).
4. **Ляхов Д.Г., Ким А.И., Минаев Д.Д.** Разработка и испытания сверхмалого телеуправляемого корабля // Подводные исследования и робототехника. С.48-57.
5. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** Определение эффективного поведения группы АНПА в сетцентрической системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 47-57.
6. **Мартынова Л.А.** Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 31-41.
7. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50-58.
8. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 109-121.
9. **Макаренко С.И.** Противовействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. СПб. Научное издание. 2020. 204 с.
10. **Нагин И.А., Мухамедзянов Т.А.** Экспериментальные исследования алгоритма комплексирования в инерциально-спутниковой навигационной системе NV216С-IMU // Перспективные системы и задачи управления: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции и XIII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2022. с. 153-159.
11. **Martynova L.A., Koryakin A.V., Lantsov K.V., Lantsov V.V.** Determination of coordinates and parameters of a moving object by image processing // Computer Optics. 2012. Т. 36. № 2. С. 266-273.
12. GSM // Электронный ресурс: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GSM>. (Дата обращения 13.05.2022).
13. Системы и средства для обнаружения беспилотников (БВС) // Электронный ресурс: <https://antidron.ru/blog/sistemy-i-sredstva-dlya-obnaruzheniya-bespilotnikov-i-effektivnost-ikh-primeneniya.html>. (Дата обращения 13.05.2022).
14. **Филин Е.Д., Киричек Р.В.** Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации, Том 6 № 2, 2018, с.87-93.
15. Квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro // Электронный ресурс: [https://www.djimsk.ru/catalog/products/mavic/mavic\\_2/dji-mavic-2-pro.html](https://www.djimsk.ru/catalog/products/mavic/mavic_2/dji-mavic-2-pro.html). (Дата обращения 13.05.2022).
16. БЛА Т23Э // Электронный ресурс: [https://web.archive.org/web/20081211023223/http://www.enics.ru/detail?product\\_id=20](https://web.archive.org/web/20081211023223/http://www.enics.ru/detail?product_id=20). (Дата обращения 13.05.2022).
17. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474-479.
18. **Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В.** Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1 (211). С. 170-187.

**A.V.Koryakin, V.V.Lantsov** (Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Applied Problems"), **L.A. Martynova** (JSC "Central Research Institute" Elektropribor ", St. Petersburg).  
**Formation of a Detection Complex for Unmanned Aerial Vehicles - Element of Marine Robotic System.**

Since the detection of small unmanned aerial vehicles is impossible by traditional radar methods, a spatially distributed system for the detection of unmanned aerial vehicles has been developed, the detection means of which are located on ultra-small unmanned boats. The size of the zone prohibited for drone intrusion was determined, the required detection range of the drone was assessed, the composition, number and topology of the placement of detection tools for the effective detection of small drones were determined. The developed detection complex can be used to protect surface habitable/uninhabited objects from drone intrusion.



В.В. ЛАНЦОВ, А.В. КОРЯКИН  
(ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем»  
ГосНИИПП, Санкт-Петербург),  
Л.А. МАРТЫНОВА  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБНАРУЖЕННОГО ОБЪЕКТА

*Рассмотрена система обнаружения малых беспилотных воздушных судов в морской акватории, представляющая собой автономные средства обнаружения, размещенные на сверхмалых безэкипажных катерах (СМБК). Ввиду краткосрочного времени нахождения беспилотника в зоне обзора средства обнаружения предложен подход к определению параметров движения БВС и уточнению по результатам обмена информацией между средствами обнаружения. Определен состав средств подавления БВС, которым необходимо доведение информации о параметрах движения беспилотника, и определен маршрут доведения информации до средств подавления.*

**Введение.** Для увеличения дальности обнаружения малых беспилотных воздушных судов (БВС) [1] при охране морских объектов создают эшелоны в виде концентрических окружностей, центр которых совпадает с положением охраняемого объекта, а средства обнаружения (СО) размещены на специальных сверхмалых безэкипажных катерах (СМБК) [2]. Для минимизации создаваемых помех и скрытности обмен информацией между СМБК осуществляется по радиоканалу только между смежными СМБК, в результате чего система обнаружения представляет собой мультиагентную систему. При обнаружении БВС одним из СО необходимо передать информацию о курсе обнаруженного БВС средствам подавления, расположенным на тех же СМБК, что и СО. Информацию о курсе можно получить, как минимум, по двум обнаружениям пространственно-разнесенных СО. Информация о параметрах БВС передается, в первую очередь, тем средствам подавления, которые ближе всего расположены к трассе БВС. В связи с этим возникает задача определения курса движения обнаруженного БВС пространственно-разнесенными СО, представляющими собой мультиагентную систему [3-6]. Подобная задача ранее не рассматривалась, поскольку как в радиолокации [7], так и в гидроакустике [8], обнаружение и сопровождение целей происходит в течение длительного времени. В связи с отсутствием готовых решений задача определения параметров движения БВС является актуальной.

**Целью работы** явилось решение задачи определения параметров движения обнаруженного БВС для выдачи ЦУ средствам подавления.

**Постановка задачи.** В системе координат  $Oxу$ , связанной с положением охраняемого объекта, размещены  $M$  СО вокруг охраняемого объекта. Каждое  $m$ -ое СО характеризуется координатами своего положения  $(x_m, y_m)$  и дальностью обнаружения  $D_{CO}$ . Смежные СО могут общаться между собой, передавая информацию друг другу. Средства подавления размещены на этих же носителях, и для определения средств подавления необходимо иметь информацию о параметрах движения БВС, прежде всего, курсе. Пусть в некоторый момент времени  $t_1$  произошло обнаружение БВС  $CO_1$ . В данном случае, по аналогии с радиолокацией и гидролокацией, по одному обнаружению можно определить только пеленг. Дождаться второго обнаружения нецелесообразно, так как БВС мало времени находится в зоне обзора средств обнаружения, и необходимо как можно быстрее включать подавление в направлении, определенному по одному-двум обнаружениям СО. Необходимо найти курс  $Q_b$  БВС и состав средств подавления  $k, k=1, \dots, K$ , которым необходимо довести информацию о курсе.

**Предлагаемое решение.** СО в пассивном режиме радиолокации позволяет определить пеленг  $P_b$  на объект и классифицировать его как БВС; СО в активном режиме радиолокации позволяет определить пеленг  $P_b$  и дистанцию  $D_b$  до БВС. Дополнительно к радиолокации в систему обнаружения БВС входят средства оптического обнаружения БВС, позволяющие

определить координаты БВС путем распознавания изображения [9], а также акустический и лидарный каналы.

Обнаружение БВС в момент времени  $t$  может произойти как одним СО, так и двумя в случае попадания БВС в область пересечения двух соседних зон обзора средств обнаружения СО. В первом случае БВС по однократно измеренному пеленгу направление движения БВС определить невозможно. Однако, в отличие от гидролокации и радиолокации, в данном случае средствам подавления нет необходимости иметь целеуказания в виде координат для нанесения точечного удара, достаточно иметь направление. Поскольку наиболее критичным направлением движения БВС в данном случае является направление на охраняемый объект, то, следуя наименьшему уровню риска, определяем направление движения БВС по двум точкам: точки первого обнаружения СО и точки положения охраняемого объекта.

При одновременном обнаружении двумя СО положение БВС определяется по пересечению двух пеленгов, каждый из которых определен СО<sub>1</sub> и СО<sub>2</sub> соответственно.

**Определение** средств подавления, которым необходимо довести информацию о параметрах движения обнаруженного БВС.

На следующем этапе, зная курс БВС  $Q_b$ , определяются средства подавления, расположенные вблизи прогнозируемой траектории движения БВС в пределах коридора заданной ширины  $d_k$ . «Заданная» ширина  $d_k$  определяется, исходя из размеров ОВП, которая определяется курсом и предполагаемой скоростью движения БВС. Традиционно используемыми БВС являются: DJI Mavic (65 км/ч), DJI Phantom (72 км/ч), «Элерон-3СВ» (105 км/ч), КУБ Zala (130 км/ч). Определение средств подавления производится путем перебора по всем средствам подавления, при котором оцениваются расстояния от каждого из них до трассы БВС. Если расстояние до трассы меньше  $d_k$ , то принимается, что этому средству подавления необходимо довести информацию.

Пусть активными СО при обнаружении определены координаты положения БВС  $(x_{b1}, y_{b1})$  в момент времени  $t_1$  и  $(x_{b2}, y_{b2})$  в момент времени  $t_2$ . Тогда уравнение траектории движения БВС можно формализовать как уравнение прямой, проходящей через две точки:

$$\frac{x - x_{b1}}{x_{b2} - x_{b1}} = \frac{y - y_{b1}}{y_{b2} - y_{b1}} \quad (1)$$

Курс  $Q_b$  БВС из геометрических соображений определяется выражением:

$$Q_b = \arctan\left(\frac{x_{b2} - x_{b1}}{y_{b2} - y_{b1}}\right)$$

После приведения (1) к уравнению прямой вида  $Ax + By + C = 0$  расстояние от  $m$ -го СО расположенного в точке с координатами  $(x_m, y_m)$ , до прогнозируемой трассы движения БВС, определяется выражением:

$$d_m = \frac{Ax_m + By_m + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad A \neq 0; B \neq 0$$

$$\text{где } A = y_2 - y_1,$$

$$B = x_2 - x_1,$$

$$C = y_1(x_2 - x_1) - x_1(y_2 - y_1).$$

Если  $d_m < d_k$ , то принимается, что  $k$ -ое средство подавления попадает в пределы коридора, и ему необходимо доставить информацию о параметрах обнаруженного БВС.

**Маршрут доведения информации до средств подавления.** Предлагается следующий алгоритм обмена информацией между СО (рис.1.).

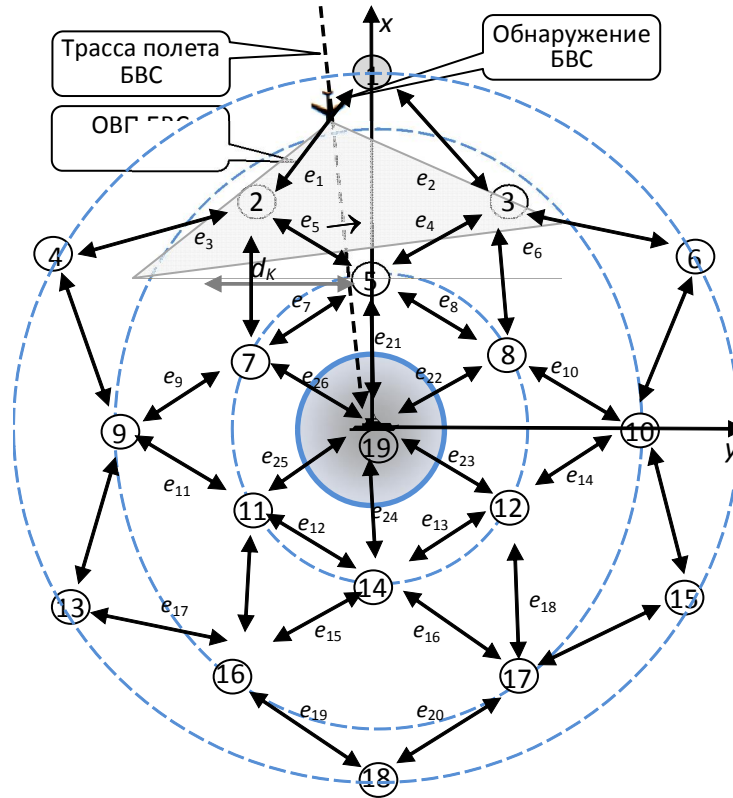


Рис. 1. Вид графа взаимосвязей СО между собой

Как только одно из периметровых пассивных СО внешнего эшелона обнаружило БВС, оно дает команды на перевод в активное функционирование всех смежных с ним СО для уточнения местоположения БВС. Из рис.1 видно, что обнаруживший СО<sub>1</sub> может передать информацию СО<sub>2</sub> и СО<sub>3</sub> как смежным, а те уже, в свою очередь, передать СО<sub>4</sub>, СО<sub>5</sub> и СО<sub>6</sub>, затем – СО<sub>7</sub>, СО<sub>8</sub>, СО<sub>9</sub>, СО<sub>10</sub>.

Связи между СО можно представить в виде матрицы смежности  $W$ , у которой элементами по горизонтали являются узлы, с которыми смежен узел с номером строки.

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Использование матрицы смежности **W** позволяет автоматизировать процесс определения СО для передачи информации.

**Заключение.** В работе приведено решение задачи определения параметров движения обнаруженного БВС и определен состав средств подавления, которым должна быть доведена эта информация, определен маршрут передачи информации в условиях ограниченности ее распространения. Результаты исследований могут быть учтены при пространственно-распределенном размещении СО вокруг охраняемого объекта для повышения эффективности функционирования [10-13] системы обнаружения БВС.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-08-00130.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Классификация БВС по летным характеристикам. Электронный ресурс // <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>. (Дата обращения 13.05.2022)
2. Ляхов Д.Г., Ким А.И., Минаев Д.Д. Разработка и испытания сверхмалого телеуправляемого корабля // Подводные исследования и робототехника. С.48-57
3. Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 109-121.
4. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4 (107). С. 31-41.
5. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4 (107). С. 31-41.
6. Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В. Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474-479.
7. Информационные технологии в радиотехнических системах: / В.А.Васин, И.Б.Власов, Ю.М.Егоров и др. Под ред. И.Б.Федорова. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004, – 768с.
8. Мальшкін Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. СПб. ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2009.-400с.
9. Martynova L.A., Koryakin A.V., Lantsov K.V., Lantsov V.V. Determination of coordinates and parameters of a moving object by image processing // Computer Optics. 2012. Т. 36. № 2. С. 266-273.
10. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 47-57.
11. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). Материалы 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. Председатель президиума мультиконференции В.Г. Пешехонов. 2016. С. 205-209.
12. Мартынова Л.А. Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсмозвездки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2 (87). С. 77-87.
13. Мартынова Л.А., Машошин А.И. Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // Экстремальная робототехника. 2016. Т.1. № 1. С.86-91.

**V.V.Lantsov, A.V.Koryakin**, (Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Applied Problems"), **L.A. Martynova** (JSC "Central Research Institute" Elektropribor ", St. Petersburg). **Multi-Agent Approach to the Problem of Determining the Motion Parameters of a Detected Object**

The complex for detecting small unmanned aerial vehicles in the sea area, which is an autonomous detection means located on ultra-small unmanned boats (SMBC), is considered discovery information. The composition of consumers who need to bring information about the parameters of the movement of the drone is determined, and the route for bringing information to consumers is determined.

А. А. ТИМОШЕНКО, А. В. ЗУЕВ, Э. Ш. МУРСАЛИМОВ,  
(Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток,  
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток)  
В. В. ГРИБОВА,  
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток)  
А. В. ИНЗАРЦЕВ  
(Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток)

## ПОДХОД К ОПИСАНИЮ И ДИАГНОСТИРОВАНИЮ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТАХ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ

*В работе предложен новый подход к описанию и диагностированию неисправностей, возникающих в бортовых подсистемах и модулях автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в процессе выполнения ими миссий и технологических операций, а также описана концепция построения интеллектуальных контрольно-аварийных систем (ИКАС), основанных на применении этого подхода. ИКАС, построенная с использованием предложенного подхода, позволяет обеспечивать своевременное обнаружение возникающих на борту АНПА неисправностей, а также безопасное завершение выполняемых миссий в случае их выявления.*

**Введение.** В настоящее время АНПА активно используются при исследовании и освоении Мирового океана [1], в том числе все более актуальными становятся задачи по автоматизированной подводной добыче и транспортировке полезных ископаемых, а также по обслуживанию подводных добычных комплексов и газопроводов [2]. Выполнение этих задач предполагает длительное пребывание АНПА в агрессивной среде и повышает риск возникновения неисправностей. Поэтому необходимо обеспечить надежное функционирование АНПА и безопасное завершение выполняемых им миссий.

Для диагностирования неисправностей современные АНПА оснащаются контрольно-аварийными системами [3], но, как правило, состояние бортовых подсистем анализируется изолированно друг от друга. Кроме того, в этих системах не реализуется адаптация к последствиям отказов, позволяющая продолжить выполнение миссий и технологических операций. Также в целом можно отметить, что все известные подходы к построению указанных систем для АНПА не предполагают функционального диагностирования, т.е. проверку в процессе выполнения миссий правильности функционирования отдельных подсистем роботов [4]. Задача реализации систем функционального диагностирования (СФД) для АНПА была решена с помощью банков наблюдателей для движителей [5] и навигационно-пилотажных датчиков [6]. Но предложенные решения узкоспециализированы и не имеют реализации для модулей полезной нагрузки. Кроме того, существующие СФД также работают изолированно, т.е. они выполняют свои функции на основе сигналов и параметров только той подсистемы АНПА, для которой были реализованы. Так как СФД работают на основе некоторой математической модели устройства, то синтез таких систем для комплексного анализа состояния АНПА чрезвычайно сложен и нецелесообразен.

Для реализации комплексной диагностики робототехнических систем в последние годы прибегают к методам искусственного интеллекта с использованием баз знаний, построенных на основе онтологического подхода. В работе [7] с этой целью была предложена концепция интеллектуальной контрольно-аварийной системы (ИКАС), использующей базы знаний для комплексного анализа неисправностей ПР и выработки решений по адаптации к ним. Базы знаний позволяют формально описать неисправности и признаки для их определения, а онтологический подход к построению позволяет представить их в виде, удобном для восприятия человеком и реализации в машинном коде. Тем не менее, онтология базы знаний для описания неисправностей, предложенная в работе [7], является громоздкой из-за наличия в ней большого числа понятий, относящихся к нижнему уровню используемых систем. Для минимизации ошибок при сопровождении базы знаний и обеспечения удобства ее эксплуатации онтология должна быть простой и понятной для конечного пользователя.

Таким образом, целью доклада является разработка нового подхода к описанию и диагностированию неисправностей, возникающих в АНПА в процессе выполнения различных

миссий и технологических операций, с применением баз знаний, построенных на основе онтологического подхода, а также разработка концепции ИКАС для АНПА, соответствующей новому подходу. Достичь поставленной цели предлагается за счет разработки двух новых онтологий для баз знаний, обладающих более простой структурой по сравнению с [7] и учитывающих различную конфигурацию АНПА.

**Описание нового подхода.** Разработку нового подхода предлагается начинать с описания общей схемы работы ИКАС. Свои функции система должна осуществлять за счет использования баз знаний, построенных с помощью онтологического подхода. Непрерывное удаленное сопровождение баз знаний предлагается реализовать с использованием программной интернет-платформы разработки и поддержки интеллектуальных облачных сервисов, например IASaaS [8]. Сервис имеет собственные инструменты работы с базами знаний, но ввиду отсутствия подключения к сети Интернет во время глубоководных погружений, в составе ИКАС должен быть реализован семантический механизм рассуждений, обрабатывающий автономные версии баз знаний в процессе выполнения АНПА своих миссий, а также интерфейс синхронизации баз знаний с облачным сервисом. Опираясь на информацию, заключенную в базах знаний, и анализируя состояния бортовых подсистем АНПА, семантический механизм рассуждений ИКАС должен вырабатывать решения по адаптации к последствиям неисправностей, а для преобразования этих решений в управляющие сигналы должна быть реализована библиотека интеллектуальных агентов ИКАС. Взаимодействие ИКАС с информационно-управляющей системой АНПА происходит с помощью некоторого интерфейса обмена данными. Построенная таким образом система будет учитывать различные возможные конфигурации АНПА и обеспечивать своевременную и адекватную реакцию на любые возможные неисправности.

Далее необходимо разработать структуру баз знаний, используемых ИКАС АНПА. В этой работе предлагаются две различные базы знаний, содержимое которых определяется соответствующими онтологиями. Основная база должна содержать информацию о возможных *диагностических ситуациях*, т.е. особых состояний АНПА, выраженных в возникновении одной или нескольких неисправностей в различных подсистемах робота. Каждой диагностической ситуации должны соответствовать конкретные аварийные, адаптационные или диагностические действия для адаптации к последствиям неисправностей, а определять ее предлагается за счет вычисления логического условия, элементами которого являются *атомарные признаки*, под которыми понимаются элементарные, не делящиеся на более мелкие, состояния подсистем АНПА, и которые могут принимать значения только *истина* или *ложь*. Онтология описанной базы знаний показана на рис. 1(а). При вычислении логического выражения используются базовые операции логического сложения  $\vee$  (дизъюнкции), умножения  $\wedge$  (конъюнкции) и отрицания  $\neg$ . Например, для диагностической ситуации «Необходимость прекращения миссии со сбросом балласта» может быть определено следующее логическое выражение: *Выполняется миссия  $A$  (аварийное отключение батареи  $V$  нет навигации для галса  $V \neg$ (маршевая группа исправна  $A$  (есть связь с батареей 1  $V$  есть связь с батареей 2  $V$  есть связь с батареей 3)))*. Во время длительных исследовательских экспедиций конфигурация конкретного ПР может несколько раз меняться, соответственно может изменяться набор возможных неисправностей, которым подвержен АНПА. Поэтому вторая база знаний должна описывать набор компонентов и сменных модулей, из которых может состоять ПР, и состояний, в которых они могут находиться. Онтология для этой базы знаний представлена на рис. 1(б). Предложенные онтологии позволяют построить базы знаний для описания диагностических ситуаций и различной конфигурации АНПА, которые при этом обладают простой структурой и логически понятны при сопровождении и последующей эксплуатации в ИКАС.

Для исследования эффективности подхода к описанию и диагностированию неисправностей был разработан прототип ИКАС на языке Python. Прототип реализует часть функций ИКАС, а именно чтение и декодирование баз знаний, сформированных с помощью облачной платформы IASaaS, а также вычисление диагностических ситуаций на основе атомарных признаков и вывод действий для их разрешения. На рис. 2 показан фрагмент результата работы программы. В верхней части вывода программы показаны значения атомарных признаков, считанных при вычислении диагностических ситуаций. Ниже выводятся диагностические ситуации, которые

были обнаружены во время одной из итераций работы решателя. Каждой обнаруженной диагностической ситуации соответствует набор необходимых для выполнения действий.

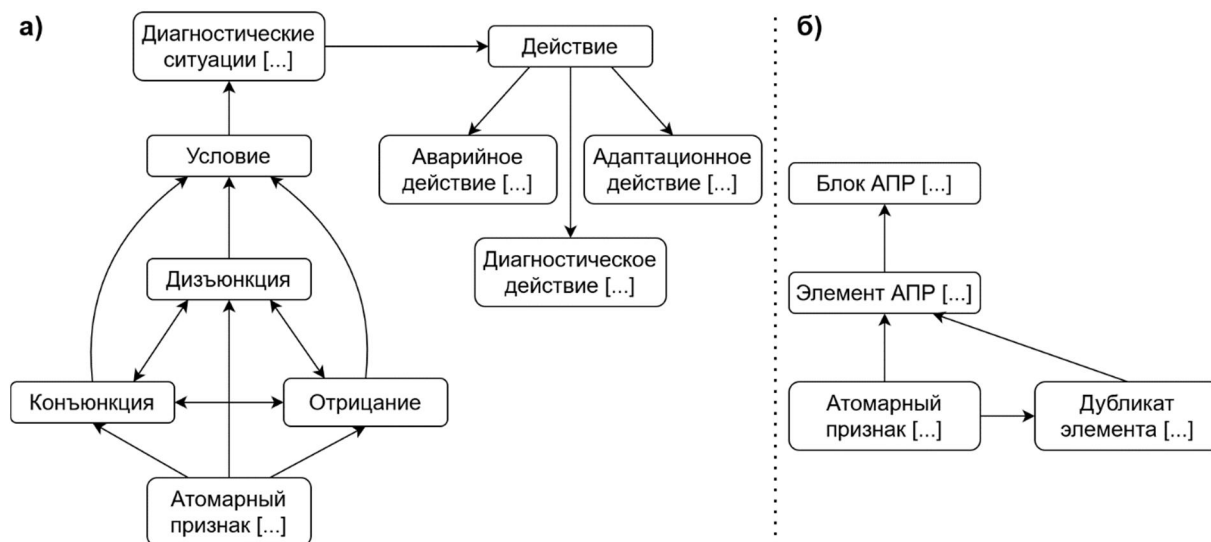


Рис. 1. Онтология диагностических ситуаций (а) и онтология конфигурации ПР (б)

```

"Выполняется миссия": True
"Актуальная версия встроенного ПО КСКАБ": True
"АВБ исправно": True
"Параметры КАБ в допустимых пределах": False
"Есть связь с батареей": True
"Есть связь с батареей": False
"Есть связь с батареей": False
"Есть связь с батареей": False
"Есть связь с батареей": True
"Обнаружение береговой линии": False
"Аварийное отключение батареи": False
"Нет навигации для галса": True
"МГ исправна": True
"Навигационные данные достоверны": True
"Выставка навигационных данных в процессе": True
"Задается движение": False
"Свободное вращение МГ": False
"Допустимая ошибка движения по траектории": False
"Допустимая температура силовых ключей МГ": False
-----
Необходимость прекращения миссии без сброса балласта:
--->Аварийное действие:Завершение миссии
Необходимость прекращения миссии со сбросом балласта:
--->Аварийное действие:Завершение миссии
--->Аварийное действие:Сброс балласта
-----
    
```

Рис. 2. Фрагмент вывода программы

**Заключение.** В данной работе был предложен новый подход к описанию и диагностированию неисправностей, возникающих в процессе функционирования АНПА, с использованием онтологий, а также описана общая схема работы ИКАС, основанная на предложенном подходе. При использовании этого подхода ИКАС должна обеспечить безопасное завершение выполняемых роботом миссий в случае обнаружения неисправностей бортового оборудования АНПА за счет функционального диагностирования всех подсистем и сменных модулей робота. Для определения структуры и отношений между отдельными

понятиями баз знаний, используемых ИКАС были разработаны две новые онтологии, которые обладают простой структурой, что облегчает реализацию и последующую эксплуатацию ИКАС.

*Работа проводилась при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-01303.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А.** Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Под. ред. В.Ф. Филаретова. Владивосток: Дальнаука, 2016. 400 с.
2. **Филаретов В.Ф., Климчик А.С., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю., Зуев А.В.** Интеллектуальные подводные робототехнические комплексы для выполнения осмотровых и технологических операций на морских газопроводах и добычных комплексах. Газовая промышленность. 2020. Т. 804. № 8. С. 30-38.
3. SeaRaptor Teledyne. URL: <http://www.teledynemarine.com/searaptor-auv> (дата обращения: 24.03.2022).
4. **Мироновский Л.А.** Функциональное диагностирование динамических систем. М.; СПб.: Изд-во МГУ, 1998. 256 с.
5. **Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Жирабок А.Н., Проценко А.А.** Разработка системы аккомодации к дефектам в движителях подводных роботов. Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 5. С. 262-271.
6. **Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А.** Метод синтеза систем диагностирования и аккомодации к дефектам в навигационных датчиках автономных подводных аппаратов. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т.13. №7. С. 32-40.
7. **А. В. Инзарцев, В. В. Грибова, А. С. Клещев.** Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях. Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2(20). С. 4-11.
8. **Gribova V., Kleschev A., Moskalenko P., Timchenko V., Fedorisidiev L., Shalfeeva E.** The IACPaaS cloud platform: Features and perspectives. 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). IEEE, 2017. С. 80-84.

**A. A. Timoshenko, A. V. Zuev, E. S. Mursalimov** (Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Far East Federal University, Vladivostok), **V. V. Gribova** (Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok), **A. V. Inzartsev** (Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok). **An approach to the description and diagnosis of malfunctions in autonomous underwater robots based on ontologies.**

The paper proposes a new approach to the description and diagnosis of malfunctions that occur in the onboard subsystems and modules of autonomous underwater robots (AUR) during their missions and technological operations, and also describes the concept of building intelligent control and emergency systems (ICES) based on the application of this approach. ICES, built using the proposed approach, makes it possible to ensure timely detection of malfunctions occurring on board the AUR, as well as the safe completion of missions performed if they are detected.



С. В. КОЗИК, В. А. СИБИЛЕВ  
(ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»,  
Санкт-Петербург)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ НАВИГАЦИИ ПО НЕБЕСНЫМ СВЕТИЛАМ

*Обеспечение безопасного судоходства – ключевой фактор надёжного и эффективного судоходства. Обеспечение навигационной безопасности подразумевающие знание координат места судна. В открытом море единственным источником обсервованного места судна служат спутниковые системы. Выявлены опасности этих систем – возможность воздействия для искажения или введения ложной навигационной информации в радиолинии спутник-приемоиндикатор. Устранение этих опасностей возможно путем использования навигации по небесным светилам, что ставит задачу совершенствования средств навигации, используемых для этого.*

**Введение.** В каждый момент плавания судно подвержено влиянию разных опасностей, соответственно применяются различные меры и действия для предотвращения их влияния на безопасности плавания судна. Для судна в состоянии движения одной из существенных опасностей будет являться навигационная опасность [1]. Комплекс мер по устранению навигационных опасностей обозначается понятием «обеспечение навигационной безопасности плавания». В основе решения навигационных задач обеспечения навигационной безопасности плавания лежит знание местоположения опасности и собственное местоположение.

Для определения местоположения опасностей используется информация картографических систем и средства навигационного обнаружения. Для определения собственного местоположения в преобладающем числе случаев используется глобальные навигационные спутниковые системы. Однако данные системы могут быть подвержены деструктивному радиоэлектронному воздействию – искажению или введению ложной информации в радиолинии спутник-приемоиндикатор и появлению ложных радионавигационных полей. В мировом сообществе ситуация введения заведомо ложной информации обозначается термином GPS spoofing, а ситуация искажения - GPS jamming [2, 3]. Появляются предпосылки к неполноценному обеспечению навигационной безопасности плавания, нарушению требований международной конвенции SOLAS [4, Гл.5, Пр.19.2.1.6]: «Все суда, независимо от размера, должны иметь <...> средства, пригодные для использования в любое время на протяжении всего предполагаемого рейса для установления и обновления положения судна автоматическим способом». Выявлению ситуации деструктивного воздействия на сигналы спутниковой системы возможно путем использования способа получения обсервованных координат места судна по небесным светилам. Возможность применение этого способа на судне в современных условиях ставит научную и конструкторские задачи по совершенствованию средств навигации, используемых для этих целей.

Предлагаемый доклад посвящен обоснованию направлений совершенствования средств навигации по небесным светилам, полученным конструкторским решениям навигационного прибора «Электронный секстан».

### **Особенности способа определения координат места судна по небесным светилам.**

Указанный способ имеет следующие преимущества:

- одинаковая точность обсерваций в любой точке мирового океана;
- полная автономность;
- скрытность наблюдений и независимость от результатов человеческой радиотехнической деятельности (в политических интересах или в целях пиратства).

К недостаткам способа следует отнести:

- зависимость от погодных условий;
- относительно низкая точность полученных координат места судна;
- высокие требования к навыкам операторов при работе с секстаном;
- аналоговое устройство секстана, требующее записи результатов на бумаге;

- необходимость двух операторов для измерения навигационного параметра;
- большой объем вычислений.

Устранение выявленных недостатков определяет пути совершенствования как самого способа, так и средств навигации. Обобщенное представление направлений совершенствования представлено на рис. 1.



Рис. 1. Направления совершенствования средств навигации по небесным светилам

**Модернизация существующих средств навигации по небесным светилам.** Средства навигации, обеспечивающие реализацию рассматриваемого способа определения координат места судна, можно разделить на измерительные и вычислительные.

К вычислительным средствам можно отнести «Морской астрономический ежегодник», The Nautical Almanac, Ephemerides Nautiques, и др.

Исследование, направленное на совершенствование вычислительных средств представлено в работе [5], а практическим промежуточным результатом служит разработанная программа для ЭВМ «Навигационный астрономический помощник» [6], автоматизирующая вычислительные процессы при определении координат места судна по небесным светилам.

К измерительным средствам можно отнести навигационный секстан, пеленгатор и хронометр.

Усовершенствовать навигационный секстан предлагается путем перевода его показаний из аналогового в цифровой вид и внедрения вычислительных устройств в корпус секстана. В результате усовершенствований можно добиться следующих функций устройства:

- автоматический перевод измеренной высоты в цифровой вид;
- автоматический учет моментов времени измерений;
- усреднение результатов измерений и моментов времени;
- вывод результатов измерений на цифровой дисплей;
- автоматическое вычисление эфемерид навигационных светил;
- автоматическое вычисление географических координат места судна;
- возможность выводить результаты измерений на стороннее устройство

Выполнены конструкторские исследования, которые привели к созданию прототипа «Электронного секстана» [7].

**Разработка нового способа измерения высоты светила и создание средств навигации для его применения.** Содержание нового способа заключается в измерении высоты светила на растровом изображении небосвода, путем расчета кратчайшего расстояния между светилом и горизонтом [8, 9]. Реализация указанного способа позволила создать макет нового навигационного прибора – «Фотосекстан».

Обработка изображения состоит из трех этапов. На первом этапе на основе базы знаний на цифровом изображении выделяются области: водной среды, воздушной среды и светила. На втором этапе анализируется область соединения воздушной среды с водной средой и выделяется линия горизонта. На третьем этапе рассчитывается расстояние от линии горизонта до центра светила в пикселях. Далее происходит пересчет из координат пикселей в градусную меру путем поиска минимального углового расстояния между горизонтом и центром светила, с учетом абберационных характеристик фотоматрицы и объектива фотосистемы.

В этом разделе можно отметить еще два направления:

- Электронный секстан с искусственным горизонтом
- Электронный секстан с возможностью измерения разности высот и разности азимутов.

**Совершенствование навыков работы судоводителей со средствами измерения высоты светила.** Появление навигационного прибора «Электронный секстан» и создание купольного планетария существенно улучшит систему подготовки судоводителей к использованию на судне способа получения обсервованных координат места судна по небесным светилам. Можно выделить следующие преимущества тренажера:

- оперативное создание заданий обучающимся, таких как: опознание светила; измерение высоты светила с помощью электронного навигационного секстана в режиме реального времени, измерение пеленга на светило в режиме реального времени;
- возможность автоматической оценки результатов выполнения упражнения, ведение электронного журнала успеваемости.

**Заключение.** Предложен путь повышения безопасности плавания судна, путем совершенствования способа определения координат места судна по небесным светилам. Обоснована целесообразность его использования для проверки работоспособности радиоканала спутник-приемоиндикатор системы спутниковой навигации от деструктивного воздействия третьей стороны. Представлена концепция путей совершенствования средств навигации по небесным светилам и условий совершенствования навыков их использования судоводителями.

Представленный прототип «Электронного секстана» имеет уровень TRL3 – создан макетный образец и продемонстрированы его ключевые характеристики. В ходе дальнейших работ проект будет доведен до уровня TRL5 – будет изготовлен опытный образец по полупромышленной технологии и протестирован в условиях, воспроизводящих реальность с высокой точностью.

Разработаны математические модели определения светила и горизонта на цифровом изображении, обоснован предлагаемый способ измерения высоты светила по цифровой фотографии небосвода. Предложен и апробирован экспериментальный способ определения калибровочных характеристик навигационного прибора «фотосекстанта».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23634-83. Морская навигация и морская гидрография. Термины и определения
2. Лукавский С. - Некоторые аспекты кибертерроризма. / Электронный ресурс: Геополитика.ru. <https://www.geopolitica.ru/article/nekotorye-aspekty-kiberterrorizma> 16.07.2015
3. Якушенко С. А., Дворников С. В. Модель угроз навигационной безопасности пользователей спутниковой радионавигационной системы // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Сборник статей XXII Международной научной конференции: 2-х частях, 2019. — С. 199-206
4. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. — 984 с.
5. Козик С. В., Денисова А. А., Алшыбеев Г. О. Математическая модель движения навигационных светил на небесной сфере // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 35–45
6. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2020614451. Рос. Федерация. Навигационный астрономический помощник / Г. О. Алшыбеев, С. В. Козик, В. А. Сибилев, А. А. Денисова, М. А. Филиппов; правообладатель ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2020613416; заявл. 27.03.2020; зарегистр. 09.04.2020; опубл. 09.04.2020, Бюл. № 4.

7. Патент 194783 Рос. Федерация, МПК G 01 C 1/08 Цифровой секстан / **В. А. Сибилев, С. В. Козик, Г. О. Алцыбеев**; патентообладатель ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова — № 2019132933; заявл. 17.10.2019; опубл. 23.12.2019, Бюл. № 36. — 7 с.. Патент на полезную модель № 205202 «Электронный секстан» от 02.07.2021.
8. Обоснование способа измерения высоты светила по цифровой фотографии небосвода / **Сибилев В.А., Козик С.В., Захаров С.А.** // Журнал «Известия вузов. Приборостроение» №4 (67), 2021. ISSN 0021-3454.
9. Экспериментальное обоснование способа калибровки навигационного прибора «фотосекстан» / **Сибилев В.А., Козик С.В., Захаров С.А.** // Журнал «Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета» №63, 2021. ISSN 2074-2762.

**S.V.Kozik, V.A.Sibiliv**, (The Federal State Financed Educational Institution of Higher Education “Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping”, Saint-Petersburg).

**Improvement of the means of navigation on the heavenly lights**

Ensuring safe navigation is a key factor in reliable and efficient shipping. Ensuring navigational safety, implying knowledge of the coordinates of the ship's position. On the high seas, satellite systems serve as the only source of the ship's position. The dangers of these systems are revealed - the possibility of exposure to distort or introduce false navigation information into the radio links of the satellite-receiver indicator. Elimination of these dangers is possible through the use of celestial navigation, which sets the task of improving the means of navigation used for this bstract in English can be a translation of the Russian abstract or an extended version of it.

С.В. СМОЛЕНЦЕВ  
(ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург)

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АГЕНТОВ В ЗАДАЧЕ РАСХОЖДЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ

*Доклад посвящен задаче безопасного расхождения судов в море. Рассматривается ситуация безэкипажных автономных судов, когда каждым судном управляет автоматический агент. Проведена формализация процесса возникновения ситуации опасного сближения и ее разрешения коллективными усилиями агентов. Описан граф состояний множества судов и условия переходов между этими состояниями. Определен перечень состояний агента в зависимости от статуса судна, которым он управляет и складывающейся навигационной ситуации. Предложен протокол взаимодействия агентов при решении задачи кооперативного маневрирования.*

### Введение

Задача безопасного расхождения судов в море является одной из важных составляющих проблемы обеспечения безопасности мореплавания. С внедрением безэкипажного судостроения эта задача должна решаться в автоматическом режиме. В работе автора [1] предложен алгоритм решения задачи безопасного расхождения судов в море. В случае кооперативного решения задачи расхождения безэкипажными судами, естественно говорить о выработке и реализации коллективного решения группой автоматов, управляющих этими судами. Подобный подход к решению задачи безопасного расхождения был предложен автором в работе [2].

В качестве объектов рассматриваются безэкипажные (автономные) суда, управляемые агентами. При этом все агенты являются универсальными и равноправными. То есть в группе агентов нет выделенного центрального (или приоритетного) агента, который координировал бы действия других агентов. В зависимости от складывающейся ситуации сближения и статуса судна каждый из агентов может выполнять различную роль в группе агентов при решении ими конкретной задачи расхождения.

В предлагаемом докладе рассматриваются основные принципы организации взаимодействия между агентами, управляющими безэкипажными судами в процессе решения задачи обеспечения безопасного расхождения.

### Постановка задачи.

Рассмотрим множество (группу)  $U$  судов в заданной акватории. В нем может быть определено подмножество судов  $G$ , в котором находятся объекты трех классов:

класс  $A$  - суда, которые идут опасно с другими судами, но не могут маневрировать (из за их привилегий в соответствии с МППСС или других причин);

класс  $B$  - суда, которые идут опасно с другими судами и обязаны маневрировать;

класс  $C$  - суда, которые не представляют опасности для других судов, но могут маневрировать;

класс  $F$  – суда, которые маневрируют с целью безопасного расхождения.

Соответственно  $G = A \cup B \cup C \cup F$ .

Кроме того, в акватории могут находиться суда класса  $D$ :  $D = U/G$ . Ни одно из судов множества  $D$  не идет опасно относительно любых судов из  $U$ . В противном случае эти суда так же включаются в  $G$ . Суда, не включенные в  $G$ , выступают как ограничения для решений, принимаемых для судов из  $G$ .

С каждым судном связан агент, управляющий этим судном. У каждого агента свой интерес (целевая функция) - заданный маршрут следования судна в данной акватории.

Проблема кооперативного маневрирования состоит в том, что действиями агентов необходимо разрешить конфликт - опасное сближение судов внутри группы  $G$ . Для этого надо изменить маршруты судов внутри группы, так, чтобы между судами не возникала ситуация опасного сближения и при этом минимизировалось общее отклонение всех маршрутов судов в группе от начальных. Принципы построения множеств  $A, B, C, D$ , а так же алгоритмы поиска решения по безопасному маневрированию предложены в [2].

### Графы состояний

В докладе рассмотрен процесс образования ситуации опасного сближения и ее разрешения как последовательность состояний множества  $U$ . Эти состояния различаются составом его подмножеств:

$$U = A \cup B \cup C \cup D \cup F;$$

$$G = A \cup B \cup C \cup F;$$

$$A \cap B = A \cap C = A \cap D = A \cap F = B \cap C = B \cap D = B \cap F = C \cap D = C \cap F = D \cap F = \emptyset.$$

Граф состояний множества  $U$  представлены на рис.1, а граф состояний каждого судна на рис. 2:

U1 - Все суда в акватории движутся безопасно:

$$A = \emptyset, B = \emptyset, C = \emptyset, D = U, F = \emptyset, G = \emptyset.$$

U2 - Ситуация опасного сближения:

$$A \neq \emptyset, B \neq \emptyset, C = \emptyset, D = U/G, F = \emptyset, G = A \cup B.$$

U3 – Для решения задачи безопасного расхождения привлекаются дополнительные суда:

$$A \neq \emptyset, B \neq \emptyset, C \neq \emptyset, D = U/G, F = \emptyset, G = A \cup B \cup C.$$

U4 – Маневрирование для безопасного расхождения:

$$A = \emptyset, B = \emptyset, C = \emptyset, D = U/F, F \neq \emptyset, G = F.$$

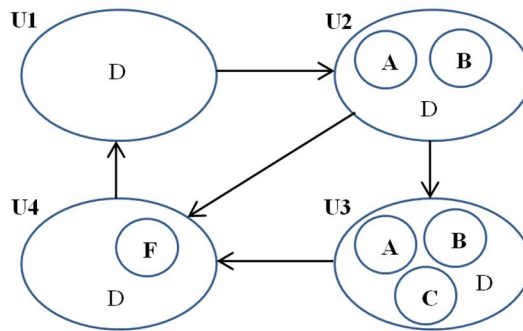


Рис. 1. Граф состояний множества  $U$

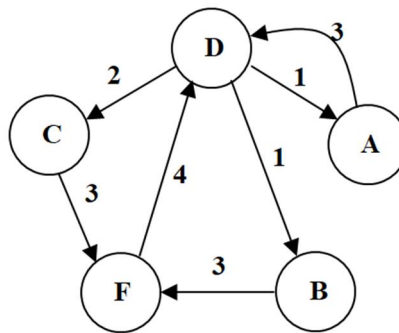


Рис. 2. Граф состояний судна

В докладе описаны состояния каждого судна и условия перехода между этими состояниями.

### Протокол взаимодействия агентов

Для реализации кооперативного взаимодействия между агентами необходимо реализовать протокол обмена информацией. В докладе предлагается система адресации, описываются типы сообщений и ситуации, в которых агенты передают те или иные сообщения.

Диаграмма протокола определяет привязку сообщений, передаваемых агентом, к состояниям этого агента и событиям в процессе возникновения и разрешения ситуации опасного сближения. Она представлена на рис. 3.

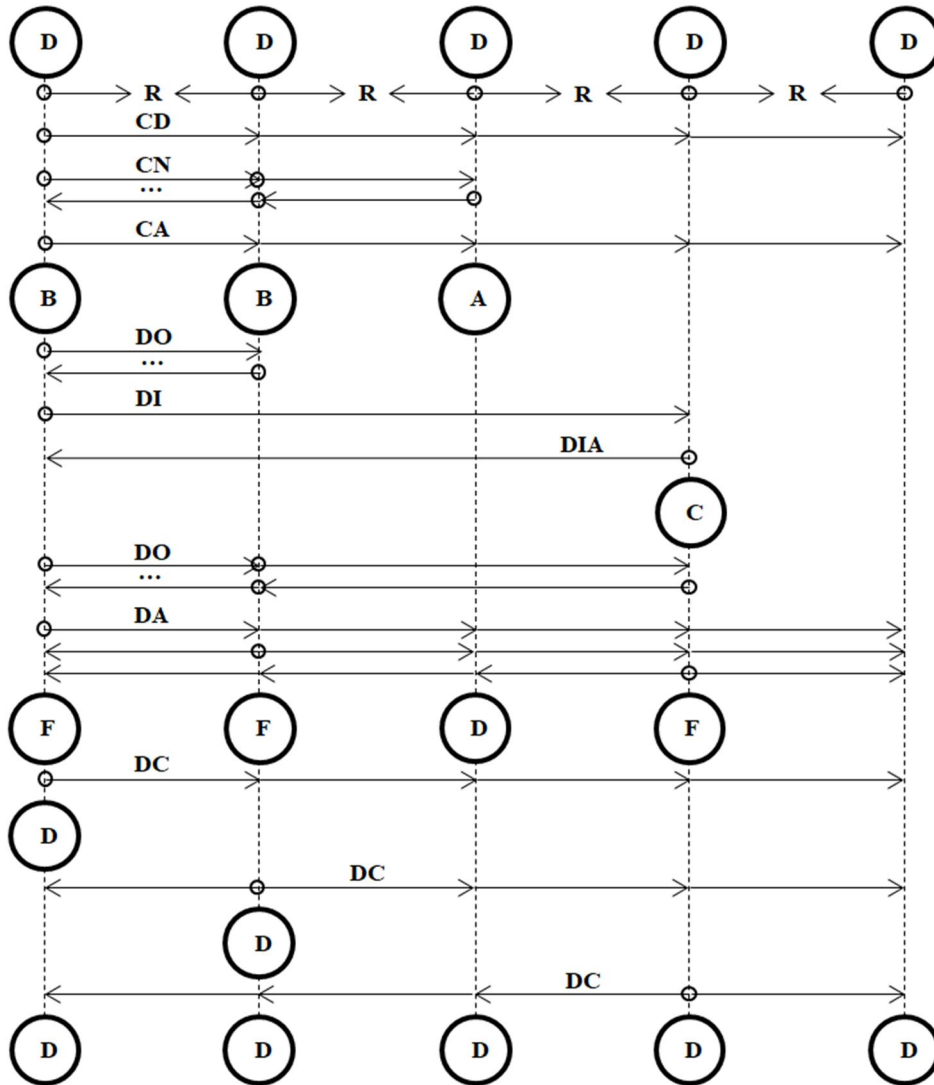


Рис. 3. Диаграмма протокола взаимодействия агентов

Типы сообщений

R - READY

CD - COLLISION\_DETECTED

CN - COLLISION\_NEGOTIATION

CA - COLLISION\_AGREEMENT

DO - DESITION\_OFFER

DA - DECISION\_AGREED

DI - DECISION\_INVITE

DIA - DECISION\_INVITE\_ACCEPTED

DC - DECISION\_COMPLETED

### Заключение

В докладе рассмотрена проблема взаимодействия агентов, управляющих автономными безэкипажными судами при решении задачи кооперативного маневрирования.

Показано, что все агенты являются равноправными, но в различных условиях могут находиться в разных состояниях и играть различные роли. Предложен протокол взаимодействия агентов при решении задачи кооперативного маневрирования. Определена система адресации, типы сообщений. Перечислены сообщения, которыми должны обмениваться агенты в процессе обнаружения и разрешения ситуации опасного сближения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смоленцев С.В.** Автоматический синтез решений по расхождению судов в море. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова - №2, 2016 - С. 7-16 DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-7-16
2. **Смоленцев С.В., Сазонов А.Е., Искандеров Ю.М.** Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2018. - №4(50). - С. 687-695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695

**Smolentsev, Sergey V.** (Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation). **Interaction of agents in the problem of collision avoidance of unmanned vessels.**

The report is devoted to the problem of safe passing of ships at sea. The situation of unmanned autonomous vessels is considered, when each vessel is controlled by an automatic agent. The formalization of the process of the emergence of a situation of dangerous approach and its resolution by the collective efforts of agents is carried out. The state graph of a set of ships and the conditions for transitions between these states are described. The list of states of the agent is determined depending on the status of the ship he controls and the current navigational situation. A protocol for the interaction of agents in solving the problem of cooperative maneuvering is proposed.



Б. А. ЛАГОВСКИЙ  
 (Российский технологический университет, Москва)  
 Е. Я. РУБИНОВИЧ  
 (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

## ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ КАК МЕТОД ДОСТИЖЕНИЯ УГЛОВОГО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ

*Теоретически обоснован метод цифрового синтезирования апертуры антенных систем, позволяющий повышать точность угловых измерений и восстанавливать радиоизображения объектов со сверхразрешением. Метод основан на экстраполяции сигналов, принимаемых каждым элементом антенной решётки, за пределы апертуры, что позволяет создать виртуальную антенную решётку значительно большего размера. Алгоритмы на основе метода обеспечивают угловое сверхразрешение в 3-7 раз превосходящее критерий Рэлея.*

**Введение.** Важнейшая современная проблема совершенствования многих информационных систем, в том числе систем радиолокации, радионавигации, радиоуправления – повышение их информативности. Одно из важных направлений решения – повышение угловой разрешающей способности и точности. Ставится задача определения возможно более точного расположения источника сигналов и формирования его детализированного изображения с угловым разрешением, превышающим критерий Рэлея, т.е. со сверхразрешением. Предлагаемый доклад посвящен обоснованию нового метода обработки данных систем измерений и наблюдений на основе экстраполяции сигналов в целях достижения сверхразрешения. Показана эффективность метода, адекватность и устойчивость получаемых решений.

**Постановка задачи.** Принимаемый системой при сканировании углового сектора по одной из координат сигнал  $U(\alpha)$  может быть представлен как сумма полезного сигнала в виде интегрального преобразования и случайных составляющих – шума  $u_n(\alpha)$ :

$$U(\alpha) = \int_{\Omega} F(\alpha - \varphi) I(\varphi) d\varphi + u_n(\alpha), \quad (1)$$

где  $\Omega$  – угловая область расположения источника сигнала,  $F(\alpha)$  – диаграмма направленности (ДН) антенной системы,  $I(\varphi)$  – угловое распределение амплитуды отраженного объектом (или же излучаемого им) сигнала.

Угловое разрешение в виде угла  $\delta\alpha$ , обеспечиваемое системой, определяется критерием Рэлея:

$$\delta\alpha \cong \lambda / D, \quad (2)$$

и равно ширине  $\theta_{0,5}$  луча ДН по половинной мощности. В (2)  $D$  – размер антенной системы,  $\lambda$  – длина волны.

Ставится задача разработки метода цифровой обработки сигнала, позволяющего восстанавливать изображения объектов  $I(\alpha)$  с разрешением, превышающим критерий (2). Поставленная задача сводится к решению интегрального уравнения (ИУ) Фредгольма первого рода типа свёртки (1) относительно  $I(\alpha)$  и относится к классу обратных. Она не удовлетворяет второму и третьему требованиям корректности задач по Адамару, т.е. является некорректно поставленной.

Во многих странах разрабатываются и внедряются методы обработки сигналов, например, [1-4], позволяющие достигать сверхразрешения. Основная трудность реализации всех предложенных методов – неустойчивость решений, являющаяся следствием некорректности поставленной задачи [5-7].

**Метод решения.** Для современных антенных систем на основе цифровых антенных решёток (ЦАР) предлагается новый подход к задаче, без прямого использования (2), что повышает стабильность алгоритмов.

Для упрощения получаемых выражений рассмотрим большую линейную эквидистантную ЦАР с числом элементов  $2N+1$ . Диаграмма направленности ЦАР, сфокусированная в

направлении  $\alpha_0$ , может быть представлена в виде суммы:

$$F(\alpha - \alpha_0) \cong \sum_{n=-N}^N \exp(-ikdn(\alpha - \alpha_0)). \quad (3)$$

Преобразуя (1) на основе (3), получим сумму:

$$U(\alpha) = \sum_{n=-N}^N \exp(-ikdn\alpha) \int_{\Omega} \exp(ikdn\phi) I(\phi) d\phi = \sum_{n=-N}^N C_n \exp(-ikdn\alpha), \quad C_n = \int_{\Omega} \exp(ikdn\alpha) I(\alpha) d\alpha \quad (4)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $d$  – расстояние между соседними излучателями.

Ядро ИУ (1) для ДН в виде (3) вырождено. Несложно показать, что тогда решение (1) можно представить в виде:

$$I(\alpha) \cong A \sum_{n=-N}^N \exp(-ikdn\alpha) C_n + \xi(\alpha), \quad (5)$$

где  $A$  – нормировочный коэффициент,  $\xi(\alpha)$  – произвольная функция, ортогональная всем функциям под знаком суммы, т.е. экспонентам  $\exp(-ikdn)$ ,  $n = -N, \dots, N$  на отрезке  $\lambda/d$ .

Часть решения, описываемая суммой в (5), представляет собой первые  $2N+1$  членов ряда Фурье и повторяет форму  $U(\alpha)$  с точностью до  $\xi(\alpha)$ . Полученное при этом разрешение соответствует критерию Рэлея.

Если к рассматриваемой АР добавить новые излучатели, то ДН станет уже, к сумме в (5) добавятся новые члены ряда Фурье, и получаемое приближённое решение станет точнее. В пределе при  $N \rightarrow \infty$  приходим к точному решению, соответствующему ДН в виде дельта-функции. В этом случае получаем разложение искомой функции в ряд Фурье на соответствующем интервале.

Воспользуемся тем, что в отличие от обычных АР коэффициенты  $C_n$  из (4) в цифровой АР могут быть зарегистрированы в цифровом виде и их значения использованы в дальнейшем при цифровой обработке сигналов. Различия в значениях  $C_n$ , как следует из (4), определяются только пространственным положением отдельных излучателей в составе АР. Можно ожидать, что, проанализировав расположение большого количества излучателей и соответствующих им значений принимаемого сигнала в виде коэффициентов  $C$ , окажется возможным с хорошей точностью найти зависимость коэффициентов от координат излучателей.

Решение этой задачи позволит прогнозировать значения принимаемого сигнала за пределами апертуры ЦАР. Тогда, используя найденные новые значения  $C_j$  при  $j = \pm(N+1) \dots \pm M$ , получим новую синтезированную ДН решётки большего размера. Принятый сигнал для новой АР также выражается в виде (4), но с распространением суммирования до  $2M+1$  членов, т.е. для АР с  $2M+1$  излучателями. В итоге, в решении (5) для синтезированной виртуальной решётки точность угловых измерений и разрешающая способность увеличатся в  $M/N$  раз.

Таким образом, приближённое решение ИУ (2) со сверхразрешением может быть сведено к определению значений возможно большего количества комплексных коэффициентов  $C$  за пределами апертуры ЦАР.

Предсказания значений коэффициентов  $C$  для виртуальных элементов ЦАР (т.е. за пределами реальной апертуры) может быть выполнено методами экстраполяции. Существует немало видов экстраполяции (линейные, полиномиальные, сплайновые и т.п.), которые характеризуются различными показателями сложности вычислений и быстродействием. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании алгоритма Берга.

**Пример решения.** Количественные характеристики достигаемого уровня сверхразрешения исследовались на математической модели. Была рассмотрена 17-ти элементная линейная ЦАР ( $N = 8$ ). Объект исследований задавался в виде распределения  $I(\alpha)$  и, далее, вычислялся принимаемый каждым элементом сигнал  $C_n$ .

Затем решалась обратная задача. Все  $C_n$  считались заданными и посредством экстраполяции коэффициентов  $C_n$  приближённо восстанавливалось распределение  $I(\alpha)$ .

Результаты приведены на Рис. 1. Показано: чёрная кривая – изображение истинного источника, состоящего из двух малоразмерных источников с несколько различными амплитудами отражаемого сигнала; верхняя синяя кривая – принятый сигнал  $U(\alpha)$  в области  $\Omega$ , т.е. полученное изображение источника без обработки; красная кривая – изображение

источника при проведенной экстраполяции, увеличившей размеры виртуальной АР в 4 раза по сравнению с исходной.

В итоге, малоразмерные источники оказались разрешены. Их амплитудные значения и угловое положение найдены с небольшими ошибками. Полученное решение устойчиво, амплитуды появившихся ложных источников относительно невелики и на практике ими можно пренебречь.

Без обработки сигнала максимумы такого источника разрешаются, если они расположены на угловом расстоянии  $1,4\theta_{0,5}$ , т.е. полученное решение со сверхразрешением превышает критерий Рэлея почти в 5 раз.

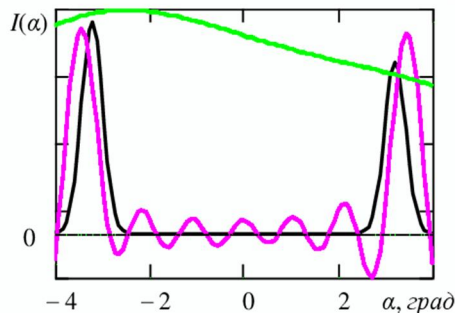


Рис. 1. Результаты восстановления изображения

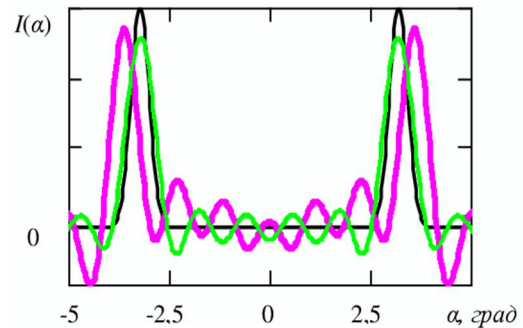


Рис. 2. Сравнение изображений виртуальной и реальной АР

На Рис. 2 приведено сравнение результатов, полученных при экстраполяции принимаемых сигналов за пределы истинной АР и реальной АР, имеющей те же размеры, что и синтезированная. Показано: чёрная кривая – изображение истинного источника, состоящего из двух малоразмерных источников с равными амплитудами отражаемого сигнала; красная кривая – угловое распределение сигнала, получаемого виртуальной АР; синяя кривая – угловое распределение сигнала, получаемого реальной АР того же размера.

Моделирование показало, что результаты, полученные при использовании методов экстраполяции, оказываются близки к реальным. При сближении источников качество изображения ухудшается, но не так быстро, как в методах [1-4], поскольку одновременно увеличивается интервал корреляции  $C_n$  и, следовательно, размер синтезированной апертуры.

Известно, что обратные задачи очень чувствительны к наличию ошибок в исходных данных. Поэтому, в дополнение к оценке степени превышения критерия Рэлея, важной характеристикой решений является минимальное отношение сигнал/шум (ОСШ) при котором решение со сверхразрешением все еще возможно. Численные эксперименты показали, что устойчивость решений и качество восстановления изображений остаются удовлетворительными при значительном уровне шума до – 14-16 дБ.

**Заключение.** Предлагаемый метод обработки сигналов ЦАР на основе экстраполяции сигналов позволяет восстанавливать изображения объектов со сверхразрешением. Его эффективность зависит от ОСШ, а также от характеристик источников сигналов. Последнее требует дополнительных исследований. Результаты численных исследований показали, что угловое сверхразрешение может быть достигнуто при существенно меньших значениях ОСШ, чем у многих известных методов и алгоритмов [3,6]. Разрабатываемые быстрые алгоритмы синтеза апертуры могут быть использованы в режиме реального времени.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ гранта №20-07-0000*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Kasturiwala S.B., Ladhake S.A.** Superresolution: A novel application to image restoration // International Journal on Computer Science and Engineering, 2010. № 5. P. 1659-1664.
2. **Uttam S., Goodman N.A.** Superresolution of coherent sources in real-beam Data // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2010. Vol. 46. № 3. P. 1557 - 1566.
3. **Park S.C., Park M.K., Kang M.G.** Super-resolution image reconstruction: a technical overview // IEEE Signal Processing

Magazine, 2003. Vol. 20(3). P. 21–36.

4. **Waweru N.P., Konditi D.B.O., Langat P.K.** Performance Analysis of MUSIC Root-MUSIC and ESPRIT // DOA Estimation Algorithm. International Journal of Electrical Computer Energetic Electronic and Comm. Engineering, 2014. Vol. 8. № 1. P. 209-216.
5. **Лаговский Б.А., Рубинович Е.Я.** // Мехатроника, автоматизация, управление, 2021, т.22, №7, с. 349.
6. **Lagovsky B., Rubinovich E.** // Advances in Systems Science and Applications, 2021, v. 21, No 2, p.104.

**B.A. Lagovsky** (Russian Technological University, Moscow), **E.Ya. Rubinovich** (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow). **Extrapolation of signals as a method of obtaining angular super-resolution.**

The method of digital synthesis of the aperture of antenna systems is theoretically justified, which makes it possible to increase the accuracy of angular measurements and restore radio images of objects with super-resolution. The method is based on extrapolation of the signals received by each element of the antenna array beyond the aperture, which makes it possible to create a much larger virtual antenna array. Algorithms based on the method provide an angular super-resolution 3-7 times higher than the Rayleigh criterion.

В. С. БЫКОВА, А. И. МАШОШИН  
(АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

## ЦИФРОВОЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ОТРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

*В работе обоснована необходимость создания цифровых полигонов на предприятиях-разработчиках АНПА, позволяющих повысить эффективность и сократить сроки и стоимость отработки системы управления АНПА. Кратко описан опыт применения такого полигона. Приведён пример моделирования миссии АНПА по поиску самолёта, потерпевшего крушение над морем.*

**Введение.** Автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1–3]. Особое место среди АНПА занимают аппараты тяжелого класса [4], которые могут взять на себя многие функции, традиционно возлагающиеся на специализированные надводные суда, подводные лодки и обитаемые подводные аппараты.

По общему мнению специалистов, разрабатывающих и эксплуатирующих АНПА в России и за рубежом, ключевым вопросом создания АНПА является разработка эффективной системы управления, назначение которой – обеспечить максимально точное выполнение маршрутного задания.

Разработка, а точнее отработка, системы управления АНПА в реальных условиях морского полигона требует значительных ресурсов и времени и при этом недостаточно эффективна. Выходом из положения является создание на предприятиях-разработчиках АНПА так называемых цифровых полигонов для разработки и отработки в условиях предприятия всех систем АНПА и, в первую очередь, системы управления.

Целью работы является изложение опыта создания и эксплуатации такого цифрового полигона.

**Описание цифрового полигона.** Цифровой полигон реализован на базе многопроцессорной вычислительной системы с развитой системой отображения.

Программное обеспечение (ПО) цифрового полигона, кроме общесистемного ПО, состоит из двух частей (рис.1):

1) цифрового двойника АНПА (блоки жёлтого цвета в рамке), включающего диспетчер и программные модели всех систем АНПА (включая их системы управления);

2) ПО, обеспечивающее имитационное моделирование поведения всех подвижных объектов, а также сигналов на выходе всех антенн и датчиков систем АНПА (блоки голубого цвета).

Средства отображения в динамике представляют оператору географию и гидрографию района плавания, траекторию движения АНПА и других подвижных объектов в трёхмерном пространстве, работу системы управления и каждой из систем АНПА.

Блоки, отвечающие за моделирование, имитируют:

- географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;
- работу навигационно-гидрографических средств, установленных в районе (спутниковых и радионавигационных систем, донных маяков-ответчиков, пассивных подводных ориентиров);
- подвижные подводные и надводные объекты;
- неподвижные препятствия (береговая черта, подводные горы и возвышенности, затонувшие корабли);
- входные сигналы режимов гидролокации и шумопеленгования гидроакустической системы освещения обстановки;
- входные сигналы навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килём;
- входные сигналы систем радио- и гидроакустической связи;
- динамику расхода запаса электроэнергии;
- динамику выхода из строя технических средств АНПА.

Моделирование подвижных и неподвижных объектов предполагает расчет их движения и акустических полей (первичного и вторичного). Поведение подвижных объектов может быть как адаптивным (т.е. изменяться при обнаружении АНПА), так и неадаптивным.

В результате моделирования гидроакустического канала формируется лучевая структура шума объекта либо эхосигнала от него на входе приемных антенн гидроакустической системы освещения обстановки, а также лучевая структура шумов моря, поступающих на вход приемных антенн. При этом учитываются гидроакустические условия в районе и текущее взаимное расположение объектов и АНПА.



Рис. 2. Структура программного обеспечения цифрового полигона

Моделирование радио и гидроакустического каналов передачи сигналов связи и навигации выполняется с учетом гидрометеорологических условий в районе выполнения миссии и возможностей аппаратуры, установленной на АНПА и на пункте управления.

Моделирование движения АНПА осуществляется следующим образом. Система управления в соответствии с маршрутным заданием и с учетом сложившейся обстановки выдает системе управления техническими средствами параметры движения АНПА, которые нужно установить. Система управления техническими средствами с использованием кинематической модели АНПА вырабатывает команды, которые передаются техническим системам АНПА для выполнения поступившего задания. Затем в соответствующем блоке моделируются параметры движения АНПА, которые реально удалось установить с учетом ограничений и возникших неисправностей технических средств. К ним в блоке моделирования оценок параметров движения добавляются систематические и случайные ошибки, характерные для навигационных приборов. Оценки параметров движения поступают в навигационную систему, выполняющую с их использованием штурманскую прокладку.

Цифровой полигон позволил отработать:

- взаимодействие диспетчера с системами АНПА и с командным пунктом по радио и гидроакустическим каналам связи;
- движение по маршруту с учётом течения, погрешностей измерения навигационных параметров, обсервации;
- позиционирование АНПА по сигналам спутниковых и радионавигационных систем, донных маяков-ответчиков, по подводным пассивным ориентирам, по естественным геофизическим полям;
- обход навигационных препятствий в виде береговой черты, подводных возвышенностей, неровностей дна, мусорных островов;
- обнаружение маневрирующих подводных и надводных объектов и при необходимости расхождение с ними на безопасном расстоянии;
- поиск назначенных донных объектов с использованием гидроакустических, электромагнитных и оптических средств мониторинга дна;
- действия при превышении расхода запаса электроэнергии по сравнению с плановым;
- действия при возникновении неисправностей в системах АНПА;
- корректуру маршрутного задания в силу возникших обстоятельств;

– аварийное прекращение миссии путём (в зависимости от условий) всплытия на поверхность, покладки на грунт либо приледнения.

**Заключение.** Ключевым вопросом создания АНПА является разработка эффективной системы управления.

Поскольку отработка системы управления АНПА в реальных условиях морского полигона требует значительных ресурсов и времени, целесообразно максимальный удельный вес отработки перенести на цифровые полигоны, которые должны создаваться на предприятиях-разработчиках АНПА.

В работе описан опыт создания и эксплуатации подобного цифрового полигона.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: Дальнаука. 2018. 368 с.
2. **Millar G., Mackay L.** Maneuvering Under the Ice // Sea Technology, 2015, vol.56, no.4, pp. 35–38.
3. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2020.
4. **Аполлонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.** О возможности и необходимости создания сверхбольшого обитаемого подводного аппарата // Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 34–42.

**V. S. Bykova, A. I. Mashoshin** (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). **Digital testing ground for testing the control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle.**

The paper substantiates the need to create digital test sites at AUV developers, which will improve efficiency and reduce the time and cost of developing the AUV control system. The experience of using such a testing ground is briefly described. An example of modeling an AUV mission to search for an airplane that crashed over the sea is given.

В. С. БЫКОВА, А. И. МАШОШИН, А. С. СМИРНОВ  
(АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

## О ПОДХОДЕ К РАСПОЗНАВАНИЮ ДОННЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ДНА, РАБОТАЮЩИХ НА РАЗНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

*Одной из задач, возлагаемой на автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) является поиск назначенных донных объектов. Для её решения АНПА оборудуются гидроакустическими, электромагнитными и оптическими средствами мониторинга дна. Учитывая, что каждое из этих средств имеет ограничения, предполагается их комплексное использование. Наиболее сложной задачей при поиске донных объектов является их распознавание. В работе для её решения предложено применение технологии глубокого обучения проблемно ориентированной искусственной нейронной сети с той особенностью, что обучающий материал формируется программным путём в виде цифровых изображений искомого донного объекта на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения. Показано применения данной технологии на примере распознавания трёх типов донных объектов по их изображениям, полученным с использованием гидролокатора бокового обзора.*

**Введение.** Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективными средствами изучения и освоения океана [1]. Одной из задач, возлагаемой на АНПА является поиск назначенных донных объектов.

Для решения задачи поиска донных объектов АНПА оборудуется набором средств мониторинга дна, работающих на разных физических принципах. К ним относятся [1,2]:

- гидроакустические станции (многолучевые эхолоты, гидролокаторы бокового обзора, профилографы);
- электромагнитные искатели;
- подводные телекамеры.

Целью работы является изложение одного из подходов к распознаванию донных объектов каждым из средств мониторинга дна.

**Обоснование подхода к распознаванию донных объектов.** Для распознавания донных объектов нельзя обойтись без использования технологий искусственного интеллекта и в частности технологий технического зрения, которые интенсивно развиваются в последнее время [3-11]. Из анализа публикаций следует, что из технологий технического зрения наибольших успехов достигла технология глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС). Однако для её эффективного применения требуется наличие большого объёма обучающего материала, исчисляемого тысячами и более экземпляров, что для рассматриваемой задачи поиска донных объектов практически не реализуемо.

Известна технология аугментации данных [9-11], которая заключается в увеличении объёма обучающего материала путём искусственного изменения условий наблюдения имеющегося экспериментально полученного обучающего материала. Авторы воспользовались данной технологией, но, учитывая специфику задачи, пошли несколько дальше и предложили вместо изображений объектов, полученных экспериментальным путём в реальных условиях, использовать изображения, полученные на цифровых моделях объектов. Для этого при получении задания на поиск конкретного донного объекта оперативно создаётся его цифровая модель, которая программным путём преобразуется в её цифровое изображение на выходе каждого средства мониторинга дна в различных условиях их наблюдения. А затем полученные аугментированные цифровые изображения используются для глубокого обучения проблемно ориентированной ИНС.

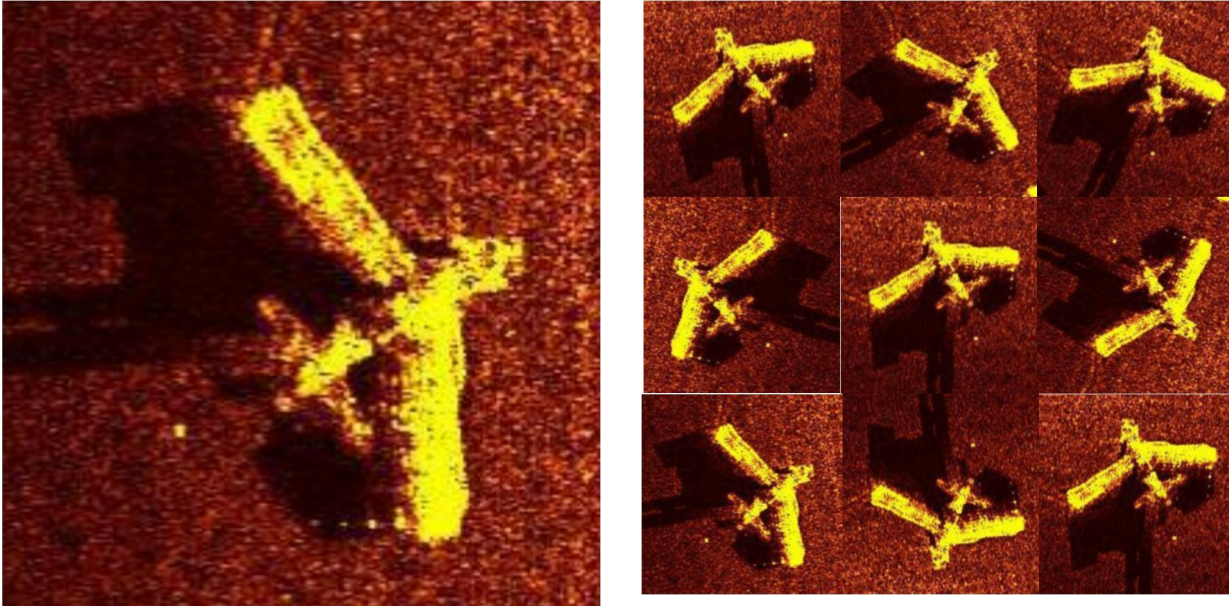
**Пример применения обоснованного подхода.** Рассмотрим применение обоснованного подхода для решения задачи распознавания донного объекта с использованием гидролокатора бокового обзора.



Для классификации рассматривались донные объекты типа «самолет». Для него была сформирована цифровая модель в виде его чертежа на плоскости. Затем с учётом характеристик гидролокатора бокового обзора цифровая модель объекта преобразовывалась в цифровое изображение объекта на выходе гидролокатора бокового обзора в различных условиях наблюдения объекта. Для увеличения объема обучающей выборки были применены следующие техники аугментации:

- поворот изображения на углы от 0 до 95 градусов;
- масштабирование изображения;
- отзеркаливание изображения.

Примеры аугментации исходного изображения объекта типа «самолет» (рис. 1а) показаны на рис.1б.



а) Исходное изображение

б) Варианты аугментированных изображений

Рис. 1. Примеры аугментации изображения объекта типа «самолет».

В результате аугментации было сформировано 1800 изображений размером 227x227 пикселей, из которых 1200 были обучающими и 600 контрольными.

В качестве ИНС с глубоким обучением была выбрана ИНС SqueezeNet [12]. Выбор именно этой сети был обусловлен её возможностью проводить обучение с наименьшими затратами вычислительной мощности. SqueezeNet является сверточной нейронной сетью, содержащей 18 скрытых слоев (слоёв обучения). Эта нейронная сеть настроена на классификацию изображения 1000 категорий объектов. Для применения SqueezeNet к нашей задаче проводилось её обучение на сформированных методом аугментации изображениях. Для этого настраивались параметры ИНС (скорость обучения, количество эпох обучения, функция оптимизации обучения и т.д.) таким образом, чтобы ошибка ИНС имела постепенно убывающее значение. Процесс обучения ИНС показал, что он сходится к практически стопроцентной вероятности распознавания.

После обучения ИНС на обучающей выборке был проведен анализ признаков, выделяемых нейронной сетью на каждом из слоев обучения. На рис.2 представлены несколько бинарных изображений, на которых обозначены наиболее значимые для классификации признаки на одном из слоев ИНС. При рассмотрении данных изображений можно отметить, что ИНС выделила не только контурные и яркостные признаки объекта, но и область гидроакустической тени, структуру фона, а также те цифровые признаки, которые не уловимы для человеческого глаза, но вносят весомый вклад в распознавание объекта типа «самолет» на гидроакустических изображениях гидролокатора бокового обзора.

Проверка обученной ИНС показала следующие вероятности распознавания объектов типа "самолёт":

- 94% на обучающей выборке;
- 76% на контрольной выборке.

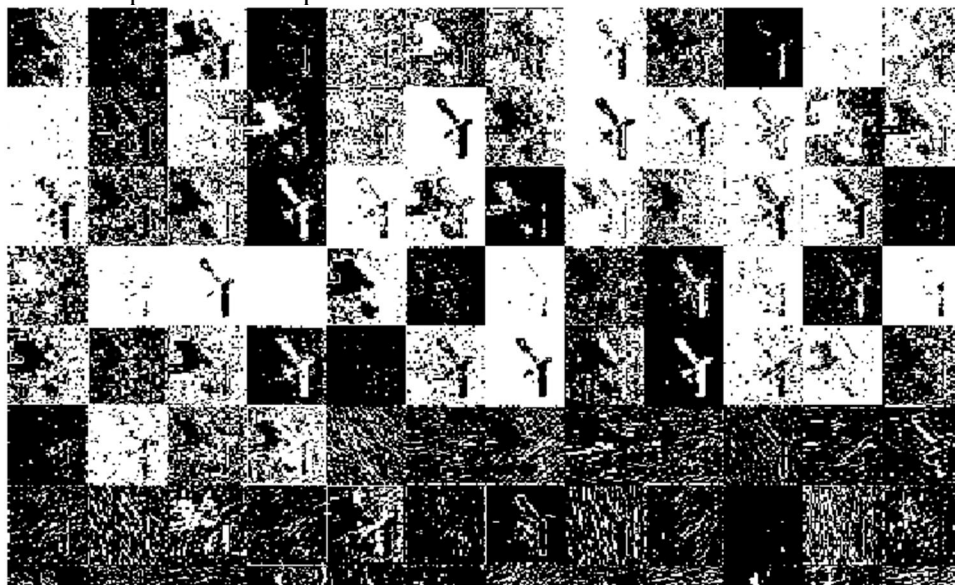


Рис. 2. Классификационные признаки изображения на одном из слоев ИНС.

**Заключение.** Одной из наиболее сложных задач, возлагаемых на АНПА является поиск назначенных донных объектов. Для решения этой задачи конструктивным видится применение технологии глубокого обучения проблемно ориентированной искусственной нейронной сети с той особенностью, что обучающий материал формируется программным путём в виде цифровых изображений искомого донного объекта на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: Дальнаука. 2018. 368 с.
2. **Агеев М.Д.** Оснащение и управление АНПА при обследовании подводных трубопроводов // В сб. «Морские технологии», вып. 5, Владивосток, Дальнаука, 2003. С. 6-17.
3. Решение задачи распознавания объектов и инцидентов на фотоматериалах, полученных беспилотных летательных аппаратов с использованием методом глубокого обучения / А.Ю. Белякова, Ю.Д. Беляков, П.С. Замятин. Инженерный вестник Дона, №5(2021)
4. Использование сверточных нейронных сетей для распознавания объектов в реальном времени /С.А. Разлацкий, П.Ю. Якимов. Информационные технологии и нанотехнологии – 2017. с 1679-1684
5. Алгоритмы обучения сверточных нейронных сетей / А.И.Бредихин, Вестник югорского государственного университета, 2019, Выпуск 1(52). С. 41-54
6. Глубокое обучение / Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. СПб.:Питер, 2018. – 480с.
7. **Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А.** Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс. 2017. 652 с.
8. **Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е.** Глубокое обучение. СПб.: Питер. 2018. 480 с.
9. **Гайер А.В., Шешкус А.В., Чернышева Ю.С.** Аугментация обучающей выборки «на лету» для обучения нейронных сетей // Труды ИСА РАН. Спецвыпуск. 2018. С. 150-157.
10. **Емельянов С.О., Иванова А.А., Швец Е.А., Николаев Д.П.** Методы аугментации обучающих выборок в задачах классификации изображений // Сенсорные системы.2018. Т.32, №3. С.236-245.
11. **Жуковский А.Е., Усилин С.А., Тарасова Н.А., Николаев Д.П.** Синтез обучающей выборки на основе реальных данных в задачах распознавания изображений // Информационные технологии и системы: сборник трудов конференции. 2012. С.377-382.
12. **Iandola F.N., Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer K.** SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5Mb model size // Under review as a conference paper at ICLR. 2017. P. 1-13.

**V. S. Bykova, A. I. Mashoshin, A.S. Smirnov (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg).  
About the approach to the recognition of bottom objects using bottom monitoring tools,  
operating on different physical principles.**

One of the tasks assigned to autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) is the search for designated bottom objects. To solve it, AUVs are equipped with hydroacoustic, electromagnetic and optical means of bottom monitoring. Considering that each of these means has limitations, their complex use is supposed. The most difficult task in the search for bottom objects is their recognition. In order to solve it, the paper proposes the use of deep learning technology of a problem-oriented artificial neural network with the peculiarity that the training material is generated by software in the form of digital images of the desired bottom object at the output of hydroacoustic, optical and electromagnetic means of bottom monitoring in various conditions for their observation. The application of this technology is shown on the example of recognition of three types of bottom objects from their images obtained using a side-scan sonar.

А.И. МАШОШИН, И.В. ПАШКЕВИЧ, А.В. ШАФРАНИОК  
(АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

## ЭМУЛЯТОР ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ

*В работе приводится описание разработанного программного эмулятора гидроакустического канала, позволяющего проверять качество функционирования гидроакустических модемов в условиях многолучевого канала распространения сигнала, доплеровских искажений и влияния помехи*

**Введение.** Качество функционирования модемов гидроакустической связи существенно зависит от гидроакустических условий (ГАУ), в которых распространяется связной сигнал (СС) и от отношения сигнал/помеха (ОСП) [1-3]. Поэтому для определения характеристик конкретного модема необходимо испытать его в различных ГАУ и при различных ОСП.

Учитывая, что испытания в реальных морских условиях являются весьма трудоёмкими и дорогостоящими, в работе [4] предложено испытания модемов проводить с использованием программного эмулятора гидроакустического канала (ПЭГК). В той же работе приведены облик такого эмулятора и требования к нему.

Целью работы является описание разработанного авторами ПЭГК, предназначенного для испытаний гидроакустических модемов.

**Описание программного эмулятора гидроакустического канала.** ПЭГК является программным продуктом, размещённым на ПЭВМ.

Входными данными для него являются:

- 1) связной сигнал в формате .wav, поступающий с выхода передающего модема;
- 2) параметры гидроакустических условий в районе, включающие:
  - глубину района;
  - вертикальное распределение скорости звука от поверхности до дна;
  - волнение поверхности;
  - частотную зависимость коэффициента пространственного затухания акустического сигнала;
  - угловую зависимость коэффициента отражения акустического сигнала от дна;
- 3) глубины источника и приёмника сообщения и горизонтальная проекция расстояния между ними;
- 4) скорость взаимного сближения (с минусом) либо удаления (с плюсом) источника и приёмника сообщения  $V_r$ ;
- 5) Отношение мощности связного сигнала к мощности помехи в той же полосе частот на входе приёмного тракта  $Q_{ss}$ .

В качестве приёмника сообщения предполагается ненаправленный гидрофон.

На выходе ПЭГК формируется связной сигнал на выходе приёмника в формате .wav.

Алгоритм функционирования ПЭГК выглядит следующим образом (рис.1).

- 1) Из входного связного сигнала в формате .wav извлекается собственно цифровой связной сигнал  $u_{ss}(t_i)$  и его параметры:

- нижняя  $f_l$  и верхняя  $f_u$  граничные частоты;
- частота дискретизации  $f_d$ ;
- количество дискретных временных отсчётов  $N_{ss}$ .

- 2) Определяется длительность связного сигнала  $T_{ss}$

$$T_{ss} = \frac{N_{ss}}{f_d}, \quad (1)$$

- 3) С использованием лучевой программы расчёта поля гидроакустического источника, входящей в комплекс программ [5], рассчитывается лучевая структура связного сигнала,

прошедшего через гидроакустический канал, на входе приёмной антенны. Результатами расчёта являются:

- $N_{ray}$  – количество сигнальных лучей, достигших приёмника;
- $\varphi_j$  – угол скольжения  $j$ -го луча на входе приёмной антенны;
- $t_j$  – время пробега  $j$ -го луча от источника до приёмной антенны;
- $k_j$  – относительная интенсивность  $j$ -го луча на входе антенны;
- $m_j, n_j$  – количество отражений  $j$ -го луча от поверхности и дна моря при распространении от источника до приёмной антенны соответственно.

4) Моделируется прохождение входного связного сигнала через гидроакустический канал и приёмный тракт, что достигается путём суммирования  $N_{ray}$  реализаций входного сигнала с учётом относительного запаздывания, относительной интенсивности и доплеровского сжатия/растяжения сигнальных лучей:

$$u_{ss/ch}(t_i) = \sum_{j=1}^{N_{ray}} \sqrt{r_{j0} \cdot k_j \cdot D(\varphi_j, \psi_p)} \cdot u_{ss/dop}(t_i - \Delta t_j), \quad i=1, \dots, N'_{ss} \quad (2)$$

где

$u_{ss/ch}(t_i)$  - цифровой связной сигнал, дискретизированный с частотой  $f_d$ , прошедший через гидроакустический канал и приёмный тракт;

$\Delta t_j$  - запаздывание  $j$ -го луча относительно наиболее быстрого луча;

$u_{ss/dop}(t_i - \Delta t_j)$  - связной сигнал, пришедший на вход антенны по  $j$ -му лучу, сдвинутый по времени относительно наиболее быстрого луча на величину запаздывания  $\Delta t_j$  и подвергшийся доплеровскому сжатию/растяжению. Доплеровское сжатие/растяжение связного сигнала достигается путём интерполяции излучённого связного сигнала  $u_{ss}(t_i)$ , отсчёты которого следуют с интервалом по времени  $\Delta t = 1/f_d$ , на моменты времени, следующие с интервалом времени  $\Delta t_{dop} = \Delta t \cdot \left(1 - \frac{V_r}{C_{zv}}\right)$ . В результате частота дискретизации цифрового связного сигнала  $u_{ss/ch}(t_i)$  равна  $f_{d/dop} = 1/\Delta t_{dop}$ ;

$r_{j0}$  - коэффициент когерентности  $j$ -го и наиболее интенсивного луча, вычисляемый по эмпирической формуле [6]

$$r_{j0} = \max\left(0; 1 - \frac{|t_0 - t_j|}{T_{ss}}\right) \cdot 10^{-s_m(m_0+m_j) - s_n(n_0+n_j)}, \quad (3)$$

$s_m, s_n$  – эмпирические коэффициенты ( $s_m, s_n = 0,03 \dots 0,06$ )

(коэффициент когерентности наиболее интенсивного луча с самим собой равен единице);

$N'_{ss}$  - количество временных отсчётов в цифровом связном сигнале на выходе гидроакустического канала:

$$N'_{ss} = \frac{T_{ss} + \Delta T}{f_d}, \quad (4)$$

$\Delta T$  - запаздывание самого медленного луча относительно самого быстрого луча;

$C_{zv}$  – скорость звука в воде.

6) Моделируется помеха  $u_{noise}(t_i)$  в виде белого шума в полосе связного сигнала с частотой дискретизации  $f_{d/dop}$ , с длительностью  $T_{ss} + \Delta T$  и с единичной мощностью.

7) Вычисляется мощность цифрового связного сигнала  $u_{ss/ch}(t_i)$ :

$$W_{ss/ch} = \sum_{i=1}^{N'_{ss}} u_{ss/ch}^2(t_i). \quad (5)$$

8) Путём суммирования на выходе приёмника связного сигнала с помехой с учётом заданного отношения сигнал/помеха  $Q_{ss}$  моделируется выходной цифровой сигнал эмулятора:

$$u_{out}(t_i) = \sqrt{\frac{Q_{ss}}{M_{ss}}} \cdot u_{ss/kanal}(t_i) + u_{noise}(t_i), \quad i=1, \dots, \frac{T + \Delta T}{f_d} \quad (6)$$

Для контроля правильности работы ПЭГК на дисплее отображаются:

- входной и выходной связной сигнал эмулятора;
- частотные спектры входного и выходного связного сигнала;
- автокорреляционные функции входного и выходного сигналов;
- взаимно-корреляционная функция входного и выходного сигналов;

Кроме того в файл записывается лучевая структура связного сигнала и шумов моря на входе приёмника.

В ПЭГК предусмотрен режим самоконтроля, в котором все описанные стадии моделирования выполняются с использованием связного сигнала, сформированного самим эмулятором в виде белого шума в заданной полосе частот.

#### Методика испытаний модема с использованием программного эмулятора гидроакустического канала

Структура стенда для испытаний модемов гидроакустической связи приведена на рис.1. Стенд позволяет испытывать как реальные, так и виртуальные модемы.



Рис.1. Структурная схема стенда для испытаний модемов гидроакустической связи

Работа стенда выглядит следующим образом. Задаются и загружаются в ПЭГК условия передачи сообщения, включающие параметры гидроакустических условий в районе, взаимное расположение корреспондентов по дистанции и глубинам, скорость взаимного сближения/удаления источника и приёмника, отношение сигнал/помеха на входе приёмного модема. Затем оператор в автоматизированном режиме готовит цифро-буквенное сообщение для передачи по гидроакустическому каналу. Подготовленное сообщение кодируется двоичным кодом и подаётся на вход передающего модема. Связной сигнал с выхода модема в формате .wav поступает на вход ПЭГК. С выхода ПЭГК связной сигнал передаётся на вход приёмного модема. Демодулированное сообщение передаётся в блок отображения и анализа сообщения, где осуществляется декодирование сообщения и подсчёт битовых ошибок в принятом сообщении.

Описанная процедура с использованием одного и того же модема повторяется многократно при варьировании содержания сообщения и условий его передачи. В результате определяются присущие испытуемому модему зависимости вероятности (точнее частоты) битовой ошибки

от различных факторов, в частности от количества сигнальных лучей, по которым распространялся связной сигнал, отношения сигнал/помеха на входе приёмного модема, радиальной скорости излучающего модема, а также от комбинации этих факторов.

**Заключение.** Разработан программный эмулятор гидроакустического канала, позволяющий оценивать эффективность алгоритмов модуляции/демодуляции связных сигналов и модемов в лабораторных условиях, что позволяет существенно сокращать время и ресурсы на проведение испытаний.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Захаров Ю.В., Коданев В.П.** Экспериментальные исследования акустической системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Акустический журнал. 1994. Т.40, № 5. С. 799-808.
2. **Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М.** Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акустический журнал. 2010. Т.56, № 2. С. 245-255.
3. **Голубев А.Г.** Методы повышения эффективности систем цифровой связи с шумоподобными сигналами. – СПб: Буквально. 2019. 317с.
4. **Мелентьев В.Д., Садовский А.Ф.** Моделирование канала гидроакустической связи для обоснования выбора сигналов // Гидроакустика. 2021. Вып.45 (1). С.29-33.
5. Программа для ЭВМ «Гидроакустические расчёты для станции шумопеленгования». Свидетельство о государственной регистрации № 2021617661 от 26.04.2021г.
6. **Машошин А.И.** Исследование условий применимости корреляционной функции широкополосного многолучевого сигнала для оценки координат источника. – Акустический журнал, 2017, том 63, № 3, с.307-313.

**A. I. Mashoshin, A.V. Shafranyuk, I.V. Pashkevich** (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg).  
**Hydroacoustic channel emulator for evaluating the characteristics of hydroacoustic modems.**

The paper provides a description of the developed software emulator of the hydroacoustic channel, which allows you to check the quality of the functioning of hydroacoustic modems in the conditions of a multipath signal propagation channel, Doppler distortion and the influence of interference.

А.С. НИКОЛАЕВ, М.П. КОЛЕСНИКОВ  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ОТНОСИТЕЛЬНО ГРУППЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

*Рассмотрено применение разностно-дальномерного метода с длинной и ультракороткой базой (ДБ и УКБ) на разных этапах причаливания подводного аппарата. В связи с ограничениями применимости в части дистанции и угловых координат использование одной конфигурации базы невозможно. Наиболее плодотворным решением может являться комбинация методов.*

*Выполнено математическое моделирование в части расчёта координат аппарата для его различных положений относительно причала, приведены оценки точности. По итогу выполненной работы были сформулированы ограничения и области применимости методов.*

**Введение.** В настоящее время при проведении различных подводных работ широко применяются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Как правило, запуск аппарата осуществляется либо с корабля-носителя, либо с причального устройства. На данный момент большинство причальных устройств имеет конструкцию сачка. Данная конструкция не требует высокой точности вычисления координат, поскольку процесс причаливания подразумевает собой простое движение по пеленгу на маяк, расположенный на причале. При этом конструкция причала компенсирует ошибки вычисления координат, и направляет аппарат до самого момента стыковки.

Такой метод недопустим при причаливании тяжелых [1] аппаратов, поскольку малая точность определения координат чревата повреждениями корпуса при ударе о причал. В связи с этим возникает потребность в разработке системы определения координат, осуществляющей вычисление координат с заданной точностью на конечном этапе причаливания, когда высокая точность определения координат наиболее важна.

В настоящее время задача определения координат аппарата решается тремя основными методами: оптическим [2], магнитным [3] и гидроакустическим [4].

Оптические методы, реализуемые с помощью телеметрических систем, позволяют определить координаты аппарата с высокой точностью [2], однако, использование таких методов ограничено рассеянием света в водной среде, а также её оптической прозрачностью.

Магнитный метод реализуется с помощью соленоидов, расположенных на причале, при этом, аппарат ориентируется по силовым линиям магнитного поля. Недостатком магнитного метода является скин-эффект в солёной воде. К примеру, при частоте магнитного поля в 1-2 кГц использование ограничено тридцатью метрами [3]. Соответственно, данный метод может быть использован только на конечных этапах приведения.

В основе гидроакустических методов лежит использование ультразвуковых сигналов. В отличие от оптического и магнитного методов гидроакустические позволяют работать на километровых дистанциях и не зависят от оптической прозрачности среды, однако, при их использовании необходимо учитывать многолучевое и непрямолинейное распространение сигнала.

Из рассмотренных методов только гидроакустический позволяет работать в широком диапазоне дистанций без потери точности вычисления координат. В качестве метода вычисления координат, использующего в своей основе распространение гидроакустических сигналов, был выбран классический разностно-дальномерный метод с длинной и ультракороткой базой.

Предлагаемый доклад посвящен оценке области применимости разностно-дальномерного метода в различных условиях и конфигурациях базы.

**2. Оценка точности разностно-дальномерного метода.** Исследование проводилось в рамках математического моделирования с помощью пакета Matlab. Расчёт координат аппарата осуществлялся путем решения нелинейной системы разностно-дальномерного метода с



помощью итерационного метода Ньютона. Для рассчитанного координатного вектора вычислялись абсолютные и относительные ошибки вычисления координат с помощью соотношений (1) - (2):

$$\sigma_r = \frac{r_1' - r_1}{r_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\Delta_r = r_1' - r_1 \quad (2)$$

где  $r_1'$  – рассчитанная координата,  $r_1$  – истинная координата. Аналогичным образом осуществлялся расчёт для углов  $\theta$  и  $\varphi$ .

Приемлемой точностью при оценке полагалась точность расчёта дистанции не более процента, а угловых координат не более градуса.

В процессе работы выполнялись следующие задачи:

- Формирование математической модели, состоящей из систем уравнений разностно-дальномерного метода для различных условий;
- Формирование программной модели, выполняющей расчёт систем итерационным методом;
- Оценка точности разностно-дальномерного метода с длинной и ультракороткой базой при различных положениях аппарата относительно причала, и при различных погрешностях входных данных (скорости звука и временных задержек);

### 2.1. Постановка и метод решения задачи

На рисунке 1 представлена решаемая задача: сверху изображен аппарат, имеющий две приёмные многоэлементные антенны в подкильной части – в корме и носу. Гидроакустические преобразователи приёмной антенны образуют ультракороткую базу. Снизу изображен причал, на котором крестом расположены четыре донных маяка-излучателя. Вектора  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  и матрицы поворота  $P_1, P_2$  задают положение подкильных антенн в системе координат аппарата ( $Oa$ ). Под решением задачи подразумевается определение вектора  $\mathbf{R}$  и матрицы поворота  $Q$ , образованной углами Эйлера.

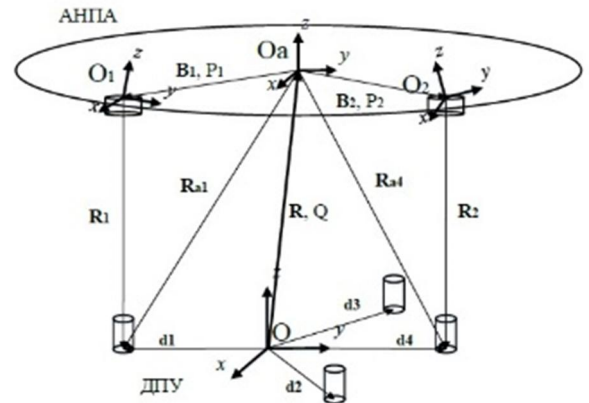


Рис. 1. Схематическое изображение аппарата над причалом

Система уравнений (3) получена для УКБ из соображений геометрии и линейной алгебры:

$$\begin{cases}
 i < k : \begin{cases} p_{i,k} - 2\Delta_{ik}\sqrt{r_{k,x}^2 + r_{k,y}^2 + r_{k,z}^2} + 2(\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_k)_x \cdot r_{k,x} + 2(\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_k)_y \cdot r_{k,y} + 2(\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_k)_z \cdot r_{k,z} = 0; \\ p_{i,k} = 2(\mathbf{b}_i, \mathbf{b}_k) - |\mathbf{b}_i|^2 - |\mathbf{b}_k|^2 + \Delta_{ik}^2 \end{cases} \\
 i > k : \begin{cases} p_{i,k} + 2\Delta_{ki}\sqrt{r_{k,x}^2 + r_{k,y}^2 + r_{k,z}^2} + 2(\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_k)_x \cdot r_{k,x} + 2(\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_k)_y \cdot r_{k,y} + 2(\mathbf{b}_i - \mathbf{b}_k)_z \cdot r_{k,z} = 0 \\ p_{i,k} = 2(\mathbf{b}_i, \mathbf{b}_k) - |\mathbf{b}_i|^2 - |\mathbf{b}_k|^2 + \Delta_{ki}^2 \end{cases} \\
 i = 1, 2, \dots, 5; \quad i \neq k.
 \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Delta_{ik}$  определяет задержку между  $i$ -ым и  $k$ -ым каналами приёмной антенны,  $\mathbf{r}_k$ , – искомый радиус-вектор,  $\mathbf{b}_i$  – вектор на  $i$ -й преобразователь в системе координат приёмной антенны.

## 2.2 Результаты математического моделирования

Расчёт выполнялся для различных систем уравнений (с учётом 5 вариантов опорных преобразователей, относительно которых выполняется расчёт задержек имеем 20 возможных систем уравнений). Погрешность скорости звука полагалась 0,1%, погрешность временных задержек 0,1 период дискретизации. На рисунках 2 – 4 приведены результаты расчёта сферических координат аппарата (дистанции, азимута, зенитного угла) с помощью УКБ.

По итогам проведенного математического моделирования были сформулированы следующие ограничения: 1) разностно-дальномерный метод с ДБ может быть использован на дистанциях от 1 метра, при зенитных углах менее 30 градусов и во всем диапазоне азимутальных углов; 2) погрешность скорости звука в системе не должна превышать 0,01 %; 3) разностно-дальномерный метод с УКБ может быть использован на дистанциях до 2 метров, при зенитных углах менее 60 градусов и во всем диапазоне азимутальных углов.

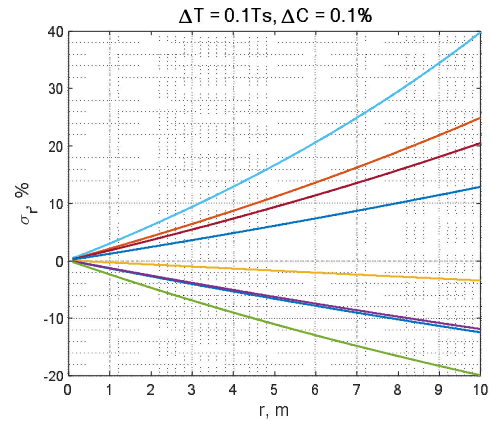


Рис. 2. Относительная ошибка вычисления дистанции для различных систем уравнений (УКБ)

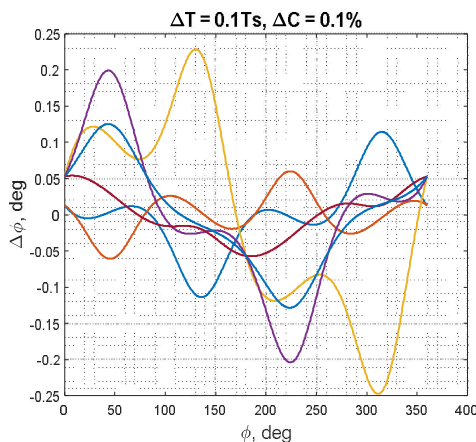


Рис. 3. Относительная ошибка вычисления азимута для различных систем уравнений (УКБ)

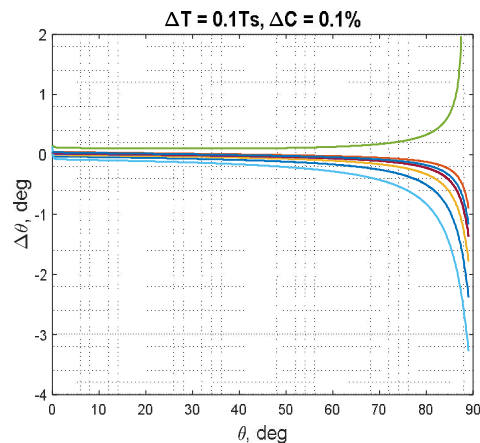


Рис. 4. Относительная ошибка вычисления зенитного угла для различных систем уравнений (УКБ)

**Заключение.** В настоящей работе были определены пределы применимости разностно-дальномерных методов с длинной и ультракороткой базами, а также сформулированы их ограничения в задаче позиционирования аппарата.

Все результаты настоящей работы будут использованы для разработки системы причаливания, обеспечивающих высокую точность позиционирования аппарата, а также могут быть использованы для оценки точностей вычисления координат разностно-дальномерным методом. В дальнейшем планируется выполнить моделирование в части расчёта координат аппарата при учете характеристик направленности антенн, а также эффектов, возникающих вследствие анизотропии водной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 56960-2016 Аппараты необитаемые подводные. Классификация. 2017.
2. **Nuno A. Cruz, Anibal C. Matos, Rui M. Almedia, Bruno.** A Lightweight Docking Station for a Hovering AUV // IEEE Underwater Technology (UT). 2017. P. 1 – 7.
3. **Michael D. Feezor, F. Yates Sorrell, Paul R. Blankinship, and James G. Bellingham.** Autonomous Underwater Vehicle Homing/Docking via Electromagnetic Guidance // Journal of oceanic engineering. October 2001. Vol. 26. No. 4. P. 515 – 521.
4. **Qinghua Luo, Xiaozhen Yan, Chunyu Ju, Yunsai Chen, Zhenhua Luo.** An Ultra-Short Baseline Underwater Positioning System with Kalman Filtering // Internet of Things, Big Data and Smart Systems. 2021. 21(1), 143.

**A.S.Nikolaev, M.P.Kolesnikov, (Concern CSRI Elektpribor, JSC, Saint Petersburg). Determination of the position of the underwater vehicle relative to a group of hydro-acoustic beacons.**

The application of the difference-range method with a long and ultrashort baseline (DB and UKB) at different stages of the underwater vehicle mooring is considered. Due to applicability limitations in terms of distance and angular coordinates, it is not possible to use one base configuration. The most fruitful solution may be a combination of methods.

Mathematical modeling has been performed in terms of calculating the coordinates of the device for its various positions relative to the berth, and accuracy estimates are given. Based on the results of the work performed, the limitations and areas of applicability of the methods were formulated.

А.Е. ПЕЛЕВИН, О.В. ЗАЙЦЕВ  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОСАДКА АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ПЛАТФОРМУ В ЗАДАННУЮ ПОЗИЦИЮ

*Сформулирована постановка задачи посадки автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) на донное причальное устройство (платформу). В предлагаемом подходе строится траектория движения АНПА из произвольной позиции на платформу посадки в точку с заданными координатами, глубиной погружения и курсом. Траектория выбирается по критерию минимального времени прохождения с учетом режимов торможения и вертикальной посадки с использованием подруливающих устройств. Приведены результаты моделирования модельных данных гидроакустической навигационной, магнитоэлектрической и оптической систем.*

**Введение.** Донные причальные устройства (ДПУ) позволяют обеспечить длительное нахождение АНПА под водой. При посадке АНПА на платформу ДПУ выполняют: информационный обмен с пунктом управления, подзарядку его аккумуляторных батарей и старт на очередную миссию. При автоматической посадке необходима навигационная привязка АНПА к ДПУ с помощью гидроакустической навигационной системы (ГАНС) и других навигационных средств и решение задач управления посадкой АНПА на ДПУ [1].

Приведем работы рассматривающие задачу приведения (посадки) АНПА к месту базирования. Так в [2] дан достаточно полный обзор работ по стыковке АНПА к месту базирования и описана технология приведения АНПА в зону стыковочной станции: на первом этапе без требования к ориентации и скорости и на втором – позиционирование с учетом требования к ориентации и скорости движения АНПА; предложен алгоритм управления, основанный на позиционно-траекторном подходе. При этом предлагается траектория без ее построения и необходимых требований для ее реализации подводным аппаратом; математическая модель АНПА дана в матричном виде без учета свойств управляющих органов на различных участках траектории.

В работе [3] на основе данных о времени распространения ГА сигнала от источника для управления АНПА предложен экстремальный регулятор приведения его к источнику гидроакустического сигнала. Для определения курса приведения АНПА совершает предварительно маневры курсом для определения экстремального значения.

В [4] представлена общая схема алгоритма организации процесса приведения телеуправляемого НПА (ТНПА). При этом проверяется ряд условий, препятствующих продолжению процедуры приведения, оператором задаются целевые значения курса и скорости, анализируется поступление новых дальномерных данных, выполняется расчет координат точки посадки, проверяются условия нахождения ТНПА в малой заранее заданной окрестности маяка, обновляются курс и скорость движения ТНПА по мере приближения ТНПА к маяку и, если дистанция от ТНПА до маяка меньше заданной границы, процесс приведения считается завершенным, т.е. без посадки на место базирования.

В [5] рассмотрен метод локального позиционирования АПА гидроакустической системой. Метод основан на измерении дальности до объекта и вычислении углов прихода эхо-сигналов на две или более разнесенные антенны. Экспериментально показана достаточно высокоточного точность измерения относительного пространственного положения АНПА.

Работы [6] рассматривали синтез управления вертикальной посадки АНПА в специальный контейнер с бортами. Проведены идентификация параметров динамической модели, выбор регулятора, определение оптимальных параметров регулятора.

В настоящей работе исследован процесс посадки АНПА из любой позиции на платформу с точки зрения планирования траектории посадки, управления на ее участках с навигационным обеспечением. Таким образом, целью работы является

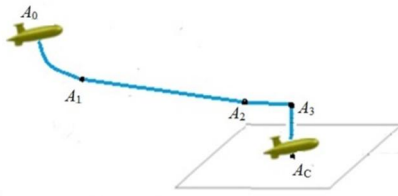


Рис. 1 Пример траектории посадки

- построение посадочных траекторий из любой позиции местоположения АНПА и формирование законов управления на ней;
- описание средств выработки параметров местоположения и ориентации АНПА относительно платформы с оценкой их точности, т.е. необходимых параметров движения, входящих в законы управления
- описание алгоритма комплексирования измерений от

ГАНС, МД и СТЗ.

**Постановка задачи управления.** Математическая постановка задачи построения траектории заключается в определении траектории движения АНПА из некоторой исходной точки  $A_0$ , с координатами  $x_0, y_0, z_0$  и курсом  $\gamma_0$  в заданную конечную точку  $A_c$  с координатами  $x_T = y_T = z_T = 0$  и курсом  $\gamma_T = 0$  за минимальное время при движении АНПА, описываемого системой дифференциальных уравнений. При этом траектории состоят из глиссады  $A_0-A_1-A_2$ , участка торможения  $A_2-A_3$  и вертикальной посадки  $A_3-A_c$  с помощью подруливающих устройств. Пример спланированной траектории приведен на рисунке 1. Необходимо произвести построение регуляторов с определением их оптимальных параметров в зависимости от эффективности органов управления.

**Постановка задачи оценивания.** Предполагается, что АНПА оснащен тремя видами обзорных систем, измерения которых комплексированы для дальнейшей обработки: системой технического зрения (СТЗ), включающей черно-белую и цветную камеры, магнитным датчиком (МД) и гидроакустической навигационной системой (ГАНС). В процессе посадки АНПА на платформу (дальность до точки посадки, расположенной на платформе, не превышает 5-10 м в зависимости от мутности воды) определение относительных координат обеспечивается с помощью СТЗ, обрабатывающей изображения спецмаркеров, укрепленных на платформе, а также магнитометрическими средствами. В диапазоне дистанций до 50 метров – источниками данных также являются магнитометрические средства. Для решения задачи в дальней зоне на дистанции между АНПА и ДПУ от 50 м до 1500 м основным источником данных является ГАНС.

Вводится связанная с АНПА система координат (СК) (ось  $Ox$  – направлена в нос,  $Oz$  – на правый борт, ось  $Oy$  – вверх). Искомый вектор состояния содержит следующие компоненты

$$x(t) = [x \ y \ z \ V_x \ V_y \ V_z \ \vartheta \ \psi \ \gamma \ \omega_\vartheta \ \omega_\psi \ \omega_\gamma], \quad (1)$$

где  $x, y, z$  – координаты АНПА,  $V_x, V_y, V_z$  – проекции вектора скорости АНПА на оси СК,  $\vartheta, \psi, \gamma$  – углы крена, дифферента и рыскания,  $\omega_\vartheta, \omega_\psi, \omega_\gamma$  – проекции вектора угловой скорости АНПА на оси СК. Набор измерений от каждого из комплексированных средств – одинаков, т.е. имеются измерения координат и углов ориентации АНПА в виде:

$$Z = [x_i \ y_i \ z_i \ \vartheta_i \ \psi_i \ \gamma_i]^T = HX + v \quad (2)$$

где  $v$  – центрированная беложумная гауссовская ошибка измерения заданной интенсивности  $R$ . Здесь произведен пересчет координат и углов ориентации от средств к связанной с АНПА системе координат, что выражается в ненулевых элементах ковариационной матрицы погрешностей измерения  $R$  соответственно равны

$$R_{1,1} = \sigma_x^2, R_{2,2} = \sigma_y^2, R_{3,3} = \sigma_z^2, R_{4,4} = 4(\psi^2 \sigma_\vartheta^2 + \gamma^2 \sigma_\gamma^2), R_{5,5} = 4(\vartheta^2 \sigma_\psi^2 + \gamma^2 \sigma_\gamma^2), R_{6,6} = 4(\vartheta^2 \sigma_\vartheta^2 + \psi^2 \sigma_\psi^2).$$

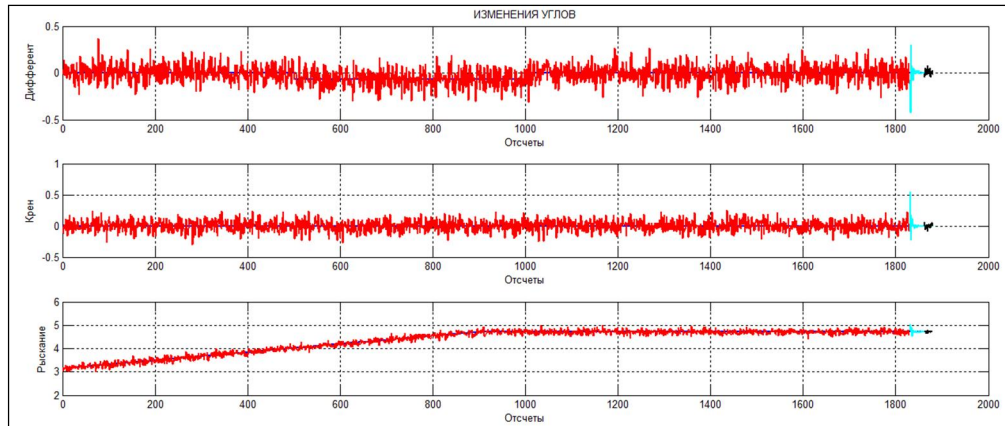
Формирующий фильтр в этой задаче представим в виде

$$\dot{x}(t) = F(\hat{x}(t))x(t) + Gw(t), \quad (3)$$

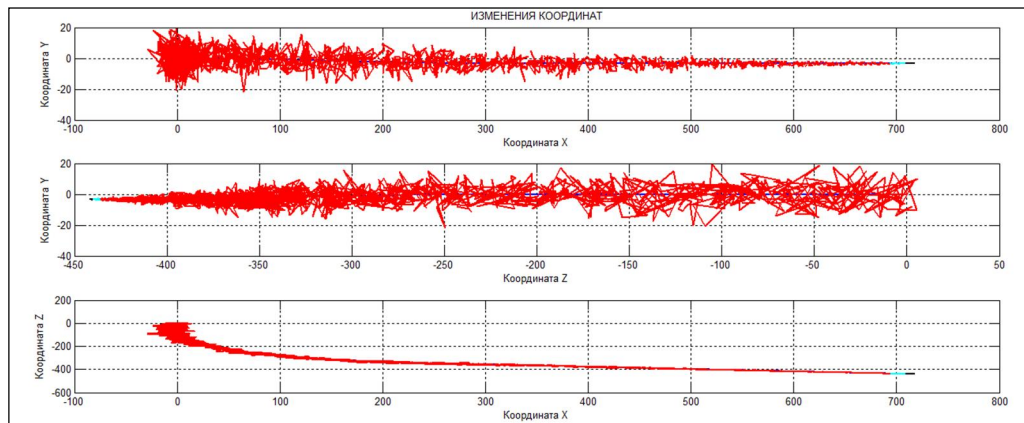
где  $F$  – матрица динамики,  $G(t)$  – матрица возмущений,  $w(t)$  – гауссовский центрированный белый порождающий шум с единичной матрицей интенсивностей. Здесь под  $\hat{x}(t)$  подразумеваются оценки соответствующих компонент вектора состояния.

**Результаты.** При оценивании вектора состояния (1) производится выработка в каждый момент времени сглаженных значений относительного пространственного положения объекта, углов ориентации, линейных и угловых скоростей относительно точки посадки на платформе. Комплексная обработка измерений указанных параметров от разнородных датчиков производится с использованием фильтра Калмана (ФК).

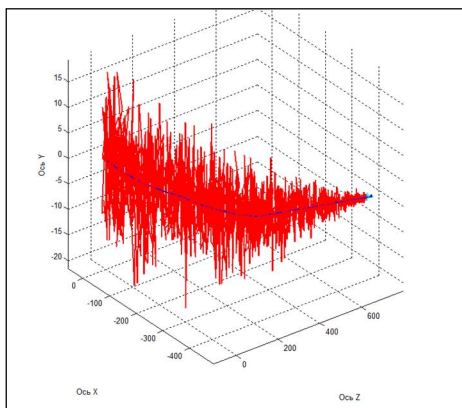
Формирование измерений от датчиков. На рисунке 2 (а) показаны результаты моделирования зашумленных значений дифферента, крена и рыскания, а на рисунке 2 (б) - координат АНПА на фоне истинных значений этих параметров. Измерения от ГАНС обозначены красным цветом, от МД - голубым цветом, от СТЗ - черным цветом. На рисунке 2 (в) приведен фрагмент траектории АНПА с наложенными шумами, а на рисунке 2 (г) его финальный увеличенный участок от 120 м до точки посадки.



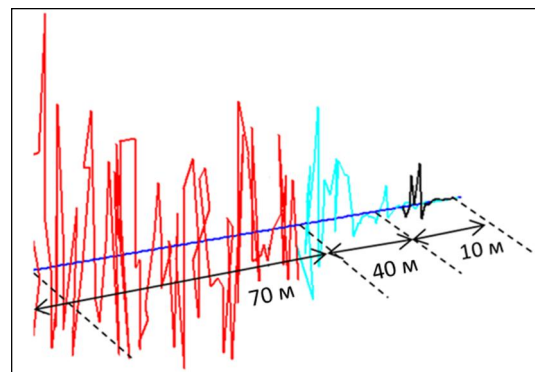
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Моделирование погрешностей датчиков АНПА

Моделирование зависимости среднеквадратических отклонений (СКО) координат и углов ориентации СТЗ от дальности осуществлялось в соответствии с [7], МД – в соответствии с [8], а ГАНС – в соответствии с [9].

При этом СКО координат от ГАНС убывает практически линейно от 8.5 м до 1- 2 м при изменении дальности до точки посадки от 850 м до 50 м. При дальнейшем сближении с точкой посадки СКО ГАНС принимается постоянным и равным 2 м. СКО углов ориентации от ГАНС считается константой, равной 2 град.

СКО координат МД убывает по квадратическому закону от 0.7 м, а СКО углов ориентации убывает по линейному закону от 2 град при изменении дальности от 50 м.

СКО координат СТЗ убывает по квадратическому закону от 0.3 м, а СКО углов ориентации считается константой, равной 1 - 4 град.

**Заключение.** В работе заложены теоретические основы для решения важной прикладной задачи посадки АНПА, оснащенного датчиками СТЗ, МД и ГАНС, на подводную платформу. Приведены постановки задачи управления и оценивания навигационных и динамических параметров АНПА. Показаны результаты моделирования типовых измерений от указанных датчиков на траекториях посадки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А., Квашнин А.Г. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов Двойные технологии №1 (54) 2011 С. 13–21.
2. Гуренко Б.В. Разработка алгоритмов сближения и стыковки автономного необитаемого подводного аппарата с подводной станцией базирования // Известия ЮФУ. Технические науки С. 162–175.
3. Бурдинский И.Н., Безручко Ф.В. Алгоритм приведения автономного подводного аппарата к источнику сигнала с использованием экстремального регулятора // Заметки ИСУ ТГУ, Хабаровск, -2011. №1(27), С. 121-129.
4. Дубровин Ф.С. Об одном алгоритме приведения автономного необитаемого подводного аппарата к гидроакустическому маяку // Приборы. - Номер 4. – 2012. – С. 28-34.
5. Каевицер В. И., Кривцов А. П., Смольянинов И. В., Элбакидзе А. В. Локальное позиционирование подводных аппаратов гидроакустической системой с лчм зондирующими сигналами // Журнал радиоэлектроники. - 2018. - № 11. - С. 1 – 10.
6. Горюнов В.В., Половко С.А., Щур Н.А. Технология создания кибернетических моделей для синтеза и отработки регуляторов системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика.- 2020.- № 8(4). – С. 308 -318.; Половко С.А., Фролов Д.А. Математическое моделирование и синтез управления процессом стыковки автономного необитаемого подводного аппарата // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. - № 8(4). – С.266 -275.
7. Wang J. Olson E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4193 – 4198.
8. Shuang Song, ChaoHu, Baoru Li, Xiaoxiao Li, Max Q.-H. Meng An Electromagnetic Localization and Orientation Method Based on Rotating Magnetic Dipole // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. Vol. 49. № 3. 2013. pp. 1274-1277.
9. Аникин А.А. Разработка и моделирование систем комплексирования разнородных наблюдений // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2006.

#### **A.E. Pelevin, O.V. Zaitsev (CSRI Elektropribor, JSC, Saint – Petersburg). Automatic landing of an autonomous uninhabited underwater vehicle on a platform in a given position.**

The problem of AUV landing on the bottom mooring device was formulated. In the proposed approach, the trajectory of the AUV movement is built from an arbitrary position to the landing platform to a point with given coordinates, immersion depth and heading. The trajectory is selected according to the criterion of the minimum transit time, taking into account the modes of braking and vertical landing using thrusters. The results of modeling data of hydroacoustic navigation, magnetolectric and optical systems are presented.

Б.А. СКОРОХОД, С.И. ФАТЕЕВ, А.В. СТАЦЕНКО, П.В. ЖИЛЯКОВ., А.Д. ЛЯШКО  
(Севастопольский государственный университет, г. Севастополь)

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПРЕДОБРАБОТКИ И ВЫДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК В ЗАДАЧЕ ПОДВОДНОЙ ВИДЕО ОДОМЕТРИИ

*Искажение подводных изображений может ухудшать как точность, так и робастность алгоритмов визуальной локализации объектов, приводя, в частности, к уменьшению количества обнаруживаемых сопряженных ключевых точек на парах последовательных изображений. В работе исследуется влияние различных алгоритмов предобработки и построения ключевых точек на свойства алгоритмов видео одометрии в условиях подводной съемки и неконтролируемого движения камеры.*

**Введение.** Задачи повышения степени автономности подводных аппаратов (ПА) широко обсуждаются в настоящее время в литературе [1-3]. Для их решения, ПА должен быть оборудован датчиками, обеспечивающие оператора, и/или систему управления, информацией об объекте и окружающем пространстве, данными об относительном положении, скорости, ориентации наблюдаемого объекта и самого ПА, возможных препятствиях. В качестве датчиков, в системах технического зрения (СТЗ) ПА, могут быть использованы видеокамеры, позволяющие решать целый комплекс задач, включающих, в частности, построение 3D модели сцены, обнаружение и классификацию объектов, их локализацию и видео сопровождение. Вместе с тем, непосредственное их использование в подводных условиях вызывает серьезные трудности. Возникающие проблемы связаны с недостаточной робастностью этих методов к изменениям подводного окружения и особенностями передачи и приема сигналов под водой. Это может быть, например, неравномерность освещенности подводной среды, быстрое затухание, рассеивание и преломление света при прохождении его через неоднородную среду воздух-вода-стекло, ограничение частотного спектра проходящего света, приводящего к поглощению низкочастотных составляющих (красный, желтый) в большей степени, по сравнению со светом более высоких частот (синий, зеленый). Все это серьезно осложняет возможности извлечения информации о сцене в целом и объектах, представляющих интерес, находящихся в подводной среде, ограничивает возможности применения стандартных алгоритмов обработки изображений и требует дополнительных экспериментальных исследований в подводной среде.

Предлагаемый доклад посвящен анализу влияния алгоритмов предобработки и построения ключевых точек (КТ) в условиях подводной съемки в контексте их возможности дальнейшего использования при решении различных задач подводной локализации объектов.

**Постановка задачи.** Предполагается, что ПА аппарат перемещается и получает изображения морского дна с помощью жестко прикрепленной к нему стереокамеры в дискретные моменты времени  $k$ . В каждый момент времени имеются левое и правое изображения, обозначаемые  $I_{l,0:n} = \{I_{l,0}, \dots, I_{l,n}\}$  и  $I_{r,0:n} = \{I_{r,0}, \dots, I_{r,n}\}$ . Пара снимков  $I_{l,k}$  и  $I_{r,k}$ , полученных в момент времени  $k$ , позволяют построить 3D облако точек, описывающих наблюдаемую камерой сцену. Используя изображения, полученные в моменты времени  $k - 1$  и  $k$ , требуется оценить относительное перемещение камеры и влияние на точность полученных результатов различных алгоритмов предобработки и построения КТ по полученным экспериментальным данным. На рис.1 приведено отображение на карте пройденного пути по навигационным данным (GPS).

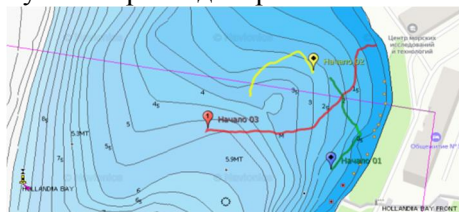


Рис. 1. Отображение на карте пройденного пути по навигационным данным (GPS)



**Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.** На рисунке 2 приведены типичные низкоконтрастные изображения морского дна, полученные при проведении экспериментов, иллюстрирующие описанные выше проблемы (расстояние до дна примерно 2 м). Видно, что дно на первом изображении представляет собой растительность и камни, на втором – песчаное дно с небольшим количеством растительности.

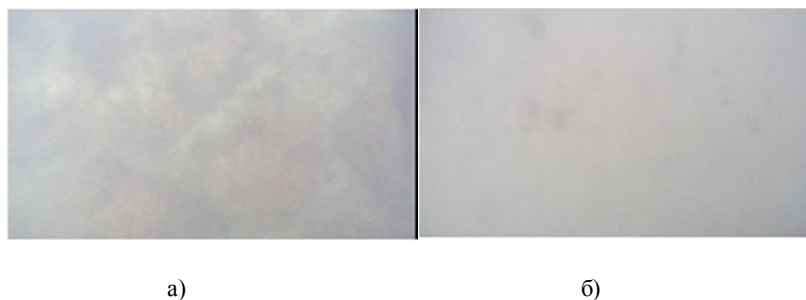


Рис. 2. Случайно выбранные изображения морского дна с различными текстурами (левая камера)

Рассматривались следующие алгоритмы предобработки: эквализация (Э), адаптивная эквализация (АЭ), гомоморфная и билатеральная фильтрация, настройка цветового баланса изображения с хроматической адаптацией (ЦБ), темный канала (ТК), адаптивная эквализация с последующей эквализацией по всему изображению (АЭ+Э). Сравнительный анализ алгоритмов проводился с точки зрения возможности выделения мелких деталей и границ объектов на обработанном изображении, среднеквадратической ошибки и отношением сигнала к шуму на исходном и обработанном изображениях. Анализ полученных изображений показал, что АЭ, ЦБ, ТК, АЭ+Э алгоритмы превосходят остальные.

В качестве детекторов особых точек рассматривались алгоритмы Харриса, FAST, BRISK, SURF, MSER и KAZE при использовании их совместно с описанными выше алгоритмами предобработки. Моделирование на имеющихся экспериментальных данных показало: 1. При отсутствии предварительной обработки и неудачно выбранном детекторе найти достаточное количество сопряженных КП на последовательности изображений для локализации положения камеры не представляется возможным. 2. Детектор KAZE может значительно превосходить детектор Harris, обычно рекомендуемый для обработки подводных изображений. 3. При отсутствии предварительной обработки и неудачно выбранном детекторе найти достаточное количество сопряженных КП на последовательности изображений для локализации положения камеры не представляется возможным. В то же время использование АЭ, ЦБ, ТК, АЭ+Э алгоритмов позволяет значительно увеличить их количество.

Для оценки положения камеры в работе использовался алгоритм, основанный на 3D-2D преобразовании. Показано, что использование предварительной обработки и тщательно подобранного детектора позволяет увеличить количество детектируемых и отслеживаемых КТ КТ на последовательности изображений. При этом детектор KAZE, используемый совместно с АЭ+Э алгоритмом превосходит другие рассмотренные детекторы.

Эксперименты проводились в акватории залива (рис.1) в дневное время при облачной погоде и отсутствии ветра. Глубина составляла 1-2 метра. Стереокамера направлена вниз. В ходе эксперимента были записаны видеоматериалы для дальнейшей обработки в лаборатории. Место проведения испытаний: Севастополь, бухта Голландия, центр морских исследований и технологий СевГУ. Съёмки проводились с помощью стереокамеры в виде модуля со стереобазой 10 см, состоящий из двух жёстко закреплёнными камер Basler acA1920-50gc с объективами Lens TS0814-MP F1.4 f8mm 1" (углами обзора в водной среде  $51^\circ \times 35^\circ$ ), в герметичном корпусе с герметичными разъёмами для коммутации к внешнему оборудованию.

**Заключение.** Проведенные экспериментальные исследования на реальных данных и компьютерное моделирование показали, что количество детектируемых и отслеживаемых КТ на последовательности изображений может зависеть кардинальным образом, как от предобработки, так и используемого детектора. В качестве рекомендаций практического применения рекомендуется совместное использование KAZE детектора с АЭ+Э алгоритмом. В

качестве направления дальнейших исследований предполагается рассмотреть применение полученных результатов в задачах видео стабилизации ПА.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение Минобрнауки РФ № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014 № 121111600136-3, а также Программа «Приоритет2030».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Casalino G., Caccia M., Caiti A., Antonelli G., Indiveri G., Melchiorri C. and MARIS A.**: a National Project on Marine Robotics for Interventions. 2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) University of Palermo. June 16-19, 2014. Palermo, Italy.

2. **Lan D., Maurelli F., Larkworthy T., Caldwell D., Salv J.i, Fox M., Kyriakopoulos K.** PANDORA: Persistent Autonomy through Learning, Adaptation, Observation and Re-planning. IFAC-PapersOnLine Volume 48, Issue 2, 2015, Pages 238-243.

3 **Матвиенко Ю.В., Борейко, А.А. Костенко, Львов О.Ю., Ваулин Ю.В.** Комплекс робототехнических средств для выполнения поисково-спасательных работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе. Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1(19).

**B. A.Skorohod, S.I. Fateev, P.V. Zhilyakov, A V Statsenko, A.D. Lyashko** (Sevastopol State University, Sevastopol). **Analysis of the effectiveness of algorithms for preprocessing and identifying key points in the underwater video odometry problem.**

Distortion of underwater images can impair both the accuracy and robustness of algorithms for visual localization of objects, leading, in particular, to a decrease in the number of detected conjugate key points on pairs of consecutive images. The paper investigates the influence of various algorithms for preprocessing and constructing key points on the properties of video odometry algorithms in conditions of underwater shooting and uncontrolled camera movement.

Г.С. МАЛЫШКИН  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ И ЭЛЕМЕНТАМ КЛАССИФИКАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АДАПТИВНО СФОРМИРОВАННЫХ ТРАЕКТОРИЙ ИСТОЧНИКОВ

*Для реализации классификационных возможностей гидроакустического средства предлагается использовать несколько вариантов адаптивных алгоритмов, каждый из которых проводит обнаружение и оценку параметров сигналов, в совокупности содержащих классификационный признак, надводный или подводный источник. Обобщение параметров измерений разными алгоритмами и принятие классификационных решений должно проводиться в результате совместного анализа результатов проведённых измерений, в том числе с помощью методов искусственного интеллекта.*

### **Введение.**

Целью гидроакустического наблюдения является выявление полного состава наблюдаемых объектов, то есть обнаружение, анализ параметров и структуры сигналов, поступающих от каждого источника и, в конечном счёте, классификация всех объектов на заданные классы. Последняя операция обеспечивается как результат обобщённого анализа всей совокупности физических, энергетических и поведенческих признаков каждого объекта, выявленного в зоне обзора гидроакустического средства. В результате совместного воздействия в сложных помеховых ситуациях формируется суммарный помеховый фон, каждый элемент которого является объектом наблюдения, с одной стороны, и источником помехи для остальных наблюдаемых объектов, с другой стороны.

В результате проведения первичной обработки формируются траектории, в виде последовательности результатов измерения параметров наблюдаемых объектов. Для пассивных методов наблюдения это пеленги на каждый объект, отношения сигнал/помеха, используемые при принятии решений, об обнаружении, и о классе каждого из наблюдаемых объектов.

Для обнаружения и разрешения сигналов далее рассматриваются быстрые проекционные адаптивные алгоритмы [1]-[4], использование которых применительно к задачам гидроакустики рассматривалась в [1], [4]. Следует отметить, что обеспечение классификации объектов предъявляет значительно более высокие требования к составу и точности измеряемых параметров траекторий. Спецификой гидроакустического шумопеленгования является сложная структура обрабатываемых сигналов в связи с наличием условий многолучевого распространения и рассеяния в реальной океанической среде [5] - [8]. Это приводит к появлению дополнительных нестабильностей и флюктуаций, которые усложняют анализ наблюдаемых источников, однако, могут оказаться источником дополнительной классификационной информации об источнике излучения. Предлагаемая работа является продолжением работы [1], однако с позиций анализа пригодности экспериментально полученных данных не только для обнаружения, но и для классификации всей совокупности наблюдаемых источников.

### **Параметры эксперимента и методы обработки**

Напомним основные параметры натурального эксперимента, приведённые в [1]. Для эксперимента использовалась антенна из  $L=56$  вертикальных гирлянд (из 10 элементов каждая), эквидистантно разнесённых по горизонтали. Антенна установлена на глубине 200 метров в прибрежной морской зоне берегового клина вблизи судоходных трасс, в районе интенсивной хозяйственной деятельности. На элементы антенны воздействовали сигналы надводных судов, неконтролируемо перемещающиеся в зоне наблюдения, один подводный источник контролируемо перемещался в зоне наблюдения. Сущность обработки заключалась в формировании спектральных отсчётов сигналов в элементах антенны, разбиении их на группы, в рамках которых проводилась адаптивная обработка, обеспечивающая представление пеленгационных рельефов, позволяющих обнаруживать и классифицировать наблюдаемые источники.

Для построения адаптивных алгоритмов использовалось сингулярное разложение элементов входной выборки размерности  $L \times K_0$

$\mathbf{X}(r, \tau) = \mathbf{U}(r, \tau)\mathbf{\Theta}(r, \tau)\mathbf{Y}^*(r, \tau)$ , где  $\mathbf{U}(r, \tau)$ ,  $\mathbf{Y}(r, \tau)$ ,  $\mathbf{\Theta}(r, \tau)$  - матрицы  $K_0$  левых, правых сингулярных векторов и сингулярных чисел, соответственно.

Напомним, что сингулярные числа, элементы диагональной  $\mathbf{\Theta}(r, \tau)$  матрицы, характеризуют энергетические характеристики, а собственные векторы фазовую структуру сигналов, содержащую информацию о физических свойствах принятых сигналах и, в частности, о направлении на наблюдаемые объекты. Дальнейшая обработка заключалась в использовании трёх вариантов весовых коэффициентов при построении пеленгационных рельефов, обеспечивающих преимущественное выделение различных компонентов сингулярного разложения:

- исходный, соответствующий энергии сигналов входной выборки  $\mathbf{\Theta}(r, \tau)$  (неадаптивный алгоритм);

- выделяющий когерентные компоненты сигналов (одинаковые весовые коэффициенты);

- выделяющий слабые и рассеянные сигналы (ограничена мощность сильных сигналов).

#### **Построение и анализ траекторий наблюдаемых источников**

Дальнейшая иллюстрация материала основана на использовании записей натуральных сигналов, описанных в [1], где рассматривалось только обнаружение сигналов. В представляемом материале анализируется построение пеленгационных рельефов с совместным выделением всех сигналов с сохранением их классификационных признаков, формирующихся при распространении звука в морских условиях. Основная особенность структуры принимаемых сигналов обусловлена расположением антенны в береговом клине, в результате чего характер распространяющихся сигналов определялся как профилем скорости звука, так и наличием наклонного дна. Профиль скорости звука при проведении записей характеризовался условиями поздней осени (рисунок 1 работы [1]). Главная особенность условий распространения для этого времени и места состоит в наличии берегового клина и то, что скорость звука в приповерхностном слое превышала скорость звука на оси подводного звукового канала (120 метров) и на дне на глубине расположения антенны 200 метров. В таком случае, дальнейшее распространение сигнала приповерхностного источника становится возможным только после многократного отражения от поверхности и различных участков грунта.

Общие черты профиля дна заключаются в наличии в окрестности антенны ровного плато размером 500-700 метров, далее крутого склона и затем глубоководной части открытого моря. На рисунках 3 работы [1] приведены лучевые картины и профиль дна, их анализ показал, что лучи с углами скольжения от  $-3$  до  $+4$  градусов не выходят к поверхности и распространяются в глубинных слоях, что обеспечивает зону обнаружения глубоководных источников. От приповерхностных источников на дистанциях до 3 километров обеспечивается проникновение на приёмную антенну, прямых лучей без отражений от поверхности и других участков дна, что обеспечивает сохранение когерентной структуры сигналов.

Основная задача заключается в проверке надёжного обнаружения и классификации подводного источника в присутствии многочисленных надводных источников. Каждый рисунок представляет траектории, выделенные при обработке 2309 пеленгационных рельефов (ось ординат) в диапазоне углов обзора, синус которых изменяется от  $-1$  до  $+1$  (ось абсцисс).

На рисунке 1 представлены картины траекторий сигналов в эпизоде длительностью два часа сорок минут, полученные рассматриваемыми вариантами алгоритмов при дополнительном усреднении восьми смежных пеленгационных рельефов (время накопления 32 секунды).

Рисунок 1а) построен с использованием неадаптивного алгоритма, в качестве весовых коэффициентов используется исходный, некорректированный вариант весовых коэффициентов. При анализе траекторий, построенных с помощью этого алгоритма, основная трудность объясняется большим динамическим диапазоном входных воздействий (собственные числа изменяются от 35 до  $-3$  децибел). В результате малые вариации уровня сильных сигналов достигают порога срабатывания, и затемняется фон, на котором наблюдаются отметки слабых сигналов. Сигнал подводного источника замаскирован многочисленными ложными отметками, прямые участки траектории искажены изгибами, имеются большие области, в которых затруднительно выделение любых сигналов.

Рисунок 1б) построен с использованием пеленгационного рельефа, в котором (путём сложения пеленгационных рельефов когерентного и для обнаружения слабых сигналов) усилено формирование слабых сигналов. В результате, при сохранении правильных энергетических параметров всех сигналов существенно улучшилось формирование траекторий слабых сигналов, уменьшились флюктуации траектории подводного источника.

На рисунке 1в) анализ полученных траекторий проводится с использованием совмещённых на общем планшете сигналов, выделенных как когерентным алгоритмом, так и алгоритмом, для обнаружения слабых и рассеянных сигналов. Такой вариант отображения позволяет, определить характер основной когерентной энергетической основы принятого колебания, и одновременно выявить рассеянную составляющую, с отличающимися физическими характеристиками, обусловленными расширением пространственного спектра при отражении от неровных границ.

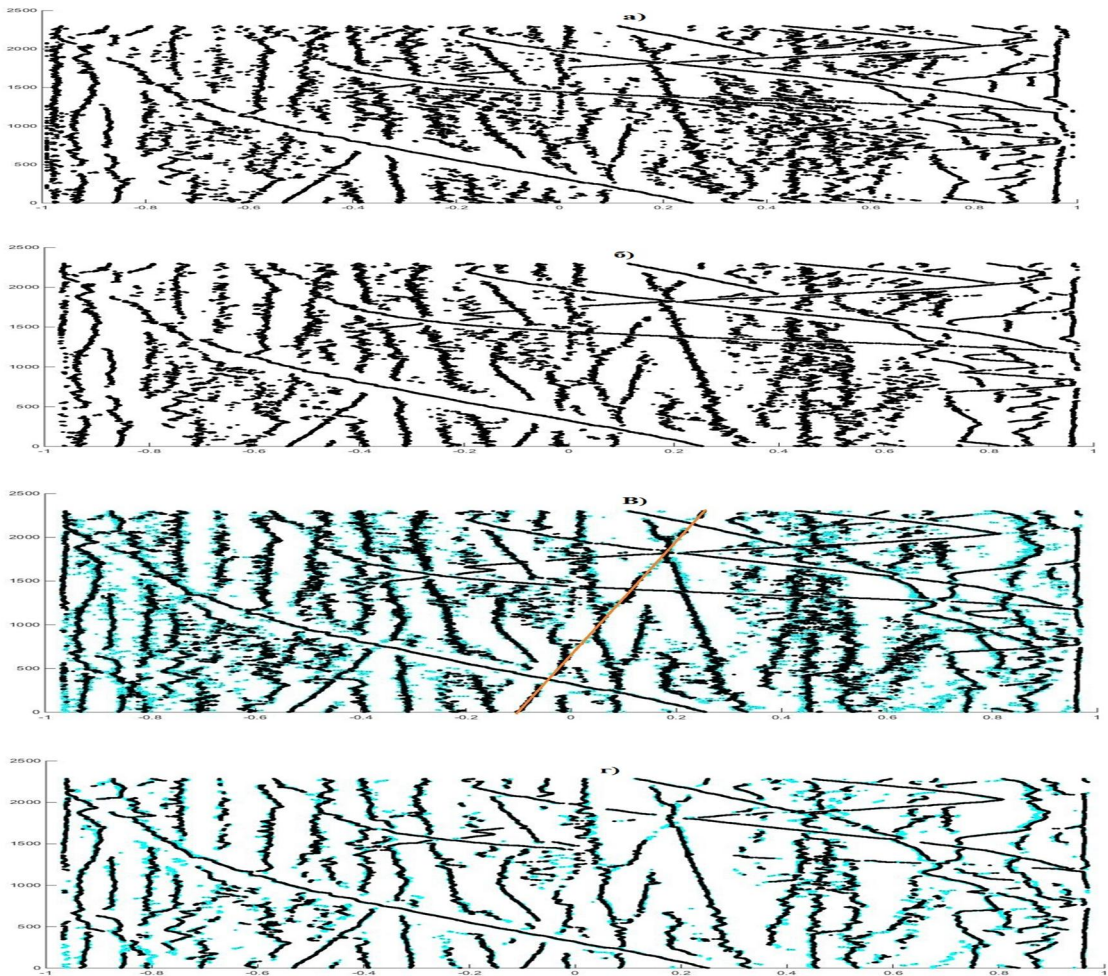


Рис. 1– Траектории сигналов а) неадаптивный алгоритм; б) алгоритм с усиленным формированием слабых сигналов; в) алгоритм с совместным представлением когерентных сигналов (чёрные кривые) и алгоритм, выделяющий слабые и рассеянные сигналы (цветные кривые), 32 сек.; г) аналогично в) но при времени усреднения 100 сек.

В рассматриваемом эпизоде присутствует сигнал одного подводного источника, отмеченный линией, а все остальные источники – различные варианты надводных судов и катеров, случайно оказавшиеся в зоне наблюдения антенны. Другие, присутствующие на рисунке 1в) траектории сигналов с узким диапазоном флуктуаций пеленга не классифицируются как подводные по другим классификационным признакам (увеличенное отношение сигнал/помеха или быстрое изменение пеленга).

При анализе сложных пеленгационных рельефов оказывается полезным использование вариантов с увеличенным временем усреднения. На рисунке 1г) представлена копия рисунка 1в), однако при увеличенном времени усреднения 100 секунд, что достигается усреднением не 8, а 25 пеленгационных рельефов,  $T_a=25$ . В этом случае исчезают мелкие подробности и наблюдается усреднённая картина, на которой проще проследить взаимосвязь отдельных элементов траекторий каждого источника.

Обобщение параметров измерений разными алгоритмами и принятие классификационных решений должно проводиться в результате совместного анализа результатов проведённых вариантов измерений, в том числе с помощью методов искусственного интеллекта, принимающих решение о типе цели и параметрах её движения без участия человека.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-08-00130*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малышкин Г.С.** Экспериментальная проверка эффективности быстрых проекционных адаптивных алгоритмов. «Акустический журнал», т.65, №6, 2019, с.828-847.
2. **Ратынский М.В.** Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2004. 199 с.
3. **Черемисин О.П., Ратынский М.В., Комов А.А., Пушин А.Е.** Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации //Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 2. С. 259–263.
4. **Малышкин Г.С.** Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов. «Акустический журнал», т.63, №2, 2017, с.196-208..
5. **Лаваль Р., Лабаск И.** Влияние неоднородностей и нестабильностей среды на пространственно-временную обработку сигналов. В книге «Подводная акустика и обработка сигналов». М., Мир, 1985, стр. 43-68.
6. **Малеханов А.И.** Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно неоднородном океаническом волноводе. «Акустический журнал», т. 38, №5, 1992, С. 898–904.
7. **Н.А. Завольский, А.И. Малеханов, М.А. Раевский, А.В. Смирнов.** Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря. // «Акустический журнал», т. 63, №6, 2017, С. 501–512.
8. **Малышкин Г.С.** Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов, том 2, Адаптивные методы, ЦНИИ «Электроприбор», С-Петербург, 2011г., стр.375.

**G.S.Malyshkin** (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). **Experiment on detection and classification elements of hydro-acoustic signals on the basis of analysis of adaptively formed source trajectories.**

To implement the classification capabilities of a hydroacoustic tool, it is proposed to use several variants of adaptive algorithms, each of which detects and evaluates the parameters of signals that together contain a classification feature, a surface or underwater source. The generalization of measurement parameters by different algorithms and the adoption of classification decisions should be carried out as a result of a joint analysis of the results of measurements, including with the help of artificial intelligence methods.

В.С. МЕЛЬКАНОВИЧ  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## АДАПТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЁМА СИГНАЛОВ ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

*Выполнено построение мультипликативного (корреляционного) обзора на основе реализации алгоритмов Кейпона и Борджотти - Лагунаса в пространстве элементов выборки. Показано преимущество мультипликативного приема в наличии рассеянной компоненты энергии локальных помех, в том числе при отсутствии корреляции искажений поля помех по времени и частоте.*

**Введение.** Условия применения гидроакустических средств на современном этапе характеризуются необходимостью обеспечивать работоспособность на фоне многокомпонентного поля помех. Подавление помех возможно в том случае, когда сигналы помех обладают когерентностью на некотором частотно - временном интервале, что позволяет сформировать выборку для построения адаптивной процедуры, совмещающей стадии работы и обучения [1-4]. Степень корреляции сигналов помех, а, следовательно, и эффективность их подавления оказывается тем выше, чем меньше размер выборки. Высокую работоспособность при экстремально малом размере выборки обеспечивает группа алгоритмов, реализующих обработку сигналов в пространстве элементов выборки [5,6,7]. Однако, при некогерентном рассеянии сигналов, которое происходит в основном при их отражении от дна и поверхности, часть энергии помех полностью теряет когерентность, формируя "гало", т.е. некогерентную рассеянную компоненту (РК) поля локальных помех (ЛП), не поддающуюся подавлению. РК ЛП маскирует сигналы слабых источников в секторе в несколько ширин характеристики направленности по направлению на ЛП и не поддается адаптивному подавлению. Для приема сигналов на фоне РК ЛП может быть использован мультипликативный (корреляционный) метод приема сигналов, основанный на вычислении вещественной части взаимной корреляции сигналов половин антенны, компенсированных в направлении наблюдения [8,9,10]. Такой метод обладает свойством нулевого отклика по некогерентной компоненте помех, однако, в свою очередь, характеризуется повышенной чувствительностью к воздействию когерентных сигналов ЛП.

**Задача настоящей работы** состоит в поиске адаптивных алгоритмов обнаружения слабых сигналов на фоне ЛП с РК, обеспечивающих подавление когерентной компоненты ЛП при реализации корреляционного (мультипликативного) приема сигналов.

### **Основная часть.**

Предлагаемое решение основывается на реализации адаптивного приема сигналов в каждой из половин антенны по отдельности с последующим вычислением вещественной части корреляции адаптивно обработанных сигналов половин антенны. Реализуются алгоритмы Кейпона и Борджотти - Лагунаса, векторы адаптивных весовых коэффициентов которых имеют вид

$$\vec{A}_{Cap} = \frac{\hat{\Theta}^{-1}\vec{V}}{\vec{V} + \hat{\Theta}^{-1}\vec{V}}, \quad \vec{A}_{B-L} = \frac{\hat{\Theta}^{-1}\vec{V}}{\sqrt{\vec{V} + \hat{\Theta}^{-2}\vec{V}}}, \quad (1)$$

где  $\hat{\Theta}$  - выборочная оценка корреляционной матрицы сигналов антенны, а  $\vec{V}$  - весовой вектор формирования неадаптивного канала. Выборка представлена матрицей  $X$ , составленной из вектор - столбцов  $\vec{X}_k(w_n)$ , содержащих значения комплексных спектров по выходу элементарных каналов антенны на  $K$  последовательных интервалах спектрального анализа, на частоте спектрального анализа  $w_n$  (ниже опущено).  $X$  имеет размерность  $L$  на  $K$ , где  $L$  - число элементов антенной решетки. Поскольку в большинстве случаев  $L > K$ , в (1) используется оценка корреляционной матрицы помех вида [11]

$$\hat{\Theta} = U_{oL}(\Lambda_o - dI_{M_o})U_{oL}^+ + dI_L, \quad (2)$$

где  $U_{oL}$  и  $\Lambda_o$  – матрицы  $M_o$  старших собственных векторов и собственных чисел  $XX^+$  – корреляционной матрицы сигналов на элементах AP,  $M_o$  – число локальных помех,  $d$  – значение составляющей энергии распределенной помехи в собственных числах матрицы  $\hat{\Theta}$ ,  $I_{M_o}$  и  $I_L$  – единичные матрицы размерности  $M_o$  и  $L$ . Учитывая, что

$$\hat{\Theta}^{-1} = \frac{1}{d}I_L - U_{oL}(\Lambda_o^{-1} - \frac{1}{d}I_{M_o})U_{oL}^+ \text{ и } U_{oL} = XU_{oR}\Lambda_o^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $U_{oR}$  – матрица  $M_o$  старших собственных векторов  $X^+X$  – матрицы корреляций элементов выборки (реализаций). Значение вектора – строки размерностью  $K$  спектральных отсчетов по выходу адаптивных алгоритмов после подстановки (3) в (1) для алгоритма Кейпона принимает вид:

$$\vec{y}_{Cap} = \vec{A}_{Cap}^+ X = \frac{\vec{V}^+ X(I_K - U_{oR}(I_{M_o} - d\Lambda_o^{-1}U_{oR}^+))}{L - \vec{V}^+ X(U_{oR}(\Lambda_o^{-1} - d\Lambda_o^{-2})U_{oR}^+)X^+ \vec{V}}, \quad (4)$$

а для алгоритма Борджотти - Лагунаса

$$\vec{y}_{B-L} = \vec{A}_{B-L}^+ X = \frac{\vec{V}^+ X(I_K - U_{oR}(I_{M_o} - d\Lambda_o^{-1}U_{oR}^+))}{\sqrt{L - \vec{V}^+ X(U_{oR}(\Lambda_o^{-1} - d^2\Lambda_o^{-3})U_{oR}^+)X^+ \vec{V}}}. \quad (5)$$

Следует отметить, что в (4 и 5) числитель соответствует результату оптимальной когерентной обработки с весами  $\hat{\Theta}^{-1}\vec{V}$ , знаменатели - нормирующие скаляры, а  $\vec{V}^+ X$  – вектор-строка  $K$  комплексных спектров по выходу неадаптивного обзора. Это значит, что когерентная адаптивная обработка реализуется умножением вектор-строки выходов неадаптивного обзора на матрицу  $I_K - U_{oR}(I_{M_o} - d\Lambda_o^{-1}U_{oR}^+)$  размерностью  $K$  на  $K$ , при чем для всех формируемых каналов эта матрица одна и та же. Последнее обстоятельство делает реализацию адаптивной обработки простой, как с алгоритмическом, так и с ресурсном аспектах.

При реализации адаптации в половинах антенны по отдельности выражения аналогичны. В частности, спектры для первой (например, левой) половины в случае алгоритма Кейпона приобретают вид

$$\vec{y}_{1Cap} = \vec{A}_{1Cap}^+ X_1 = \frac{\vec{V}_1^+ X_1(I_K - U_{1oR}(I_{M_o} - d\Lambda_{1o}^{-1}U_{1oR}^+))}{L/2 - \vec{V}_1^+ X_1(U_{1oR}(\Lambda_{1o}^{-1} - d\Lambda_{1o}^{-2})U_{1oR}^+)X_1^+ \vec{V}_1}, \quad (6)$$

где  $\vec{V}_1$  - весовой вектор размерности  $L/2$ , содержащий весовые коэффициенты для первой половины антенны,  $X_1$  - матрица спектральных отсчетов элементарных каналов первой половины антенны размерности  $L/2$  на  $K$ , а  $\Lambda_{1o}$  и  $U_{1oR}$  – матрицы  $M_o$  старших собственных векторов  $X_1^+X_1$

На рис. 1 и 2 представлен пример моделирования приема сигналов плоской антенной решеткой размерностью 16 на 64 (1024 гидрофона) на одной из частот спектрального анализа. Параметры моделируемых сигналов соответствуют таблице 1. На Рис.1 представлены результаты для случая чисто когерентных сигналов. На рис.2 - при наличии рассеяния с коэффициентом когерентности 0.9 при интервале корреляции искажений равном 0.7 размера апертуры по горизонтали. Корреляция искажений по частоте и времени отсутствует, что делает невозможной адаптацию к искажениям с обучением по времени и частоте.

Таблица 1

Параметры моделируемых сигналов						
Параметр\Номер сигнала	1	2	3	4	5	6
Азимут, град	15	25	36	40	55	60
С/Ш на сумматоре, дБ	0	10	3	20	3	30
С/Ш на гидрофоне, дБ	-30	-200	-27	-10	-27	0



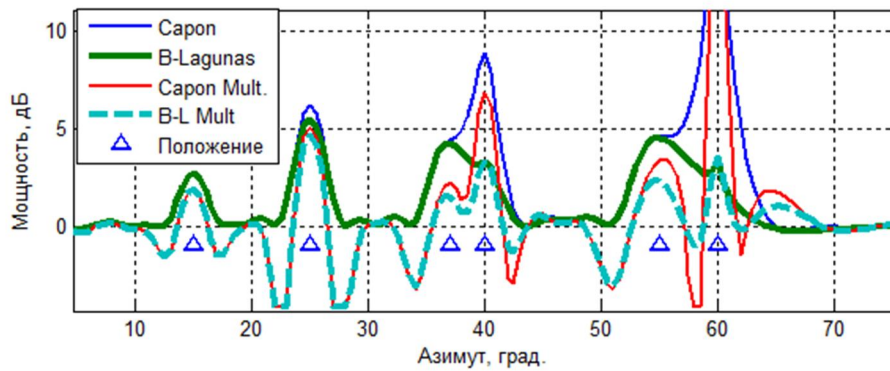


Рис.1 – Результат обзора пространства на тоне. Сигналы без рассеяния.

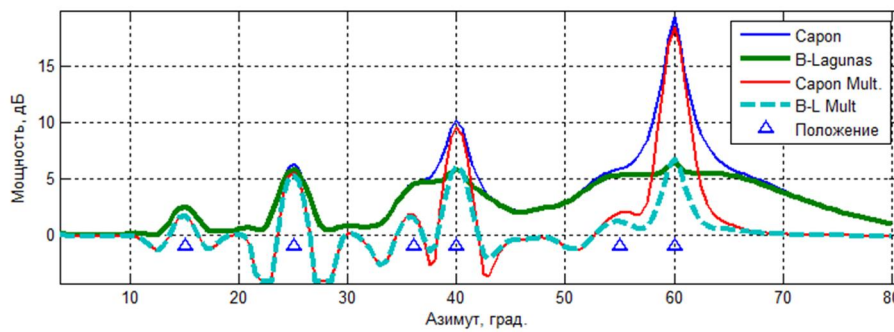


Рис.2 – Результат обзора пространства на тоне. Рассеяние:  $k$ -т когерентности 0.9, интервал корреляции искажений - 0.7 апертуры.

При анализе рис. 1 и 2 обращает на себя внимание преимущество мультипликативных алгоритмов при разрешении слабых сигналов на фоне ЛП, как в случае чисто когерентного сигнала, так и при наличии рассеяния. Преимущество предложенного варианта мультипликативных алгоритмов основывается не только на их свойстве обеспечивать нулевое математическое ожидание отклика по распределенной помехе, но и на том, что реализация адаптации раздельно по половинам антенны обеспечивает формирование индивидуальных весов, учитывающих искажения поля индивидуально для каждой из половин.

**Выводы.**

1. Предложены адаптивные варианты реализации мультипликативного приема сигналов на основе алгоритмов Кейпона и Борджотти - Лагунаса.
2. Основным фактором, препятствующим обнаружению слабых сигналов при мультипликативном обзоре является наличие отрицательных областей в сигнальных откликах локальных помех. Адаптивная обработка обеспечивает уменьшение либо ликвидацию таких областей для наиболее сильных сигналов.
3. Применение адаптивного мультипликативного обзора обеспечивает кардинальное преимущество по разрешению слабых сигналов на фоне помех с рассеянной компонентой поля. Наилучшее разрешение обеспечивается при использовании алгоритма Борджотти - Лагунаса.

*Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00130.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Мюнье Ж., Делиль Ж.Ю. Пространственный анализ в пассивных локационных системах с помощью адаптивных методов, ТИИЭР, 1987, Т.75, №11, С. 21-37.
2. Джонсон ДХ. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения, ТИИЭР, 1987, Т.70, №9, С. 126-138.
3. Г.С. Малышкин, В.С. Мельканович. Адаптивные алгоритмы для обнаружения и оценки параметров слабых сигналов в режиме шумопеленгования при наличии сильных мешающих источников звука // Успехи современной радиоэлектроники, №12, 2009 г., с. 32-45.
4. Г.С. Малышкин. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т. 2 Адаптивные методы, СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011, 374 стр.
5. Мельканович В.С. Адаптивный алгоритм ограничения мощности локальных помех по выходу каналов обзора шумопеленгатора // Труды российской научно-практической конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» УМАС-2018, С.191-201.
6. V.S. Melkanovich. Features of implementation of adaptive signals processing for a cylindrical antenna array with a horizontal generatrix, 2021, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1864** 012141.
7. Мельканович В.С. Препроцессорное ограничение мощности сигнала локальных помех с целью повышения эффективности алгоритмов сверхразрешения // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», СПб.:Нестор-История. - 2014. - с. 390-393.
8. Chavali, Vaibhav; Wage, Kathleen E.; Buck, John R. Multiplicative and min processing of experimental passive sonar data from thinned arrays, 2018, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(6), 3262–3274, doi:10.1121/1.5064458
9. Ksienski A. Multiplicative processing antenna systems for radar applications, *Radio Electron. Eng.* 29(1), 53–67 (1965).
10. D. Davies and C. Ward, Low sidelobe patterns from thinned arrays using multiplicative processing, *IEE Proceedings Communications, Radar and Signal Processing* (1980), Vol. 127, pp. 9–15.
11. Мельканович В.С. Субоптимальная реализация в пространстве элементов выборки адаптивных алгоритмов обработки сигналов многоэлементных антенных решеток // Труды XVI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», ГА-2022, 4с.

**V.S.Melkanjvich (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). Adaptive implementation of correlational reception of signals for multy-element hydroacoustic antenna arrays.**

A multiplicative (correlation) survey is constructed based on the implementation of the Capon and Borgiotti-Lagunas algorithms in the space of sample elements. The advantage of multiplicative reception in the presence of a scattered energy component of local interferences, including the absence of correlation of distortions of the interference field in time and frequency, is shown.

Ю.М. СКОРОДУМОВ, Е.В. ЛУКОЯНОВ, А.Б. ТОРОПОВ, Д.А. МУХИН  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СЕТЕВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

*Активное освоение морских ресурсов требует создания нового оборудования и технологий, включая технологии создания необитаемых подводных аппаратов, как автономных, так и буксируемых или телеуправляемых. При этом принципиально важным является наличие на борту систем, позволяющим осуществлять одновременное информационное взаимодействие и взаимное позиционирование множества корреспондентов друг с другом. В работе представлены результаты разработки и испытаний макета аппаратно-программных средств сетевой гидроакустической связи в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».*

**Введение.** В настоящее время идет активное освоение морских ресурсов, что требует создания нового оборудования и технологий. В связи с этим активное развитие получили технологии создания необитаемых подводных аппаратов (автономных, буксируемых и телеуправляемых) и построения мультиагентных систем с использованием групп автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1]. При этом принципиально важным является наличие на борту АНПА систем, позволяющим осуществлять одновременное информационное взаимодействие и взаимное позиционирование множества корреспондентов друг с другом [2-7].

Качество звукоподводной связи, дальность ее действия и скорость передачи информации непосредственно зависят от полосы рабочих частот связного сигнала, гидроакустических условий его распространения связного сигнала, и от отношения сигнал/помеха в точке его приема [8-10]. В связи с этим, в работе предлагается концепция организации сетевой гидроакустической связи, которая подразумевает построение множества отдельных гидроакустических сетей с дальностью связи 1-2 километра для решений конкретных тактических задач, работающих в частотных диапазонах, лежащих выше верхних частот шумов двигательных систем АНПА и позволяющих обеспечить высокую потенциальную скорость передачи информации. Информационный обмен между такими подсетями, а также передача в них или получение из них оперативной информации осуществляется в нижнем диапазоне частот, обеспечивающем устойчивую связь на дистанциях десятков километров. Кроме того, такая организация связи позволит сохранить совместимость с существующими стандартами связи и частотными диапазонами для потребителей.

В настоящей работе речь пойдет об опыте АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в части разработки и испытаний макета аппаратно-программных средств сетевой гидроакустической связи ближнего действия.

**Макет аппаратно-программных средств сетевой гидроакустической связи.** Созданный в Концерне макет аппаратно-программных средств (далее – АПС) сетевой гидроакустической связи (далее – СГС) предназначен для отработки основных технических решений, включая протоколы информационно-технического взаимодействия (далее – ИТВ) абонентов подводной сети, их навигационного обеспечения, накопления телеметрических данных. АПС СГС представляют собой три дрейфующих узла (буи) и один мобильный узел (буксируемый подводный аппарат – далее БПА, имитирующий АНПА). Структурная схема АПС СГС приведена на рис. 1.

Все узлы оснащены ненаправленными в горизонтальной плоскости излучающими гидроакустическими антеннами и приемными антенными решетками, обеспечивающими пространственное разделение каналов приема с охватом в 360° в горизонтальной плоскости (до 33 пространственных каналов). Аппаратура узлов также содержит электронные модули формирования и приема сигналов (включая ЦАП, АЦП, активные фильтры и усилители), вычислительный модуль, аккумуляторную систему электропитания, приемник спутниковых навигационных сигналов (СНС) для определения собственных координат и набор интерфейсных модулей для обеспечения взаимодействия с узлами сети посредством внешней системы управления. На рисунке 2 показан внешний вид узлов макета (буев) и антенного

модуля, обеспечивающего ненаправленное в горизонтальной плоскости излучение, и направленный прием сигналов.

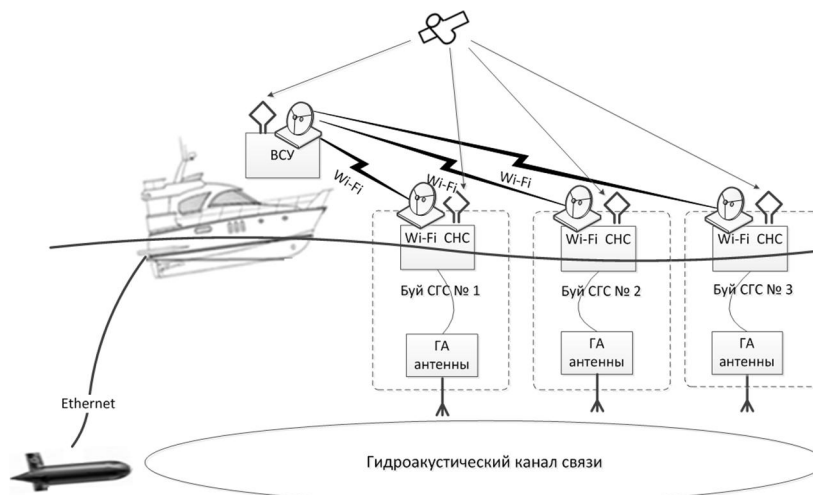
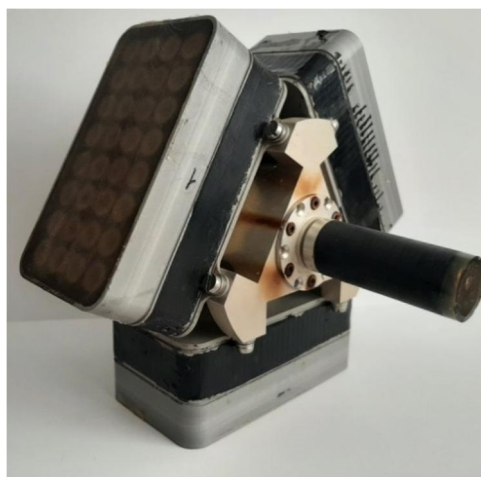


Рис. 1 – Структурная схема макета АПС СГС



а)



б)

Рис. 2 – Макет АПС СГС: а) внешний вид макета буюв; б) приемопередающая гидроакустическая антенна

При разработке макета АПС СГС учитывался ранее полученный опыт Концерна в части осуществления гидроакустической связи с быстроходным подводным объектом [11]. Для реализации информационного обмена по гидроакустическому каналу связи использован комбинированный сигнал, состоящий из синхронизирующей и информационной компонент. Детектирование сигнала связи производится путем обнаружения синхронизирующей компоненты (на основе массива тональных сигналов разной частоты) методом согласованной фильтрации с одновременной оценкой доплеровского смещения частоты. Передача целевой информации производится с использованием BPSK кодирования, обеспечивающего высокую скорость передачи данных при приемлемом уровне вероятности битовой ошибки, при использовании контрольной суммы, сформированной как циклический избыточный код требуемой разрядности [10].

Для компьютерного моделирования взаимодействия абонентов сети была разработана специальная программа, ее интерфейс приведен на рисунке 3. Она обеспечила возможность

отладки программного обеспечения узлов сети в части реализации протокола информационно-технического взаимодействия, включая отработку вопросов маршрутизации сообщений. Возможности программы позволяют обеспечить произвольное размещение абонентов (топологию сети) и задавать различные режимы их работы, включая адресную и широковещательную передачу данных, а также коммуникацию в режиме запрос-ответ в том числе и при наличии ретрансляции сообщений.

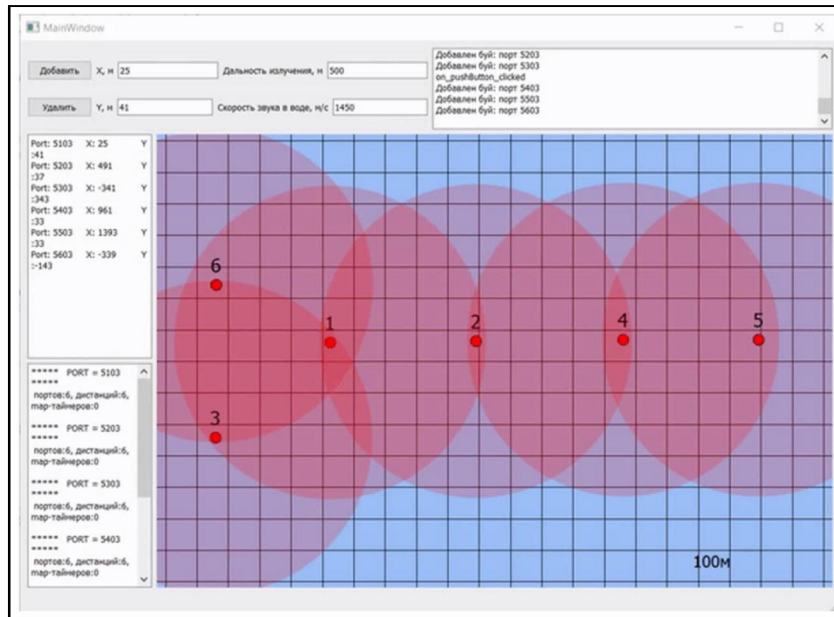


Рис. 3 – Окно программы моделирования взаимодействия абонентов сети

По результатам модельного эксперимента были проведены натурные испытания разработанного макета, в ходе которых было сформировано три конфигурации сети и заданы соответствующие режимы работы:

- 1) три буйа и БПА (рис. 4а) – широковещательная передача данных, связь «каждый с каждым».
- 2) три буйа (рис. 3б) – адресная передача данных, ретрансляция сообщений.
- 3) три буйа и БПА (рис. 4в) – адресная передача данных, ретрансляция сообщений.

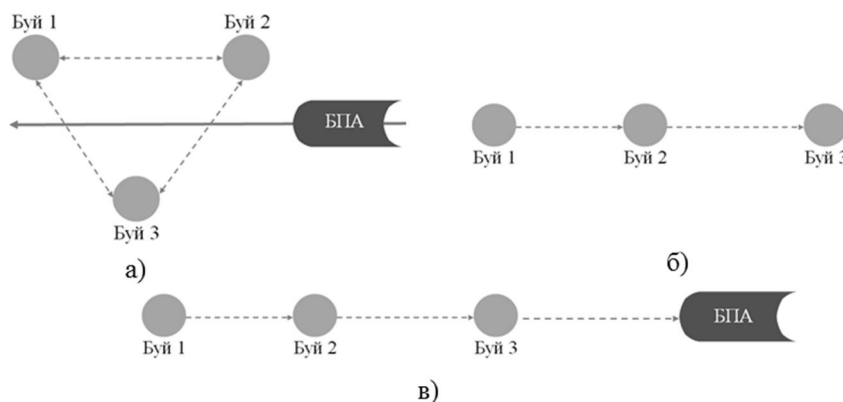


Рис. 4 – Конфигурации сети при проведении натурных испытаний

Надо отметить, что в конфигурациях 1 и 3 состав сети и ее топология динамически изменялись ввиду использования мобильного узла сети (БПА).

В результате испытаний подтверждено корректное функционирование сети из трех дрейфующих буйа и одного подвижного подводного объекта при использовании разработанных

алгоритмов и протоколов информационно-технического взаимодействия, основанных на таблицах маршрутизации.

Созданный образец АПС СГС позволил отработать алгоритмы взаимного позиционирования подводных абонентов. В частности, проверялась задача навигации подвижного подводного объекта по информации от трех дрейфующих буев, фактически имитирующая работу длиннобазовой гидроакустической навигационной станции. Отличительной особенностью разработанных для навигации алгоритмов заключалась в использовании не только дальностей, но и скорости Доплера, по аналогии с разработанными ранее алгоритмами одномаяковой навигации [12, 13], что повысило точность навигационного решения. Это позволило создать задел в области разработки подобных систем.

Проведенные испытания АПС СГС с участием представителей заинтересованных организаций судостроения, подтвердили эффективность выбранных технических решений и близкие к мировым аналогам характеристики.

**Выводы.** Проведенные в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» работы по созданию гидроакустической аппаратуры связи позволили:

- создать макет АПС СГС, позволяющий обрабатывать технические решения, протоколы информационно-технического взаимодействия абонентов подводной сети, их навигационного обеспечения, накопления телеметрических данных и модели применения, используя пространственное разрешение, а в перспективе – и частотное;
- отработать алгоритмы взаимного позиционирования, включая алгоритмы одномаяковой навигации а также алгоритмы работы длиннобазовой гидроакустической навигационной системы;
- создать оборудование дальней гидроакустической связи, обеспечивающей в перспективе связь отдельных подсетей ближней сетевой связи.

*Работа в части моделирования информационно-технического взаимодействия узлов сетевой гидроакустической связи выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-29-00339*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Гайкович Б.А. и др.** Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подледных акваториях//Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года, 2018 г., с. 64-86.
2. **К. Г. Кебкал, А. И. Машошин, Н. В. Мороз.** Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования// Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019, с. 106-135.
3. **González-García J et. al.** Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions\\Appl. Sci. 2020, 10, 1256; doi:10.3390/app10041256.
4. Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов: монография / В. П. Федосов, С. П. Тарасов, В. В. Воронин, С. В. Кучерявенко, П. П. Пивнев, А. А. Легин, А. В. Ломакина, В. А. Франц – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. – 178 с.
5. **Khalid Mahmood Awan, Peer Azmat Shah, Khalid Iqbal, Saira Gillani, Waqas Ahmad, and Yunyoung Nam.** Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges// Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2019, Article ID 6470359, 20 pages <https://doi.org/10.1155/2019/6470359>
6. **Andrea Munafò and Gabriele Ferri.** An Acoustic Network Navigation System.// Journal of Field Robotics 00(0), 1–20 (2017) DOI: 10.1002/rob.21714
7. **К. Г. Кебкал, А. И. Машошин.** Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. Том 24, № 3 (94), 2016. с. 115-130 DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.3.
8. **Захаров Ю.В., Коданев В.П.** Экспериментальные исследования акустической системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Акустический журнал. 1994. Т.40, № 5. С. 799-808.
9. **Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М.** Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акустический журнал. 2010. Т.56, № 2. С. 245-255.
10. **Голубев А.Г.** Методы повышения эффективности систем цифровой связи с шумоподобными сигналами. – СПб: Буквально. 2019. 317с.
11. **Пелевин А.Е., Скородумов Ю.М., Торопов А.Б., Зайцев О.В., Елисеев Д.П., Лукоянов Е.В., Юхта Е.Д., Поляков Д.Ю., Павлова С.В., Фесенко И.А., ЛитуненкоЕ.Г., Варварин С.С.** Способ осуществления

гидроакустической связи с быстроходным подводным объектом. Патент R U 2 7 3 3 4 8 9 C1. Заявка 2020104824 от 03.02.2020.

12. **Торопов А.Б., Лопарев А.В., Пелевин А.Е.** Сравнение алгоритмов оценивания местоположения подводного аппарата при одномаяковой навигации. // Материалы 13 мультиконференции по проблемам управления, 2020
13. **Кошаев Д.А.** Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 109–130.

**YU.M. Skorodumov, E.V. Lukoyanov, A.B. Toropov, D.A. Mukhin** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia). **Underwater acoustic communication network prototype: development and test results.**

Studies of the World Ocean and exploration of sea resources are accompanied by the development of new equipment and technologies such as multiagent systems using autonomous underwater vehicles (AUV) groups. Reliable communication between the network nodes and relative positioning are the key factors affecting the efficient mission performance by the AUV group. Development and test results of underwater acoustic communication network rototype designed by Concern CSRI Elektropribor are provided.

В.С. МЕЛЬКАНОВИЧ  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

## ПОДАВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОМЕХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

*Предложен подход к повышению эффективности подавления маломощных локальных помех по выходу многоэлементных антенных решеток при использовании алгоритмов Кейпона и Борджотти - Лагунаса путем введения в обучающую выборку данных неадаптивного обзора и формирования сигнального подпространства помех в пространстве элементов выборки.*

**Введение.** Одна из основных проблем применения адаптивных алгоритмов приема гидроакустических сигналов на фоне локальных помех (ЛП), основанных на минимизации выходной мощности с ограничениями связана с необходимостью оценивания корреляционной матрицы входной выборки. В случае алгоритма Кейпона (линейные ограничения) для обеспечения помехоустойчивости размерность выборки, элементы которой представлены векторами комплексных спектральных отсчетов сигналов гидрофонов, должна, по меньшей мере, в четыре раза превышать число гидрофонов в антенне. В случае алгоритма Борджотти – Лагунаса [1,2] (квадратичные ограничения) – в восемь раз. Для уменьшения размерности обработки сигналов известны два подхода:

- перевод обработки сигналов из пространства элементов антенны в пространство сформированных каналов (beam space processing) [3,4];
- применение регуляризации выборочной оценки корреляционной матрицы сигналов элементов антенны (diagonal loading) [5,6].

Достоинством обработки в пространстве каналов является высокая разрешающая способность при условии попадания локальных помех в рабочее окно, т.е. сектор покрытия пространственными каналами, участвующими в адаптации. Основным недостатком – потеря помехоустойчивости, вызванная ослаблением эффекта адаптации к сигналам источников помех, в рабочее окно не попавшим.

Достоинствами применения регуляризации является отсутствие зависимости эффективности от угла прихода помех, а также возможность адаптации при чрезвычайно малом объеме обучающей выборки, что дает возможность подавления ЛП резко нестационарными искажениями волновых фронтов. Недостатком – ослабление адаптивного эффекта по ЛП относительно малой мощности, наиболее актуальное в случае многоэлементных антенн, когда сигналы маломощных помех тонут в фоновых шумах.

**Задача настоящей работы** состоит в поиске универсального подхода к реализации алгоритмов Кейпона и БЛ, совмещающего возможность подавления всех ЛП вне зависимости от направления их прихода со способностью подавления относительно слабых ЛП при многократном превышении числа гидрофонов над размером обучающей выборки.

### Основная часть.

Предлагаемое решение основывается на совмещении обоих упомянутых подходов на основе перевода обработки сигналов из пространств элементов антенны и пространственных каналов в пространство элементов обучающей выборки.

В классическом виде векторы адаптивных весовых коэффициентов алгоритмы Кейпона и Борджотти - Лагунаса имеют вид

$$\vec{A}_{Cap} = \frac{\Theta^{-1}\vec{V}}{\vec{V}^+\Theta^{-1}\vec{V}}, \quad \vec{A}_{B-L} = \frac{\Theta^{-1}\vec{V}}{\sqrt{\vec{V}^+\Theta^{-2}\vec{V}}}, \quad (1)$$

где  $\Theta = XX^+$  - выборочная оценка корреляционной матрицы сигналов антенны, а  $\vec{V}$  - весовой вектор формирования неадаптивного канала. Выборка представлена матрицей  $X$ , составленной из вектор - столбцов  $\vec{X}_k(w_n)$ , содержащих значения комплексных спектров по выходу элементарных каналов антенны на  $K$  последовательных интервалах спектрального анализа, на частоте спектрального анализа  $w_n$  (ниже опущено).  $X$  имеет размерность  $L$  на  $K$ ,



где  $L$  - число элементов антенной решетки. Задача построения адаптивной обработки сводится к оценке корреляционной матрицы по выборке  $X$ . Для случая  $K < L$  аналогично [7] может быть предложена замена выборочной оценки корреляционной матрицы на оценку вида

$$\hat{\Theta} = U_{oL}(\Lambda_o - dI_{M_o})U_{oL}^+ + \mu dI_L, \quad (2)$$

где  $U_{oL}$  и  $\Lambda_o$  – матрицы  $M_o$  старших собственных векторов и собственных чисел  $XX^+$  – корреляционной матрицы сигналов на элементах АР,  $M_o$  – число локальных помех,  $d$  – среднее значение составляющей энергии распределенной помехи в собственных числах матрицы  $\hat{\Theta}$ ,  $\mu = K / L$  - коэффициент пересчета  $d$  к уровню распределенной помехи на элементах антенны.  $I_{M_o}$  и  $I_L$  – единичные матрицы размерности  $M_o$  и  $L$ . Учитывая, что

$$\hat{\Theta}^{-1} = \frac{1}{\mu d} I_L - U_{oL}((\Lambda_o - dI_{M_o})(\Lambda_o - d(1-\mu)I_{M_o})^{-1})U_{oL}^+ \text{ и } U_{oL} = XU_{oR}\Lambda_o^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $U_{oR}$  – матрица  $M_o$  старших собственных векторов  $X^+X$  – матрицы корреляций элементов выборки (реализаций), значение вектора - строки размерностью  $K$  спектральных отсчетов по выходу адаптивных алгоритмов после подстановки (3) в (1) для алгоритма Кейпона принимает вид:

$$\bar{y}_{Cap} = \bar{A}_{Cap}^+ X = \frac{\bar{V}^+ X [I_K - U_{oR}(\Lambda_o^{-1}(\Lambda_o - dI_{M_o})(\Lambda_o - d(1-\mu)I_{M_o})^{-1})U_{oR}^+ X^+ X]}{L - \bar{V}^+ X [(I_K - U_{oR}(\Lambda_o^{-1}(\Lambda_o - dI_{M_o})(\Lambda_o - d(1-\mu)I_{M_o})^{-1})U_{oR}^+ X^+ X]} \quad (4)$$

а для алгоритма Борджотти-Лагунаса

$$\begin{aligned} \bar{y}_{B-L} &= \bar{A}_{B-L}^+ X = \\ &= \frac{\bar{V}^+ X [I_K - U_{oR}(\Lambda_o^{-1}(\Lambda_o - dI_{M_o})(\Lambda_o - d(1-\mu)I_{M_o})^{-1})U_{oR}^+ X^+ X]}{\sqrt{L - \bar{V}^+ X (U_{oR}[\Lambda_o^{-1}(\Lambda_o - dI_{M_o})(\Lambda_o - d(1-\mu)I_{M_o})^{-1} + d\mu(\Lambda_o - d(1-\mu)I_{M_o})^{-2}]U_{oR}^+) X^+ \bar{V}}} \end{aligned} \quad (5)$$

В (4) и (5) числитель соответствует результату оптимальной когерентной обработки с весами  $\hat{\Theta}^{-1}\bar{V}$ , знаменатели – нормирующие скаляры, а  $\bar{V}^+ X$  – вектор-строка  $K$  комплексных спектров по выходу неадаптивного обзора. Отметим, что когерентная адаптивная обработка в числителях реализуется умножением вектор-строки выходов неадаптивного обзора на матрицу размерностью  $K$  на  $K$ , заданную выражением в квадратных скобках. При чем для всех формируемых каналов эта матрица одна и та же. Последнее обстоятельство делает реализацию адаптивной обработки простой, как в алгоритмическом, так и в ресурсном аспектах. Отмеченное справедливо и для знаменателей (4 и 5).

Выражения (4) и (5) позволяют реализовывать в пространстве элементов антенны адаптивную обработку сигналов при минимальных размерах обучающих выборок за счет использования априорной информации о структуре распределенной помехи. При формировании модельной корреляционной матрицы (2) выборочная оценка используется лишь для формирования аддитивной компоненты матрицы, обусловленной сильными сигналами на основе подпространства старших собственных векторов. Последнее возможно постольку поскольку старшие собственные числа  $\hat{\Theta}$ , обусловленные энергией ЛП образуют группу, оторванную от младших, обусловленных смесью энергии распределенной помехи и слабых сигналов. Возможность адаптивного подавления относительно слабых помех определяется переходом соответствующих собственных чисел выборочной оценки корреляционной матрицы из группы младших в группу старших. Для усиления компоненты ЛП в выборочной оценке корреляционной матрицы может быть использована информация об антенном многообразии, выражающаяся в использовании выходов сформированного веера неадаптивных пространственных каналов.

Сформируем выборку, включающую сигналы как гидрофонов, так и каналов в виде

$$\bar{X} = [X^+, (W^+ X)^+]^+ = \bar{U}_L \bar{\Lambda}^{1/2} \bar{U}_R^+, \quad (6)$$

где  $W$  – матрица весовых векторов формирования веера каналов обзора,  $\bar{U}_L$ ,  $\bar{U}_R$  – матрицы левых и правых сингулярных векторов  $\bar{X}$ , а  $\bar{\Lambda}^{1/2}$  – диагональная матрица

сингулярных чисел  $\bar{X}$ . Введем  $U_{oR}$  и  $U_{oL}$  – матрицы  $M_o$  старших сингулярных векторов  $\bar{X}$ . Матрица  $\bar{U}_{oR}\bar{U}_{oR}^+$  есть проектор на подпространство сильных сигналов в пространстве элементов выборки, едином как для пространственных каналов, так и для элементов , а матрица  $\tilde{X}_o = X\bar{U}_{oR}\bar{U}_{oR}^+$  – проекция выборки  $X$  на подпространство сильных сигналов, полученная с использованием проектора, сформированного с использованием сигналов как элементов антенны, так и пространственных каналов. т.е. сумма компоненты сильных сигналов и части распределенной помехи, или иными словами – компонента ЛП в  $X$ , оцененная с использованием пространственных каналов.

Оценка корреляционной матрицы помех может быть представлена в аналогичном (2) виде

$$\tilde{\Theta} = \tilde{U}_{oL}(\tilde{\Lambda}_o - dI_{M_o})\tilde{U}_{oL}^+ + \mu dI_L, \tilde{U}_{oL} = \tilde{X}\tilde{U}_{oR}\tilde{\Lambda}_o^{-1/2} = X\bar{U}_{oR}\bar{U}_{oR}^+\tilde{U}_{oR}\tilde{\Lambda}_o^{-1/2} = X\tilde{U}_{oR}\tilde{\Lambda}_o^{-1/2}, \quad (7)$$

где  $\tilde{U}_{oL}$ ,  $\tilde{U}_{oR}$  – матрицы левых и правых сингулярных векторов  $\tilde{X}_o$ , а  $\tilde{\Lambda}_o^{-1/2}$  – диагональная матрица её сингулярных чисел,  $\tilde{U}_{oR} = \bar{U}_{oR}\bar{U}_{oR}^+\tilde{U}_{oR}$ .

Подстановка в (4) и (5)  $\tilde{U}_{oR}$  вместо  $U_{oR}$  и  $\tilde{\Lambda}_o$  вместо  $\Lambda_o$  дает возможность получить варианты алгоритмов Кейпона и БЛ, совмещающие преимущества обработки сигналов в элементах антенны и в сформированных каналах.

По результатам моделирования плоской антенной решетки при  $L=1000$  и  $K = 40$  адаптивный эффект алгоритмов, использующих сигналы неадаптивных пространственных каналов был достигнут для сигнала с отношением сигнал/шум на гидрофоне -25 дБ, в то время, как для алгоритмов [7], реализуемых на элементах антенны – только при -15дБ. При этом при решении задачи разрешения, как слабых, так и сильных сигналов наблюдалось преимущество алгоритма БЛ.

#### Выводы.

1. Предложены адаптивные варианты реализации приема сигналов на основе алгоритмов Кейпона и Борджотти – Лагунаса, обеспечивающие усиление адаптивного эффекта в случае слабых сигналов за счет одновременного использования в обучающей выборке выходов, как элементов антенны, так и пространственных каналов обзора.

3. Наилучшее разрешение обеспечивается при использовании алгоритма Борджотти-Лагунаса.

2. Дальнейшее повышение адаптивного эффекта в случае слабых сигналов может быть достигнуто путем селекции используемых пространственных каналов.

*Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00130.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **J. Munier, G. Y. Delisle**, Spatial Analysis in Passive Listening Using - Adaptive Techniques
2. Proceedings of the IEEE, vol. 75, NO. 11, november 1987
3. **Мальшкин Г.С.** Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т.2. Адаптивные методы. СПб: Электроприбор, 2011.
4. **Ильин И. М.** Оптимизация обработки сигналов на выходе сформированного веера характеристик направленности. – Вопросы судостроения, сер. «Общетеchnическая», вып. 75, 1984, с. 49–54.У.
5. **Deylami, A., Mohammadzadeh Asl, B.**, A Fast and Robust Beamspace Adaptive Beamformer for Medical Ultrasound Imaging. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, **64**(6) , 2017, 947-958, doi:10.1109/tuffc.2017.2685525 L.Du, J.Li, P.Stoica Fully Automatic computation of diagonal loading levels for robust adaptive beamforming, IEEE Aerospace ElectronSyst 2010 vol. 46, **1** pp. 449-458.
6. **Абрамович Ю.И.**, Регуляризованный метод адаптивной оптимизации фильтров по критерию максимума отношения сигнал/помеха//Радиотехника и электроника т.26 №3с.87-95.
7. **Jian Li, Petre Stoica, and Zhisong Wang**, «On robust capon beamforming and diagonal loading», IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, vol. 51, 7, pp. 1702–1715.
8. **В.С. Мельканович**, Субоптимальная реализация адаптивных алгоритмов обработки сигналов многоэлементных антенных решеток в пространстве элементов выборки // Сборник материалов конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», СПб, 2022.

V.S. Melkanjvich (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). **Suppression of low-power local interference for multi-element hydroacoustic antenna arrays.**

An approach is proposed to increase the efficiency of suppressing low-power local interference at the output of multi-element antenna arrays using the Capon and Borgiotti-Lagunas algorithms by introducing non-adaptive survey data into the training sample and forming a signal subspace of interference in the training sample element space.

А.В. ШАФРАНИЮК, Д.О. ТАРАНОВСКИЙ  
 (АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

## ОБЗОР МЕТОДОВ ПРОКЛАДКИ ТРАЕКТОРИИ АНПА ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ

*В докладе приводится обзор существующих в мире подходов к построению траектории АНПА для выполнения поставленной миссии с учётом различных влияющих факторов. Приводится обзор существующих подходов и их предварительная классификация, даётся краткий обзор отечественных статей по тематике.*

**Введение.** На настоящий момент в России и в мире установилась устойчивая тенденция замены операторов (а также водителей, пилотов и иных) системами автоматического управления (СУ), в задачи которых входит обеспечение следования объекта по заданному маршруту, либо выполнение некоторой миссии. Такая тенденция характерна и для морских подводных объектов, в частности (и в основном) автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Существует значительное число публикаций по этой тематике [1...34]. Условно, эти работы можно разделить на несколько тематик (рисунок 1).

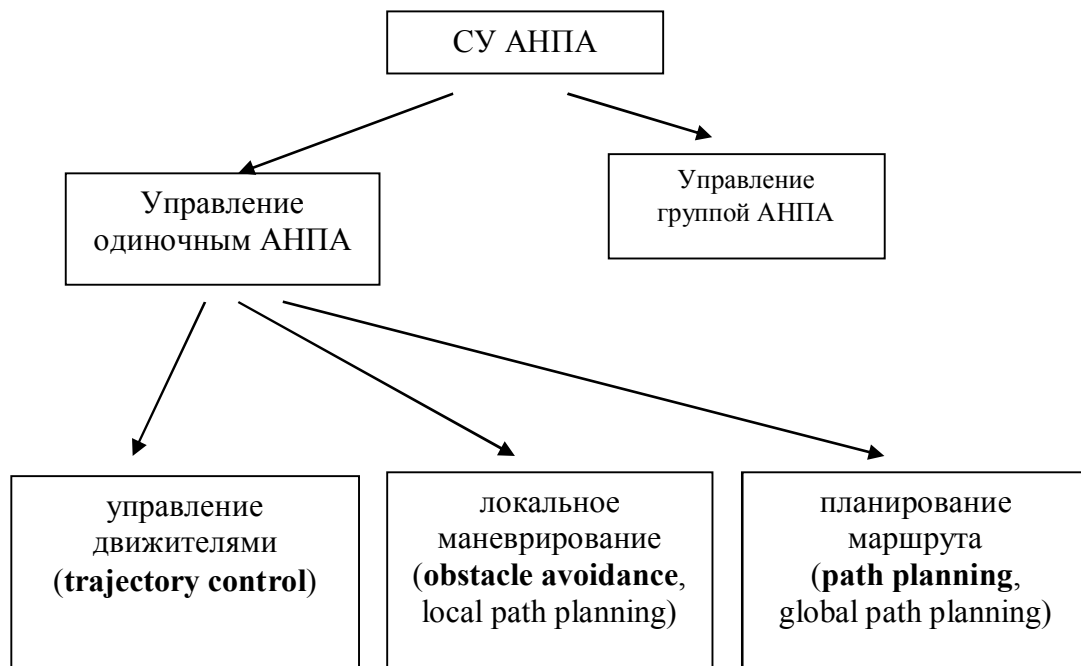


Рис.1 – Основные тематики публикаций по СУ АНПА.

Как показано на рис.1 алгоритмы СУ разделяются на предназначенные для управления движением одиночного АНПА и группы АНПА. Алгоритмы группового управления обычно включают в себя управление одиночными АНПА. При этом можно выделить СУ верхнего уровня, управляющие системами АНПА в целом [1...6], а также СУ управляющие группой АНПА [7...12].

Анализируя публикации по одиночным АНПА можно выделить три группы СУ:

- управление движительно-рулевой системой, позволяющие осуществлять управление движением АНПА по желаемым координатам [13...16];
- решение задач локального маневрирования (**obstacle avoidance**), к которым можно отнести: избежание столкновений (с локальными препятствиями типа морских искусственных объектов и крупных гидробионтов, буёв, вышек и т.п. и с протяжёнными объектами, типа дна, скоплений растительности и т.п.) [17, 18]. При этом локальное маневрирование как правило пренебрежимо мало по отношению к

глобальному маршруту и характеризуется тем, что учитываемое в нём окружение отсутствует в множестве априорных данных;

- планирование маршрута (**path planning**) [19...34], которое характерно априорно известными данными, такими как крупный рельеф дна, острова, проливы и фарватеры, а также такое планирование определяется имеющимися на АНПА ресурсами (запасом энергии и особенностями движительно-рулевой системы, поставленной в миссии задачей и т.п.). Такие алгоритмы достаточно хорошо формализуемы, но не столь широко распространены в АНПА как в иных приложениях. К примеру, в автомобильных системах к таким алгоритмам можно отнести программы навигации, такие как Яндекс Навигатор, Google maps, 2GIS и др. В морских надводных применениях широко используются электронные картографические навигационно-информационные системы (ЭКНИС).

Рассмотрим существующие подходы к решению задачи планирования маршрута АНПА, в значительной степени опираясь на обзорные статьи [33, 34], а также рассмотрим место отечественных публикаций в общемировой системе и попробуем сформулировать основные проблемы и дальнейшие пути развития.

Общий подход к решению задачи построения маршрута приведён на рисунке 2.

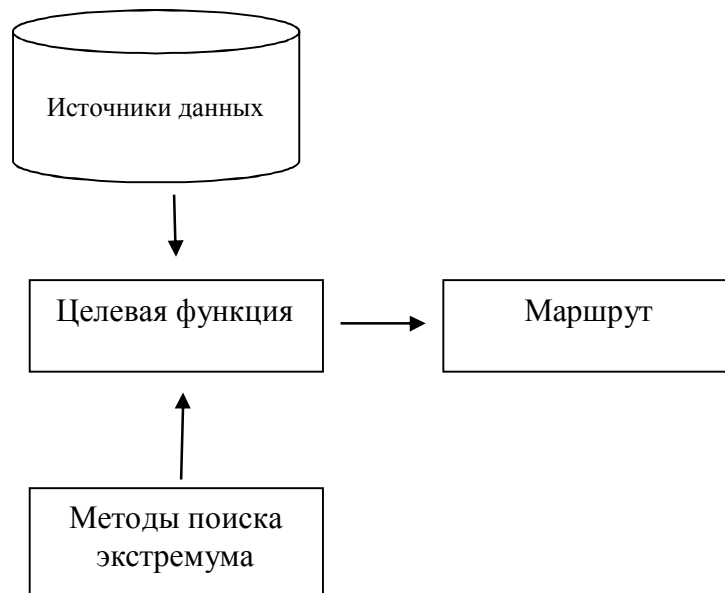


Рис.2 – Решение задачи построения маршрута.

Наиболее проработанным в литературе является вопрос оптимизации уже сформированного функционала (целевой функции), в то время как вопросы формирования целевой функции обходятся стороной, а задача получения исходных данных рассматривается в инженерной плоскости.

Итак, условно можно выделить следующие используемые для решения методы:

- генетические алгоритмы [23...26];
- муравьиные алгоритмы [27...29];
- другие алгоритмы [30...32].

**Заключение.** В докладе были рассмотрены основные тенденции развития систем управления АНПА в части прокладки маршрутов, доминирующие в мировой и отечественной печати. При это можно отметить, что значительная часть литературных источников имеет описательный характер и базируется на переработке существующих подходов, предназначенных для их реализации с участием людей, непосредственно включенных в функционирование систем управления. Особенно это наблюдается в отечественных работах. Алгоритмы прокладки имеют три основных задачи, на текущий момент активно обсуждаемых: получение исходных данных для формирования целевой функции, формирование целевой

функции и разработка методов нахождения её глобальных и локальных экстремумов. Наиболее интересным и перспективным с точки зрения дальнейших исследований по мнению авторов является решение обозначенных выше задач для нестационарного случая, когда параметры выполняемой АНПА миссии изменяются в процессе её выполнения.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Инзарцев А.В., Багницкий А.В., Елисеенко Г.Д., Павин А.М.**, Особенности организации программного комплекса управления для АНПА большой автономности // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2019. № 8. С. 99-105.
2. **Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В.**, Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (28). С. 23-31
3. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.**, Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50-58.
4. **Пшихопов В.Х., Чернухин Ю.В., Федотов А.А., Гузик В.Ф., Гуренко Б.В., Медведев М.Ю., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Переверзев В.А., Приемко А.А.**, Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 87-101.
5. **В. С. Быкова, А. И. Машошин, И. В. Пашкевич**, Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. Том 29. №1 (112), 2021..
6. **Машошин 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.
7. **Юхимец Д.А.**, Система управления группой АНПА на основе визуального слежения за АНПА-лидером // Робототехника и искусственный интеллект. материалы XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский федеральный университет, Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». 2020. С. 215-221.
8. **Лямина Е.А.**, Алгоритмы управления движением группы АНПА по поисковым траекториям // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 11. С. 10.
9. **Чурсин Ю.А., Нурмухаметов Р.А., Данилов А.В., Павличев В.В.**, Разработка комбинированного алгоритма группового управления АНПА // В сборнике: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Гидроакустические системы обнаружения объектов". Сборник статей I Всероссийской научно-технической конференции. Анапа, 2021. С. 57-74.
10. **Максимкин Н.Н., Нагул Н.В.**, Децентрализованное распределение группы АНПА по областям с приоритетами // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2013. Т. 5. С. 414-418.
11. **Машошин 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.
12. **Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Кензин М.Ю.**, Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2 (8). С. 34-43.
13. **Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Ларионов М.В., Сурин С.Н.**, Структура системы управления АНПА с поворотным маршевым движителем // Системы управления и обработки информации. 2018. № 4 (43). С. 5-9.
14. **Костенко В.В., Толстоногов А.Ю.**, Задача декомпозиции управления движением анпа с учетом изменяющихся ограничений маршевых движителей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 210-222.
15. **Киселев Л.В., Матвиенко А.В., Инзарцев Ю.В.**, О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 13-26.
16. **Павлов Д.А.**, Алгоритм управления глубиной погружения АНПА методом задания дифференциальной функцией вида сигмоида // Системы управления и обработки информации. 2017. № 4 (39). С. 34-42.
17. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.**, Управление движением АНПА для восстановления на маршрутной траектории при возникновении отказов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 7 (224). С. 92-108.
18. **Павлов Д.А.**, Алгоритм управления АНПА в горизонтальной плоскости методом наведения в «субточку» // Системы управления и обработки информации. 2017. № 4 (39). С. 23-33.
19. **Илларионов Г.Ю., Лаптев К.З., Матвиенко А.В.**, Подготовка и планирование глобального маршрута океанского похода автономного необитаемого подводного аппарата дальнего радиуса действия // Двойные технологии. 2018. № 2 (83). С. 41-49.
20. **Галяев А.А., Рубинович Е.Я.**, Планирование маршрутов АНПА в конфликтной среде // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11. № 8 (11). С. 119-123.
21. **Лаптев К.З., Багницкий А.В.**, Планирование маршрута и алгоритмы маневрирования автономного необитаемого подводного аппарата дальнего радиуса действия при поиске полыней и разводий в арктике // В сборнике: Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). 13-я МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ. Санкт-Петербург, 2020. С. 60-63.

22. **Кензин М.Ю., Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Киселёв Л.В.**, Планирование динамических многоцелевых миссий для групп автономных необитаемых подводных аппаратов на основе гибридного эволюционного подхода // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3876-3887.
23. **M. Ataei and A. Yousefi-Koma**. Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, pp. 23-32.
24. **S. Mahmoudzadeh, D. Powers, K. Sammut, A. Lammas and A. M. Yazdani**, Optimal route planning with prioritized task scheduling for AUV missions. 2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, 7-14.
25. **X. Pan, X. Wu, X. Hou and Y. Feng**, Global path planning based on genetic-ant hybrid algorithm for AUV // *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(5), 45-9, 76.
26. **P. Yao and S. Zhao**, Three-Dimensional Path Planning for AUV Based on Interfered Fluid Dynamical System Under Ocean Current // *Ieee Access*, June 2018, 6, pp. 42904-42916.
27. **S. Perez-Carabaza, E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco and J. M. de la Cruz**, Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains // *Applied Soft Computing*, 62, 2018, pp. 789-806.
28. **H. J. Hong and W. Xiong**, Research on global path planning based on ant colony optimization for AUV. *Journal of Marine Science and Application*, 8(1), 2009, pp. 58-64.
29. **L. Y. Dong and H. L. Xu**, AUV path planning based on improved ant colony algorithm // *Automation & Instrumentation*, 32(3), 2017, pp. 1-4.
30. **Y. J. Heo, W. K. Chung and Ieee**, RRT-based path planning with kinematic constraints of AUV in underwater structured environment. 2013 // 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 2013, pp. 523-525.
31. **I. B. Jeong, S. J. Lee and J.-H. Kim**, Quick-RRT: Triangular inequality based implementation of RRT with improved initial solution and convergence rate // *Expert Systems with Applications*, 123, 2019, pp. 82-90.
32. **J. T. Kim, J. H. Li, M. J. Lee, H. J. Kang, W. S. Lee and Ieee**, Path planning for 3D coastal navigation of underwater structures // 2014 Oceans - St. John's. Ieee, New York.
33. **TingTing Yao, Tao He, WenLong Zhao, Abdou Yahouza M.Sani**, Review of path planning for autonomous underwater vehicles // *RICAI 2019: Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, September 2019, pp. 482-487.
34. **Voemir Kunchev, Lakhmi Jain, Vladimir Ivancevic, and Anthony Finn**, Path planning and obstacle avoidance for autonomous mobile robots: a review // *Lecture Notes in Computer Science*, October 2006, pp. 537-544

**A.V. Shafranyuk, D.O. Taranovskiy (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). Review of AUV path planning methods for solving various problems.**

The report provides an overview of the approaches existing in the world to AUV path planning to fulfill the assigned mission, taking into account various influencing factors. A review of existing approaches and their preliminary classification is given, a brief review of domestic articles on the subject is given.

А.В. ШАФРАНИЮК, Д.А. ДОБРИКОВ  
(АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

## ИМИТАЦИОННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЁТА СИГНАЛА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДЕМА ПРИ ЕГО ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ВОДНУЮ СРЕДУ

*В докладе рассматриваются алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие формировать на основе звукового файла с записью реальных сигналов модема выходной звуковой файл, содержащий сигнал на гидрофоне принимающей стороны с учётом шумов моря и передаточной функции волновода. Модель строится во временной области и позволяет достаточно адекватно воспроизводить прохождение сигнала по водной среде и использовать полученный звуковой файл для тестирования реальных устройств.*

**Введение. Постановка задачи.** Использование цифровых двойников в современной промышленности позволяет значительно снизить затраты на отработку программно-алгоритмического обеспечения и испытания разрабатываемого оборудования. Наиболее актуально этот вопрос стоит в области обработки информации в гидроакустике. Это связано с:

- дороговизной проведения экспериментов в условиях морской среды;
- сложность проверки функционирования разрабатываемых устройств по всей номенклатуре требуемых акваторий и сезонов года;
- длительности проведения экспериментов в морских условиях.

В связи с этим стоит актуальная задача разработки программных моделей для проведения экспериментов в части одной из активно развивающихся областей гидроакустики – подводной связи. В ней в первую очередь представляют интерес цифровые полигоны, т.е. модели морских волноводов, которые позволят преобразовывать выдаваемый акустическим модемом сигнал в соответствии с заданным волноводом и последующий его приём со стороны модема. Это позволит определить такие параметры связи для заданных акваторий как:

- вероятность (объём) потери данных;
- оптимальные скорость обмена и частоты связи;
- оптимальные режимы связи.

Пример такого цифрового полигона, используемого для отработки гидроакустического модема, приведён на рисунке 1.

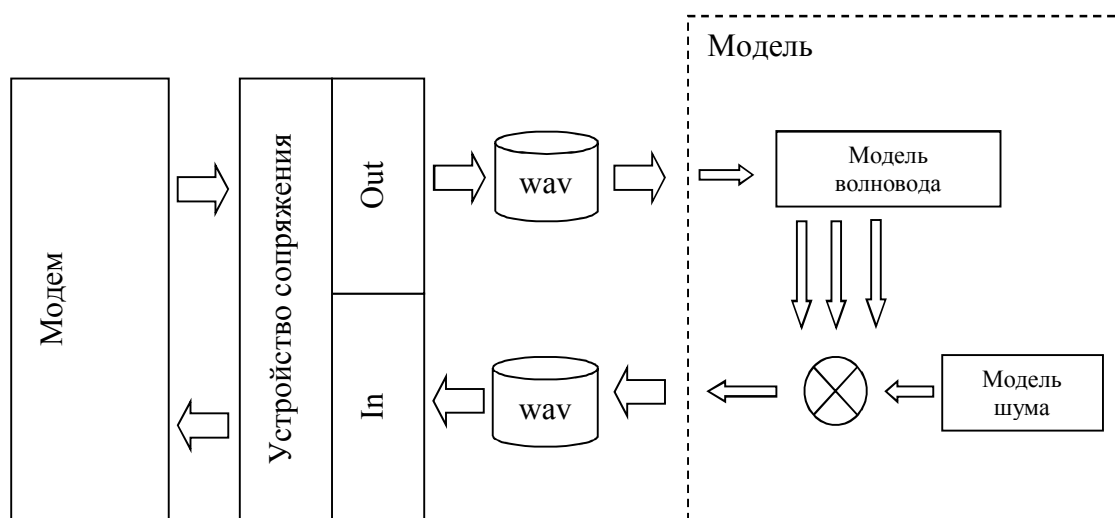


Рис.1 – Схема эксперимента с использованием программной модели волновода.



Для получения данных на входе приёмного модема (рис. 1) с использованием устройства сопряжения (которым в простейшем случае может являться звуковая карта) формируется звуковой файл с записью сигнала, излучённого модемом. Записанный сигнал преобразуется в соответствии с передаточной функцией волновода. Сама передаточная функция формируется достаточно простым способом и для её нахождения требуется определить параметры волновода на заданный момент времени. Затем, полученный сигнал суммируется с шумовым сигналом ветровой помехи моря, которая в соответствии с модель Урика [1] задаётся как равномерный шум в заданном диапазоне частот с наклоном -6 дБ/окт. Из полученного сигнала формируется звуковой файл, который может в дальнейшем с использованием устройства сопряжения быть поданным на вход модема.

В рамках работы рассмотрим способ оценки параметров волновода для заданного момента времени и способ формирования ветровой помехи в требуемом диапазоне частот.

**Оценка параметров волновода.** Для формирования сигнала звуковой связи на входе гидрофона воспользуемся следующей схемой, являющейся усовершенствованным методом, описанным в [2, 3].

Для расчёта временных отсчётов (ВО) сигнала на входе приёмного модема будем использовать результаты гидроакустических расчётов (ГАР) двух соседних по имитационному времени ГАР. Причём между ВО и моментами проведения ГАР соблюдается следующее соотношение:

$$\forall i_{TS} \in \{i_{TS}\}: t_{imt}(i_{HAC}) \leq t_{imt}(i_{TS}) < t_{imt}(i_{HAC} + 1),$$

где  $t_{imt}$  – имитационное время.

Рассмотрим задачу расчёта ВО сигнала связи применительно к  $\Pi(i_{HAC})$ . Точки для которых производится гидроакустический расчёт (ГАР) соответствуют расположению передающего и принимающего модемов в момент времени  $t_{imt}(i_{HAC})$ . Схема, поясняющая расчёт сигнала связи приведена на рисунке 2.

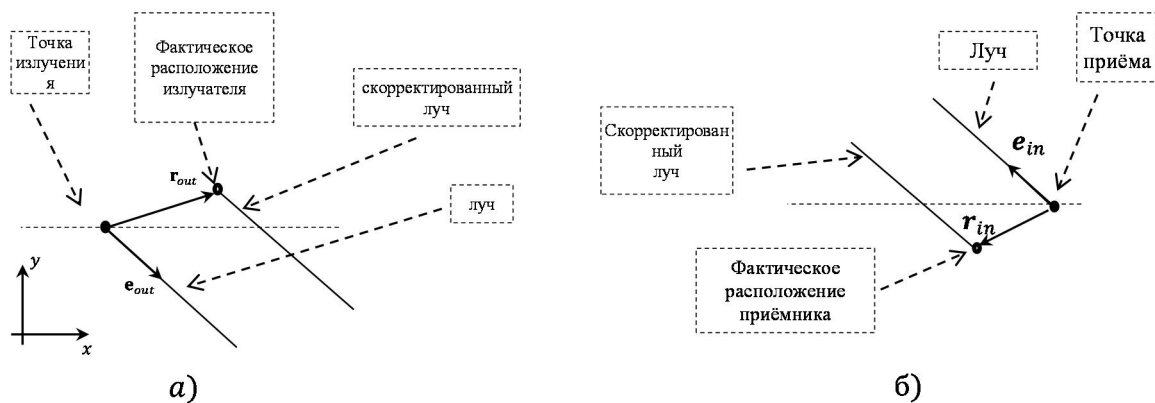


Рис. 2 – Схема расчёта задержек сигналов по волновым фронтам

Для расчёта параметров  $\mathbf{G} = \{k, T, L, \beta_{out}, \beta_{in}\}^T$  на момент времени  $t_{imt}(i_{TS})$ , когда расположение излучателя не совпадает с точкой излучения для которой рассчитано  $\mathbf{G}$  воспользуемся следующими предположениями:

- скорость звука в области точки расчётной точки излучения, к которой относится фактическая точка излучения, будем считать постоянной  $c_{out} = const$ , т.е. звук по лучам распространяется прямолинейно, а аномалия распространения в пределах области будет равна 1;
- границы волновода считаем достаточно удалёнными от точки расчёта, т.е. волновой фронт имеет сферическую форму.

С учётом вышеописанного скорректированный луч в области излучения (рис. 4а) распространяется параллельно сформированному ГАР, а изменение времени распространения по нему составит:

$$\Delta T_{out} = \frac{\Delta x_{out}}{c_{out}},$$

где  $\Delta x_{out} = -(\mathbf{r}_{out}, \mathbf{e}_{out})$ ,  $\mathbf{r}_{out}$  – вектор смещения излучающего модема в вертикальной плоскости относительно точки излучения для которой получены ГАР,  $\mathbf{e}_{out} = \{\cos(\beta_{out}) \quad \sin(\beta_{out})\}^T$ .

Длина луча  $L$ , очевидно, измениться на величину  $\Delta x_{out}$ .

Коэффициент усиления  $k$  при этом измениться на величину следующего множителя:

$$\Delta k_{out} = \frac{(L+\Delta x_{out})^2}{L^2} \frac{L+\Delta x_{out}}{L},$$

где первый множитель обусловлен изменением расширения волнового фронта, а второй изменением затухания звука в среде. Выражение записано с учётом расчёта коэффициента затухания звука в воде по выражению  $\beta = \beta_1(f_{avg} \cdot 10^{-3})^{\beta_2}$ ,  $\beta_1 = 0,025$ ,  $\beta_2 = 1,5$ , где  $f_{avg} = \sqrt{f_{high}f_{low}}$  – среднегеометрическая частота сигнала ЗПС ( $f_{high}$  и  $f_{low}$  – соответственно верхняя и нижняя частоты частотного диапазона сигнала связи).

Отметим также, что угол места луча не изменяется.

Для области приёма (рис. 4б) передаточный коэффициент волновода измениться аналогичным образом с небольшими изменениями:

$$\Delta T_{in} = \frac{\Delta x_{in}}{c_{in}},$$

$$\Delta x_{in} = -(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{e}_{in}),$$

$$\mathbf{e}_{in} = \{-\cos(\beta_{in}) \quad \sin(\beta_{in})\}^T,$$

$$\Delta k_{in} = \frac{(L+\Delta x_{in})^2}{L^2} \frac{L+\Delta x_{in}}{L}.$$

Таким образом, скорректированный коэффициент передачи волновода будет:

$$\mathbf{G}_{corr} = \begin{Bmatrix} k_{corr} \\ T_{corr} \\ L_{corr} \\ \beta_{in.corr} \\ \beta_{out.corr} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta k_{in} \Delta k_{out} k \\ T + \Delta T_{in} + \Delta T_{out} \\ L + \Delta x_{in} + \Delta x_{out} \\ \beta_{out} \\ \beta_{in} \end{Bmatrix}.$$

Выражение для передаточного коэффициента рассчитаем дважды: для  $\Pi(i_{HAC})$  и для  $\Pi(i_{HAC} + 1)$ :  $G_{corr}(i_{TS}, i_{HAC})$  и  $G_{corr}(i_{TS}, i_{HAC} + 1)$  соответственно. Рассчитаем интерполированное взвешенное значение передаточной функции волновода по выражению:

$$G_{intrap} = \frac{1}{w_1 + w_2} (w_1 G_{corr}(i_{TS}, i_{HAC}) + w_2 G_{corr}(i_{TS}, i_{HAC} + 1)),$$

где  $w_1 = t_{imit}(i_{TS}) - t_{imit}(i_{HAC})$ ,  $w_2 = t_{imit}(i_{HAC} + 1) - t_{imit}(i_{TS})$  – весовые коэффициенты.

**Формирование ветровой помехи.** Формирование помехи во временной области может быть осуществлено множеством способов:

- БПФ-фильтрацией, когда шум формируется в спектральной области, а временная последовательность формируется с использованием обратного БПФ с перекрытием. Недостатком такого подхода является наличие эффекта Гибса;
- специализированные фильтры, типа фильтра Келлета [4]. Однако такой фильтр формирует широкополосный сигнал во всём диапазоне частот, в то время как сигнал для проверки модема должен соответствовать полосе пропускания фильтров исследуемого изделия;
- Использование КИХ-фильтров, что позволяет сформировать частотно ограниченный сигнал заданной формы, что с учётом стационарности ветрового шума является наиболее подходящим способом реализации.

Идентифицируем коэффициенты КИХ-фильтра с использованием теоремы Винера-Хинчина. А именно, зададим желаемый спектр плотности мощности с параметрами:  $P_{red.dB} = 33$  дБ и  $k_{slope} = -6 \frac{дБ}{окт} = -20$  дБ/дек для диапазона частот  $[f_{low} \dots f_{high}]$ .

Синтез КИХ-фильтра проводится по следующей схеме:

- формируется желаемый спектр мощности помехи:

$$P_{clutter}(i_{SS}) = P_{base}^2 10^{0,1(P_{red.dB} - 6 \log_2 \frac{i_{SS} f_{disc}}{N_{SS} f_{red}})},$$

где  $P_{base} = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – базовый уровень давления,  $P_{red.dB}$  – приведённый уровень ветровой помехи в дБ,  $i_{SS} \in [0, N_{SS} - 1]$  – индекс спектрального отсчёта,  $N_{SS}$  – размер КИХ-фильтра,  $f_{disc}$  – частота дискретизации,  $f_{red} = 1000$  Гц;

- вычисляем коэффициенты КИХ-фильтра по формуле:  $\mathbf{K}_{FIR} = \text{ifft}(\mathbf{P}_{clutter})$ , где  $\text{ifft}(\blacksquare)$  – функция обратного преобразования Фурье;
- приняв уровень допустимых потерь в 5% по мощности и, с учётом порогового значения  $k_{thrshld} = 0,01\max(\mathbf{K}_{FIR})$  (где  $\mathbf{K}_{FIR}$  – коэффициенты КИХ-фильтра), отбросим меньшие порога коэффициенты и получим набор значимых коэффициентов КИХ-фильтра.

На рисунке 4 приведены спектр мощности КИХ-фильтра, его коэффициенты и пример порождённого ветрового шума.

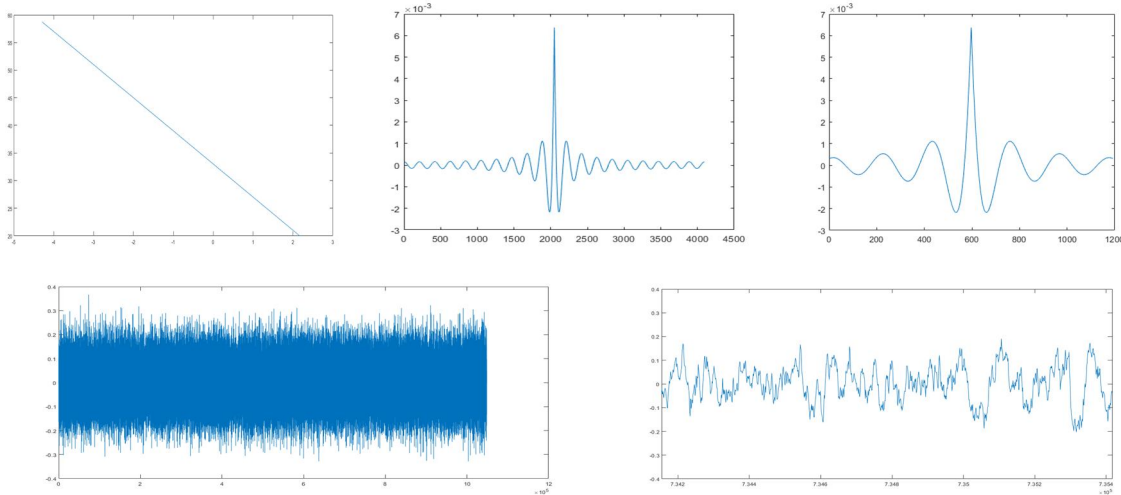


Рис. 4 – Формирование ветровой помехи с использованием КИХ-фильтра.

**Заключение.** Рассмотренные алгоритмы позволяют сформировать входной сигнал гидроакустического модема на основе выходного, для осуществления отработки программно-алгоритмического оснащения модема и его испытаний.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Урик Р. Дж., Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978, 445 с.
2. Шафранюк А.В., Тимофеев В.Н., Копачёв О.А., Моделирование сигнала на выходах гидроакустических приёмников фазированной антенной решётки во временной области//Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014). 7-я российская мультиконференция по проблемам управления: материалы конференции. ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электрон". 2014. С. 848-854.
3. Копачёв О.А., Магистерская диссертация «Разработка имитатора сигналов на выходах гидроакустических приёмников фазированной антенной решётки во временной области» // Минобрнауки, СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.
4. <https://www.firstpr.com.au/dsp/pink-noise/>.

A.V. Shafranyuk, D.A. Dobrikov (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). **Simulation software for calculation of hydro-acoustic modem signal as it passes through aqueous environment.**

The report discusses algorithms and software that make it possible to generate, based on a sound file with a recording of real modem signals, an output sound file containing a signal on the hydrophone of the receiving side, taking into account sea noise and the wave-to-water transfer function. The model is built in the time domain and allows adequately reproducing the passage of a signal through an aquatic environment and using the resulting sound file to test real devices.

## СЕКЦИЯ 2. УПРАВЛЕНИЕ МОРСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ИХ СКРЫТНОСТЬЮ

Ю. В. ГУРЬЕВ, Е.Н. МИХАЙЛОВ, М.З. СЛУЦКАЯ  
(ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия, Санкт-Петербург)

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Изложены математические модели и численный метод расчета гидродинамических реакций при пространственном маневрировании морских подводных объектов с выступающими частями. Для моделирования обтекания корпуса объекта и выступающих частей используется непрерывный слой гидродинамических источников и системы дискретных вихревых отрезков, что обеспечивает учет взаимного влияния и реальной геометрии всех конструктивных элементов. Предложенные модели косвенно учитывают влияние вязкости жидкости на величину гидродинамических реакций на корпусе и выступающих частях.*

*Апробация метода показала его удовлетворительную сходимость и возможность использования в практике гидродинамического проектирования, а также в составе тренажеров и бортовых комплексов на компьютерах с относительно невысокой производительностью.*

**Введение.** Прогнозирование параметров управляемости и траектории движения морских подводных объектов (МПО) является не только одной из важнейших задач их гидродинамического проектирования, но и востребовано в работе тренажеров и специальных бортовых системах различного назначения. Компьютерное моделирование динамики МПО основано на численном интегрировании дифференциальных уравнений их движения в сплошной среде. При этом основной проблемой является определение гидродинамических реакций, действующих на эти объекты. Для этой цели используют методы физического и математического моделирования. Методы второго направления могут использовать модели как вязкой, так и невязкой жидкости. В первом случае проводится численное решение осредненных тем или иным способом уравнений Навье-Стокса, что позволяет с достаточной для практики степенью точности находить значения всех гидродинамических реакций, но требует огромного объема вычислений. Это затрудняет их практическое применение, например, при расчетах траектории МПО, когда необходимо десятки тысяч раз повторять расчет на каждом шаге интегрирования уравнений движения. Методы на основе модели невязкой жидкости имеют определенные ограничения, например, не позволяют определить силу вязкостного сопротивления [1, 2]. Однако экономичность их алгоритмов позволяет выполнять расчёты даже на персональных компьютерах. Это преимущество становится решающим на начальных этапах проектирования, когда необходимо оперативно сопоставить гидродинамические параметры большого числа проектно-конструкторских решений, а также в случаях ограниченной производительности компьютеров, например, бортовых. В докладе приводится описание математических моделей и численных методов расчета гидродинамических реакций, основанных на допущении о невязком характере течения жидкости, и обладающих высоким быстродействием.

**Постановка физико-математической задачи.** Пусть МПО – тело произвольной формы с выступающими частями, характерными для подводного кораблестроения, движется в невязкой безграничной жидкости с шестью степенями свободы (рис. 1).

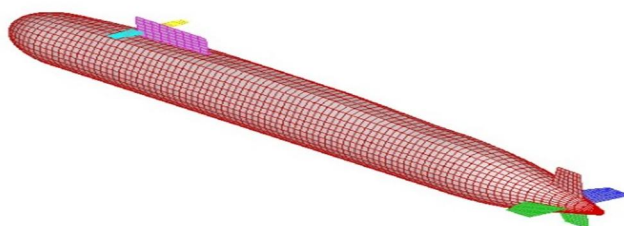


Рис.1 – Расчетная сетка корпуса с выступающими частями

Выступающие части имеют, как правило, форму тонких симметричных крыльев произвольной формы в плане. При этом значения кинематических параметров движения МПО ограничены линейной областью изменения гидродинамических реакций, соответствующей безотрывному обтеканию корпуса и выступающих частей.

Считая вызванное течение потенциальным, для его описания воспользуемся методом гидродинамических особенностей. Моделировать воздействие корпуса на жидкость будем с помощью непрерывного слоя источников, расположенных на его поверхности  $S$  (эффект вытеснения), и специальной вихревой системой, имитирующей поперечную завихренность в пограничном слое корпуса и следе за ним (рис. 2) и позволяющей косвенно учесть влияние вязкости среды на гидродинамические давления.

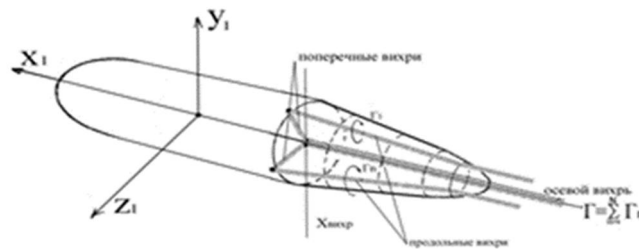


Рис.2 Вихревая модель корпуса

Моделирование выступающих частей производится с помощью известных методов теории крыла, в которых крыло разделяется на  $N$  панелей, каждая из которых заменяется одним П-образным вихрем.

Неизвестная интенсивность источников  $q$  на корпусе можно получить из решения граничного интегрального уравнения (ГИУ) Фредгольма второго рода

$$2\pi q(P) + \int_S q(Q) \frac{\vec{r} \cdot \vec{n}}{r^3} dS = (\vec{V}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_0 - \vec{W}_{вихр.корп} - \vec{W}_{выст.ч}) \cdot \vec{n}_S(P)$$

где  $P$  и  $Q$  – соответственно контрольная точка поверхности  $S$ , в которой выполняется условие непротекания, и текущая точка этой же поверхности,  $\vec{r} = \overrightarrow{QP}$ ,  $\vec{r}_0$  – радиус-вектор контрольной точки относительно полюса,  $\vec{n}$  – орт внешней нормали к  $S$ ,  $\vec{V}_0$  и  $\vec{\omega}$  – соответственно вектор поступательной и угловой скорости МПО,  $\vec{W}_{вихр.корп}$  и  $\vec{W}_{выст.ч}$  – скорости, вызванные вихревой системой корпуса и вихревыми системами всех выступающих частей.

Неизвестные параметры вихревой системы корпуса определяются из расчета безвихревого обтекания изолированного корпуса. Для этого выполняется решение ГИУ, в котором стоящие в правой части скорости вихревых систем полагаются равными нулю. После чего по полученному распределению скоростей и давлений на поверхности корпуса определяются интенсивности вихрей системы  $\Gamma_i$  и координата ее начала  $X_{вихр}$ .

Циркуляция  $\Gamma_i$  П-образных вихрей на отдельном крыле определяется из условия непротекания в одной из точек каждой его панели и сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$\sum_i \vec{W}_{ij} \cdot \Gamma_i = (\vec{V}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_0 - \vec{W}_{корп} - \vec{W}_{вихр.корп} - \vec{W}_{выст.частей}) \cdot \vec{n}_j$$

где  $\vec{W}_{ij}$  – скорость, индуцированная в  $j$ -ой контрольной точке единичным  $i$ -м П-образным вихрем,  $\vec{n}_j$  – нормаль в  $j$ -ой контрольной точке,  $\vec{W}_{корп}$ ,  $\vec{W}_{вихр.корп}$  и  $\vec{W}_{выст.частей}$  – скорости от корпуса и его вихревой системы, а также от других выступающих частей.

Совместное решение записанных ГИУ и СЛАУ позволяет определять все гидродинамические характеристики течения с учетом взаимного влияния корпуса и выступающих частей. После полученного решения можно найти по формуле Коши-Гельмгольца гидродинамические давления на корпусе, интегрируя которые, получим

гидродинамические реакции за исключением силы сопротивления. Силы на крыльях вычисляются с помощью теоремы Жуковского «в малом».

**Численное решение ГИУ.** Поверхность корпуса в общем случае имеет произвольную форму и не описывается аналитически. Для ее аппроксимации используется параметрическое представление, снимающее ограничение на ее форму, присущие другим методам. Для корректного вычисления несобственных интегралов задачи используется замена переменных, обеспечивающая сгущение расчетных точек в окрестности особой точки [3]. Решение ГИУ осуществляется методом последовательных приближений. В докладе приводятся примеры расчетов гидродинамических реакций на МПО реальных обводов и сравнение полученных значений с величинами, найденными с помощью испытаний в аэродинамических трубах. Расхождение между сопоставляемыми величинами составило от 5 до 17% в области линейного их изменения.

**Заключение.** Разработанные модели и методы численного определения гидродинамических реакций, действующих на МПО с выступающими частями, позволяют выполнять расчеты в оперативном режиме на компьютерах с невысокой производительностью. Предложенное математическое и программное обеспечение может применяться на начальных этапах проектирования МПО, а также в составе тренажеров и бортовых комплексов, связанных с моделированием их движения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Guryev, Yu V; Zaletin, V V.** Journal of Physics: Conference Series; Bristol Том 1864, Изд. 1, (May 2021). DOI:10.1088/1742-6596/1864/1/012135. 13th Multiconference on Control Problems (MCCP 2020) Determination of the added-liquid masses in the problems of control of the motion and stealthiness of marine underwater objects
2. **Guryev, Y V; Slutskaya, M Z.** Journal of Physics: Conference Series; Bristol Том 1864, Изд. 1, (May 2021). DOI:10.1088/1742-6596/1864/1/012147. 13th Multiconference on Control Problems (MCCP 2020) Results of computer simulation of force impact of difficult marine conditions on underwater objects.
3. **Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В.** Компьютерные технологии в корабельной гидродинамике. Монография. СПб.: Военно-морской инженерный институт, 2010. 326 с.

Guryev Y. V., Mikhailov E. N., Slutskaya M. Z. (Naval Polytechnic Institute (Branch) MESC NF “Naval Academy”, Saint-Petersburg). **Prediction of hydrodynamic reactions in the problems of motion control of sea underwater objects.**

Mathematical models and a numerical method for calculating hydrodynamic reactions during spatial maneuvering of marine underwater objects with protruding parts are presented. To simulate the flow around the body of the object and protruding parts, a continuous layer of hydrodynamic sources and a system of discrete vortex segments are used, which ensures that the mutual influence and the real geometry of all structural elements are taken into account. The proposed models indirectly take into account the influence of fluid viscosity on the magnitude of hydrodynamic reactions on the body and protruding parts.

Approbation of the method showed its satisfactory convergence and the possibility of using it in the practice of hydrodynamic design, as well as in simulators and on-board systems on computers with relatively low productivity.

М.Э. БУЗИКОВ, С.Н. ВАСИЛЬЕВ, А.А. ГАЛЯЕВ, П.В. ЛЫСЕНКО, А.С. САМОХИН, М.А. САМОХИНА  
(ИПУ РАН, Москва)  
В.В. ЗАЛЕТИН, Е.И. ЯКУШЕНКО  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)

## МОДЕЛЬ ГРУППОВОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЕ САМОНАВЕДЕНИЯ

*Рассматривается модель системы, состоящей из атакующего объекта, носителя и автономных источников широкополосных помех. Имитационное моделирование позволило сравнить разные способы управления носителем и источниками широкополосных помех при заданном способе управления атакующим. Получены результаты численных расчётов для разных моделей поведения атакующего.*

### Введение.

Классические законы самонаведения, такие как пропорциональная навигация (ПН), являются очень эффективными, когда самонаводящаяся торпеда обладает значительно большей маневренностью, чем цель [1,2]. К середине 1970-х годов возможности ПЛ-целей по прогнозированию траекторий атакующего торпедного оружия (ТО) показали, что оружие по принципу ПН может быть неэффективным против них. Однако к тому времени применение теории оптимального управления к задачам наведения уже было достаточно развито, что позволило предложить новые и потенциально более перспективные проекты законов наведения. Примерно в это время вычислительная мощность, необходимая для реализации таких передовых алгоритмов, была уже вполне достаточной для того, чтобы сделать их применение практичным. Большинство современных законов управления выведены с использованием линейно-квадратичной (LQ) теории оптимального управления для получения аналитических решений с обратной связью. Многие из современных формализаций учитывают маневр цели, что позволяет иметь дело со сценариями, учитывающими высокую маневренность цели (особенно это касается задач терминального наведения). Как правило, стратегии оптимального управления используют функцию затрат для явной оптимизации критериев эффективности торпеды в целях повышения общей производительности применения ТО.

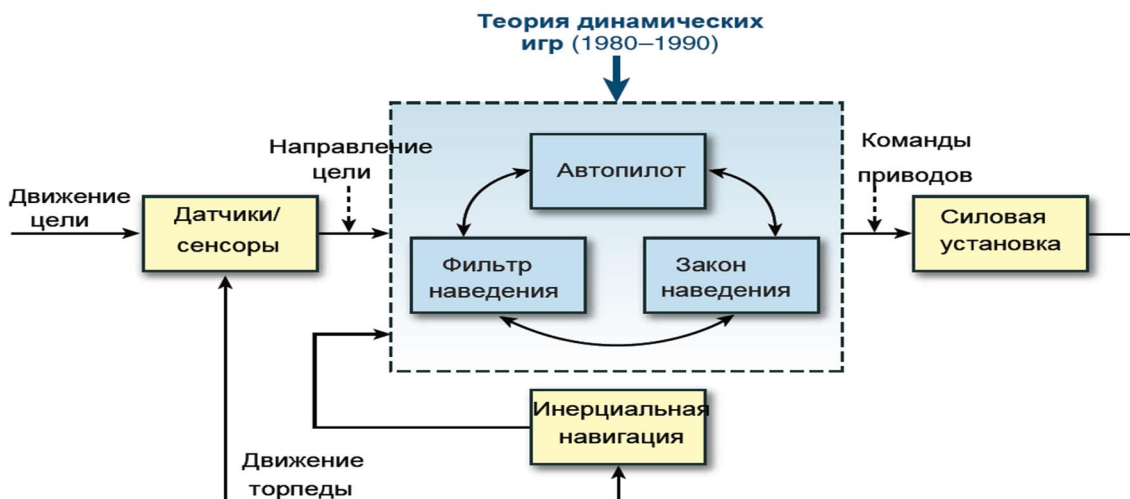


Рис. 1. Топология наведения, навигации и управления для управляемой торпеды

Использование мехатронных устройств типа мобильной помехи [3] позволит повысить боевую устойчивость стратегически важных подвижных объектов (носитель) и его боевые возможности путем отвлечения средств ТО предполагаемого противника на помеху в таких эпизодах как: уклонение от обнаружения и атаки, срыв слежения, скрытное проникновение в охраняемую зону, скрытное слежение за посторонними движущимися объектами (представляющими оперативный или стратегический интерес), безопасное прохождение угрожаемых районов и географических узкостей и в ряде других. Отсюда вытекает, что



мехатронные устройства типа мобильной помехи, должны оказывать акустическое воздействие на сенсорные устройства противника, а также иметь возможность отвлекать ТО от реальной траектории носителя. В связи с этим возникает актуальная задача оптимального группового управления движением как собственно носителем, так и интеллектуальными мехатронными устройствами типа мобильной помехи, играющих роль ложных целей (ЛЦ).

Математические формализации возможных эпизодов применения таких устройств используют аппарат конфликтно-кооперативных дифференциальных игр [4,5]. Дело в том, что носитель и мехатронные устройства, действуя совместно, образуют коалицию против ТО и его поисковой системы. По этой причине в таких постановках используются обычные для теории дифференциальных игр критерии типа "Время" или типа "Промах". Дифференциально-игровые постановки позволяют попутно решать задачи оптимизации процессов преследования (например, торпедной атаки) в случае применения противником ложных целей. Что касается динамики игроков в рассматриваемых эпизодах, то, как правило, используются простые (безынерционные) движения или движения с ограничениями на разворот (кривизну траектории) на плоскости [14]. Подобные допущения оправданы геометрическими характеристиками реальных объектов и территорией их применения.

### Основная часть.

Приведем общую модель системы, состоящей из ТО, носителя и автономных источников широкополосных помех. Будем считать, что состояние носителя описывается некоторым вектором  $\mathbf{x}_H$ . На борту носителя находится  $N$  автономных источников широкополосных помех, которые впоследствии будут выполнять роли ложных целей (ЛЦ), причем состояние  $i$ -й ЛЦ описывается вектором  $\hat{\mathbf{x}}_{ЛЦ}^i = [(\mathbf{x}_{ЛЦ}^i)^T, s_i]^T$ , где вектор  $\mathbf{x}_{ЛЦ}^i$  отвечает за пространственное положение, а  $s_i$  за включенность режима имитации шумов. Момент выпуска  $i$ -й ЛЦ обозначим через  $t_i$ . Каждая ЛЦ может начать имитацию шумов в момент  $\tau_i \geq t_i$ , причем продолжительность шумов составляет  $\tau$ : в режиме имитации шумов  $s_i = 1$ , иначе  $s_i = 0$ . Состояние ТО описывается вектором  $\mathbf{x}_{ТО}$ . Динамика системы описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_H &= \mathbf{f}_H(t, \mathbf{x}_H, \mathbf{u}_H), & \dot{\mathbf{x}}_{ТО} &= \mathbf{f}_{ТО}(t, \mathbf{x}_{ТО}, \mathbf{u}_{ТО}), \\ [(\dot{\mathbf{x}}_{ЛЦ}^i)^T, s_i]^T &= \begin{cases} [(\mathbf{f}_H(t, \mathbf{x}_H, \mathbf{u}_H))^T, 0]^T, & t < t_i; \\ [(\mathbf{f}_{ЛЦ}(t, \mathbf{x}_{ЛЦ}^i, \mathbf{u}_{ЛЦ}^i))^T, \chi_{[\tau_i, \tau_i + \tau]}(t)]^T, & t \geq t_i. \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь  $\mathbf{u}_H, \mathbf{u}_{ТО}, [(\mathbf{u}_{ЛЦ}^i)^T, t_i, \tau_i]^T$  – это управления носителем, ТО и  $i$ -й ЛЦ, а функция  $\chi_{\Omega}(t)$  определяется через

$$\chi_{\Omega}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Omega; \\ 0, & t \notin \Omega. \end{cases}$$

Управления, вообще говоря, зависят от наблюдений с сенсоров. Обозначим через  $\mathbf{y}_H, \mathbf{y}_{ТО}$  векторы наблюдений носителя и ТО. Управления ЛЦ будем считать программными, т.к. ЛЦ не обладает сенсорами и имеет программируемое поведение при выпуске. Будем обозначать через  $\mathbf{x}[t_0, t]$  историю изменения вектора  $\mathbf{x}$  в течении времени от  $t_0$  до  $t$ . Пусть наблюдения зависят от состояния системы так:

$$\mathbf{y}_H = \mathbf{g}_H(t, \mathbf{x}_H[t_0, t], \mathbf{x}_{ТО}), \quad \mathbf{y}_{ТО} = \mathbf{g}_{ТО}(t, \mathbf{x}_{ТО}, \mathbf{x}_H[t_0, t], \hat{\mathbf{x}}_{ЛЦ}^1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{ЛЦ}^N).$$

Зависимость наблюдений от истории изменения состояния  $\mathbf{x}_H[t_0, t]$  позволяет учесть навигацию ТО по физическому полю носителя без дополнительного описания состояния среды. Далее будем считать, что управления зависят только от следующих параметров:

$$\mathbf{u}_H = \mathbf{u}_H(t, \mathbf{y}_H), \quad \mathbf{u}_{ТО} = \mathbf{u}_{ТО}(t, \mathbf{y}_{ТО}),$$

$$[(\mathbf{u}_{ЛЦ}^i)^T, t_i, \tau_i]^T = [(\mathbf{u}_{ЛЦ}^i(t, \mathbf{y}_H(t_i)))^T, t_i(\mathbf{y}_H), \tau_i(\mathbf{y}_H(t_i))]^T.$$

Приведенная общая модель может быть использована в имитационном моделировании после конкретизации динамики системы, способов наблюдения и правил управления. Имитационное моделирование позволяет сравнивать разные способы управления носителем и источниками широкополосных помех при заданном управлении ТО. Такое сравнение позволяет выбрать наиболее приемлемые сценарии поведения в задаче противодействия ТО.

При известном поведении ТО для носителя и ЛЦ возникает оптимизационная задача: найти такие управления  $\mathbf{u}_H(t, \mathbf{y}_H)$ ,  $\mathbf{u}_{ЛЦ}^i(t, \mathbf{y}_H(t_i))$  и такие числа  $t_i(\mathbf{y}_H)$ ,  $\tau_i(\mathbf{y}_H(t_i))$ , чтобы в момент  $T$  расстояние между носителем и ТО было как можно больше, т.е.  $\|\mathbf{x}_H(T) - \mathbf{x}_{ТО}(T)\| \rightarrow \max$ .

В виду высокой сложности задачи рассчитывать на получение аналитического решения не приходится. Однако можно конкретизировать классы функций, внутри которых происходит поиск управлений и с помощью имитационного моделирования и поиска экстремума на вещественных пространствах найти некоторые субоптимальные решения.

#### **Заключение.**

Произведено моделирование работы системы самонаведения торпеды в случае двух защитников. Предполагается, что основная цель и защитники двигаются прямолинейно с постоянной скоростью. Углы выпуска обоих защитников и время выпуска второго защитника оптимизируются. Получены результаты численных расчётов для разных моделей поведения торпеды: движения к ближайшей цели, ближайшей в зоне видимости цели, ближайшей в зоне видимости цели с дополнительными условиями на переключение с основной цели на защитника; а также для случая выпуска защитников с одного борта. Показано, что во всех случаях наличие второго защитника целесообразно, т.к. значительно увеличивает время перехвата по сравнению со случаем лишь одного защитника. Также дополнительный защитник увеличивает вероятность выбора для промежуточного преследования именно одного из защитников вместо основной цели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Girard A., Kabamba P.** Proportional Navigation: Optimal Homing and Optimal Evasion // *SIAM Review*. - 2015. - V. 57. – P. 611-624. - DOI: 10.1137/130947301.
2. **Neil F. Palumbo, Ross A. Blauwkamp, Justin M. Lloyd.** Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // *Homing Missile Guidance and control*. – 2010. –V. 29. 1.
3. **Васильев С.Н., Галяев А.А., Залетин В.В., Кулаков К.С., Сильников М.В., Якушенко Е.И.** Совместное использование мехатронных систем для организации эффективного противодействию скоординированному действию торпед противника // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. Т. 23. № 4. С. 197-208.
4. **Rubinovich E.Ya.** Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // *Dynamic Games and Applications (Special Issue)*. - 2019. – DOI: 10.1007/s13235-019-00297-0.
5. **Eloy G., Casbeer D. W., Pachter M.** Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // *IET Control Theory and Applications*. - 2017. - V. 17. - № 11. - P. 2985–2993.

**M.E. Buzikov, S.N. Vassilyev, A.A. Galyaev, P.V Lysenko, A.S. Samokhin, M.A. Samokhina** (ICS RAS, Moscow), **V.V. Zaletin, E.I. Yakushenko** (JSC «Scientific-Production Association of Special Materials», St. Petersburg). **A model of group counteraction to homing system.**

We consider a model of a system consisting of an attacker, a carrier, and autonomous sources of broadband interference. Simulation modeling has allowed us to compare different ways of controlling the carrier and sources of broadband interference for a given way of controlling the attacker. Numerical results were obtained for different models of attacker behavior.

Л.А. МАРТЫНОВА  
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)  
А.В. КОРЯКИН, В.В. ЛАНЦОВ  
(ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем»  
ГосНИИПП, Санкт-Петербург),

## УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОГО ОБИТАЕМОГО ОБЪЕКТА

*Рассмотрена система безопасности объекта, включающая средства обнаружения малых беспилотных воздушных судов. Для согласованного перевода средств обнаружения из неактивного режима в активный и обратно разработано управление, определяемое попаданием средства обнаружения в область возможного положения беспилотника. Определены размеры области возможного положения обнаруженного беспилотника. Управление системой безопасности позволило сократить количество активно работающих средств обнаружения, и сэкономить, тем самым, энергоресурс СМБК.*

**Введение.** Для безопасности морских объектов от малых беспилотных воздушных судов (БВС) [1] в акватории используют систему обнаружения, у которой средства обнаружения (СО) базируются на сверхмалых безэкипажных катерах (СМБК) и располагаются вдоль концентрических окружностей, центры которых совпадают с положением охраняемого объекта. Система обнаружения, по сути, является самоорганизующейся мультиагентной системой с определенной архитектурой, характеризуемой количеством СО и связями между ними [2-4]: общение между смежными СО происходит по радиоканалу. Каждое средство обнаружения представляет собой совокупность разнородных информационных каналов, отличающихся физическими принципами действия, условиями применения и дальностями обнаружения. Расположенный на носителе комплекс средств обнаружения включает в свой состав: оптический (пассивный) канал (дальность обнаружения менее 1000 м); звуковой (пассивный) канал (дальность обнаружения менее 1000 м); радиоканал (пассивный и активный режимы), дальность обнаружения – единицы километров; лидарный канал (дальность обнаружения 250 м).

Постоянное содержание всех СО в состоянии активного функционирования (сканирование радиочастотной обстановки и излучение-прием сигнала) способно привести к помехам судоходству и работе других служб. Кроме того, одновременное включение всех каналов приводит к повышенному расходу энергоресурса. Заряд аккумуляторов СМБК происходит с использованием солнечных батарей, в связи с чем энергоресурс СМБК ограничен. В связи с этим возникает задача управления системой обнаружения БВС так, чтобы в каждый момент времени количество активно работающих СО было минимально при эффективном функционировании системы обнаружения в целом. Эффективное функционирование системой обнаружения определяется степенью покрытия области возможного положения (ОВП) БВС зонами обзора СО [5-8], то есть области пространства, в пределах которой возможно обнаружение БВС СО. В публикациях с описанием СО БВС [9,10], группового управления БВС, космических аппаратов, надводных и подводных роботизированных систем [11-15] отсутствуют готовые решения задачи управления мультиагентной системой обнаружения малых БВС в морской акватории.

**Цель работы** – разработать управление системой обнаружения БВС так, чтобы при эффективном обнаружении БВС минимизировать количество активно работающих СО.

**Постановка задачи.** Пусть в связанной с подвижным объектом системе координат  $OxOy$  СМБК с СО расположены вдоль эшелонов (рис.1) в виде концентрических окружностей с центром в точке положения охраняемого объекта. Положение каждого СО характеризуется координатами  $(x_{CO}, y_{CO})$ . Пусть время  $t$  – дискретное, и пусть постоянно работают малопотребляющие радиочастотные каналы для обнаружения в пассивном режиме сигнала командного канала и канала телеметрии. Остальные каналы в режиме ожидания обнаружения неактивны. В каждый момент времени  $t$  состояние системы обнаружения характеризуется

вектором  $\mathbf{S}(t)$ , у которого элементам  $s_i$  соответствуют СО и принимают значения: 0 – СО не активно; 1 – СО активно. Пусть в некоторый момент времени  $t+1$  одно из СО обнаружило движущийся по направлению к охраняемому объекту БВС, характеризуемый текущими координатами  $(x_b, y_b)$ , курсом  $Q_b$  и скоростью  $V_b$ . По результатам обнаружения БВС СМБК с обнаружившим СО передает смежным СМБК с СО информацию об обнаружении, в результате чего часть СО также должны перейти в активное функционирование.

**Необходимо** определить СО и каналы, которые необходимо дополнительно включить для уточнения параметров обнаруженного БВС и его классификации.

**Предлагаемое решение.** В режиме ожидания появления БВС первыми его обнаружат СО внешнего эшелона в пассивном режиме. После первичного обнаружения БВС предлагается включить дополнительные каналы обнаружившего СО и дополнительные каналы смежных СО, попадающих пределы ОВП БВС. Положение ОВП БВС связано с координатами  $(x_1, y_1)$  обнаружившего СО. При формировании ОВП БВС считаем направление движения БВС равновероятным в секторе  $\pm 60^\circ$ ; ось сектора направлена на охраняемый объект. ОВП представляет собой сектор, ориентированный на охраняемый объект, с вершиной в точке  $(x_b, y_b)$ , с углом  $\varphi$  и радиусом  $R_{ОВП}$ , пропорциональным скорости  $V_b$  и времени после первого обнаружения  $t_b$  (рис. 1).

Для проверки принадлежности СО ОВП БВС перейдем в систему координат, связанную с ОВП. Пусть координаты проверяемого СО  $(x', y')$  в связанной с охраняемым объектом системе координат.

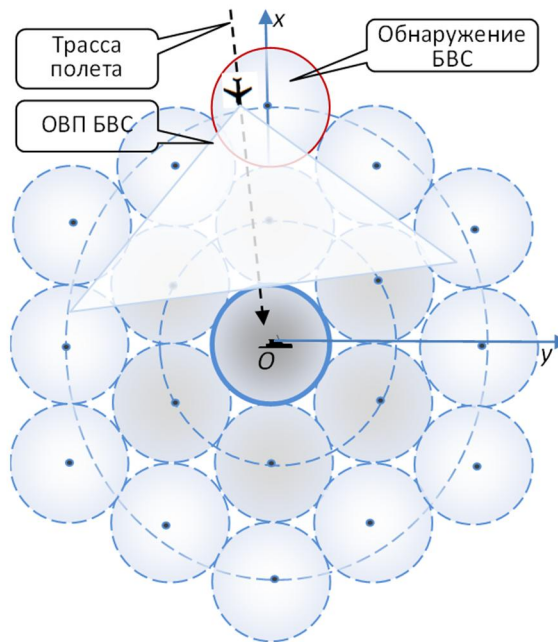


Рис.1. Положение охраняемого объекта, зон обзора СО, расположенных в два эшелона, и ОВП БВС

Координаты этой же точки в системе координат, связанной с точкой обнаружения  $(x_1, y_1)$ , определяются уравнениями:

$$\begin{cases} x^* = x' \cos Q_b - y' \sin Q_b + x_1 \\ y^* = x' \sin Q_b + y' \cos Q_b + y_1 \end{cases}$$

где  $Q_b$  – угол между положениями осей  $y$  первой и второй систем координат, в данном случае угол совпадает с курсом БВС. Далее проверяем условия попадания точки  $(x^*, y^*)$  в сектор ОВП:

$$\begin{cases} (x^* - x_1)^2 + (y^* - y_1)^2 < R_{OZ}^2 \\ x^* \sin \varphi < y^* \end{cases}$$

Если точка  $(x^*, y^*)$  попадает в сектор, то на таком СО можно включать дополнительные каналы обнаружения. Состав каналов определяется текущими внешними условиями.

Так, при использовании акустического канала большое значение имеет шум внешней среды, поэтому его целесообразно использовать в штиль и без осадков. Преимуществом акустического канала является отсутствие необходимости прямой видимости на БВС. При использовании оптического канала дальности обнаружения несколько выше, чем у акустического, однако обязательным условием является обеспечение прямой видимости на БВС. Для того, чтобы оптический канал можно было использовать в темное время суток, его дополняют инфракрасным каналом, требующем также прямой видимости. Лидарный канал позволяет определить параметры движения объекта, однако его дальность невелика, требуется отсутствие тумана и осадков, и обследуемое пятно должно быть небольших размеров, то есть должно быть предварительно другими средствами максимально возможно локализовано обследуемое пространство. Использование радиолокационного канала в активном режиме требует наличия прямой видимости, и проведения дополнительной классификации для отличия малого БВС от птиц.

Классификационными признаками отличия БВС от птиц являются:

- характер движения (жесткий/нежесткий);
- реакция на ветер (энергичные взмахи крыльев/зависание на одном месте);
- траектория полета (кружение при снижении/вертикальный спуск).

По результатам классификации принимается решение относительно включения средств подавления.

Маршрут доведения информации осуществляется аналогично [18], приведенному в настоящем сборнике.

Предложенный алгоритм управления системой безопасности, определяющий порядок включения СО и их каналов обнаружения, был реализован в математической модели функционирования системы безопасности. Программная реализация математической модели позволила провести исследования, направленные на оценку эффекта от предложенного решения. Для этого рассмотрены различные варианты появления БВС, отличающиеся частотой появления (БВС могут быть использованы как одиночными, так и группой, а также последовательно с различных направлений). На рисунке 2 приведена зависимость вероятности обнаружения БВС, зависящей не только с возможностями каналов обнаружения, но и от достаточности энергоресурса на борту СМБК для включения дополнительных каналов.

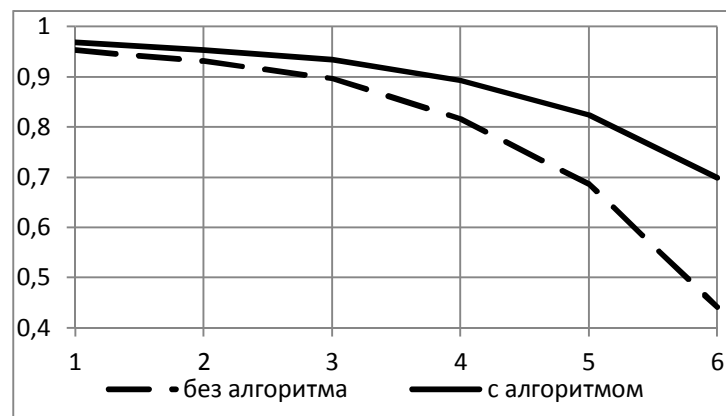


Рис. 2. Зависимость вероятности обнаружения БВС

**Заключение.** Для оценки сокращения количества одновременно активно работающих СО проведен сравнительный анализ с использованием имитационного моделирования функционирования БВС и СО с учетом основ, заложенных в [16,17]. По результатам рассмотрения этап ожидания появления БВС и этап первичного обнаружения БВС выявлено, что за счет управления системой безопасности сокращение активно работающих СО произошло на 20% при сохранении эффективного обнаружения БВС.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-08-00130.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ляхов Д.Г., Ким А.И., Минаев Д.Д.** Разработка и испытания сверхмалого телеуправляемого корабля // Подводные исследования и робототехника. С.48-57.
2. **Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А.** Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4 (107). С. 31-41.
3. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 3 (110). С. 109-121.
4. **Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А.** Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4 (107). С. 31-41.
5. **Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.** Определение эффективного поведения группы АНПА в сетевидной системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 47-57.
6. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). Материалы 9-ой Мультиконференции по проблемам управления. Председатель президиума мультиконференции В.Г. Пешехонов. 2016. С. 205-209.
7. **Мартынова Л.А.** Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2 (87). С. 77-87.
8. **Мартынова Л.А., Машошин А.И.** Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // Экстремальная робототехника. 2016. Т.1. № 1. С. 86-91
9. **Макаренко С.И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. СПб. Научные технологии. 2020. 204 с.
10. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyutralizacii-besplotnikov>
11. **Будаев Д.С., Воцук Г.Ю., Гусев Н.А., Майоров И.В., Мочалкин А.Н.** Разработка системы согласованного управления группой беспилотных аппаратов с применением мультиагентных технологий // «Известия ЮФУ. Технические науки», № 10(171), 2015. – С. 18-28.
12. **Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В.** Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 3–24
13. **Машошин А.И., Скобелев П.О.** Применение мультиагентных технологий к управлению группой автономных необитаемых подводных аппаратов //11-я Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», 4-8 апреля 2016 г., Крым, Евпатория
14. **Кожемякин И.В., Никущенко Д.В., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н.** Развитие системы автономного группового управления разнородными надводными и подводными необитаемыми аппаратами //Седьмая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана. Владивосток. 2017. С.48-57.
15. **Кожемякин И.В., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н.** Мультиагентная система управления группой АНПА с несколькими лидерами// International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2017, October 9-11, 2017, Saint-Petersburg, Russia
16. **Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В.** Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1 (211). С. 170-187.
17. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474-479.
18. **Ланцов В.В., Корякин А.В., Мартынова Л.А.** Мультиагентный подход в задаче определения параметров движения обнаруженного объекта // Материалы конференции «Управление в морских системах». АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2022 г. 126 с.

**L.A. Martynova** (JSC "Central Research Institute" Elektropribor ", St. Petersburg), **A.V.Koryakin**, **V.V.Lantsov** (Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Applied Problems").  
**Safety Control of a Marine Object.**

The security system of the object, including the means of detecting small unmanned aerial vehicles, is considered. For a coordinated transfer of detection tools from an inactive mode to an active one and vice versa, a control is developed, determined by the hit of the detection tool in the area of the possible position of the drone. The dimensions of the area of possible position of the detected drone are determined. Security management has reduced the number of active detection tools.

Д. В. БОСОМЫКИН, В. К. САРЬЯН  
(НИИ Радио, Москва)  
А. А. ЗАХАРОВА, Р. В. МЕЩЕРЯКОВ  
(ИПУ РАН, Москва)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ МОРСКИХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

*В работе рассмотрены вопросы управления жизненным циклом морских систем. Изложены основные его этапы, актуальные научно-технические задачи, решаемые на указанных этапах, отмечены основные ограничения краткосрочного, среднесрочного и долгосрочных прогноза работоспособности морских систем, с которыми сталкиваются разработчики. Особо отмечена актуальность мониторинга состояния систем с целью своевременного обнаружения и оповещения о внештатной или чрезвычайной ситуации. В качестве решения предлагается создание массовой информационной услуги по индивидуализированному управлению спасением абонентов, сформулированы основные положения, на которые следует опираться при ее разработке, описаны преимущества и перспективы реализации предлагаемого решения.*

**Введение.** Внедрение управления жизненным (или непрерывным) циклом морских систем (МС) позволило в последнее время существенно повысить качество выпускаемого оборудования. Особо это актуально в условиях производства мелкими сериями или единичного производства уникальных МС. В данной работе рассматриваются перспективы использования интегрированных информационно-управляющих систем для повышения эффективности реализации жизненного цикла МС.

**Постановка задачи.** Эффективность жизненного цикла МС оценивается рядом параметров, которые достигаются при условии, если все этапы осуществляются по технологии непрерывного цикла – совокупности непрерывных технологических процессов от разработки до утилизации МС в целом, входящих в него отдельных объектов и субъектов-сотрудников, участвующих в определенные рабочие отрезки времени. Ключевую роль в создании эффективного непрерывного цикла играет интегрированная система управления МС (ИСУмс). Основными этапами непрерывного цикла, которыми должна управлять ИСУмс и входящие в нее подсистемы и объекты являются [1]: 1 – формирование технического задания; 2 – разработка МС (определение объектов, которые разработчик МС будет создавать и производить самостоятельно; выбор соисполнителей, в том числе и среди сторонних организаций, производящих недостающие объекты); 3 – изготовление МС и контроль изготовления на собственном производстве и/или у соисполнителей; 4 – настройка МС в целом; 5 – ввод МС в эксплуатацию; 6 – эксплуатация МС; 7 – утилизация МС. В том случае, если МС являться частью комплекса, то необходимо, чтобы разрабатываемая ИСУмс была встроена в систему управления всего комплекса.

Рассмотрим научно-технические задачи, которые необходимо решить на представленных выше этапах непрерывного цикла управления ИСУмс: 1 – постановка задачи; 2 – определение и осмысление требований, текущих и на перспективу к МС и требований, которые будущий потребитель определяет исходя из собственных целей и задач, это важно выполнять постоянно, что актуально для лиц, принимающих решение (ЛПР) ИСУмс; 3 – определение физических пределов достижимости нужных (требуемых) параметров, принципиальных или относящихся только к используемым в настоящее время компонентов или требующих поиска новых компонент (этот поиск должен быть непрерывным и находиться под контролем ЛПР через ИСУмс); 4 – определить место производимой аппаратуры в комплексе и с учетом совместимости разрабатываемой системы управления с эксплуатируемыми решениями и оборудованием, поиск новых партнеров с требуемыми критериями; 5 – учитывать особенности мелкосерийного и единичного производства предприятия и соисполнителей, сформулировать требования к оборудованию высокотехнологического производства, в том числе измерительных приборов, что позволит выполнить техническое задание, на данном этапе



производится ревизия имеющегося оборудования, измерительной аппаратуры, важно обеспечить ее соответствие требованиям технического задания, необходимо обучить разработчиков, определить точки контроля и требования обязательного непрерывного мониторинга с занесением их в реальном масштабе времени в базу данных конкретного МС на всех этапах его жизненного цикла, эти данные необходимы для создания виртуальной модели создаваемого МС, а поскольку математическая модель трудно реализуема, осуществляется экспериментальное определение штатного работоспособного состояния объекта, определение (изучение) пределов адаптационного потенциала МС при допустимых изменениях параметров внешней среды; 6 – разработка систем краткосрочного, среднесрочного и долгосрочных прогноза работоспособности МС, которые очень важны как для ЛПР, так и обслуживающего персонала (и роботов, при наличии коллаборативной среды); 7 – создание систем машинного обучения персонала (в том числе роботов), реализующего все этапы непрерывного цикла; 8 – для создания систем искусственного интеллекта, для помощи обслуживающему персоналу с указанием действий, которые необходимо выполнить, чтобы ликвидировать последствия возникновения нештатной или чрезвычайной ситуации с тем, чтобы уменьшить негативные последствия.

Все принятые решения в реальном времени и данные помещаются в базу данных ИСУ разрабатываемого МС, хранятся и анализируются вплоть до этапа утилизации, после которого остаются в общей базе данных как виртуальный образ конкретного МС. Естественно, что за качеством и сроками исполнения всех этапов следит и своевременно управляет ЛПР. Для этого необходимо разработать и внедрить рабочие места исполнителей, как части ИСУмс. При правильной реализации 1-го и 3-го этапов, реализация непрерывного цикла и этапов с 4-го по 7-ой будет сводиться для разработчиков к корректировке на основе новых данных мониторинга параметров эксплуатации МС, систем машинного обучения (МО) и систем искусственного интеллекта (ИИ). Формируемый в ИСУмс экспериментальный образ данного МС будет являться его виртуальной моделью, которая может использоваться разработчиками для его модернизации вплоть до этапа утилизации, а затем остается в базе данных и может быть использован в системах МО и ИИ.

Таким образом, очевидно, что актуальная научная проблема разработки современных МС – создание интегрированной системы управления непрерывным циклом крупно серийного, мало серийного и даже единичного производства, создания на ее основе устойчивой системы эксплуатации МС в рамках ИСУмс подсистем МО и ИИ.

Особый интерес представляет также создание подсистемы ИУСмс, обеспечивающей получение краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозов наступления нештатных ситуаций в ходе реализации непрерывного цикла МС и управление.

**Ограничения.** Следует отметить, что создаваемые в настоящее время подсистемы краткосрочного, среднесрочного и долгосрочных прогноза работоспособности МС, имеют ряд ограничений:

- нештатными или чрезвычайными ситуациями (ЧС) признаются только сбои в оборудовании МС и сигналы управления получают в реальном времени только подсистемы – обслуживающий персонал (и роботы), которые в момент фиксации нештатной ситуации непосредственно заняты в непрерывном цикле производства данного МС. Таким образом, незадействованными остаются и некоторые члены обслуживающего персонала (и роботов), которые в данный момент не заняты в реализации данного этапа непрерывного цикла, также люди и роботы, которые заняты другим производством, а также население сопряженных с производством территорий;

- не предусмотрена интеграция с существующими системами мониторинга и предупреждения ЧС техногенного и природного происхождения;

- не предусмотрено внедрение в разработанной в РФ перспективной массовой информационной услуги по индивидуализированному управлению спасением абонентов (ИУСА) при возникновении природных и техногенных ЧС, которая может радикально снизить людские и материальные потери.

Очевидно, что отмеченные выше недостатки, учитывая принятую ООН парадигму «ненулевого риска» снижают эффективность существующего подхода к реализации непрерывного цикла МС

**Предлагаемое решение.** Далее кратко опишем преимущества ИУСА и ее технологическую готовность интегрироваться с существующими ИУСмс.

Поскольку основное функциональное назначение системы индивидуализированного управления спасением абонента (ИУСА) [2-5] – это комплексный подход к сбору, анализу, обработке данных, мониторингу и оперативному принятию решений в экстремальных условиях (лимит времени, изменение обстановки, изменение работоспособности каналов связи и т.п.), важно учитывать вес имеющийся научно-технологический задел при проектировании цифровой платформы [6-8]. На рис. 1 [6], представлена обобщенная схема агрегирования составных частей платформы, включающей, в качестве цифровой основы, ГИС, нормативную базу, репозиторий данных, а также модуль интеллектуального анализа данных (ИАД).



Рис. 1. Схема взаимодействия ИУСА МС

Именно поэтому важно создание новой массовой информационной услуги (ИУСА), учитывающей в своей концепции следующее [6]: возможность взаимодействия с реципиентом (сообществом, когортой, индивидуумом) с учетом их особенностей; интерактивность; выбор модели управления действиями реципиента с применением интеллектуальных методов и инструментов; обобщение опыта взаимодействия ИУСА

в рамках репозитория моделей (обстановка, поведенческие схемы) для обобщения опыта и применение в критических и чрезвычайных ситуациях; соответствие требуемому современному уровню цифровизации; обеспечение физической и кибернетической безопасности, надежности и устойчивости работы всех элементов системы; развитие и внедрение современных методов ИИ на всех этапах создания и эксплуатации МС; возможность значительного масштабирования системы.

Особенностью ИУСА является то, что объектом управления является человек, а динамически изменяющиеся условия становятся ограничениями и условиями моделирования.

Преимуществами предлагаемой реализации платформы и созданная на ее основе система ИУСА, можно отметить [6, 7]: масштабируемость решения; создание инструмента управления массами людей в условиях ЧС; возможность проведения мониторинга ситуации, накопления знаний в рамках интеллектуальных моделей в рамках репозитория, что позволит провести важные исследования в области развития методов слабого и сильного ИИ; создать новые инструменты визуальной аналитики, когнитивного и динамического моделирования; создание обучающих симуляторов для руководящего состава, технического персонала и граждан; инструмента для исследования архитектурных, технических и информационно-аналитических решений; создание и апробация комплексных/гибридных сетей связи и коммуникаций; моделирования нагрузок (управление абонентами) любой величины и т.п.

**Заключение.** В данной работе представлена концепция системы ИУСА, которая предлагается в качестве базовой для создания единой платформы ИСУмс в РФ. Следует отметить, что ИУСА полностью отечественная технология, защищенная патентами и стандартами Международного Союза Электросвязи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бюро ESG** / Производство с непрерывным циклом URL: [http://esg.spb.ru/solutions\\_production](http://esg.spb.ru/solutions_production).
2. **Meshcheryakov R.V., Saryan V.K.** Chimera-States in A Hyperconnected World // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T) 10.1109/EnT50437.2020.9431280.

3. ITU-T technical report FG-NET-2030 « Network 2030 «A Blueprint of technology Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond (Written by FG-NET-2030 in 2020 y.).
4. **Сарьян В.К., Мещеряков Р.В. и др.** Междисциплинарные исследования и международное сотрудничество в период с 2014 по 2019 гг. по формированию массовой услуги по индивидуализированному управлению. спасением людей при возникновении ЧС природного и техногенного происхождения// Труды НИИР. 2019. №1. С. 4–22.
5. **Meshcheryakov R.V., Saryan V.K.** An individualized service for control the rescue of subscribers of an information and control system in the event of emergencies as an example of managing a system of interdisciplinary nature // Materials of the 13th multiconference on control problems, ICS RAS, 2020.
6. **Сарьян В.К., Мещеряков Р.В., Босомыкин Д.В., Захарова А.А., Козлова Н.В.** Архитектура системы индивидуализированного управления спасением абонента, «Электросвязь», №1, 2022.
7. **Ямалов И. У.** Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций / И. У. Ямалов. — 4-е изд., электрон. — М.: Лаборатория знаний, 2020. — 291 с.
8. **Кононов, А.А.** Проблема когнитивных искажений в оценке опасности угроз и рисков природных и техногенных катастроф / А. А. Кононов, В. П. Авдотьин // Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий: сб. статей международного конгресса. – Ногинск, 2017. – С. 106-112.

**D.V. Bosomikin, V.K. Sarian**, (NII Radio, Moscow), **A.A. Zakharova, R.V.Mesheryakov** (ICS RAS, Moscow). **Increasing the efficiency of life cycle management of marine systems through the use of information and control systems .**

The paper considers the issues of life cycle management of marine systems. Its main stages are outlined, the actual scientific and technical problems solved at these stages, the main limitations of the short-term, medium-term and long-term forecast of the performance of marine systems that developers face are noted. The relevance of monitoring the state of systems for the purpose of timely detection and notification of an emergency or emergency was especially noted. As a solution, it is proposed to create a mass information service for individualized subscriber rescue management, formulate the main provisions that should be based on when developing it, and describe the advantages and prospects for implementing the proposed solution.

В. В. ДЕРЯБИН  
(ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ ДРЕЙФА СУДНА

*Для решения задачи счисления пути судна необходимо знание скорости его дрейфа. Предлагается построение модели прогноза скорости дрейфа судна на основе нейронных сетей. Используются две архитектуры: сеть прямого распространения с полными связями и на основе радиальных базисных функций. Имитационным моделированием движения контейнеровоза в течение года получен набор учебных данных. После настройки сети тестируются на основе той же имитационной модели в течение месяца. Результаты тестирования говорят об удовлетворительной точности прогноза, позволяющей заметно повысить точность счисления.*

**Введение.** На конвенционных судах морского флота валовой вместимостью 300 и более установлен относительный лаг, измеряющий, как правило, только продольную составляющую скорости, т.к. требование к оборудованию двухосевым абсолютным лагом существует лишь для судов вместимостью не менее 50000. В связи с этим, для многих судов поперечный канал скорости не доступен для измерений, но скорость дрейфа нужна для ведения счисления.

В теории судовождения известны «навигационные» методы оценки скорости дрейфа («пеленгование кильватерной струи», «по пеленгам свободно плавающего ориентира» и др.), но их применение, во-первых, не всегда возможно и, во-вторых, позволяет получить только статическую оценку скорости. Существуют также и расчётные методы, например, методы Н. Н. Матусевича и С. И. Дёмина, но и они также дают лишь статическую оценку. Наиболее совершенный подход заключается в использовании аппарата дифференциальных уравнений [1, 2].

Основная проблема подхода на основе дифференциальных уравнений заключается в выборе методов расчёта сил, формирующих их правые части. Как правило, тот или иной метод имеет ограничения в плане типа судна и/или условий его плавания, т.е. он не универсален.

Из теории нейронных сетей известно, что они являются универсальными инструментами аппроксимации функций многих переменных [3, 4], а задача прогноза скорости дрейфа судна как раз и является такой задачей аппроксимации. Поэтому имеет смысл разработка модели прогноза скорости дрейфа судна на основе нейронных сетей. Работы, в которых используются нейронные сети для моделирования динамики судна, многочисленны. Наиболее близкие к задаче счисления исследования содержатся, например, в [5, 6, 7], но в них отсутствует полномасштабная проверка моделей в различных условиях, необходимая для режима счисления пути.

Поэтому возникает задача исследования возможностей нейронных сетей к прогнозу скорости дрейфа судна в большом количестве различных условий плавания (что характерно для счисления), чему и посвящён настоящий доклад.

### Модели прогноза скорости дрейфа судна на основе нейронных сетей.

**Постановка задачи.** Дифференциальное уравнение для скорости дрейфа судна записывается следующим образом [8]:

$$\frac{dV_y}{dt} = f_1(V_x, V_y, \omega, p_1, p_2, \dots, p_N) \quad (1)$$

где  $V_x$  – продольная составляющая относительной скорости судна;  $V_y$  – поперечная составляющая относительной скорости (скорость дрейфа);  $\omega$  – угловая скорость поворота судна;  $p_1, p_2, \dots, p_N$  – набор  $N$  параметров, характеризующих силовые воздействия в поперечном направлении;  $f_1$  – некоторая непрерывная функция многих переменных.

В дискретной постановке выражение (1) может быть записано таким образом:

$$V_y(t_n) = f_y(V_x(t_{n-1}), V_x(t_n), V_y(t_{n-1}), \omega(t_{n-1}), \omega(t_n), p_1(t_{n-1}), p_1(t_n), p_2(t_{n-1}), p_2(t_n), \dots, p_N(t_{n-1}), p_N(t_n)) \quad (2)$$

где  $t_{n-1}, t_n$  – два последовательно идущих момента дискретного времени.

Возникает задача приближения функции  $f_y$  нейронной сетью.

**Архитектуры нейронных сетей.** В качестве базовых архитектур для прогноза скорости дрейфа были выбраны две – сеть прямого распространения с одним скрытым слоем и полными связями между нейронами (FFNN – Feed Forward Neural Network) и сеть на основе радиальных базисных функций (RBF – Radial Basis Functions). Обе архитектуры обладают свойствами универсальной аппроксимации, с одной стороны, и имеют достаточно простую структуру, с другой. Параметрами обеих архитектур является число нейронов в скрытом слое, которое одновременно является и числом центров радиальных функций для RBF-сети.

На основе соотношения (2) определим вид входного сигнала как последовательность аргументов функции  $f_y(\cdot)$ . В качестве параметров, определяющих силы, будем использовать  $p_1 = \delta$  – угол перекадки руля и  $p_2 = V_r \sin \alpha$  – проекцию вектора скорости относительного ветра на поперечную ось ( $V_r$  – скорость относительного ветра,  $\alpha$  – его курсовой угол). В итоге получается девятимерный вектор входного сигнала нейронной сети. Выходным сигналом является скорость дрейфа судна  $V_y(t_n)$  на момент времени  $t_n$ .

**Имитационная модель движения судна.** Выбирается на основе Marine System Simulator (MSS) (Т. I. Fossen and Т. Perez (2004). Marine Systems Simulator (MSS) URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>), который представляет собой набор m-файлов, позволяющих моделировать движение судна в заданных условиях плавания. В качестве модели выбирается контейнеровоз серии SR 108 [9], реализованный в функции container.m. Указанная функция учитывает гидродинамические силы на корпусе, а также силы со стороны движительно-рулевого комплекса.

Силы со стороны ветра были получены путём использования функции blendermann94.m. Силы со стороны волнения учитывались лишь в смысле медленноменяющихся сил волнового дрейфа. Для их расчёта использовались амплитуды передаточной функции, рассчитанные для различных значений периода волнения и его курсового угла при помощи программ численной гидродинамики. Используется модель волн с длинными гребнями со спектром Пирсона-Московица.

В качестве алгоритма численного интегрирования использовался метод Рунге-Кутты четвёртого порядка. Временная дискретность модели составляет 0,1 с.

**Получение набора учебных данных.** С использованием имитационной модели, реализованной в системе Scilab, рассматривалось плавание контейнеровоза в течение одного года (365 дней). Направление ветра – северное. Скорость – от 0 до 20 м/с. Волнение моделировалось в соответствии с ветром. Судно совершало движение вдоль отрезка маршрута, составляющего случайный угол с направлением ветра. Длительность плавания на отрезке варьировалась от 30 мин. до 12 ч. На каждом участке маршрута судно стабилизировалось при помощи ПИД-алгоритма так, что наибольший модуль поперечного смещения от оси маршрута составил 138 м (через 10 мин. и более после начала переходного процесса). По мере плавания регистрировались образцы через каждые 10 с. Всего было получено 3154094 пар «вход-выход», которые традиционно были разбиты случайным образом на две выборки – обучающую (70%) и контрольную (30%).

**Обучение нейронных сетей.** Для FFNN-сети процесс обучения состоял в том, что на каждой из 2000 пройденных итераций выполнялся один шаг метода Левенберга-Марквардта, после которого фиксировалось наибольшее значение модуля ошибки прогноза скорости дрейфа на контрольной выборке. Данный критерий выбран определяющим при сохранении наилучшего состояния сети. Обучение было проведено для сетей с различным количеством скрытых нейронов (10, 20, 25, 30, 35, 40 и 45). Лучший результат (0,32 уз.) был получен для архитектуры с 35-ю нейронами в скрытом слое.

Для RBF-сетей обучение сводится к случайному выбору центров базисных функций, количество которых также варьировалось: 100, 200, 300, 400, 500, 1000 и 10000. Лучший результат (3,32 уз.) получен для 10000 центров.

Обе архитектуры реализованы и обучены средствами Scilab.

**Тестирование нейронных сетей.** Выполняется аналогично тому, как это было проделано на стадии сбора данных, с тем лишь отличием, что время плавания на каждом отрезке маршрута составляет от 0,5 ч до 3 ч, а также до месяца (30 суток) сокращается общая продолжительность плавания. Помимо критерия максимума модуля ошибки прогноза скорости дрейфа используется скорость нарастания модуля невязки, а также критерий эффективности работы

нейронной сети. Он характеризуется двумя величинами: наибольшими ухудшением и улучшением точности прогноза скорости дрейфа по сравнению с тем случаем, когда она не учитывается вообще. Наибольшее ухудшение точности – максимум разности между скоростью нарастания невязки с нейронной сетью и без учёта скорости дрейфа, наблюдаемый в рассмотренных модельных ситуациях. Наибольшее улучшение точности определяется аналогично с заменой вычитаемого и уменьшаемого. Результаты тестирования для сетей с лучшим показателем на этапе обучения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип сети	Критерии работоспособности			
	Точность		Эффективность	
	Наибольший модуль ошибки прогноза скорости дрейфа, уз.	Наибольшая скорость нарастания невязки, мили/ч	Наибольшее ухудшение точности, мили/ч	Наибольшее улучшение точности, мили/ч
FFNN-сеть (35 нейронов)	2,79	0,11	0,07	0,88
RBF-сеть (10000 нейронов)	3,28	0,91	0,07	0,63

Как видно из таблицы, точность FFNN-сети заметно выше по сравнению с RBF-сетью. Тем не менее, обе архитектуры не ухудшают точность счисления существенно, но при этом позволяют увеличивать её ощутимо.

**Заключение.** Разработаны нейронные сети, прогнозирующие скорость дрейфа судна в условиях внешних факторов. На основе имитационной модели сформированы наборы учебных данных, а также проведено тестирование обученных нейронных сетей. Результаты тестирования позволяют говорить об удовлетворительной точности прогноза скорости дрейфа, позволяющей повышать конечную точность счисления в рассмотренных модельных ситуациях. Дальнейшие исследования могут лежать в области разработки методов сбора учебных данных, позволяющих их реализацию с учётом условий эксплуатации реального судна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Fossen T.I.** Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. XVIII, 575 p.
2. Guide for vessel maneuverability (Updated Feb. 2017). Houston: American Bureau of Shipping, 2017. X, 101 p.
3. **Hornik K.** Some new results on neural network approximation. *Neural Networks*. 1993. Vol. 6. № 8. P. 1069–1072.
4. **Pinkus A.** Approximation theory of the MLP model in neural networks. *Acta Numerica*. 1999. Vol. 8. P.143–195.
5. **Blendermann W.** Parameter identification of wind loads on ships. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1994. Vol. 51. Is. 3. P. 339–351.
6. **Lainiotis D. G. et al.** Neural network application to ship position estimation. *Proceedings of Conference «OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean»*. Piscataway: IEEE, 1993. Vol. 1. P. I384–I389.
7. **Skulstad R. et al.** Dead Reckoning of Dynamically Positioned Ships using an Efficient Recurrent Neural Network. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2019. Vol. 26. № 3. P. 39–51.
8. **Дерябин В. В.** Обобщенная нейросетевая модель счисления пути судна. *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2020. Т. 12. № 3. С. 423–435.
9. **Son K.-H., Nomoto S.** On the Coupled Motion of Steering and Rolling of a High-Speed Container Ship. *Naval Architecture and Ocean Engineering*. 1982. Vol. 20. P. 73–83.

**V. V. Deryabin**, (Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg). **The use of neural networks for the prediction of vessel drift speed.**

In order to fix a vessel position in dead reckoning mode it is necessary to know its drift speed. A construction of a drift speed prediction model on the basis of neural networks is proposed. Two architectures are investigated. The first is a fully-connected feed forward neural network. The second one is a network with radial basis functions. By means of imitation modelling of vessel one-year period motion a training data set is obtained. After learning the networks have been tested by means the imitation model which simulates one-month period of sailing. The testing results show the acceptable prediction accuracy that let to increase dead reckoning accuracy signally.

Г. А. ФЕДОТОВ  
(ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург)

## О ВЛИЯНИИ КОНФИГУРАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Рассмотрена система четырёх датчиков давления, расположенных в вершинах правильной треугольной пирамиды. Выходной сигнал такой системы, сформированный по специальному алгоритму, позволяет определить плотность морской воды и не зависит от ориентации системы в пространстве. Получены выражения и приведены соответствующие графики, с помощью которых можно определить угол при вершине пирамиды, обеспечивающий наименьшую погрешность определения плотности воды для разных углов наклона пирамиды в поле силы тяжести.*

**Введение.** Данная работа является продолжением работ [1-5], в которых была предложена и исследована новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды. Метод основан на совместной обработке сигналов четырёх жёстко конфигурированных датчиков давления. Важная положительная особенность предложенного метода заключается в том, что выходной сигнал системы не зависит от ее пространственной ориентации в поле силы тяжести. Метод позволяет определять плотность морской среды в реальном времени по измеренным значениям гидростатического давления при условии, что известны параметры, характеризующие пространственную конфигурацию входов индивидуальных датчиков давления, образующих систему. Предлагаемый доклад посвящен поиску оптимальной (минимизирующей погрешность измерения плотности) конфигурации системы датчиков давления в зависимости от пространственной ориентации этой системы в морской среде.

**Оптимальная конфигурация системы датчиков давления в зависимости от ориентации системы в поле силы тяжести.** Три датчика давления из четырёх, образующих рассматриваемую систему, лежат в вершинах основания правильной треугольной пирамиды, а четвёртый (под номером ноль) расположен в её вершине (рис.1а). Угол при вершине пирамиды равен  $\alpha$ , длина боковых ребер равна  $l$ ,  $P_i$  ( $i=0,1,2,3$ ) - сигналы датчиков давления. Тогда искомая плотность морской среды определяется следующим образом:

$$\rho = \frac{G}{g}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $|\text{grad}P| \equiv G$  – модуль градиента гидростатического давления, который вычисляется по измеренным значениям разностей сигналов датчиков давления  $\delta P_i \equiv P_i - P_0$  ( $i=1,2,3$ ):

$$G = \sqrt{\frac{(1+c)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - 2c(b_1b_2 + b_1b_3 + b_2b_3)}{(1-c)(1+2c)}}. \quad (2)$$

Здесь  $b_i = \delta P_i / l$ , где  $l$  - расстояние между нулевым и тремя остальными датчиками (длина бокового ребра пирамиды).  $\alpha$  - угол при вершине пирамиды,  $c \equiv \cos \alpha$ . Ради простоты и наглядности изложения предполагаем, что датчики давления идентичны, а погрешности величин  $b_i$  одинаковы для всех трех пар датчиков и равны  $\Delta b$ . Введем в рассмотрение безразмерную функцию  $F$ , характеризующую величину  $\Delta G$  - погрешность определения величины  $G$ :

$$F \equiv \frac{\Delta G}{\Delta b}. \quad (3)$$

Величина  $\Delta G$  – погрешность определения модуля вектора градиента гидростатического давления в воде, входящего в рабочую формулу метода (1) – является основным источником ошибки определения  $\rho$ .

На рис.1а изображен вектор  $\vec{h}$ , соединяющий вершину правильной пирамиды и центр ее основания (равностороннего треугольника 123). Обозначим через  $\varphi$  угол между векторами  $\vec{h}$  и  $\vec{g}$  (рис. 1а). Тогда можно показать, что выражение (3) для погрешности определения модуля градиента гидростатического давления принимает следующий вид:

$$F(\alpha, \varphi) = \sqrt{\frac{1 - c + 3c \sin^2 \varphi}{(1 - c)(1 + 2c)}} \quad (4)$$

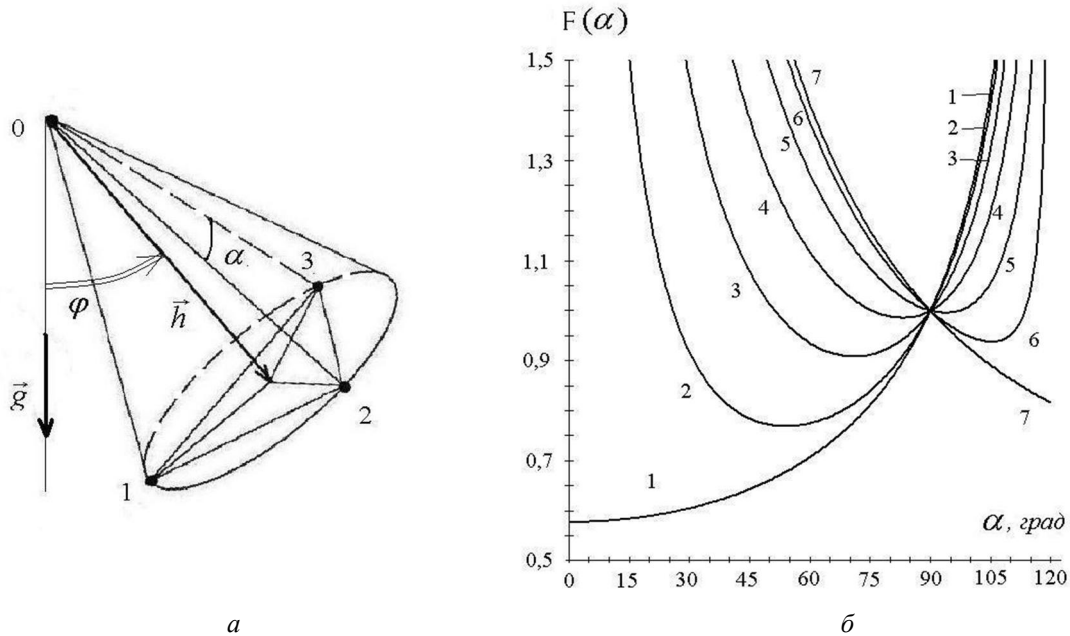


Рис. 1. а - схематическое изображение конфигурации системы четырех датчиков давления и ориентации этой системы в пространстве. б - графики функции  $F(\alpha)$  для семи характерных значений угла  $\varphi$ . Пояснения в тексте.

Графики функции  $F(\alpha)$  для семи характерных значений  $\varphi$  (1 –  $0^\circ$ ; 2 –  $15^\circ$ ; 3 –  $30^\circ$ ; 4 –  $45^\circ$ ; 5 –  $60^\circ$ ; 6 –  $75^\circ$ ; 7 –  $90^\circ$ .) приведены на рис. 1б. Первый график соответствует параллельности векторов  $\vec{h}$  и  $\vec{g}$  ( $\varphi = 0$ ), последний (седьмой) график – перпендикулярности  $\vec{h}$  и  $\vec{g}$  ( $\varphi \rightarrow 90^\circ$ ). Пять промежуточных вариантов (2, 3, 4, 5, 6) соответствуют наклонной ориентации системы, качественно изображённой на рис. 1а. Из этих графиков следует, что для разных значений угла  $\varphi$  функции  $F(\alpha)$  достигают минимума при разных значениях  $\alpha = \alpha_0$ , то есть погрешность определения  $G$ , а значит и  $\rho$ , при этих  $\alpha$  минимальна. В данной работе получены аналитические и графические выражения, позволяющие оценить зависимости  $\alpha_0(\varphi)$  и  $F_0(\varphi)$ , где  $F_0 \equiv F(\alpha = \alpha_0)$ .

Значение  $\alpha_0$ , при котором  $F(\alpha) = \min$  для данного  $\varphi$  определяется из условия

$$\frac{dF}{d\alpha}(\alpha, \varphi) = 0 \quad (5)$$

Решение уравнения (5) относительно  $\alpha$  имеет вид

$$\alpha_0(\varphi) = \arccos \frac{\sqrt{2K(3-K)} - 2}{2(K-1)}, \quad (6)$$

где  $K \equiv 3 \sin^2 \varphi$ .

Можно показать, что в интервале  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  формула для  $F_0(\varphi)$  имеет следующий вид:

$$F_0(\varphi) = \frac{\sqrt{6}}{6} \sqrt{3 + 2\sqrt{2} \sin 2\varphi - \cos 2\varphi} \quad (7)$$



Графики функций  $\alpha_0(\varphi)$  и  $F_0(\varphi)$  для интервала углов наклона  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  представлены на рис. 2.

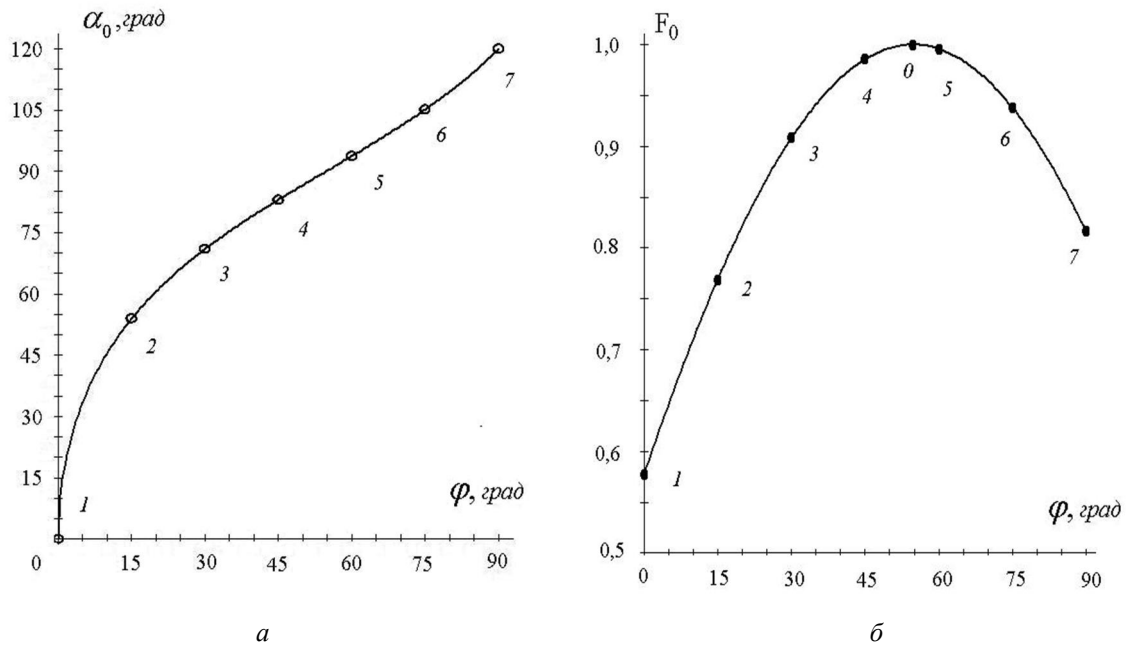


Рис. 2. Зависимости угла  $\alpha_0$  (а - слева) и функции  $F_0$  (б - справа) от величины угла  $\varphi$ . Цифрами обозначены точки на графике, соответствующие семи конкретным значениям  $\varphi$ . Пояснения в тексте.

**Заключение.** Таким образом, в данной работе получены аналитические выражения и приведены графики, позволяющие оценить оптимальную (с точки зрения минимизации погрешности определения плотности морской воды) конфигурацию датчиков давления, образующих измерительную систему (а именно, угол при вершине правильной треугольной пирамиды, в вершинах которой расположены датчики), при наклонной ориентации системы в морской среде. Полученная информация способствует расширению функциональных возможностей гидростатического метода определения плотности морской воды и позволяет выполнить количественные оценки положительного эффекта от использования рассматриваемого метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Федотов, Г. А.** Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды / Г. А. Федотов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 58-65.
2. **Федотов, Г. А.** О точности определения плотности морской воды с помощью новой модификации гидростатического метода / Г. А. Федотов // *Труды всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики"* (см. в книгах). – 2016. – № 13. – С. 205-208.
3. **Федотов, Г. А.** Оценка точности определения плотности морской воды при неконтролируемой ориентации гидростатического измерителя / Г. А. Федотов // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики : Труды XIV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 года*. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 2018. – С. 275-277.
4. **Федотов, Г. А.** О некоторых особенностях новой модификации гидростатического метода определения плотности морской воды / Г. А. Федотов // *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики : труды XV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 21–25 сентября 2020 года*. – Санкт-Петербург: Б. и., 2020. – С. 284-287.
5. Патент № 2747854 С2 Российская Федерация, МПК G01N 9/26. Способ измерения плотности морской воды с подвижного носителя гидрофизической аппаратуры : № 2020116797 : заявл. 18.05.2020 : опубл. 17.05.2021 / Л. Б. Гусев, Г. А. Федотов.

**G.A.Fedotov** (Naval Polytechnical Institute of the Education and Research Center “Naval Academy”, Saint Petersburg). **On the influence of the configuration and orientation of a system of pressure sensors on the accuracy of measuring the density of the marine environment by the hydrostatic method.**

A system of four pressure sensors located at the vertices of a regular triangular pyramid is considered. The output signal of such a system, formed according to a special algorithm, makes it possible to determine the density of sea water and does not depend on the orientation of the system in space. Expressions are obtained and the corresponding graphs are given, with the help of which it is possible to determine the angle at the top of the pyramid, which provides the smallest error in determining the density of water for different angles of inclination of the pyramid in the field of gravity.

Л.Б. ГУСЕВ  
(Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия»,  
Пушкин)  
Ю.С. САМЫЧКО  
(АО «СПМБМ «Малахит», Санкт-Петербург)

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Определяющее значение для разработки качественной продукции имеет применение средств автоматизации для снижения влияния человеческого фактора и сокращения экономических потерь из-за несоблюдения сроков изготовления. Внедрение системы управления процессом проектирования ядерных энергетических установок позволит повысить качество проектирования важной части корабля – энергетической установки, а также повлечет на соблюдение требований нормативной документации по ядерной и радиационной безопасности.*

**Введение.** Одной из главных задач ядерной энергетики является обеспечение ядерной и радиационной безопасности. К ядерным энергетическим установкам предъявляются высокие требования по соответствию важнейшим документам отрасли – это ОПБ-К-98/05 и ПБЯ-В.08-88/05. Соблюдение этих требований, в основном, относится к этапу проектирования, где закладываются тактико-технические характеристики, а также к проведению испытаний – где апробируются важнейшие результаты проектирования и производятся последние технические доработки, и обеспечивается сдача корабля силам ВМФ.

Актуальной задачей на сегодняшний день для судостроительной отрасли является улучшение качества проектирования, проведения испытаний и применение современных средств автоматизации, так как это играет значительную роль в определении экономических и технических показателей постройки кораблей и их будущей безопасной эксплуатации. Проектирование включает в себя несколько стадий и занимает большую часть времени на протяжении всего жизненного цикла ядерных энергетических установок [1].

Процесс создания ядерных энергетических установок является трудоемким процессом, в котором важным вопросом является соблюдение требований нормативной документации по ядерной и радиационной безопасности. При наличии таких требований и работы с большим объемом важной информации нередко на помощь приходит идея создания и применения систем управления.

В создании систем управления главным вопросом является постановка задачи для внедрения подобных систем:

- определение объекта управления;
- цель внедрения системы;
- определение функций системы управления;
- параметры внедрения системы управления.

**Определение объекта управления.** Проектирование включает в себя несколько стадий и занимает большую часть времени на протяжении всего жизненного цикла ЯЭУ. Объектом управления является процесс проектирования ядерных энергетических установок, который состоит из различных разрозненных процессов [2]:

- сбор информации от разработчиков составных частей ядерной энергетической установки;
- определение состава документов в зависимости от стадии проектирования;
- выдача данных в смежные подразделения;
- разработка или поиск аналогичных документов;
- создание или поиск шаблонов документов;
- разработка документов.

В данный момент весь описанный выше процесс не автоматизирован, а созданы и внедрены некоторые программные продукты, способствующие контролю выполнения данных операций или их передаче.

**Цель внедрения системы.** Целью внедрения данной системы управления процессом проектирования является автоматизация разнородных процессов и объединение данных с существующих программных продуктов для возможности полноценного контроля состояния дел по конкретному проекту.

Система управления проектированием процессом проектирования – это информационная система, с помощью которой пользователи управляют объектами внутренней среды для осуществления работ по проекту, оптимизируя процесс проектирования с помощью инструмента планирование работ, распределение нагрузки подразделений, контроля над исполнением задач и автоматизированным созданием документов.

**Определение функций системы управления.** Каждое изделие, проектируемое для корабля характеризуется определенными свойствами, назовем их информационные наборы, они определены заранее, так как на каждое изделие разрабатывается техническое задание. Например, реакторная установка состоит из следующих информационных наборов: состав, масса, показатели надежности, эргономические характеристики, методы обслуживания, кампания активной зоны, стоимость, длительность этапов проектирования, сроки создания, данные по виброшумовым характеристикам, вклад в акустическое поле корабля, флюенс, показатели радиоактивной следности, состав систем, важных для безопасности, перечень потребителей электроэнергии, габариты оборудования и многие др. Данный набор характеристик, необходимых для разработки документов называется информационным набором и является важной составной частью изделия, данные о нем необходимы иногда нескольким подразделениям одновременно для разработки собственной документации, проведения расчетов и разработки чертежей.

Основная идея системы управления процессом проектирования - связь документов по элементам информационных наборов по типу реляционной базы данных, что позволяет однократно занести информацию в базу данных и использовать ее в нескольких документах, а при внесении изменений, следовательно, отследить цепочку документов, подлежащих изменению.

Демонстрация понятия информационных наборов и их связи представлена на рисунке 1. Каждый элемент информационного набора – составная часть исходных данных множества документов нескольких структурных подразделений. Изменение какого-либо элемента без системы управления процессом проектирования сложно поддается отслеживанию и поддержанию в актуальном состоянии. Данная проблема влечет за собой корректировку неполного объема документации при внесении изменений, а также отображения неактуальных сведений и использования их в расчетах.

Решение данной проблемы возможно только методом внедрения автоматизированного контроля изменения данных и оповещением о цепочки изменяемых документов соответствующих пользователей. Влияние человеческого фактора, а также научно-технического задела каждого исполнителя играет немаловажное значение в отслеживании подобных изменений при традиционных методах проектирования с бумажно-ориентированным подходом.

Внедрение интеллектуальной системы управления процессом проектирования позволит минимизировать влияние человеческого фактора, поддерживать информацию в актуальном виде и выдавать сообщения пользователям системы о возможных путях решения возникших проблем в процессе проектирования.

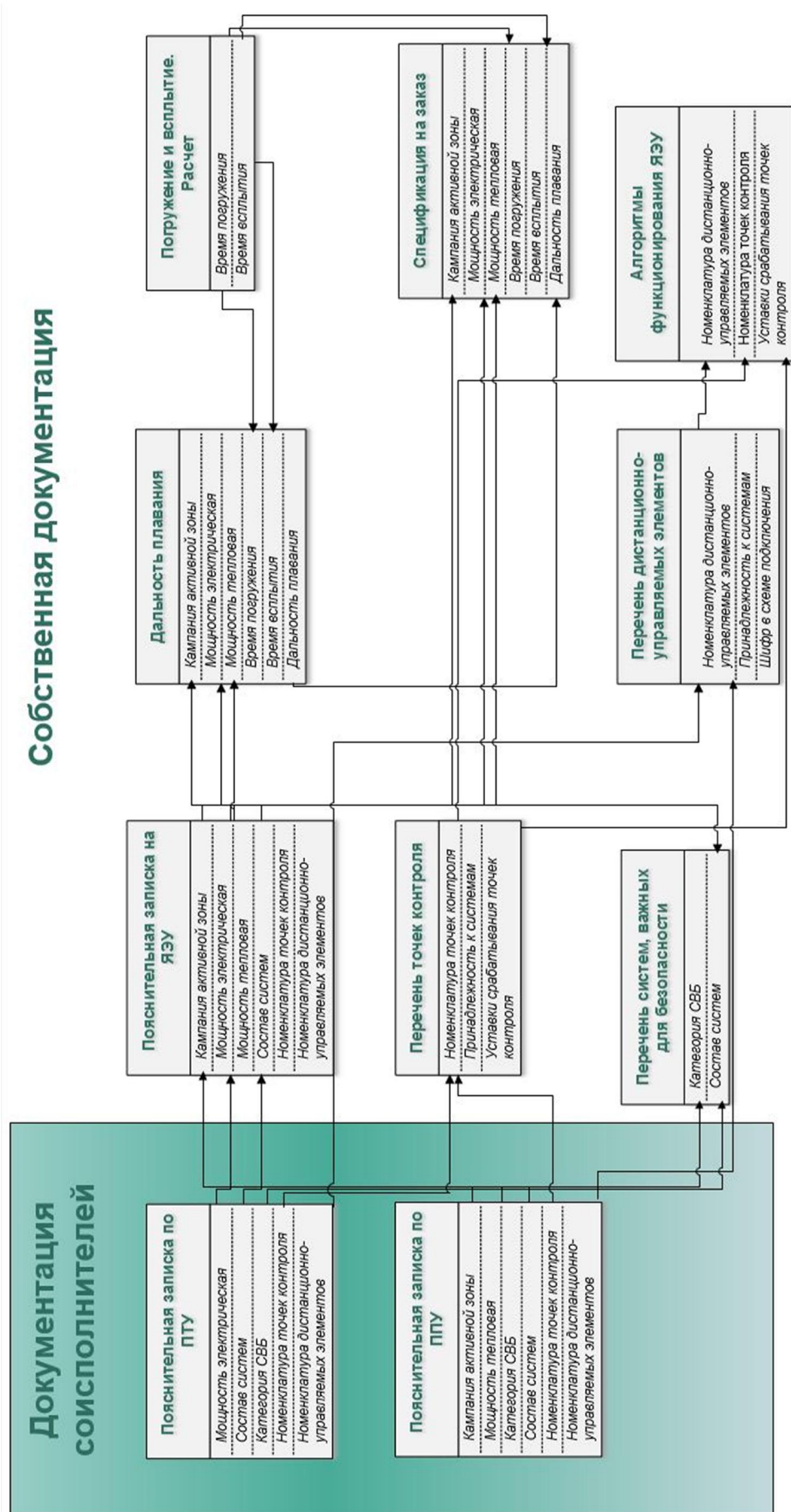


Рис. 1. Взаимосвязь документов по элементам информационного набора

На рисунке 2 приведены те же документы, что и на предыдущем рисунке, в виде элементов массива информационных наборов.

Док1	Док2	Док3	Док4	Док5	Док6	Док7	Док8	Док9	Док10
X1	Y1	Y1	X4, Y5	X2, Y4	Y1	X5, Y6	Z3	Y1	X5, Y6
X2	Y2	X1	Z1	X3, Y3	X1	Z1	Z4	X1	X4, Y5
X3	Y3	Y2	Z2	...	Y2	Z6	...	Y2	Z2
X4	Y4	X2, Y4	...	...	Z3	...	...	Z3	...
X5	Y5	X4, Y5	...	...	Z4	...	...	Z4	...
...	Y6	X5, Y6	...	...	Z5	...	...	Z5	...

Рис. 2. Массив данных элементов информационных наборов

Для оценки целесообразности внедрения предлагаемой системы управления ниже в таблице 1 приведена оценка вхождений элементов информационных наборов что позволяет, учитывая функционал этой системы, сделать вывод о целесообразности внедрения системы управления процессом проектирования.

Таблица 1

Элемент	Вхождение	Элемент	Вхождение	Элемент	Вхождение
X1	4	Y2	4	Z2	2
X2	3	Y3	2	Z3	3
X3	2	Y4	3	Z4	3
X4	3	Y5	4	Z5	2
X5	4	Y6	4	Z6	1
Y1	4	Z1	2		

На основании анализа потребностей проектной организации разработан набор функций системы управления процессом проектирования:

- автоматизированный конструктор документов по определенным информационным наборам;
- контроль внесения полученных контрагентских данных за счет категорирования ответственным по проекту проектантом полученных информационных наборов;
- контроль взаимосвязанных по общим информационным наборам документов для корректировки при их изменении;
- четкое распределение нагрузки руководителем подразделения;
- контроль над формированием и выпуском документации руководителем любого уровня с необходимой степенью детализации;
- контроль состояния проекта в целом (степень готовности СЧ ОКР, количество выпущенных и готовых к выпуску документов, не начатые документы, количество заполненных и незаполненных информационных наборов);
- система оповещений и сообщений между подразделениями для необходимости заполнения каких-либо информационных наборов;
- единое хранилище информации по проекту (собственная и контрагентская);
- формирование комплекта информационных наборов в зависимости от стадии проектирования;
- формирование в процессе проектирования необходимой базы данных для создания комплексной модели ЯЭУ и других объектов, подлежащих моделированию.

**Параметры внедрения системы управления.** Для внедрения интеллектуальной системы управления процессом проектирования необходимо разработка и внедрение

специализированного программного обеспечения, которое позволит выполнять обозначенные функции, и будет работ, как прикладное приложение.

Также при разработке интеллектуальной системы управления процессом проектирования необходимо будет провести тщательный анализ предметной области для создания текстового описания каждого документа, создать шаблоны всех необходимых документов, разработать информационные наборы для каждого документа и создать модель работы системы с взаимосвязанными элементами информационных наборов, разработать базу сообщений пользователю, а также разработать схему присвоения нагрузочного коэффициента для каждого документа с целью выполнения функции распределения нагрузки внутри структурного подразделения.

**Заключение.** Создание и использование интеллектуальной системы управления процессом проектирования ядерных энергетических установок позволит повысить качество разработки проектных документов на различных стадиях проектирования – основной функции проектных бюро.

Повышение качества проектирования влияет на последующие стадии жизненного цикла ядерных энергетических установок, таких как проведение испытаний, что имеет определяющее значение для экономических и технических показателей постройки кораблей и их дальнейшую безопасную эксплуатацию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 ИТ. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем – М.: Стандартинформ, 2006. – 54 с.
2. ГОСТ РВ 1900-010-2019. Корабли и суда ВМФ. Порядок проектирования и постройки. Введ. 01-07-2020. – М.: Стандартинформ.

**L.B. Gusev** (Military Training and Research Center of the Navy «Naval Academy», Saint-Petersburg)  
**Y.S. Samychko** (Saint-Petersburg Design Maritime Bureau of Mechanical Engineering «Malachite», Saint-Petersburg). **Intelligent management system for the design of nuclear power plants.**

Of decisive importance for the development of quality products is the use of automation tools to reduce the influence of the human factor and reduce economic losses due to non-compliance with production deadlines. The introduction of a process control system for the design of nuclear plants will improve the design quality of an important part of the ship – the power plant, and will also affect compliance with the requirements of regulatory documentation on nuclear and radiation safety.

В.Ф. ФИЛАРЕТОВ

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

А. В. ЗУЕВ, А. Н. ЖИРАБОК, А. А. ПРОЦЕНКО

(Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток)

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)

## САМОНАСТРАИВАЮЩЕЕСЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

*В докладе представлен метод синтеза самонастраивающихся корректирующих устройств (СКУ) для электроприводов манипуляторов подводных аппаратов, обеспечивающих высокоточное управление перемещениями их рабочих органов. Предложенный метод за счет использования новых наблюдателей с переменной структурой позволяет точно идентифицировать моментные воздействия на выходные валы электроприводов манипуляторов, возникающие при перемещениях в вязкой среде и точно их компенсировать. Выполнено численное моделирование разработанной системы, результаты которого подтвердили эффективность синтезированных СКУ.*

**Введение.** В настоящее время необитаемые подводные аппараты (НПА), оснащенные многозвенными подводными манипуляторами (ПМ) [1], являются важным средством для исследования Мирового океана и выполнения различных подводных технологических операций. При этом актуальной задачей является повышение точности управления ПМ. Это необходимо для расширения областей применения подводной робототехники при выполнении конкретных операций. Однако на звенья ПМ при их движении оказываются значительные динамические воздействия со стороны окружающей водной среды [2]. При этом ПМ часто перемещают подводные объекты с априорно неизвестными параметрами. В результате на выходных валах приводов ПМ возникают дополнительные переменные моменты, существенно снижающие точность перемещения их рабочих органов при выполнении манипуляционных работ.

Сейчас существует несколько подходов к построению систем управления для электроприводов ПМ [3, 4]. В целом эти подходы основаны на использовании дополнительных наблюдателей для оценки моментных воздействий на выходные валы электроприводов ПМ, возникающие при их перемещениях в вязкой среде. Но эти наблюдатели строятся на основе полной модели электроприводов, а также требуют установки дополнительных датчиков. Это значительно усложняет практическую реализацию создаваемых систем управления.

Таким образом в докладе ставится задача разработки СКУ для электроприводов ПМ, которые за счет использования новых легкорезализуемых наблюдателей с переменной структурой для оценки в реальном масштабе времени величин внешних моментов, обеспечивают высокоточное управление перемещениями рабочих органов этих манипуляторов по сложным пространственным траекториям.

**Разработка метода синтеза СКУ.** Рассмотрим НПА с ПМ имеющий  $n$  степеней свободы. Каждая степень свободы управляется электроприводом, который включает двигатель постоянного тока, редуктор и датчики, измеряющие угол поворота выходного вала редуктора  $\alpha_r(t)$  и силу тока в цепи якоря двигателя  $I(t)$ . Детальное описание математической модели электропривода приведено в работе [5]. Моментное воздействие, обусловленное взаимодействиями в степенях подвижности ПМ,  $P(t)$  можно представить в следующем виде:

$$P(t) = (H(t) + \hat{H}(t))\ddot{q}(t) + (h(t) + \hat{h}(t))\dot{q}(t) + (M_E(t) + \hat{M}_E(t)), \quad (1)$$

где  $H(t)$  – компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей степени подвижности ПМ;  $h(t)$  – компонента кориолисовых и скоростных сил;  $M_E(t)$  – моментное воздействие, учитывающее эффекты взаимодействия между всеми степенями подвижности ПМ в процессе его движения;  $\ddot{q}(t)$  и  $\dot{q}(t)$  – обобщенные ускорения и скорости ПМ;  $\hat{H}(t)$ ,  $\hat{h}(t)$  и  $\hat{M}_E(t)$  – неизвестные нелинейные функции, обусловленные отклонением динамических



параметров звеньев ПМ от своих номинальных значений, изменением массы груза и влиянием внешней вязкой среды. Предполагается, что известны возможные диапазоны изменения этих функций.

Известно, что для любых кинематических схем ПМ с известными номинальными значениями параметров звеньев и массы перемещаемого груза могут быть получены точные аналитические выражения для компонент  $H(t)$ ,  $h(t)$  и  $M_E(t)$  [5]. Однако в процессе работы ПМ зачастую перемещают объекты с неизвестной массой, на звенья ПМ может дополнительно устанавливаться различное навесное оборудование, а также на звенья ПМ оказывает дополнительное влияние вязкая окружающая среда. Всё это приводит к появлению ненулевых неизвестных компонент  $\hat{H}(t)$ ,  $\hat{h}(t)$  и  $\hat{M}_E(t)$ , что можно представить как появление дополнительного неизвестного момента нагрузки на электропривод  $\hat{M}(t)$ , негативно влияющего на качество его работы. Чтобы обеспечить неизменную точность выполнения операций, появление ненулевой функции  $\hat{M}(t)$  необходимо своевременно обнаружить, а её воздействие на динамику ПМ компенсировать.

Для решения этой задачи предлагается использовать метод, включающий два этапа: 1) идентификация функции  $\hat{M}(t)$  с помощью наблюдателей с переменной структурой (НПС) [6, 7]; 2) формирование с помощью СКУ специального управляющего сигнала, позволяющего поддерживать основные динамические свойства ПМ на номинальном уровне.

На первом этапе по известному алгоритму [7] строится НПС чувствительный к появлению ненулевой функции  $\hat{M}(t)$ . Полученный НПС может быть описан следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}(t) &= x_{*2}(t) + \frac{k_y}{L} u(t) - \left[ \frac{(k_B + h^*(t))L + (J + H^*(t))R}{(J + H^*(t))L} \right] I(t) + k_1 e_y(t) + k_{v1} v(t), \\ \dot{x}_{*2}(t) &= \frac{(k_B + h^*(t))k_y}{(J + H^*(t))L} u(t) - \frac{k_M k_\omega + (k_B + h^*(t))R}{(J + H^*(t))L} I(t) + \frac{k_\omega M_E^*(t)}{(J + H^*(t))L} + \frac{k_\omega M_{тр}}{(J + H^*(t))L} \cdot \\ &\cdot \text{sign} \left( L \left( \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} I(t) - x_{*2}(t) \right) / k_\omega \right) + \frac{\dot{h}^*(t)(J + H^*(t)) - h^*(t)(k_B + h^*(t))}{(J + H^*(t))^2} I(t) + k_2 e_y(t) + k_{v2} v(t), \\ e_y(t) &= I(t) - x_{*1}(t), \quad v(t) = e_y(t) / |e_y(t)|, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_{*1}(t)$ ,  $x_{*2}(t)$  – переменные состояния НПС;  $J$  – момент инерции ротора двигателя и вращающихся частей редуктора;  $k_B$  – коэффициент вязкого трения;  $k_M$  – коэффициент крутящего момента;  $k_y$  – коэффициент усиления усилителя мощности;  $k_\omega$  – коэффициент противо-э.д.с;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты обратной связи;  $I(t)$  – ток якоря электродвигателя;  $u(t)$  – входное напряжение электропривода;  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$  – постоянные положительные коэффициенты;  $R$  – активное сопротивление цепи якоря;  $L$  – индуктивность цепи якоря;  $M_{тр}$  – величина момента сухого трения;  $H^*(t) = H(t)/i_p^2$ ,  $h^*(t) = h(t)/i_p^2$  и  $M_E^*(t) = M_E(t)/i_p$  – приведенные к ротору двигателя компоненты моментного воздействия  $P_i(t)$ ;  $i_p$  – передаточное отношение редуктора.

В результате значение функции  $\hat{M}(t)$  можно определить как [6]:

$$\hat{M}(t) = k_{v2} v_{eq}(t)(J + H^*(t)), \quad (3)$$

где  $v_{eq}(t) = e_y(t) / (|e_y(t)| + \delta)$ ,  $\delta$  – положительная константа.

На втором этапе для компенсации последствий появления дополнительных моментных воздействий на электроприводы ПМ предлагается использовать метод синтеза нелинейных систем автоматического управления [5]. В результате закон формирования выходного сигнала  $u(t)$  будет иметь вид:

$$u(t) = \frac{J + H^*(t)}{J} \tilde{u}(t) + \frac{L(2h^*(t) + k_B)}{k_y k_M} \ddot{\alpha}(t) + \frac{1}{k_y k_M} (L\dot{h}^*(t) + R(h^*(t) + k_B) + k_\omega k_M (1 - \frac{J + H^*(t)}{J})) \dot{\alpha}(t) + \frac{R}{k_y k_M} (M_E^*(t) + M_{стр}(t) + \hat{M}(t)) + \frac{L}{k_y k_M} (\dot{M}_E^*(t) + \dot{\hat{M}}(t)) \quad (4)$$

где  $\alpha(t)$  – угол поворота вала двигателя;  $M_{стр}(t) = M_{тр} \text{sign} \dot{\alpha}$ ;  $\tilde{u}(t)$  – управляющий сигнал для электропривода с номинальными параметрами.

**Исследование работы электропривода ПМ с разработанным СКУ.** Анализ эффективности разработанной системы проводился с использованием модели ПМ с тремя степенями свободы [3]. В процессе моделирования схват ПМ перемещался по сложной пространственной траектории с

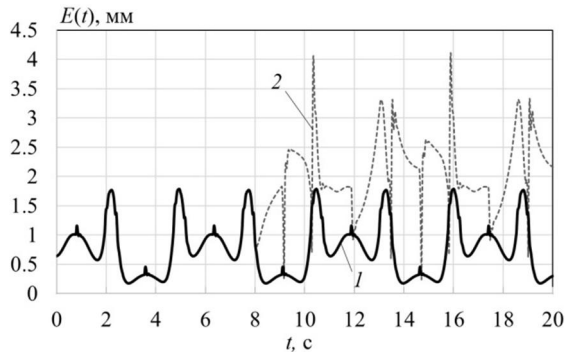


Рис. 1. Ошибки слежения электропривода при добавлении дополнительного момента нагрузки

**Заключение.** В докладе предложен новый метод синтеза СКУ для электроприводов ПМ, обеспечивающих высокоточное управление перемещениями рабочих органов этих манипуляторов, установленных на подводных аппаратах. Этот метод за счет использования новых наблюдателей с переменной структурой позволяет точно идентифицировать негативные моментные воздействия на выходные валы электроприводов манипуляторов, возникающие при их перемещениях в вязкой среде. Затем идентифицированные моментные воздействия на электроприводы всех степеней подвижности манипулятора точно компенсируются с помощью СКУ, обеспечивающих стабилизацию динамических свойств этих приводов на номинальном уровне. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенных СКУ.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01303.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Antonelli G. Underwater Robots. Springer International Publishing Switzerland. 2014. 279 p.
2. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. М.: Мир, 1985. 285 с.
3. Филаретов В.Ф., Коноплин А. Ю., Зуев А. В., Красавин Н.А. Метод синтеза систем высокоточного управления перемещениями подводных манипуляторов. Подводные исследования и робототехника. 2020. №4 (34). С. 31-37.
4. Зуев А. В., Проценко А. А., Жирабок А. Н. Разработка системы обнаружения и идентификации дефектов в электроприводах подводных манипуляторов. 8-я Всероссийская научно-техническая конференция "Технические проблемы освоения Мирового океана" (ТПОМО-8). Владивосток. 2019. С. 377-381.
5. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.
6. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation. Automatica, Vol. 36, 2000. P. 541-553.
7. Жирабок А.Н., Зуев А.В., Шумский А.Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей. Автоматика и телемеханика, №2, 2020. С.18-35.

**V.F. Filaretov**, (Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok), **A.V. Zuev**, **A.N. Zhirabok**, **A.A. Protsenko** (Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Far Eastern Federal University, Vladivostok). **Self-adjusting correction device for electric drives of underwater manipulators.**

The paper presents a method for the synthesis of self-adjusting corrective devices (SCD) for electric drives of underwater vehicle manipulators, which provide high-precision control of the movements of their working tools. The proposed method, due to the use of new observers with a variable structure, makes it possible to accurately identify torque on the output shafts of manipulator electric drives that occur during movements in a viscous environment and accurately compensate for them. Simulation of the developed system was performed, the results of which confirmed the effectiveness of the synthesized SCD.

Д.В. БЫКОВ, В.А. ГОРБАЧЁВ, Б.Г. ИВАНОВ, А.Я. ЛАПИДУС  
(Военный институт (военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»)

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ РИСКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Среди задач снижения и предупреждения аварийности особое место занимает прогнозирование потенциальных рисков уже на начальной стадии развития аварии с учётом влияния различных, в том числе эксплуатационных, факторов.*

*Постановка такой задачи, на первый взгляд, может представляться мало актуальной в связи с разработанной классификационной базой и стандартными понятиями из теории «живучести». Однако современная концепция по использованию корабельных технических средств, требует дополнительного структурно-функционального сопряжения процедур прогнозирования потенциальных рисков с общими требованиями по борьбе за живучесть.*

*В статье приводится кусочно-постоянная динамическая модель аномального состояния (отказа) с учётом влияния причинно-следственных связей в виде опорного множества классов начальных состояний для выработки соответствующих векторов управления.*

### **Введение**

Несмотря на применяемые меры организационно-технического и технического характера, проблема снижения аварийности остаётся актуальной [1].

В общем объёме задач снижения и предупреждения аварийности особое место занимают такие, как прогнозирование потенциальных рисков уже на начальной стадии развития аварии с учётом влияния различных, в том числе эксплуатационных факторов.

Постановка такой задачи, на первый взгляд, может представляться мало актуальной в связи с разработанной классификационной базой и стандартными понятиями из теории «живучести». Однако современная концепция по использованию корабельных технических средств, автоматизированных и информационных комплексов в условиях боевых и эксплуатационных повреждений требует необходимости дополнительного анализа для формирования задач структурно-функционального сопряжения процедур прогнозирования потенциальных рисков с общими требованиями по борьбе за живучесть.

### **Исследование потенциальных рисков судовых энергетических комплексов**

Для рассмотрения поставленной задачи введём некоторые понятия и определения в системе безопасности кораблей. Отсутствие нормативных определений позволяет выделить некоторые из них на концептуальном уровне в порядке научного обсуждения.

Системной безопасностью будем называть совокупность взаимодействующих объектов, функционирование которых описывается набором эксплуатационных показателей (параметрической базой), и набором алгоритмов локализации.

Такое определение придаёт понятию системной безопасности универсальный смысловой характер и вводится для удобства использования некоторых терминов теории управления.

Будем исходить из того, что любая системная модель определяется внутренней параметрической базой с учётом влияния внешних (экзогенных) факторов.

Выявить и исследовать влияние экзогенных факторов на характер развития аварии и выработать предпочтительные алгоритмы её купирования в рамках одной математической модели, пусть даже записанной в  $n$ -мерном пространстве состояний системы безопасности без достаточно корректных начальных условий, не представляется возможным. Поэтому целесообразно ввести понятие кусочно-постоянной динамической модели аномального состояния (отказа) на основе учёта влияния причинно-следственных связей в виде опорного множества классов начальных состояний и для выработки соответствующих векторов управления.

Подобное концептуальное определение основано на анализе ковариационной матрицы, отражающей линейный тренд изменения аварийности в зависимости от интенсивности и использования кораблей в различные периоды эксплуатации.

Дополним математическую схему величиной вектора ковариационной матрицей классификационных признаков аварий и происшествий. Собственный вектор классификационной матрицы определяет направление, по которому наиболее целесообразно проводить отделение какого-либо класса аварии от остальных в пространстве признаков. Характерной особенностью связи между рассматриваемыми группами является наличие запаздывания между эндогенными и экзогенными переменными, т.е. эффект от внедрения соответствующих управляющих воздействий на состояние системы безопасности осуществляется с опозданием, иными словами, через некоторое время. Таким образом, система безопасности адаптируется к изменению параметрической базы в течение времени переходного процесса, образуя распределенный лаг [2].

Тогда математическая модель системы с распределённым лагом может быть записана в виде:

$$Y(A) = N \sum_{\tau=0}^{\infty} h(\tau) X(A+\tau) + \Sigma(A), \quad (1)$$

где:  $Y(A)$  и  $X(A)$  соответственно эндогенная и экзогенная переменные;

$h(\tau)$  – коэффициент лага;

$\Sigma(A)$  – некоторое стохастическое (случайное) возмущение (эксплуатационный шум).

При использовании предложенной математической схемы необходимо чтобы предложенная область вероятностной части модели адекватно отражала существующие функциональные связи в системе [5].

Итак, сформируем задачу и возможные способы её решения: в многомерном пространстве состояний системы безопасности необходимо разделить (классифицировать) эксплуатационные показатели в виде нормальных (случайных) величин, которые обладают одинаковыми средними значениями, но отличаются по дисперсии хотя бы в одном каком-то направлении. В большинстве практических случаев [4] точки смешанной выборки разделены в пространстве признаков равномерно по всему объёму. Такое условие позволяет для классификационной матрицы ввести допущение, чтобы её собственные члены были равны дисперсии точек выборки линейного тренда колебаний уровня аварийности (объёма отказов) осреднённых по всем кораблям данного соединения.

Линейный тренд колебаний уровня аварийности (аварий/год) осреднённый по 72-м кораблям составил  $0,14 \pm 0,6$  аварий/год. Характерно наличие отрицательного тренда в определённые периоды, что подтверждает определённую цикличность аварийности при анализе устойчивости тренда. Такая тенденция возможно объясняется изменением структуры лага модели (эффективностью работы по предупреждению аварийности, качеством подбора и расстановки кадров, формирования экипажей перед боевой службой, районом плавания ПЛ, решаемой задачей и т.д.).

Кусочно-постоянная модель управления предложена в виде опорного множества классов начальных состояний и соответствующих классам векторов управления. Классы в пространстве начальных состояний выделялись по такому признаку, как ближайшее расстояние, либо по радиусу, выраженному через относительную дисперсию. Обработка реальных данных подтвердила наличие в этом пространстве зависимых признаков и, как следствие, – растяжение областей классов вдоль этих признаков. При этом результаты классификации оказываются зависящими от способа нормировки данных. Разработанный алгоритм автоматической классификации при неизвестном числе классов, пригодный для работы в пространстве зависимых признаков, основан на анализе ковариационной матрицы класса [3], выделенного алгоритмом классификации по ближайшему расстоянию, на выборе таких направлений – признаков, вдоль которых класс обладает минимальной дисперсией, и на последующем окончательном выделении класса в пространстве разделяющих признаков.

Для автоматической классификации в многомерном пространстве количественных признаков при неизвестном числе классов однозначное решение задачи может быть получено только после введения некоторых ограничений типа «гипотезы компактности». Поэтому целесообразно ввести в рассмотрение модель порождения класса в пространстве признаков и

представить класс как результат рассеяния многомерного случайного вектора. Среднее значение вектора определяет положение центра класса, а его дисперсия по отдельным направлениям определяет протяжённость класса вдоль этих направлений. Если допустить наличие многочисленных причин, влияющих на процесс рассеяния, то тогда класс можно представить, как набор реализации многомерной нормальной случайной величины  $N(\mu \rightarrow \Sigma)$ .

Чтобы такой класс мог быть отделён от остальных классов в пространстве признаков, должны существовать направления, по которым рассеяние класса характеризуется достаточно малой величиной. Это требование накладывает ограничение на ковариационную матрицу  $\Sigma_0$ : среди её собственных чисел  $\lambda$  должно быть хотя бы одно достаточно малое число, т.е.  $\lambda_{\min} \ll \lambda_{\max}$ . Таким образом, соответствующий этому собственному числу начальный вектор ковариационной матрицы определит направление, по которому наиболее целесообразно проводить отделение данного класса от остальных.

Так как число классов при автоматической классификации в пространстве начальных состояний значительно больше двух, то предложено усреднить воздействие смежных классов на процесс выделения отдельного класса. Для этого введена в рассмотрение новая величина – рассеяние центров классов в пространстве признаков. Будем рассматривать её как многомерную нормально распределённую случайную величину с ковариационной матрицей  $\Sigma_0$ , собственные числа которой равны дисперсии точек смешанной выборки по каждому признаку. Проведённое усреднение позволило свести первоначальную задачу автоматической классификации с неизвестным числом классов к последовательности задач по выделению одного произвольного класса на мешающем фоне.

Итак, имеем следующую задачу: в многомерном пространстве признаков разделить реализации двух нормальных случайных величин  $N1(\mu_1 \rightarrow \Sigma_1)$  и  $N0(\mu_1 \rightarrow \Sigma_0)$ , которые обладают одинаковыми средними, но отличаются по дисперсии хотя бы в одном каком-то направлении. В большинстве практических случаев точки смешанной выборки распределены в пространстве признаков равномерно по всему объёму, это позволяет для ковариационной матрицы  $\Sigma_0$  принять условие, что её собственные числа равны дисперсии точек выборки по первоначальным признакам. Так как для  $\Sigma_1$ , по предположению, выполняется условие  $\lambda_{\min} \ll \lambda_{\max}$ , то вдоль направления, соответствующего собственному вектору  $\bar{U}_1(\lambda_{\min})$ , распределения  $N0(\bar{\mu}_1, \Sigma_0)$ , и  $N1(\bar{\mu}_1, \Sigma_1)$  будут существенно отличаться по дисперсии, что позволит выделить класс из общего фона именно по этому направлению. Из такой обстановки задачи вытекает, что собственный вектор  $\bar{U}_1(\lambda_{\min})$  является разделяющим признаком для данного класса. Так как ковариационная матрица  $\Sigma_1$  может характеризоваться не одним собственным числом  $\lambda_{\min}$ , для которого выполняется условие  $\lambda_{\min} \ll \lambda_{\max}$ , а несколькими, то соответствующие им собственные векторы образуют пространство разделяющих признаков, в котором следует осуществлять выделение класса. Все остальные направления, для которых собственные числа матриц  $\Sigma_0$  и  $\Sigma_1$  близки между собой, не могут быть использованы для выделения класса на мешающем фоне. Поэтому предложенная схема эквивалента поиску разделяющих признаков в виде линейной комбинации первоначальных признаков. В пространстве разделяющих признаков класс обладает достаточно малой относительной дисперсией, что позволяет использовать алгоритм выделения класса по радиусу, выраженному через относительную дисперсию его точек.

Так как собственные векторы ковариационной матрицы ортогональны между собой, то на их основе можно построить линейное подпространство разделяющих признаков, в котором новые координаты смешанной выборки выразятся через скалярное произведение исходных векторов и соответствующих собственных векторов  $\bar{U}_1(\lambda_1)$  ковариационной матрицы класса.

Матрица  $\Sigma_0$  может быть оценена по смешанной выборке как среднеарифметическая элементарных матриц  $\bar{X}_1 \bar{X}_i, i=1, N$ .

Матрица класса  $\Sigma_1$  до проведения классификации неизвестна, поэтому она будет восстанавливаться и оцениваться в процессе классификации. Для получения начального значения  $\Sigma$  могут быть использованы результаты предварительной классификации по

ближайшему расстоянию. При деформированной области класса алгоритм классификации по ближайшему расстоянию разделит такой класс на несколько. В качестве начального приближения выберем наиболее представительный из выделенных классов и по его составу получим начальную оценку ковариационной матрицы  $\Sigma_1$ .

Для нахождения собственных чисел и собственных векторов матрицу  $\Sigma_1$  следует привести к диагональному виду с помощью преобразования подобия:  $\Sigma_1^1 = Q^{-1} \Sigma_1 Q$ , при котором сохраняются собственные числа матрицы. Любая симметричная матрица  $\Sigma$  может быть представлена в виде:  $\Sigma = Q \Lambda Q^T$ , где  $Q$  – ортогональная матрица, составленная из собственных векторов матрицы  $\Sigma$ , а  $\Lambda$  – диагональная матрица, содержащая собственные числа матрицы  $\Sigma$ :  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ . Разработан ряд вычислительных методов, например метод Якоби, которые позволяют провести такое преобразование, т.е. определить  $\lambda_i$  и  $\bar{U}(\lambda_i)$ . В результате анализа полученных собственных чисел  $\lambda_i$  ковариационной матрицы  $\Sigma_1$  выделяется необходимое количество разделяющих признаков. Требование  $\lambda_{\min} \ll \lambda_{\max}$  можно уточнить, если учесть величину среднего риска при выделении класса по схеме, где решена задача разделения двух многомерных нормальных случайных величин с одинаковым средним, но разными дисперсиями, причём  $\Sigma_1 \cong \sigma_1^2 J$ , а  $\Sigma_2 \cong \sigma_2^2 J$  и  $\sigma_1 \ll \sigma_2$ ,  $J$  – единичная матрица. После соответствующей нормировки данных радиус класса  $\rho$ , при котором минимизируется средний риск, выражается через относительную дисперсию точек класса следующим образом:

$$\rho = \frac{\sigma}{\sqrt{1-\sigma}} \sqrt{-2m \ln \sigma} \quad (2)$$

При этом средний риск достигает минимума, равного при единичной матрице потерь и одинаковых априорных вероятностях следующему:

$$R(\sigma_1, m) = O_1 S \left\{ \frac{\int_0^\rho r^{m-1} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr}{2^{\frac{m}{2}-1} \cdot \tilde{A}\left(\frac{M}{2}\right) \cdot \sigma^m} + \frac{\int_0^\rho r^{m-1} e^{-\frac{r^2}{2}} dr}{2^{\frac{m}{2}-1} \cdot \tilde{A}\left(\frac{1}{2}\right)} \right\} \quad (3)$$

$$\int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма-функция:  $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ .

Величина среднего риска  $R(\sigma, m)$  может быть использована для оценки количества разделяющих признаков. При  $m_1$  претендентах на разделяющие признаки и общем числе признаков  $m$  определяется средний риск в пространстве мерности  $m_1$  при

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{m_1} (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m) \quad \sigma_2^2 = \frac{1}{(m - m_1)} (\lambda_{m_1+1} + \lambda_{m_1+2} + \dots + \lambda_m) \quad \sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad \text{и} \quad \sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} .$$

Начиная с одного разделяющего признака, соответствующего наименьшему собственному числу  $\lambda_1 = \lambda_{\min}$ , и при последующем увеличении числа разделяющих признаков выбирается такое число разделяющих признаков, при котором  $R(\sigma, m)$  достигает наименьшего значения.

Опишем предложенный алгоритм классификации по выделению классов в пространстве зависимых признаков.

1. находятся вектор средних  $\bar{\mu}$  и ковариационная матрица  $\Sigma_0$  по смешанной выборке  $x = \{ \vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n \}$  и координаты точек нормируются по дисперсии.
2. программа автоматической классификации по ближайшему расстоянию классифицирует смешанную выборку в первоначальном пространстве признаков.
3. по составу наиболее представительного класса вычисляется ковариационная матрица. Находятся её собственные числа и собственные векторы по методу Якоби.

4. выбирается пространство разделяющих признаков, в котором  $R(\sigma, m)$  достигает наименьшего значения.

5. определяются координаты всех точек смешанной выборки в пространстве разделяющих признаков и осуществляется выделение класса по радиусу, выраженному через относительную дисперсию в этом пространстве.

6. если состав класса совпадает с выделенным ранее, то класс считается выделенным окончательно и его представители (точки) исключаются из состава смешанной выборки. Если все оставшиеся классы являются малочисленными, то алгоритм оканчивает работу, иначе возвращается в п.1.

7. при новом составе класса переходим в п.3.

8. каждый выделенный класс связываем с ортогональным подпространством разделяющих признаков  $U_i = \{\overline{U_{i1}}(\lambda_1), \overline{U_{i2}}(\lambda_2) \dots \overline{U_{im_i}}(\lambda_{m_i})\}$ , в котором класс характеризуется центром  $\mu_i$  и радиусом  $\rho_i$ .

Предложенная схема алгоритма классификации при неизвестном числе классов, основанная на модели порождения класса в виде рассеяния гиперплоскости, отличается от ранее разработанных тем, что в процессе выделения класса происходит формирование пространства разделяющих признаков, в котором достигается наименьшее значение функционала средних потерь. Результаты автоматической классификации по предложенному алгоритму в пространстве начальных состояний аварии более адекватно отражают реальные закономерности распределения нарастания уровня аварии и оценки эффективности принимаемых мер на каждом этапе принятия решения.

### Заключение

Результаты автоматической классификации по предложенному алгоритму в пространстве начальных состояний аварии более адекватно отражают реальные закономерности распределения нарастания уровня аварии и оценки эффективности принимаемых мер на каждом этапе принятия решения.

Дальнейшее уточнение требует проведения серии численных экспериментов для оценки влияния различных факторов в многолетние колебания уровня аварийности и создать научную базу для совершенствования методов управления системой безопасности в ходе боевой подготовки и использования кораблей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Горбачёв, В.А.** Прогнозирование технического состояния паропроводных систем / В.А. Горбачёв, П.Д. Лукин // Сборник материалов научно-технической конференции. СПб, ВМПИ, 2012.
2. **Горбачёв В.А., Михненко М.В.** Техногенная безопасность при эксплуатации кораблей и технических средств. СПб, ВМПИ, 2014.
3. **Горбачёв, В.А.** Параметрическая база потенциальных рисков судовых энергетических комплексов / В.А. Горбачёв, Д.В. Быков, Г.В. Иванов, В.И. Ануфриев // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2018). СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018.
4. **Горбачёв, В.А.** Типовые процедуры управления процессами прогнозирования функциональной эффективности технических средств / В.А. Горбачёв, Д.В. Быков, Г.В. Иванов, В.И. Ануфриев // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2018). СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018.
5. **Котов, В. С.** Проблема влияния качества топлива на экономичность и экологическую безопасность / В. С. Котов, Р. К. Резникова // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : Материалы международной научно-технической конференции: в 2-х частях, Петропавловск-Камчатский, 17–19 октября 2018 года / Ответственный за выпуск О.А. Белов. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2019. – С. 48-53.



D.V.Bykov, V.A.Gorbachev, B.G.Ivanov, A.Y. Lapidus (VMPI VUNC VMF «Naval Academy», Saint-Petersburg). **Algorithm for Automated Classification of Potential Risks in Ship Power Plant Operation.**

Among the tasks of reducing and preventing accidents, a special place is occupied by forecasting potential risks already at the initial stage of accident development, taking into account the influence of various, including operational, factors

The formulation of such a problem, at first glance, may seem little relevant in connection with the developed classification framework and standard concepts from the theory of "survivability". However, the modern concept of using shipboard technical means requires additional structural and functional coupling of procedures for predicting potential risks with general requirements for the fight for survivability.

The article presents a piecewise constant dynamic model of an abnormal state (failure), taking into account the influence of causal relationships in the form of a reference set of classes of initial states for the development of appropriate control vectors.

Д.В. БЫКОВ, В.А. ГОРБАЧЁВ, Г.В. ИВАНОВ, В.А. ШУЛЬГАН  
(Военный институт (военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»)

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

*В статье проанализированы некоторые подходы в вопросе выбора типа судовой энергетической установки (СЭУ). Показано, что выбор типа СЭУ должен быть увязан с задачей по оптимизации основных параметров судна, в первую очередь его скорости и основных размерений. Приводится сравнение значений экономических показателей судов с разными типами энергетических установок: малооборотная дизельная; среднеоборотная дизельная; паротурбинная для ЯЭУ; паротурбинная с промежуточным перегревом пара; газотурбинная промышленного типа; газотурбинная авиационного типа с теплоутилизационным контуром. Обозначены проблемные вопросы в выборе СЭУ.*

### Введение

Эффективность судовых энергетических систем относится к числу принципиальных вопросов эксплуатации судна. Особое значение имеют системы охлаждения главных конденсаторов (ГК) и паропроводные системы для судов с ПТУ, в том числе для судов с ЯЭУ.

Теоретическая постановка задачи прогнозирования функциональной эффективности сводится к процедурам дискретной оптимизации, которые могут быть решены либо в рамках оптимизации основных параметров (элементов и характеристик) ЯЭУ, либо при наличии определенных условий эксплуатации – как самостоятельный элемент прогнозирования эффективности энергетических систем.

Математическая формулировка задачи в данном случае наиболее удобна в таком виде, который предусматривает разделение оптимизируемых параметров на непрерывные  $x_i (i = 1, \dots, n)$  и дискретные  $p_j (j = 1, \dots, m)$ . Тогда каждый вариант решения будет характеризоваться парой векторов  $(X, P)$ :

$$X = (x_1, \dots, x_n);$$

$$P = (p_1, \dots, p_m).$$

Тип энергетической системы как один из дискретных параметров входит в число компонент вектора  $P$ . Так, например, оптимизация основных параметров паропроводных систем сводится к нахождению экстремума целевой функции  $F(X, P)$  при  $(X, P) \in \Omega$ , где  $\Omega$  – множество допустимых (возможных) векторов  $X$  и  $P$ .

При решении подобных задач [1] обычно выполняется оптимизация по вектору  $X$  при различных векторах  $P \in \Omega$ . Кроме общей формулировки задачи оптимизации как поиска и перебора вариантов по вектору  $X$ , сопоставляются между собой, и определяется оптимальная совокупность векторов  $X$  и  $P$ . Таким образом, задача приводится к виду:

$$\text{extr } F(X, P);$$

$$P \in \Omega(P),$$

где  $\Omega(P)$  – область допустимых векторов  $X$  при фиксированном векторе  $P$ .

Область допустимых векторов определяется ограничениями задачи, которые могут иметь различный состав в зависимости от назначения судна, условий его постройки и эксплуатации. Так, для атомных судов характерны два варианта системы ограничений. В том случае, когда необходимо установить верхний предел мощности СЯЭУ ограничения записываются набором параметрической базы  $L \leq L_{\max}, B \leq B_{\max}, T < T_{\max}$ , условного параллелепипеда, где индекс «max» относится к предельным значениям сторон. В том случае, когда мощностные (винтовые) характеристики непосредственно не лимитированы, ограничиваются массогабаритными параметрами трубопроводных систем, исходя из водоизмещения и требуемых размеров энергетических отсеков.

Однако и при такой упрощенной модели прогнозирования, оптимизация основных параметров энергетических систем СЯЭУ связаны с рядом трудностей. К их числу относится не

только необходимость рассмотрения многочисленных вариантов эксплуатационных технологических решений, но и большая размерность задачи. Одним из путей уменьшения размерности задачи является её разделение на ряд взаимосвязанных подзадач.

Анализ показывает, что с этих позиций выбор функциональной структуры, например, паропроводной системы может быть практически без ущерба для точности результатов отделён от выбора других элементов, отражённых компонентами векторов  $P$  и  $X$ , за исключением скорости судна. Скорость судна строго может быть не задана (например, для судов ледового плавания или ледоколов), а тем более для плавучей атомной станции (ПАЭС). В этом случае задача прогнозирования функциональной эффективности системы должна оптимизироваться для каждого из сопоставляемых типов энергетических установок [1]. Это условие связано с тем, что различным типам энергетических установок могут соответствовать существенно отличающиеся друг от друга оптимальные по эффективности эксплуатационные характеристики. Соответственно разными могут быть и коэффициенты общей полноты для корпуса или объёма отсеков.

Если для решения задачи дополнительно задана скорость судна, необходимо выполнить корректуру итерационного сравнения различия по массе и габаритным размерам энергетических установок с учётом объёма топлива (для неатомных судов).

При фиксировании одного из элементов, например, грузоподъёмности, остальные параметры такие, как главные размерения, водоизмещение могут варьироваться для различных типов энергетических установок.

Тогда в качестве критерия эффективности при сравнении судов с различными типами энергетических установок можно использовать минимум удельных приведённых затрат [1], определяемых по выражению:

$$F = (S + EK) \frac{1}{Q},$$

где  $S$  – среднегодовые эксплуатационные расходы;

$E$  – нормативный коэффициент использования;

$K$  – сумма капитальных вложений и оборотных средств, «омертвлённых» в перевозимом грузе и в запасах топлива;

$Q$  – объём ежегодных производственных заданий, выполняемых судном.

Выбор типа судовой энергетической установки затруднён в тех случаях, когда варианты проектов судна, которые различаются типом установки, имеют близкие расчётные значения удельных приведённых затрат [6]. Подобные случаи встречаются довольно часто. В качестве примера можно привести ситуацию, возникшую при выборе типа энергетической установки для морских контейнеровозов большой вместимости.

В соответствии с изложенными выше методическими положениями были выполнены расчёты приведённых затрат на перевозку 1 т груза для вариантов контейнеровозов с различными типами энергетических установок в случае постоянных главных размерений и в случае фиксированной грузоподъёмности.

В первом из них были проработаны варианты трёх контейнеровозов, имеющих существенно разные значения скорости и мощности энергетической установки, что позволило проследить их влияние на выбор типа установки. В рассмотренных вариантах, отличающихся типом энергетической установки, были приняты одинаковыми не только главные размерения, но и скорость в предположении, что она определяется требованиями к скорости доставки груза на линии. Соответственно были постоянны коэффициент общей полноты и водоизмещение. При этом рассматривались следующие типы энергетических установок: малооборотная дизельная (МОД), среднеоборотная дизельная (СОД); паротурбинная для ЯЭУ (ПТУ с ЯЭУ), паротурбинная с промежуточным перегревом пара (ПТУП), газотурбинная промышленного типа (ГТУП), газотурбинная авиационного типа с теплоутилизационным контуром (ГТУ с ТУК).

В табл. 1 приведены основные технические характеристики рассмотренных вариантов. Исходя из этих характеристик выполнены расчёты приведённых затрат на перевозку 1 т груза при протяженности линии 6000 миль, характерной для транспортных связей со странами Америки и Юго-Восточной Азии или Арктические перевозки.

Таблица 1

**Основные характеристики контейнеровозов с различными типами энергетических установок при заданных значениях главных размеров и скорости**

Характеристика	Вариант контейнеровоза		
	1	2	3
Эксплуатационная скорость, уз	22	26	30
Эксплуатационная эффективная мощность энергетической установки, тыс. э. л. с.	23	63	90
То же в варианте с МОД, тыс. э. л. с.	24,8	68,1	97,3
Водоизмещение, тыс. т	31,7	59,2	51,5
Грузоподъёмность судна при различных типах энергетической установки, тыс. т:			
МОД	19,7	29,7	18,1
СОД	20,5	31,3	19,3
ПТУ с ЯЭУ	20,2	30,9	20,3
ПТУП	20,5	31,8	21,2
ГТУП	21,1 – 21,2	32,9 – 33,2	22,6 – 22,9
ГТУ с ТУК	21,2 – 21,3	33,5 – 33,8	23,2 – 23,6

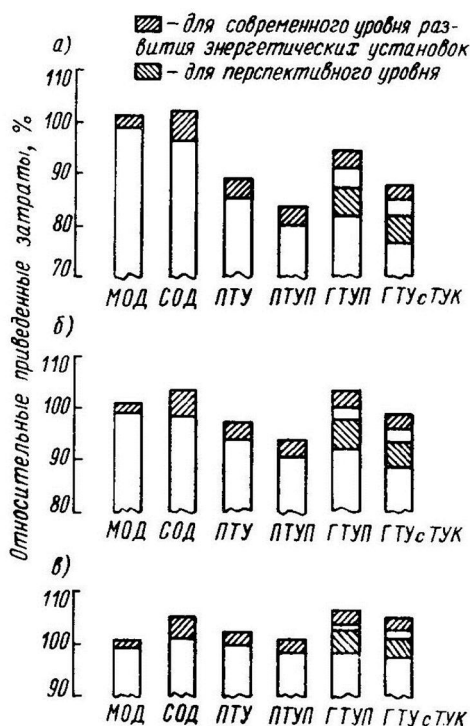


Рис. 1. Зависимость относительных приведенных затрат от типа энергетической установки для трёх вариантов проекта контейнеровоза: а – водоизмещение ( $D$ ) 51,5 тыс.т, скорость ( $v$ ) 30 уз; б –  $D = 59,2$  тыс.т,  $v = 26$  уз; в –  $D = 31,7$  тыс.т,  $v = 22$  уз. За 100% приняты средние приведенные затраты для судна с МОД.

В ходе расчётов удельный расход на все нужды МОД и СОД принят равным 155 г/(л. с. • ч), ПТУ – 200 – 210 г/(л. с. • ч), ПТУП – 175 – 185 г/(л. с. • ч) в зависимости от мощности, ГТУП – 194 (для современного уровня развития газотурбинных установок) и 160 – 170 г/(л. с. • ч) (для перспективного уровня), ГТУ с ТУК – 179 (для современного уровня) и 150 – 160 г/(л. с. • ч) (для перспективного).

Стоимость энергетических установок принята в пределах диапазонов, крайние значения которых отклоняются от среднего на  $\pm 5\%$  (МОД),  $\pm 10\%$  (ПТУ и ПТУП) и на  $\pm 15\%$  (СОД, ГТУП и ГТУ с ТУК). Результаты расчётов приведенных затрат в этом случае представлены на рис. 1.

При постоянном значении грузоподъёмности были рассмотрены варианты контейнеровоза вместимостью 1500 контейнеров длиной по 6,1 м, что с учётом недогрузки контейнеров соответствует грузоподъёмности около 25500 т.

Соотношения главных размерений контейнеровоза выбирались с учётом результатов работы [3].

Скорость судна в этом случае не задавалась, поэтому варианты с различными типами энергетических установок сопоставлены при значениях скорости, оптимальных для каждого типа установки. Ввиду трудоёмкости расчетов большого числа вариантов, отличающихся типом установки и скоростью контейнеровоза, они были выполнены на ЭВМ по методике и программам, описание которых приведено в работе [2]. Скорость судна варьировалась в пределах 14 – 30 уз.

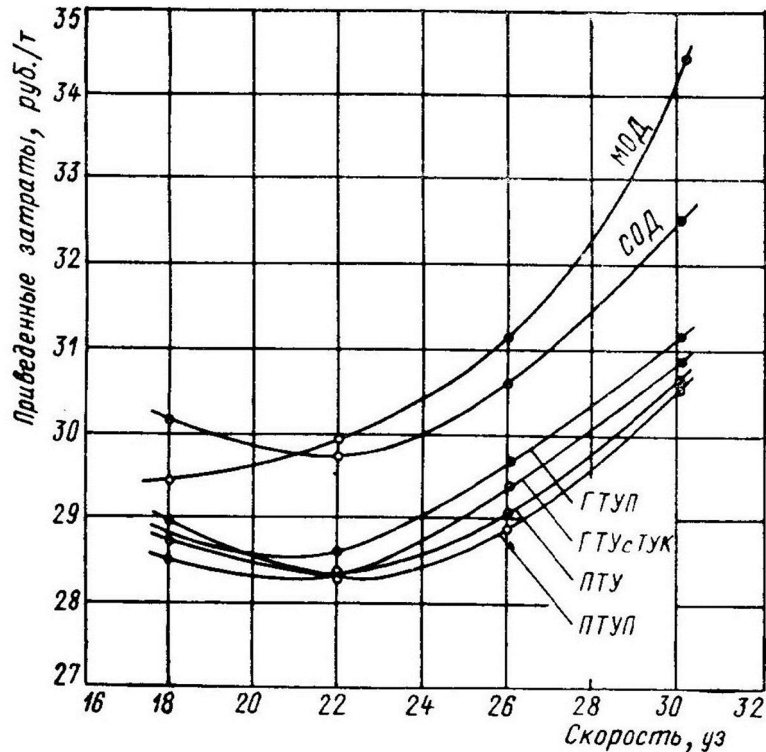


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат от скорости контейнеровоза

В табл. 2 приведены характеристики контейнеровоза грузоподъемностью 25 500 т при различных типах энергетических установок. Эти характеристики соответствуют скорости 22 уз, которая оказалась близка к оптимальной для всех типов установок, кроме МОД. Для МОД приведены также данные при оптимальной скорости 18 уз. Результаты расчетов приведенных затрат для контейнеровоза с заданной грузоподъемностью представлены на рис. 2. Из рис. 1 и 2 видно, что результаты расчетов для всех шести рассмотренных типов установок примерно одинаковы при мощности до 30 – 40 тыс. л. с., а при более высоких мощностях – для всех типов установок за исключением МОД и СОД. Это обстоятельство, а также наличие не поддающихся прогнозу отклонений фактических значений показателей от расчетных затрудняют в подобных случаях выбор типа энергетической установки.

Повышение степени достоверности технико-экономических расчетов при выборе типа энергетической установки возможно в процессе разработки конкретных проектов, когда уточняются исходные данные. Кроме того, выбор типа энергетической установки при проектировании определенного судна облегчается в тех случаях, когда ограничения габаритов и объемов машинно-котельных отделений несколько конкретизируют задачу. Тем не менее, и здесь бесспорный выбор может оказаться невозможным.

Таблица 2

**Основные характеристики контейнерова с различными типами энергетических установок при заданной грузоподъемности 25500 т**

Характеристика	Тип энергетической установки					
	МОД	СОД	ПТУ	ПТУП	ГТУП	СТУ с ТУК
Скорость, уз	18 22	22	22	22	22	22
Водоизмещение, тыс. т	45,3 52,8	49,8	53,0	51,5	50,7	49,9
Эксплуатационная эффективная мощность энергетической установки, тыс. э. л. с.	22,5 46,1	42,0	42,8	42,0	41,8	41,2
Масса энергетической установки, т	1540 3150	1810	1540	1750	1420	1140
Удельный расход топлива, г/(л.с. · ч)	161 153	155	207	179	194	179

В подобных случаях целесообразно использовать методы принятия решений в условиях неполной информации. Если имеется возможность получить вероятностное описание исходных данных (вид закона распределения или его основные характеристики), могут быть использованы стохастические модели [4]. Неполнота информации может быть учтена также путём многократного использования детерминированных моделей [5], причём этот способ применим и в условиях неопределённости, когда невозможно получить вероятностное описание исходных данных, и для них могут быть оценены лишь нижнее и верхнее значения. Наряду с математическими алгоритмами в процессе исследования широко используются опыт и интуиция специалистов.

Предлагаемая схема выбора типа судовой энергетической установки (рис. 3) предусматривает многократное решение детерминированной задачи определения наиболее эффективного типа установки для совокупности вариантов перспективных расчётных условий. Эта совокупность образуется путём варьирования исходных данных в пределах их возможных значений. Выбранные таким образом типы установок составляют зону неопределённости оптимальных решений. Для каждого из них по вариантам расчётных условий определяются значения экономического риска, характеризующие возможный ущерб в случае, если после выбора определённого типа установки из числа входящих в зону неопределённости окажется, что реализован не тот вариант расчётных условий, при котором данный тип установки наиболее эффективен.

При определении экономического риска может быть учтена возможность его уменьшения за счёт проведения в ходе поставок и эксплуатации установок комплекса мероприятий по корректировке принятого решения о типе установки с учётом реально складывающейся ситуации. К числу таких мероприятий относится прекращение в перспективе поставок установок данного типа и переход на установки другого типа, более эффективные в изменившихся условиях, модернизация их и т.д.

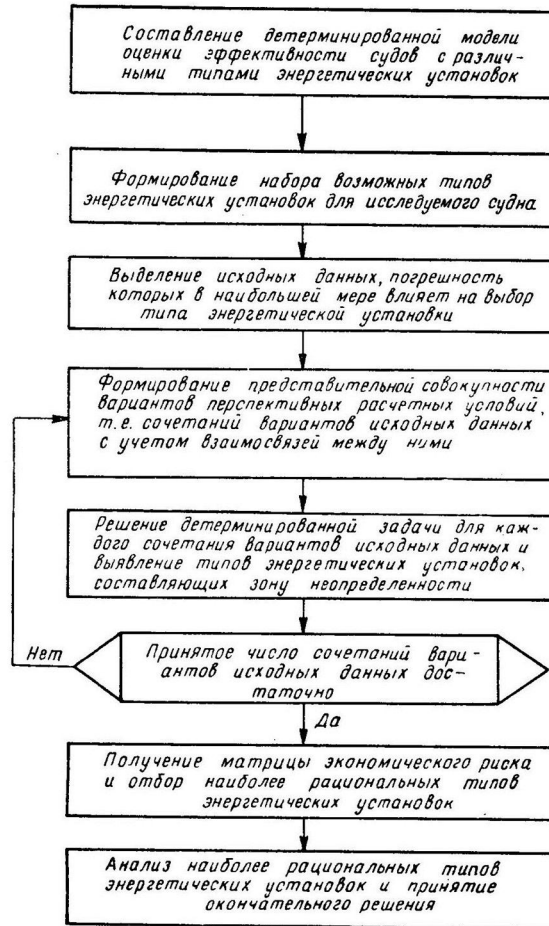


Рис. 3. Блок-схема выбора типа судовой энергетической установки в условиях неполной исходной информации

После того как получена матрица экономического риска, типы установок сопоставляются по критериям «минимум среднего риска», «минимум максимального риска» и др. На основании этого принимаются окончательные решения с учётом не отражённых в математической модели экономических факторов, а также соображений неэкономического характера.

### Заключение

Рассмотренные в настоящей статье методические положения и результаты расчётов позволяют сформулировать некоторые выводы общего характера.

1. Выбор типа судовой энергетической установки должен осуществляться либо в рамках оптимизации основных параметров судна, либо отдельно, но с учётом связей с этой задачей.

2. Различия в расчётных значениях экономических показателей судов с разными типами энергетических установок могут оказаться небольшими. Это обстоятельство, а также наличие непредвиденных отклонений реальных значений показателей от расчётных затрудняют в подобных случаях выбор типа установки.

3. Для более обоснованного выбора типа судовых энергетических установок целесообразно использовать методы принятия решений в условиях неполной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Горбачёв, В.А.** Типовые процедуры управления процессами прогнозирования функциональной эффективности технических средств / В.А. Горбачёв, Д.В. Быков, Г.В. Иванов, В.И. Ануфриев. // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2018). СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» – 2018.
2. **Мицевич, А.К.** Об эффективности морских судов, перевозящих грузы на поддонах, и контейнеровозов / А.К. Мицевич, Л.Н. Мучник – Труды Института комплексных транспортных проблем при Госплане СССР, 1973, вып. 39.
3. **Мучник Л.Н., Журилов В.И.** О комплексной технико-экономической оценке судна и энергетической установки с использованием обоснованных показателей / Л.Н. Мучник, В.И. Журилов – «Судостроение», 1965, № 9.
4. **Носенко В.М.** Выбор типа судовой энергетической установки морских транспортных судов с помощью ЭВМ / В.М. Носенко, В.П. Шаповаленко – Труды Николаевского кораблестроительного института, 1975, вып. 104.
5. **Панкратов, А.В.** Диагностирование состояния корабельных газотурбинных двигателей на основе их нейроинформационных моделей / А. В. Панкратов, А. Я. Лapidус, С. С. Коротков // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. – 2016. – № 92(376). – С. 183-194.
6. **Поляков, С.А.** Прогнозирование и нормирование затрат энергии / С.А. Поляков, А. Д. Ревин, Б. Г. Иванов, А. Я. Лapidус // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева, посвященной 90-летию профессора Р.З. Магарилы : Материалы конференции, Тюмень, 25–27 ноября 2021 года / Отв. редактор А.Н. Халин. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 435-438.

**D.V.Bykov, V.A.Gorbachev, G.V.Ivanov, V.A.Shulgan** (VMPI VUNC VMF «Naval Academy», Saint-Petersburg). **Methodological bases of management of forecasting characteristics of power plants of perspective ships and vessels.**

The article analyzes some approaches to the issue of choosing the type of ship power plant (SPP). It is shown that the choice of the type of SPP should be linked to the task of optimizing the main parameters of the vessel, primarily its speed and basic dimensions. A comparison of the values of economic indicators of ships with different types of power plants is given: low-speed diesel; medium-speed diesel; steam turbine for nuclear power plants; steam turbine with intermediate steam overheating; industrial-type gas turbine; aviation-type gas turbine with a heat recovery circuit. Problematic issues in the choice of SPP are identified.



Д.В. БЫКОВ, В.А. КОЛЕСНИК, В.И. АНУФРИЕВ, В.С. БАБИЧЕВ  
(Военный институт (военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ УСТРОЙСТВ ГАШЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА РАЗЛИЧНОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

*В статье рассмотрены исследования эксплуатационных характеристик защитных устройств от гидравлического удара. Проведённый сравнительный анализ показывает, что защитное устройство предлагаемой конструкции, при прочих равных условиях, обладает наибольшим быстродействием.*

Период с 2015 года и по настоящий момент на кафедре паровых турбин Военного института (военно-морского политехнического) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» проводятся исследования свойств устройства для гашения гидравлического удара в трубопроводных системах (УГГУ) [2]. Общий вид УГГУ и его геометрические характеристики представлены на рисунке 1.

Снижение ударного давления [4] обусловлено тем, что в устройстве плоская ударная волна, распространяющаяся по трубопроводу, преобразуется в камере гашения в сферическую, вследствие чего по пути распространения волнового фронта падает удельная энергия ударной волны и ударное давление. Наличие перфорированной мембраны вызывает диссипацию энергии при перетекании жидкости, являющемся следствием деформационного движения, через отверстия перфорации, которые препятствуют формированию отражённой ударной волны.

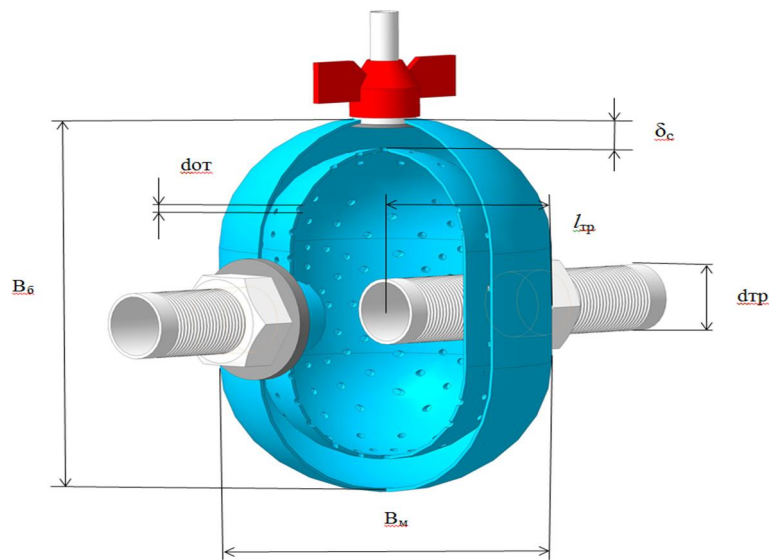


Рис. 1. Устройство для гашения гидравлического удара в трубопроводных системах

$B_б$  – большая полуось наружного корпуса,  $B_м$  – малая полуось наружного корпуса,  $d_тр$  – диаметр трубопровода,  $d_от$  – диаметр отверстий внутренней полости гасителя,  $l_тр$  – длина трубопровода во внутренней полости гасителя,  $\delta_с$  – расстояние между внутренним и наружным корпусами.

Для решения задачи строгого сравнения эффективности (в первую очередь, быстродействия) УГГУ с защитными устройствами других конструкции и принципа действия, была определена его передаточная функция непосредственно на экспериментальном стенде [5]. Расчёты производились на основании рекомендаций, изложенных в [6].

Управляющим воздействием УГГУ на трубопроводную систему является снижение давления  $P_1$  до давления  $P_2$  при прохождении ударной волны (т.е. возмущающего воздействия), обозначенное  $\Delta P$ . Тогда переходный процесс будет протекать как показано на рисунке 2.

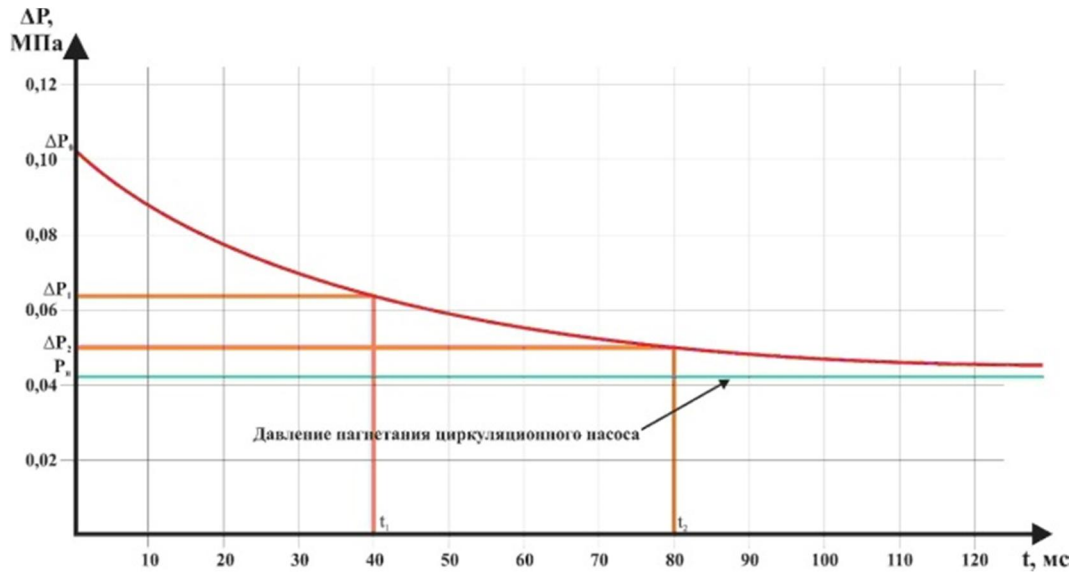


Рис. 2. Переходный процесс в УГГУ

Передаточная функция запишется в виде:

$$W_{\text{уггу}}(p) = K_{\text{уггу}} \frac{T_{1\text{уггу}} + 1}{T_{2\text{уггу}}p + 1} \quad (1)$$

Коэффициент усиления определяется на основании статической характеристики, т.е.:

$$K_{\text{уггу}} = c_{\text{уг}} \quad (2)$$

Постоянные времени:

$$T_{2\text{уггу}} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{\Delta P_1 - P_n}{\Delta P_2 - P_n}\right)} = \frac{0,08 - 0,04}{\ln\left(\frac{0,064 - 0,042}{0,051 - 0,042}\right)} = 0,048. \quad (3)$$

$$T_{1\text{уггу}} = \Delta P_0 \cdot T_{2\text{уггу}} = 0,105 \cdot 0,048 = 0,0047. \quad (4)$$

Таким образом, передаточная функция УГГУ будет зависеть от гасящего эффекта устройства и запишется в виде:

$$W_{\text{уггу}}(p) = \frac{1,048c_{\text{уг}}}{0,0047p + 1} \quad (5)$$

С точки зрения теории автоматического управления, гидравлическую систему можно представить, в частности, как регулятор давления перекачиваемой среды. Таким образом, пользуясь методами теории автоматического управления, можно сравнить быстродействие УГГУ и защитных устройств других типов (аккумулирующих и сбросных). Для данной задачи рассмотрим простейшую трубопроводную систему, схема которой показана на рисунке 3. На этой схеме между насосом и запорным органом (клапаном) разместим защитное устройство (ЗУ).

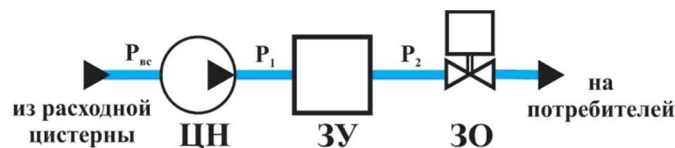


Рис. 3. Принципиальная гидравлическая схема трубопроводной системы

Исходя из представленной схемы, определим структуру САР поддержания давления.

Объект регулирования (ОР) – участок трубопровода на напоре насоса (т.к. на этом участке ударное давление будет максимальным).

Регулируемый параметр – давление в трубопроводе на напоре насоса ( $P_1$ ).

Регулирующий орган (РО) – в явном виде отсутствует, т.о., исходя из конструкции системы, им является циркуляционный насос (ЦН).

Отрицательной обратной связью рассмотренной САР является защитное устройство.

Запорный орган (ЗО) формирует возмущающее по отношению к объекту регулирования воздействие.

Полученная САР представлена на рисунке 4.

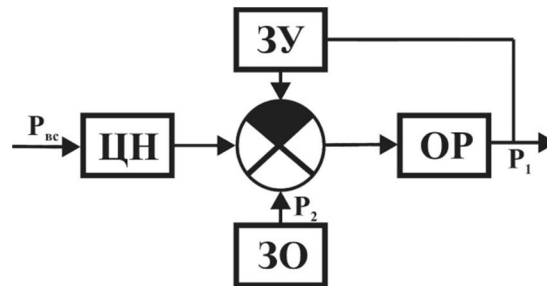


Рис. 4. Принципиальная гидравлическая схема трубопроводной системы

Определим конкретные значения коэффициентов по конкретным режимным и геометрическим характеристикам трубопроводной системы, которыми зададимся произвольно [1].

Циркуляционный насос:

Постоянную времени для насоса принимаем  $T_{цн} = 0,3$  сек. Коэффициент передачи насоса определяется в статическом режиме как отношение номинальной производительности насоса  $Q_n$  к номинальной скорости электродвигателя  $\omega_n$ . Номинальная производительность  $Q_n = 35$  м<sup>3</sup>/час, (0,56 м<sup>3</sup>/сек).  $\omega_n = 3000$  об/мин (311,48 рад/сек).

$$W_{цн} = \frac{k_{цн}}{T_{цн}p + 1} = \frac{0,0018}{0,3p + 1} \quad (6)$$

Трубопровод:

$t$  – постоянная запаздывания (время транспортировки):

$$t = \frac{L}{u} = \frac{25}{10,9} = 2,29с, \quad (7)$$

где  $L$  – длина трубопровода, м;

$u$  – скорость течения жидкости, м/с.

$$T_{тр} = t/2 = 1,15 с. \quad (8)$$

$$K_{тр} = \frac{P_{max}}{S_{max}} = \frac{2,5 \cdot 10^5}{1,96 \cdot 10^{-3}} = 1,27 \cdot 10^8 \quad (9)$$

$$W_{тр} = \frac{K_{тр}}{(T_{тр}p + 1)^2} = \frac{1,27 \cdot 10^8}{(1,15p + 1)^2} \quad (10)$$

Запорный орган (клапан с гидроприводом):

$T_{зо}$  – постоянная времени, берём как время открытия клапана при малом входном воздействии  $T = 0,05$  мин.

Коэффициент усиления клапана высчитывается следующим образом:

$$K_{зо} = K_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (11)$$

где  $K_v$  – коэффициент пропорциональности,  $K_v = 3,2 \cdot 10^{-4}$  с/м<sup>2</sup>;

$\Delta P = 4$  МПа – перепад на сервомоторе;

$\rho$  – плотность питательной воды, = 1009 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, коэффициент усиления запорного органа равен:

$$K_{30} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 10^6}{1000}} = 0,02 . \quad (12)$$

$$W_{30} = \frac{K_{30}}{T_{30} \cdot p + 1} = \frac{0,02}{0,05 \cdot p + 1} \quad (13)$$

Защитное устройство аккумулирующего типа (АЗУ) [3]:

Модуль упругости составляет  $G = 21000 \text{ кгс/см}^2$

Начальный объём воздуха под мембраной  $V = 5 \text{ см}^3$

Диаметр трубопровода, питающего гидроаккумулятор –  $d_{\text{отв}} = 25 \text{ см}$ .

Площади поперечного сечения отверстия:

$$S = \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 25^2}{4} = 4,906 \text{ см}^2 \quad (14)$$

$T_{\text{га}}$  – постоянная времени зависит от отношения скорости изменения объёма к скорости изменения давления жидкости, из опыта эксплуатации  $T_{\text{га}} = 0,15 \text{ мин}$ .

$$W_{\text{азу}} = \frac{G \cdot S}{v \cdot T_{\text{га}} \cdot p + 1} = \frac{103026}{0,75 \cdot p + 1} \quad (15)$$

Защитное устройство сбросного типа (СЗУ) [3]:

Передаточная функция определяется аналогично обычному запорному клапану, рассмотренному ранее. Однако отмечу, что наличие у современных устройств дополнительного управляющего клапана делает их интегрирующим звеном с запаздыванием.

Из анализа инструкций производителей, в среднем:

$T_{\text{ск}} = 0,03 \text{ мин}$ .

$\Delta P = 0,5 \text{ МПа}$  – перепад на сервомоторе.

$$K_{\text{ск}} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 10^5}{1000}} = 0,007 . \quad (16)$$

Передаточная функция запишется в виде:

$$W_{\text{сзу}} = \frac{K_{\text{ск}}}{p(T_{\text{ск}}p + 1)} = \frac{0,007}{p(0,03p + 1)} \quad (17)$$

Устройство гашения гидравлического удара (УГГУ):

Для расчётов примем коэффициент гашения  $c_{\text{уг}} = 2,6$ .

$$W_{\text{уггу}} = \frac{1,048 c_{\text{уг}}}{0,0047p + 1} = \frac{2,7}{0,0047p + 1} . \quad (18)$$

Сначала определим передаточную функцию разомкнутой САР.

Передаточная функция регулятора (ЦН):

$$W_{\text{рег}} = W_{\text{цн}} = \frac{0,0018}{0,3p + 1} \quad (19)$$

Передаточная функция объекта регулирования (ОР):

$$W_{\text{ор}} = W_{\text{тр}} W_{\text{зу}} \quad (20)$$

Передаточная функция возмущающего воздействия (ЗО):

$$W_{\text{з}} = W_{\text{тр}} W_{\text{зу}} W_{\text{зо}} = W_{\text{ор}} W_{\text{зо}} \quad (21)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой САР:

$$W_{\text{р}} = W_{\text{ор}} W_{\text{рег}} = W_{\text{ор}} W_{\text{цн}} \quad (22)$$

Теперь получим передаточную функцию замкнутой САР по возмущению:

$$W_{\text{з}} = \frac{W_{\text{з}}}{1 + W_{\text{р}}} \quad (23)$$

Так как различные типы защитных устройств (АЗУ, СЗУ, УГГУ) имеют не просто разные передаточные функции, а являются звеньями разных типов, передаточную функцию рассматриваемой САР требуется определять отдельно для каждого типа ЗУ с использованием уравнений (5 – 23).

После проведения преобразований и подстановок получим:

Для АЗУ:

$$W_3^{азу} = \frac{4,07p^4 + 5,01p^3 + 14,66p^2 + 8,81p + 2,63}{2,1p^8 + 4,4p^7 + 18,1p^6 + 25,9p^5 + 45,9p^4 + 41,1p^3 + 34,1p^2 + 13,8p + 3,4} \quad (24)$$

Для СЗУ:

$$W_3^{сзу} = \frac{2,4p^4 + 0,82p^3 + 6,7p^2 + 1,8p + 4,73}{1,8p^9 + 0,8p^8 + 9,9p^7 + 8,7p^6 + 17,7p^5 + 19,1p^4 + 13,7p^3 + 5,1p^2 + 1,1p} \quad (25)$$

Для УГГУ:

$$W_3^{уггу} = \frac{0,9p^4 + 0,28p^3 + 2,47p^2 + 1,77p + 0,68}{1,75p^8 + 0,63p^7 + 9,6p^6 + 8,3p^5 + 17,8p^4 + 18,5p^3 + 15,6p^2 + 6,4p + 1,62} \quad (26)$$

В соответствии с теорией Ляпунова, знаменатель уравнений (24, 25, 26) является характеристическим полиномом исследуемых САР. Произведём подстановку:  $P = j\omega$  и выделим действительные и мнимые части –  $U(\omega) + jV(\omega)$  знаменателей.

$$\begin{aligned} U^{азу}(\omega) &= 2,1\omega^8 + 18,1\omega^6 + 45,9\omega^4 + 34,1\omega^2 + 3,4 \\ V^{азу}(\omega) &= 4,4\omega^7 + 26,9\omega^5 + 41,1\omega^3 + 13,8\omega \\ U^{сзу}(\omega) &= 0,8\omega^8 + 8,7\omega^6 + 19,1\omega^4 + 5,1\omega^2 \\ V^{сзу}(\omega) &= 1,8\omega^9 + 9,9\omega^7 + 17,7\omega^5 + 13,7\omega^3 + 1,1\omega \\ U^{уггу}(\omega) &= 1,75\omega^8 + 9,6\omega^6 + 17,8\omega^4 + 15,6\omega^2 + 1,62 \\ V^{уггу}(\omega) &= 0,63\omega^7 + 8,3\omega^5 + 18,5\omega^3 + 6,4\omega \end{aligned} \quad (27)$$

Построим вещественную частотную характеристику (ВЧХ)  $P(\omega)$  каждой САР, которой является вещественная часть передаточной функции (соответственно, 24, 25, 26). Чтобы выделить действительную часть избавимся от мнимости в знаменателе, для этого умножим числитель и знаменатель на:  $U(\omega) + jV(\omega)$ . После произведения преобразований ВЧХ рассматриваемых САР примет вид:

$$P^{азу}(\omega) = \frac{4,07U^{азу}\omega^4 - 5,01V^{азу}\omega^3 - 14,66U^{азу}\omega^2 + 8,81V^{азу}\omega + 2,63U^{азу}}{U^2_{азу} + V^2_{азу}} \quad (28)$$

$$P^{сзу}(\omega) = \frac{2,4U^{сзу}\omega^4 - 0,82V^{сзу}\omega^3 - 6,7U^{сзу}\omega^2 + 1,8V^{сзу}\omega + 4,73U^{сзу}}{U^2_{сзу} + V^2_{сзу}} \quad (29)$$

$$P^{уггу}(\omega) = \frac{0,9U^{уггу}\omega^4 - 0,28V^{уггу}\omega^3 - 2,47U^{уггу}\omega^2 + 1,77V^{уггу}\omega + 0,68U^{уггу}}{U^2_{уггу} + V^2_{уггу}} \quad (30)$$

Известно, что вид полученной кривой (рис. 5) позволяет достоверно оценить качество переходного процесса без его непосредственного построения.

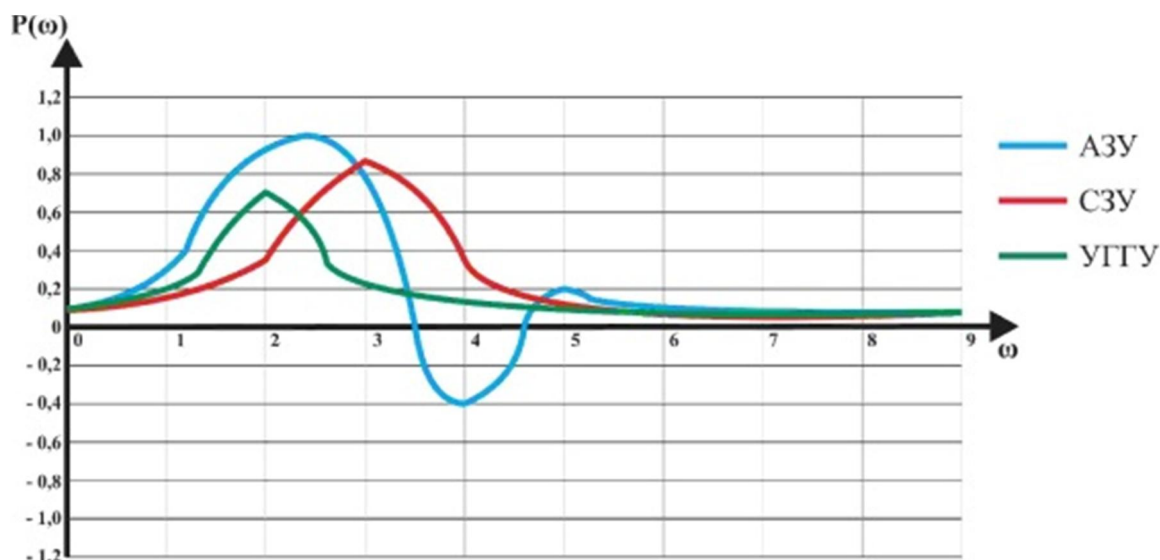


Рис. 5. Вещественные частотные характеристики рассматриваемых систем при применении различных типов защитных устройств

Как можно судить по полученным зависимостям, наибольшая длительность переходного процесса составляет 5-6 секунд для защитных устройств аккумулирующего типа, что является довольно большой величиной. Кроме того, АЗУ будут вызывать колебания давления в трубопроводе. СЗУ и УГГУ не проявляют перерегулирования, что является их достоинством. Время переходного процесса в АЗУ – около 4,5 секунд, у УГГУ – менее 3-х секунд.

### Выводы

Проведённый сравнительный анализ показывает, что УГГУ предлагаемой конструкции, при прочих равных условиях, обладает наибольшим быстродействием. Как представляется, быстродействие является самым важным критерием эффективности работы средств защиты трубопроводных систем от гидравлических ударов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Белов, Г.О.** Исследование процессов возбуждения и подавления пульсаций рабочей среды и гидродинамического шума в трубопроводных системах / Г.О. Белов, А.Н. Головин, А.Н. Крючков, Л.В. Родионов, Е.В. Шахматов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4. С. 178-184.
2. **Быков, Д.В.** Устройство для защиты трубопроводов от ударных скачков давления / Д.В. Быков, В.И. Ануфриев, И.Н. Черкашин, А.В. Смутнев Патент РФ № 2020119690, 08.06.2020.
3. **Головин А.Н., Шорин В.П.** Гасители колебаний для гидравлических систем. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2005. 168 с.
4. **Иванов, Б. Г.** Исследование влияния вибропоглощающего покрытия при импульсном воздействии / Б. Г. Иванов, В. Н. Гнездилов // Актуальные проблемы морской энергетики : Материалы девятой Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 20–21 февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный морской технический университет", 2020. – С. 497-500.
5. **Колесник, В.А.** Методы расчета и средства борьбы с гидроударом в корабельных гидравлических системах / В.А. Колесник, Д.В. Быков, В.И. Ануфриев // Морской вестник. – Санкт-Петербург: ООО Издательство «МорВест», 2020. – № 4 (76). – С. 52-56.
6. **Печорина И.М.** Расчёт систем автоматического управления. Справочное пособие. – Свердловск: Машгиз, 1962г.

**D.V.Bykov, V.A.Kolesnik, V.I.Anufriev, V.S.Babichev** (VMPI VUNC VMF «Naval Academy», Saint-Petersburg). **Investigation of transfer functions of hydraulic shock damping devices of various operating principles**

The article deals with the research of operational characteristics of protective devices against hydraulic shock. The comparative analysis shows that the protective device of the proposed design, all other things being equal, has the highest speed.

В.А.СВЕТЛИЧНЫЙ, К.И.КАЛИНИЧЕВ  
(ВВМИУ ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДИПОЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЗАДАЧАХ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Разработан новый метод численного расчета низкочастотного электромагнитного поля дипольных источников НЭМПК в трехслойной среде «атмосфера – морская среда – грунт дна» и созданы программы для ПЭВМ, предназначенные для расчета дистанционных зависимостей компонент электрического и магнитного поля источников. Выполнено исследование характеристик поля на низких частотах в мелком море. Проанализирована возможность обнаружения морских объектов системой датчиков, расположенных на морском дне в мелком море.*

Низкочастотное электромагнитное поле (НЭМП) относится к числу основных физических полей, по которым предусмотрены методы и средства защиты в процессе эксплуатации морских объектов. Особенностью НЭМПК, отличающей его от электрического и магнитного полей морских объектов, является такая характеристика как частотный спектр. Это, в совокупности с достаточно большим числом основных источников этого поля, излучающих на разных частотах, повышает его информативность и создает предпосылки для решения задачи классификации обнаруживаемых целей. Вместе с тем, из-за сильного затухания низкочастотных электромагнитных волн в морской среде, НЭМП локализовано в относительно небольшой области пространства вблизи морских объектов. Поэтому считается, что возможности использования НЭМП в минном оружии довольно ограничены, и оценки характеристик распространения поля различных источников зачастую выполняются по простым формулам для поля диполей в безграничной морской среде.

В последние годы опубликованы новые работы специалистов США и Китая по этому полю [1, 2]. В публикации [1] описан метод восстановления источников НЭМПК по данным измерения двумерного распределения поля на полигоне и его экспериментальная проверка. В работе [2] описаны эксперименты по обнаружению коммерческого судна на мелководье на дальностях до 1,5 км по его НЭМП, измеренному датчиками электрического и магнитного типа, размещенными у поверхности моря. Измерения поля проводились на частотах, соответствующих вальной частоте 1,8 Гц переменного тока в цепи гальванической пары «винт - корпус» и ее первых гармониках. В работе сделан вывод о состоятельности модели источника для гальванической пары «винт – корпус» в виде горизонтального электрического диполя (ГЭД) в рассматриваемой задаче. Несмотря на то, что датчики располагались непосредственно у морской поверхности, столь большие дальности обнаружения свидетельствуют о важной роли боковой волны, возбуждаемой погруженным источником и распространяющейся в прилегающей к поверхности моря области атмосферы с малым затуханием. Боковая волна подпитывает поле и в самой морской среде, поэтому вопрос о том, на каких глубинах можно обнаружить цель на столь низких частотах в условиях мелкого моря датчиками, размещенными на дне, особенно со слабо проводящим грунтом дна, является актуальным.

Учет вклада боковых волн в поле погруженных источников в мелком море представляет собой сложную в вычислительном плане задачу, хотя общее аналитическое решение для поля дипольных источников в слоистых средах хорошо известно [3]. Спецификой НЭМП является то обстоятельство, что поле необходимо рассчитывать, в том числе, и на малых расстояниях от источника (над и под ним). Это препятствует замене функции Ханкеля ее асимптотикой в интегральном представлении решения, что обычно используется в задачах СНЧ связи с погруженными объектами, и существенно усложняет численную процедуру расчетов на ЭВМ. В частном случае вертикального магнитного диполя (ВМД) в глубоком море удастся выделить вклад боковой волны в поле в аналитической форме и свести его к табличному интегралу, хотя получающиеся выражения для компонент электромагнитного поля весьма громоздки. Численная реализация этих формул, также встречает некоторые затруднения для достаточно больших горизонтальных расстояний от источника, связанные с потерей точности при



вычислениях комбинаций функций Бесселя комплексных аргументов. Для горизонтальных диполей и моря конечной глубины выделить вклады боковых волн в аналитической форме и вовсе не удастся. В результате исследований авторам данной работы удалось разработать численный метод для расчета электромагнитного поля вертикальных и горизонтальных диполей в мелком море вплоть до значительных расстояний от источника. Суть метода состоит в получении новых интегральных представлений для поля с последующим вычислением интегралов по квадратурным формулам высокого порядка (более 100). Поле горизонтального электрического диполя моделирует излучение переменных токов гальванической пары «винт – корпус», а магнитные диполи различной ориентации моделируют излучение вращающегося намагниченного вала и излучение электрооборудования корабля.

В данной работе представлены результаты расчета и анализа поля дипольных источников различной ориентации с учетом влияния смежных сред (атмосферы и грунта дна), полученные с помощью созданных программ для ПЭВМ на основе точного решения задачи о поле дипольных источников в трехслойной среде (атмосфера, морская среда глубиной  $h$ , грунт морского дна). Программы выполняют расчет всех шести компонент электромагнитного поля горизонтального электрического диполя (ГЭД), горизонтального магнитного диполя (ГМД) в морской среде  $E_r, E_\varphi, E_z, H_r, H_\varphi, H_z$  и трех компонент поля вертикального магнитного диполя (ВМД) в зависимости от горизонтальной дальности  $r$  в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  с осью  $z$ , направленной вертикально вниз. Для ГЭД и ГМД угол  $\varphi$  отсчитывается от направления вектора дипольного момента источника. Задаваемыми параметрами являются глубина расположения диполя  $z_0$ , м, глубина точки наблюдения  $z$ , м, глубина моря  $h$ , м, дипольные моменты источников  $M_0, A \cdot m^2$  - для магнитного диполя, токовый момент  $P_0, A \cdot m$  - для электрического диполя, частота поля  $\nu$ , Гц, проводимость морской среды  $\sigma$ , См/м. Проводимость грунта дна считается намного меньшей, чем проводимость морской среды. Результаты расчетов выводятся на печать в виде графиков дистанционных зависимостей уровней компонент магнитного и электрического поля, причем в случае ГЭД, ГМД для удобства анализа результатов на одном рисунке выводится сразу три графика для всех компонент магнитного или электрического поля, соответственно. Индекс  $i = r, \varphi, z$  нумерует компоненты полей. При необходимости можно распечатать массивы рассчитанных комплексных величин, их модулей или уровней.

Типичные результаты расчетов полей горизонтальных диполей в мелком море представлены на рисунках 1 – 2.

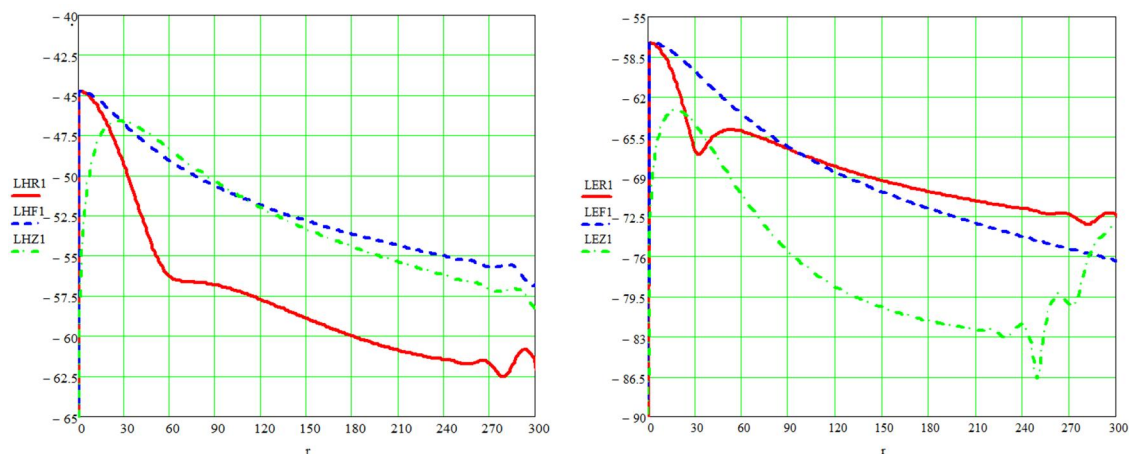


Рис. 1. Дистанционная зависимость уровней компонент магнитного (слева) и электрического поля (справа) ГЭД в мелком море

Анализ результатов расчетов и сравнение с тем частным случаем, когда вклад боковой волны выделяется в аналитической форме, позволяет сделать вывод о том, что в новом методе удается описать характерные особенности поля, обусловленные подпиткой поля в толще среды верхней и нижней боковыми волнами. Как видно из рисунков 1 и 2, на дистанционных

зависимостях уровней поля имеет место более медленное спадание уровня поля по мере роста горизонтального расстояния от источника, начиная с некоторых дальностей порядка 50 м.

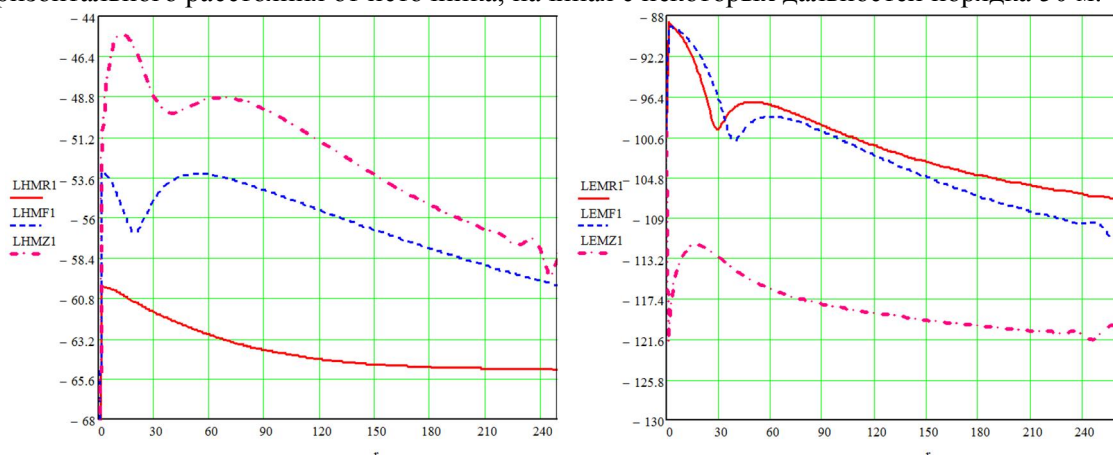


Рис. 2. Дистанционная зависимость уровней компонентов магнитного (слева) и электрического поля (справа) ГМД в мелком море

Известно, что амплитуда боковой волны убывает в непроводящей смежной среде по степенному закону, чем и объясняется изменение скорости снижения уровня поля с ростом расстояния в самой морской среде. Таким образом, перепад уровней поля в рассматриваемых интервалах изменения горизонтальной дальности оказывается существенно меньше, чем рассчитанный в приближении геометрической оптики, то есть без учета боковых волн.

Возможность обнаружения погруженных объектов, так же как и срабатывания неконтактных взрывателей мин по их НЭМП, зависит не только от характеристик затухания поля в морской среде. Она определяется также интенсивностью источника поля, уровнем помех от естественного электромагнитного поля Земли и чувствительностью приемной аппаратуры (датчиков). Считается, что в диапазоне очень низких частот эти помехи обладают большим радиусом корреляции, и их компенсация возможна в многоэлементных рубежных системах обнаружения целей по их НЭМП, имеющих протяженный характер, а возможности «точечных» датчиков по выделению сигнала из помех ограничены. Однако в упомянутых экспериментах [2] использовались весьма компактные датчики магнитного поля. Поэтому остается предполагать, что, возможно, предельно достижимая чувствительность снижается при нахождении датчика в морской среде из-за шунтирования его проводящей средой и влияния помех, обусловленных динамическим взаимодействием конструкции датчика с ней, в том числе электрохимическими процессами на обтекатель датчика. Малое затухание поля на низких частотах в мелком море создает предпосылки для обнаружения погруженных объектов по их низкочастотному электромагнитному излучению датчиками, расположенными на дне, а также использования этого излучения в неконтактных взрывателях мин при условиях достижения высокой чувствительности датчиков и возможности компенсации помех от естественного электромагнитного поля Земли.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **N.P. Valdivia, E.G. Williams, and H. Alqadah.** Holographic Imaging of Ship Sources from Silencing Range Signatures // 2015 NRL REVIEW, pp. 178 – 180.
2. **Wang J., Li B., Chen L., Li L.** A novel method for underwater moving targets by measuring their ELF emissions with inductive sensors // Sensors. 2017. V.17. P. 1734.
3. **Дмитриев Д.И., Федорова Э.А.** Численные исследования электромагнитных полей в слоистых средах // Вычислительные методы и программирование. М.: Изд-во МГУ. 1980. Вып.32. С. 150 – 183.

**V.A. Svetlichniy, K.I. Kalinichev** (Navy's Polytechnic Institute of Navy's MESC "Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov", St. Petersburg).  
**Application of the dipoles model source's in the tasks marine object's extremely low frequency electro-magnetic protection.**

This article is devoted to extremely low frequency (ELF) emissions calculation of marine targets. The ELF field source of the targets is modeled by an electric & magnetic dipoles.

Л.Б. ГУСЕВ, А.В. БЕЛОВ  
(ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург)  
А.А. ГОРШКОВ  
(ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург)

## УЧЕТ ОТКАЗОВ ПО ОБЩЕЙ ПРИЧИНЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОРАБЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

*Доклад раскрывает применение различных параметрических моделей отказов по общим причинам при проектировании сложных человеко-машинных систем, таких как корабельные ядерные энергетические установки, рассмотрение основных недостатков предлагаемых моделей и поиска путей выбора оптимальной модели для ВМФ.*

**Введение.** Корабельная ядерная энергетическая установка (КЯЭУ) представляет собой сложную человеко-машинную систему (ЧМС), характеризующуюся различными детерминированными и случайными зависимостями между её элементами. Одним из видов зависимостей являются отказы по общей причине (ООП). Для достижения высокого уровня надежности, живучести и безопасности используется резервирование как один из элементов проектирования КЯЭУ.

Так как ООП могут угрожать эффективности резервирования, то необходимы меры по защите от данных отказов. Предлагаемый доклад посвящен рассмотрению различных параметрических моделей учета ООП при проектировании сложных ЧМС и выбору предпочтений для использования в ВМФ при проектировании КЯЭУ.

ООП представляют собой зависимые отказы группы из нескольких элементов, происходящие одновременно или в течение короткого промежутка времени (т.е. почти одновременно), вследствие действия одной общей причины (например, резкое изменение климатических условий эксплуатации, затопление помещения, большой пожар и пр.). Зависимый отказ – это множественный отказ нескольких элементов системы, вероятность которого не может быть выражена просто как произведение вероятностей безусловных отказов отдельных элементов[1].

Совокупность характерных для КЯЭУ причин, которые могут привести к одновременному отказу сразу всей группы зарезервированных элементов, условно разделяют на несколько групп, представленных в Таблице 1 [2].

Таблица 1

Совокупность причин приводящих к одновременному отказу группы зарезервированных элементов	
Наименование группы отказов	Виды причины отказов
Физико-механические	– Ненормально высокая или низкая температура; – Ненормально высокое или низкое давление; – Механическое напряжение выше проектных пределов; – Вибрация; – Радиация; – Влажность; – Пыль.
Электрические	– Ненормально высокое напряжение; – Ненормально большой электрический ток; – Электромагнитные помехи.
Химические	– Коррозия; – Химические реакции.
Человеческие	– Ошибки при разработке или производстве; – Ошибки при выполнении испытаний/обслуживания/эксплуатации
Другие	– Подрыв боезапаса; – Пожары; – Затопление и др.

В практике проектирования сложных ЧМС, расчет вероятностей ООП осуществляется на основе одной из известных эмпирических параметрических моделей: модель греческих букв,

альфа-, бета-фактора, модель базового параметра, биномиальная модель и различные их вариации [1, 2, 3, 4].

Однако перед проектантом стоит резонный вопрос: «А какая модель предпочтительней?».

Специалисты сходятся во мнении, что параметрическая модель должна быть простой, универсальной, корректной, а также обеспечивать четкое определение параметров и совместимость с существующими источниками данных[2].

В рамках доклада авторы ограничиваются рассмотрением 3-х моделей: альфа-, бета-фактора и биномиальной моделью.

Одна из наиболее простых – модель бета-фактора, которая рассматривает либо единичные независимые отказы элементов группы, объединенные общей причиной (ООП-группы), либо одновременный отказ всех элементов ООП-группы. Согласно [2,5] данная модель является наиболее консервативной, что является ее большим недостатком и предполагает, что все элементы, включенные в группу ООП, отказывают по общей причине с вероятностью  $P_{ооп}$ , равной:

$$P_{ооп} = \beta \cdot P, \quad (1)$$

где  $\beta$  – вероятность отказа всех элементов в группе ООП при условии, что произошел отказ одного элемента;  $P$  – вероятность отказа одного элемента из группы ООП, полученная на основании опыта эксплуатации и статистики всех отказов элемента.

Соответственно вероятность независимого отказа  $P_n$  любого элемента в группе ООП вычисляется по формуле:

$$P_n = (1 - \beta) \cdot P. \quad (2)$$

При отсутствии специфических данных рекомендуется принимать значения  $\beta$  в диапазоне  $\beta \approx 0,07 - 0,1$ .

Авторы работ [2, 3, 4] считают, что пользоваться формулами (1), (2) возможно лишь при условии высокой надежности элементов. В тех же случаях, когда надежность элементов относительно невысока, следует использовать уточненные выражения:

$$P = P_n + P_{ооп} - P_n \cdot P_{ооп} \quad (3)$$

$$P_n = \frac{(1-\beta) \cdot P}{1-\beta \cdot P} \quad (4)$$

$$P_{ооп} = \frac{P - P_n}{1 - P_n} \quad (5)$$

$$P = \frac{P_n}{1 - \beta \cdot (1 - P_n)} \quad (6)$$

Математическое исследование модели бета-фактора учета ООП [1] показало, что увеличение параметров модели для различных структурных схем надежности (параллельной, последовательной и схеме типа мостик) необязательно приводит к увеличению их ненадежности. Однако, как известно с увеличением количества причин отказов элементов надежность всей системы должна снижаться, что требует осмысления и дальнейшего изучения данного вопроса.

В практике проектирования атомных станций предпочтение нашла параметрическая модель  $\alpha$  – фактора, которая учитывает частичные и полные отказы элементов группы ООП [5]:

$$P_k^{(m)} = \frac{m}{\binom{m}{k}} \cdot \frac{\alpha_k^{(m)}}{\alpha_T^{(m)}} \cdot P_T; \quad \alpha_T = \sum_{k=1}^m k \cdot \alpha_k^{(m)} \quad (7)$$

где  $\alpha_k$  – вероятность, что в событии ООП откажет ровно  $k$  из группы  $m$  элементов ( $\alpha$  – фактор);  $P_T$  – вероятность отказа одного элемента из группы ООП, полученная на основании опыта эксплуатации и статистики всех отказов элементов;  $\binom{m}{k}$  – число сочетаний элементов  $k$  из  $m$ .

При отсутствии специфических данных в [5] рекомендуется использовать табличные значения  $\alpha$  – факторов.

Также в [5] отмечено, что для групп ООП, вносящих значимый вклад в оценку показателей надежности системы, рекомендуется использование модели  $\alpha$  – фактора с реалистичными

значениями  $\alpha$  – факторов (то есть со значениями  $\alpha$  – факторов, учитываемыми, по возможности, имеющиеся специфические данные по надежности элементов). Вклад группы ООП в оценку показателей надежности системы полагается значимым, если показатель безотказности системы с учетом вероятности возникновения ООП элементов рассматриваемой группы отличается от показателя безотказности, рассчитанного в предположении невозможности ООП указанных элементов более чем на 10 %.

При проектировании КЯЭУ традиционно применяется биномиальная модель, которая описывает событие ООП как следствие воздействий, влияющих на отдельные элементы и систему в целом. Её популярность в ВМФ обусловлена возможностью учёта различной природы зависимых отказов (летальные и нелетальные шоки), а также отсутствием «жесткой» зависимости параметров модели от кратности резервирования.

Ниже представлены выражения для расчета биномиальной модели [6]:

$$P_n = P - k_1 \cdot q \cdot P - k_2 \cdot P \quad (8)$$

$$P_\mu = \frac{k_1}{1 - k_1 \cdot q - k_2} \cdot P \quad (9)$$

$$P_\omega = \frac{k_2}{1 - k_1 \cdot q - k_2} \cdot P \quad (10)$$

$$P = \frac{P_n}{1 - k_1 \cdot q - k_2} \quad (11)$$

где  $P$  – суммарная вероятность отказа каждого элемента, входящего в группу ООП, обусловленная как независимыми отказами, так и отказами по общей причине;  $P_n$  – вероятность независимых отказов;  $P_\mu$  – вероятность нелетальных шоков;  $q$  – условная вероятность отказа элемента при возникновении нелетального шока принимается равной 0,333;  $P_\omega$  – вероятность летального шока;  $k_1 = 0,405$ ;  $k_2 = 0,005$  – параметры биномиальной модели.

Основными недостатками биномиальной модели являются: параметры  $q$ ,  $k_1$  и  $k_2$  определяются экспертным путем, то есть отсутствие статистических оценок ее параметров и сложность обработки статистической информации для оценки, что вызывает привнесение дополнительного по сравнению с другими моделями субъективизма [3].

**Заключение.** Как следует из приведенных выше формул для расчета вероятностей множественных отказов в качестве исходных данных могут задаваться, как вероятности независимых отказов (без общей причины), так и вероятности отказов по всем причинам (и по независимым, и по общим), они достаточно легко пересчитываются друг в друга.

Учет ООП позволяет повысить обоснованность предлагаемых решений по защите КЯЭУ, обеспечивая в тоже время снижение излишнего консерватизма.

Требуется дополнительные исследования по снижению субъективизма биномиальной модели и поиску научно обоснованных ее параметров. Кроме того для КЯЭУ возможно потребуются разработка некой обобщенной модели ООП, которая бы учитывала преимущества и по возможности исключала недостатки существующих параметрических моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А.В., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Исследование модели учета отказов по общей причине бета-фактора // Надежность. 2019. №2. С. 9-17. DOI:10.21683/1729-2646-2019-19-2-9-17
2. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Парфентьев М.А. и др. Моделирование отказов по общей причине при проведении вероятностного анализа безопасности АЭС // Тяжелое машиностроение. 2008. №10, С. 2 - 5.
3. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Калинин А.А., Калинин А.И., Бухарин В.Х. Оценка защиты АЭС от отказов по общей причине // Атомная энергия, т. 114, вып. 6, июнь 2013
4. Петров С.А., Ершов Г.А., Калинин А.И., Калинин А.А. Учет отказов по общей причине при оценке надежности и безопасности корабельной техники // Морская радиоэлектроника, 2008. № 2(24), С. 56-62.

5. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии "Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций". РБ -100 -15. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 января 2015 г. N 26.

6. Отчет о верификации программы для ЭВМ БАРС «Безопасность и Анализ Риска Систем», версия 3.0. – СПб.: ОА «Атомэнергопроект», 2022. – 375 с.

**L. B. Gusev, A. V. Belov, A. A. Gorshkov** (Naval Polytechnic Institute, Naval Academy, Saint Petersburg). **Accounting for failures due to a common cause in the design of shipboard nuclear power plants.**

The report reveals the use of various parametric failure models for common reasons in the design of complex human-machine systems, such as shipboard nuclear power installations, consideration of the main disadvantages of the proposed models and the search for ways to choose the optimal model for the Navy.

И. К. БОРОДИН, К. С. КУЛАКОВ, В. В. ЗАЛЕТИН  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)

## УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ДВИГАТЕЛЯ КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В МНОГОФАЗНОЙ СРЕДЕ

*Доклад посвящён результатам численного моделирования взаимодействия движущегося корпуса морских аппаратов с окружающей средой. Предложен способ оценки акустического шума от движущегося подводного объекта. Выявлена существенная нелинейная зависимость силы сопротивления со стороны многофазной среды от скорости движения судна. Что является критически важным при проведении прочностных испытаний новых композитных материалов с анизотропными свойствами.*

**Введение.** На сегодняшний день актуальной задачей является управление морскими судами [1]. Первостепенную роль в управлении играет численное моделирование [2].

Важнейшей проблемой в управлении морскими системами является минимизация излучаемого шума. Уровень акустического фона зависит от множества факторов: размеров и формы подводной лодки, скорости и траектории движения, материала корпуса и вязкости окружающей среды [3].

Второй задачей управления, особенно касательно автономных морских систем, можно назвать получение точного управляющего сигнала. С помощью которого можно оптимизировать расход топлива, уменьшить потери ходового времени, снизить себестоимость перевозок

**О моделировании акустического шума подводных лодок.** Расчёт акустического поля подводной лодки предлагается производить в два этапа в двумерной постановке для уменьшения затрат оперативной памяти и сокращения расчетного времени. При этом решаемые уравнения и мультифизические связки при переходе к полноценной трехмерной постановке не изменятся.

В рамках первого шага, вычисляются характеристики гидродинамического потока в непосредственной близости от движущегося подводного объекта. Затем на втором шаге на его фоне решается акустическая задача.

Данная математическая модель опирается на уравнения (1-3).

$$\rho \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = f \quad (1)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\rho(u \cdot \nabla) * u + \rho \cdot \mu \cdot \Delta u - \nabla P + f \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho * c^2} \cdot \frac{d^2P}{dt^2} = \nabla \left( \frac{1}{\rho} (\nabla P) - \frac{\delta}{\rho * c^2} \cdot \frac{d(\nabla P)}{dt} \right) \quad (3)$$

Где  $f$  – объёмная сила со стороны подводной лодки, перемещающейся вдоль оси  $x$ ,  $u$  – поле скорости течения в среде плотностью  $\rho$ ,  $P$  – гидродинамическое давление, подставляемое в уравнение скалярной акустики с учётом коэффициента вязкостного затухания  $\delta$ , скорости звука  $c$  и кинематической вязкости среды  $\mu$ .

На рисунке 1 представлена геометрия расчётной области и задаваемая зависимость скорости подводной лодки от времени.



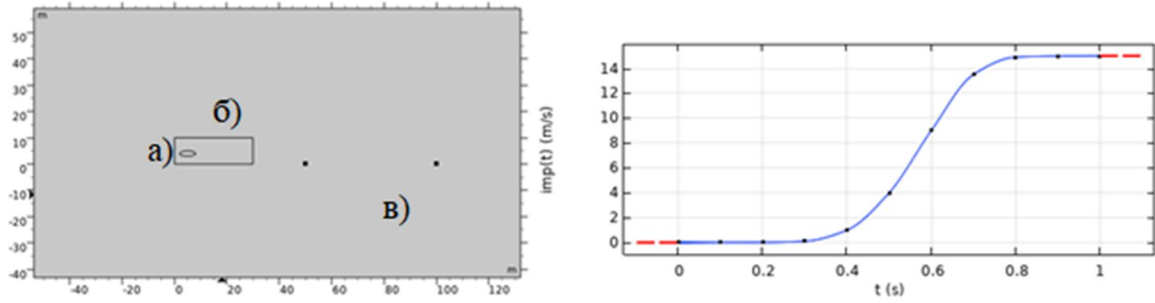


Рис. 1 – Двумерная постановка задачи, где справа – скорость подводной лодки, а слева – а) подводная лодка, б) область расчёта гидродинамического потока, в) область расчёта акустического поля с датчиками давления

На рисунке 2 представлены графики распределения поля скорости гидродинамического течения вследствие перемещения подводной лодки.

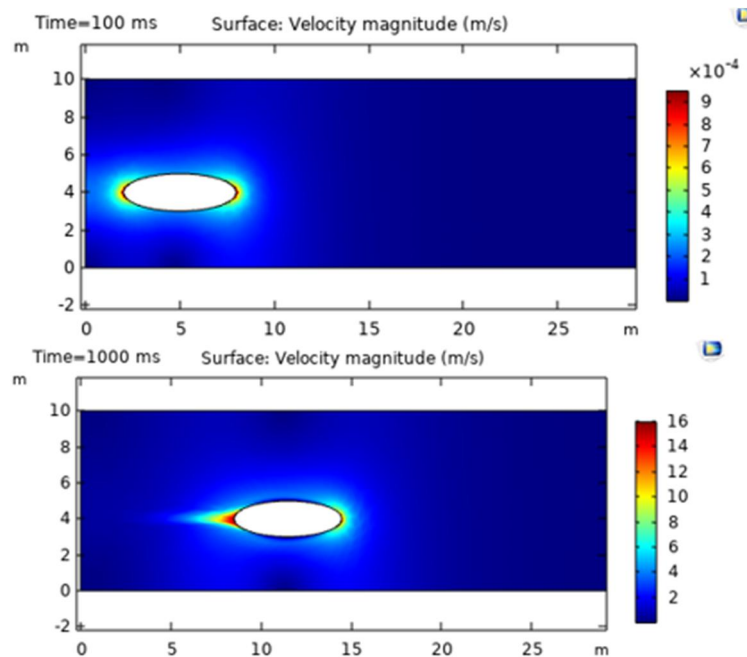


Рис. 2 – Распределение поля скорости жидкости в различные моменты времени 100 мс и 1000 мс от начала движения подводной лодки

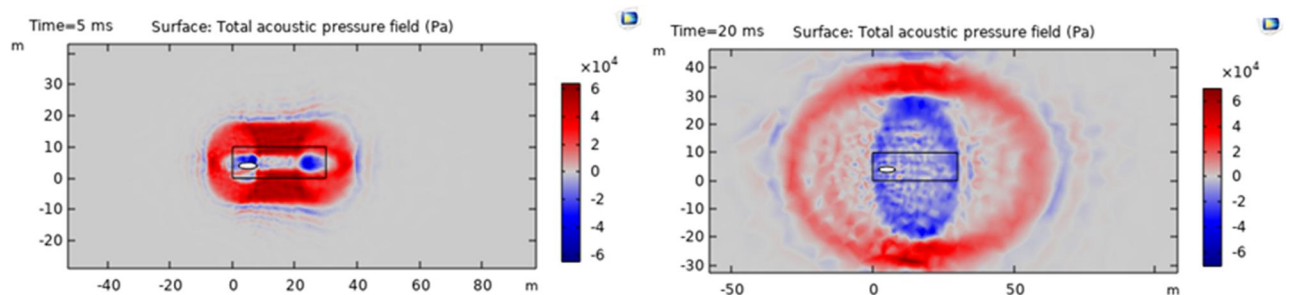


Рис.3 – Распределение поля акустического давления в ближней зоне

На рисунке 4 представлены данные с датчиков давления, расположенных на расстоянии 100 и 500 метров от движущейся подводной лодки.

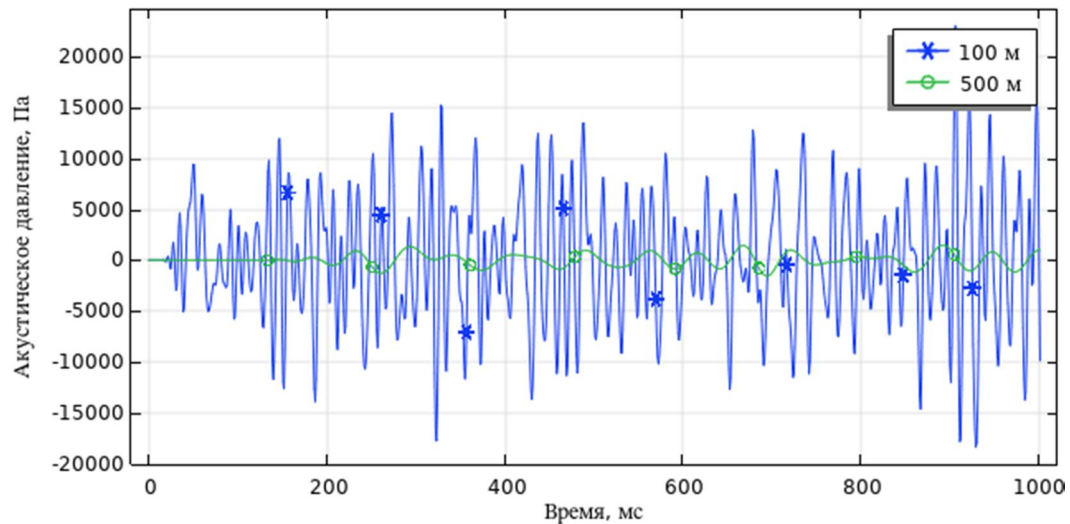


Рис.4 – Оциллограммы акустического давления в точках на расстоянии 100 и 500 метров

**О расчёте мощности двигателя корабля.** После определения подходящей функции скорости движения морского объекта целесообразно рассчитать управляющую функцию. Наиболее сложным видом движения является движение с учётом многокомпонентной среды. На рисунке 5 видно, что корабль в начале движения создает солитон, который изменяет межфазовую границу, что существенно нелинейно отражается на силе сопротивления  $F(t)$ .

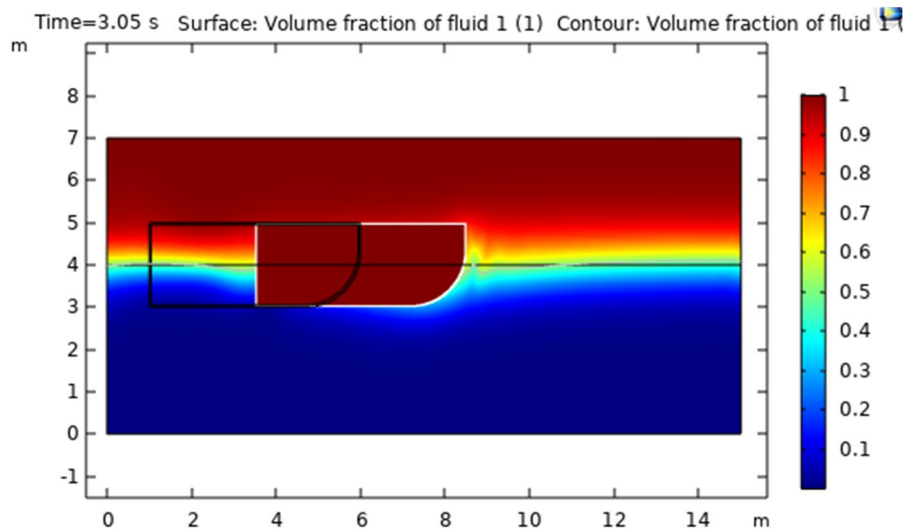


Рис.5 – Изменение межфазной границы (воздух – вода) в результате движения корабля

**Заключение.** Таким образом, определившись с оптимальной кинематической функцией  $v(t)$  и произведя расчёт динамики движения можно получить управляющую функцию мощности  $P(t)$ , подаваемую на двигатель различных морских систем (4).

$$P(t) = F(t) \cdot v(t) \quad (4)$$

Планируется продолжить исследования в этом направлении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Смоленцев С. В.** Моделирование движения судна на основе упрощенной кинематической модели, вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала с. о. макарова. - 2018. - №6(52).
2. **Белоцерковский О. М.** Математическое моделирование на суперкомпьютерах (опыт и тенденции), ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2000, том 40, номер 8
3. **Александров Ю. И., Гусев А. Н.** Боевые корабли мира на рубеже xx-xxi веков. часть i. подводные лодки. справочник, санкт-петербург, "галя-принт, 2000

**I. K. Borodin, K. S. Kulakov, V. V. Zaletin** (*NPO Spetsmaterialov, St. Petersburg*). **Power control of a ship engine based on the results of computer simulation of motion in a multiphase environment.**

The report is devoted to the results of numerical simulation of the interaction of the moving body of marine systems with the environment. A method for estimating acoustic noise from a moving underwater object is proposed. A significant non-linear dependence of the drag force from the side of a multiphase environment on the ship's speed is shown. What is critical when conducting strength tests of new composite materials with anisotropic properties

А.Н. ЮСУПОВ, Д.С. ПОПОВ  
(ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург)  
К.С. КУЛАКОВ, Е.И. ЯКУШЕНКО  
(НПО СМ, Санкт-Петербург)

## ИНТЕГРАЦИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМУ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОЕМ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

*Работа посвящена анализу, обобщению и внедрению современных риск-ориентированных технологий, в том числе собственного опыта в алгоритмы управления мультиагентной системой, в частности – роем беспилотных аппаратов.*

**Введение.** Основная цель работы – минимизировать влияние человеческого фактора при управлении роем беспилотных аппаратов. Для этого мы предлагаем собственную концепцию системы управления, базирующуюся на статистическом анализе взаимодействия агентов роа между собой и с внешней средой. Для анализа используются данные различной природы, характера, распределения: результаты экспериментов, наблюдений, компьютерного моделирования; априорные данные из различных источников и мнения экспертов.

Для максимально эффективного использования этих данных, для строгой формализации и описания предлагаемой концепции, для усовершенствования известных распределенных алгоритмов распознавания, управления, организации передачи данных мы предлагаем интегрировать ряд риск-ориентированных технологий, показавших высокую эффективность в наших работах.

**Концепция.** Оператор или система верхнего уровня указывают цель рою и устанавливают баланс между риском не выполнить поставленную задачу и риском потерять рою (совокупный риск). Риск в данном случае – это оценка вероятности наступления события, умноженная на оценку ущерба от его последствий. Если оценить ущерб невозможно, то оператор задает баланс между вероятностью потерять рою и вероятностью не выполнить задачу.

Для самого роа и для каждого агента определен набор требований безопасности. Нарушения этих требований приводят к возрастанию вероятности потерять рою и (или) не выполнить поставленную задачу. Термин «требования безопасности», методика структурирования и разработки этих требований, понятие «риск» и другие термины мы перенимаем из совокупности риск-ориентированных технологий, связанных, в частности, с проблемами производственной безопасности и создания систем принятия решений в чрезвычайных ситуациях [1].

Нарушение требований безопасности мы связываем с термином «фактор безопасности». Фактор безопасности – это численная оценка – условная функция частоты (УФЧ) [2], определяющая как часто нарушалось конкретное требование безопасности агента в текущих условиях.

Совокупность всех факторов безопасности может быть отображена в факторное пространство, где состояние агентов и самого роа могут быть однозначно представлены соответствующим набором чисел (вектором) – факторным состоянием. В настоящий момент исследуется гипотеза, что и агенты, и рою (возможно, что и агенты внешней среды и противоположной стороны) функционируют в едином факторном пространстве.

Очевидно, что между факторами безопасности агентов и факторами безопасности роа существует статистическая взаимосвязь. Например, попытка уйти от столкновения с препятствием одного агента может опосредовано вызвать незапланированное движение всего роа с опасными последствиями. При этом, агент может нести критически полезную нагрузку. И таких конфликтов – бесчисленное множество.

Для описания взаимовлияния факторов безопасности агентов и роа мы ввели термин «тензор факторов безопасности». Это трехмерная таблица (куб) чисел, который показывает, как изменение фактора безопасности одного агента влияет на остальные собственные факторы безопасности агента и на факторы других агентов, а также, совокупно – на факторы безопасности роа.

Тензор факторов безопасности совместно с факторным состоянием агентов и роя (все вместе – факторные показатели) представляет все многообразие взаимодействий в доступную для статистического и экспертного описания (и, соответственно- алгоритмического) форму: действие агента – следствие для него и для соседей – последствие для роя – изменение совокупного риска.

Внешняя система управления и бортовая автоматика агентов на основе факторных показателей выбирает оптимальный набор действий (паттернов: «смена позиции», «атака» и др.) и переводит рой в состояние, соответствующие минимуму совокупного риска.

**Оценка факторов безопасности по экспериментальным данным.** Способ обобщения экспериментальных данных искусственной нейронной сетью (ИНС) был применен в оценке риска развития сердечно-сосудистых заболеваний по биомедицинским данным [3]. В этой работе статистическая взаимосвязь событий с данными наблюдений выражалась нейросетевой аппроксимацией УФЧ [4].

Известны еще два метода аппроксимации УФЧ: «метод N ближайших соседей» (Дуда, Харт, 1974) и «модель Фишера». Метод Дуда-Харта содержит самоочевидную интерпретация результата – именно он в нашей работе рассматривается как «физический смысл» всех числовых величин (как часто происходило исследуемое событие, среди N известных наблюдений, «схожих» по обстановке с заданной), а «модель Фишера» имеет строгое математическое обоснование. В нашей работе [5] было показано, что ИНС деформирует облако экспериментальных данных (как правило – произвольного характера и распределения) в пространство, подчиняющееся требованиям модели Фишера; последний нейрон (который и есть модель Фишера в нейросети прямого распространения) воспроизводит искомую УФЧ.

**Оценка факторов безопасности по данным компьютерного моделирования.** В сфере управления робототехническими манипуляционными системами мы использовали имитационные модели, которые в настоящее время обозначаются более точным термином - «цифровой двойник». В частности, мы применяем цифровые двойники для эволюционного поиска «опасных» состояний. Подобные состояния в нелинейной динамике называют «странный аттрактор» - замкнутая последовательность событий, которая с некоторой вероятностью приводит, например, к аварии. Результат этой технологии также описывается условной функцией частоты, но «исследуемым событием» является нарушения “требований безопасности” цифрового двойника при многократных вычислительных экспериментах.

**Интеграция системы с экспертным мнением.** Значительная часть технологических аспектов функционирования роя имеют весьма приближенное описание. Поэтому, для формализации влияния сложных, малоизученных, вариативных факторов на поведение роя мы применяем методы нечеткой логики, аналогично тому, как она была адаптирована к проблемам безопасности. Таким образом, концепция управления роем дополняется еще одним источником информации - заключениями экспертов, которые также выражаются в условной функции частоты «нарушений требований безопасности».

**Интеграция риск-ориентированных технологий в бортовые системы агента.** Каждый агент роя имеет бортовые системы, которые позволяют ему самостоятельно участвовать в передаче данных, поддерживать заданный курс, выполнять групповые маневры и операции, адекватно реагировать на потерю связи и на другие нештатные и аварийные ситуации. Очевидно, что самостоятельные решения агента и их последствия напрямую связаны с совокупным риском и должны подчиняться единой концепции его минимизации. Для этого мы планируем адаптировать к задаче управления роем следующих технологии:

- самоорганизация многоканальных гетерогенных сетей передачи данных, позволяющих оперативно приспосабливаться к текущей обстановке за счет децентрализованной, гибкой и динамичной структуры, способной «обходить» физические или искусственные «препятствия» в радиозфире и передавать информацию с использованием маломощного радиосигнала [6] или других сред передачи данных;

- система целеуказания и ориентации на базе технического зрения с реконструкцией трехмерных объектов [7];

- синтез устойчивых систем телеуправления в условиях существенной задержки информации (на базе подходов телеуправления в экстремальной робототехнике [8]).

**Заключение.** Таким образом, в нашем распоряжении имеется целый ряд риск-ориентированных технологий с успешным опытом применения, которые могут быть эффективно интегрированы в систему управления роем с единой концепцией- каждый элемент роя и каждая бортовая подсистема агента работают на единую цель – минимизацию совокупного риска. Вопрос же выбора оптимального баланса между риском потерять рой и риском не выполнить задачу мы оставляем за рамками данной работы в силу его сугубой специфичности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ибадулаев В.А.** Современные тенденции совершенствования риск-ориентированных технологий обеспечения безопасности потенциально опасных объектов // Труды 18 Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», СПб.: - 2015 т.2, С. 116-120.
2. **Бикел, П.** Математическая статистика / П. Бикел, К. Доксам; пер. с англ. Ю.А. Данилова; [предисл. Ю.Н. Тюрина]. — М.: Финансы и статистика, 1983. — Вып. 1. — 278 с.: ил. — (Математико-статистические методы за рубежом).
3. **Юсупов А.Н.** Оценка активности атеросклеротических процессов с применением математического аппарата искусственных нейронных сетей у работников нефтеперерабатывающего предприятия / А.Н. Юсупов, П.В. Бовтюшко // Вестник Российской Военно-медицинской академии. - 2011. - № 3 (35). - С. 141-145.
4. **Юсупов А.Н.** Регуляризация метода Лавенберга-Маркварта при обучении искусственных нейронных сетей прямого распространения / А.Н. Юсупов, П.В. Бовтюшко // Актуальные проблемы защиты безопасности. Военно-морской флот России. Труды XIV научно-практической конференции. Том 4. - С. 283 - 292.
5. **Юсупов А.Н.** Нейросетевая аппроксимация условной функции частоты // Нейрокомпьютеры. - 2015. - №8. С.
6. **Кошелев П.Е.** Применение системы технического зрения, реконструирующей трехмерную форму объектов космической техники / П. Е. Кошелев, А. А. Юев, Ю. В. Коноплев и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022 Т. 23, № 1 С. 8–20. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-8-20.
7. **Спирков А.** Практические подходы к развитию технологии Mesh-сетей [Электронный ресурс]. 2017. Дата обновления: 16.02.2017. URL: <https://astrosoft.ru/articles/embedded-software/prakticheskie-podkhody-k-razvitiyu-tekhnologii-mesh-setey/>
8. **Спасский, Б. А.** Телеуправление в экстремальной робототехнике / Б. А. Спасский // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 101-111. – DOI: 10.31776/RTCJ.8202. – Текст: непосредственный

**A.N. Yusupov, D.S. Popov** (CNII RTK, St. Petersburg), **K.S. Kulakov, I. Yakushenko** (NPO SM, St. Petersburg). **Integration of risk-oriented technologies into the system of intelligent management of a swarm of unmanned vehicles.**

The work is devoted to the analysis, generalization and implementation of modern risk-based technologies, including our own experience in the control algorithms of a multi-agent system, in particular, a swarm of unmanned vehicles.

М.В. СИЛЬНИКОВ, В.И. ЛАЗОРКИН  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)

## **МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА И ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ БАЗИРОВАНИЯ, ТЫЛОВОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ КОРАБЛЕЙ**

*В статье излагается методический подход к обоснованию поэтапного развития комплекса объектов базирования, тылового и технического обеспечения соединения кораблей по критерию боевой устойчивости соединения на начальных этапах обоснования. Решение задачи оптимизации состава и характеристик объектов производится с учётом поступления новых кораблей в состав соединения, развёртывания новых объектов на морском театре военных действий (МТВД), потерь кораблей и материальных запасов в результате воздействия противника, применения средств активной защиты и инженерных мероприятий по обеспечению живучести объектов.*

Система «соединение кораблей – объекты базирования, тылового и технического обеспечения» является сложной многоуровневой системой с переменной структурой [1]. В дальнейшем для краткости будем называть объекты базирования, тылового и технического обеспечения – «объекты обеспечения соединения (ООС)».

С точки зрения взаимодействия с кораблями соединения ООС можно подразделить на две группы:

**объекты базирования кораблей (ОБК), расположенные на побережье у уреза воды, в которых осуществляется восстановление боеспособности, боеготовности и технической готовности кораблей;**

**объекты хранения запасов (ОХЗ) материальных средств, расположенные в глубине территории.**

Функциональные возможности ОБК целесообразно характеризовать в терминах количества боеспособных и боеготовых кораблей, сохранившихся в объектах в условиях воздействия противника, и обеспеченных всеми видами запасов материальных средств, функциональные возможности ОХЗ – в терминах количества сохранившихся в условиях воздействия противника запасов материальных средств в расчётно-снабженческих единицах (РСЕ), которыми могут быть обеспечены корабли в требуемых объёмах.

**Под РСЕ понимается количество материальных средств, установленное для исчисления потребности и обеспеченности кораблей в различных видах снабжения и определения норм расхода [2].**

РСЕ исчисляются: по боеприпасам – в боевых комплектах, по горючему – в заправках (заправка – количество горючего, установленное на одну единицу боевой техники), по продовольствию – в суточных дачах, по запасным частям, инструментам и некоторым другим видам имущества – в комплектах, по другим видам снабжения – в штуках, весовых и объёмных единицах.

Одним из основных требований к системе «соединение кораблей – ООС» является обеспечение боевой устойчивости базирующегося соединения кораблей, под которой понимается способность соединения сохранить боеспособность и свои боевые возможности для гарантированного выполнения поставленных боевых задач при активном противодействии противника [3]. Важнейшая роль в выполнении этого требования принадлежит ООС.

**Главная задача обоснования ООС, обеспечивающих требуемый уровень боевой устойчивости соединения кораблей – сбалансирование состава и характеристик ОБК и ОХЗ.**

В целях обоснования состава и характеристик ООС система «соединение кораблей-объекты обеспечения соединения» должна быть представлена в формализованном виде.

Основой формализации движения кораблей в системе являются циклы их использования в мирное и военное время [4]. Это даёт основание формализовать комплекс береговых объектов как замкнутую сетевую систему массового обслуживания (СМО) [5].

Блок-схема алгоритма оптимизации состава и характеристик объектов обеспечения соединения кораблей приведена на рисунке 1.

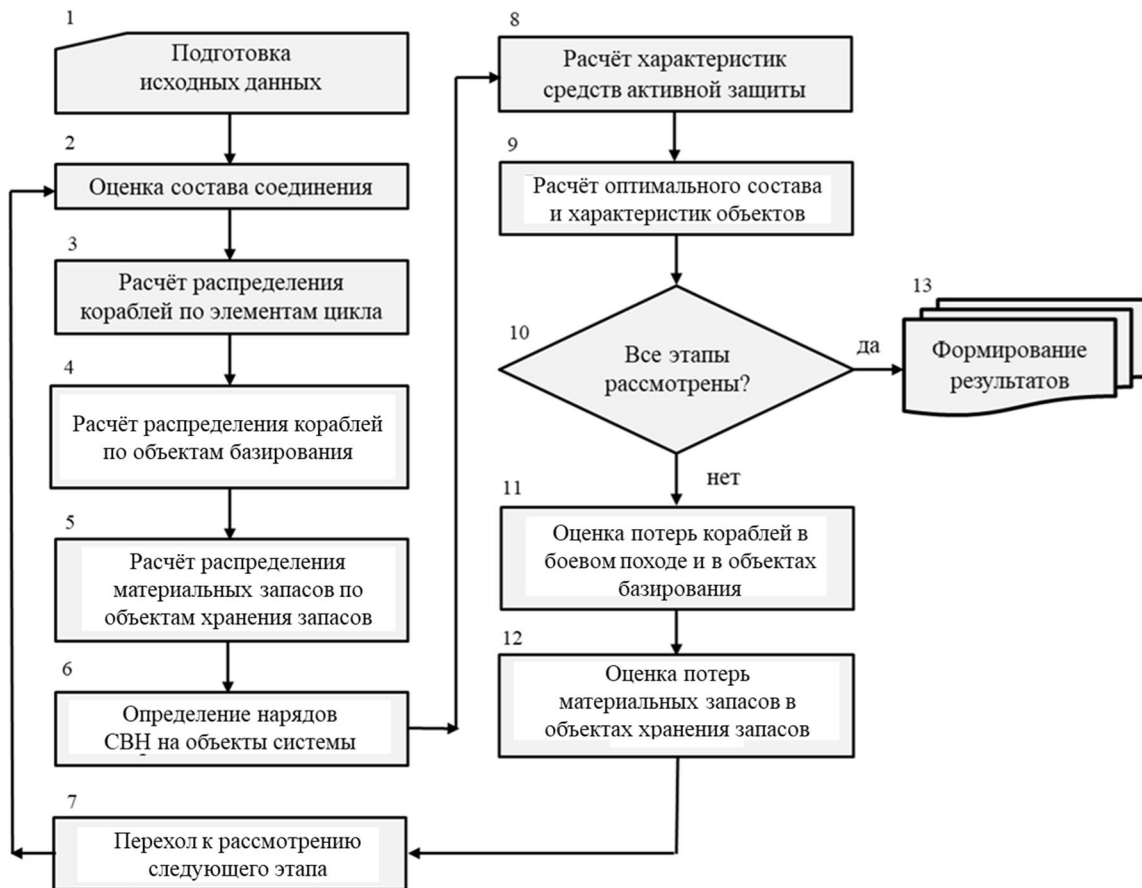


Рис.1 – Блок-схема алгоритма оптимизации состава и характеристик объектов обеспечения соединения кораблей

Задача оптимизации состава и характеристик объектов базирования, тылового и технического обеспечения соединения кораблей представляет собой чрезвычайно сложную задачу не только вследствие большой размерности системы, сложности взаимосвязей между элементами и изменчивости структуры в различные периоды функционирования системы, но, главным образом, из-за наличия большого количества факторов неопределённости, особенно на начальных этапах обоснования системы. Именно на этих этапах зарождается облик будущей системы, её основные военно-экономические показатели, определяются необходимые затраты ресурсов на её создание (развитие). Ошибки при обосновании объектов обеспечения соединения может в дальнейшем привести к серьёзному снижению боевой устойчивости корабельных сил и необоснованным затратам ресурсов. Поэтому процесс обоснования такого рода систем носит многоэтапный характер с последовательным уточнением необходимых исходных данных и уменьшением роли факторов неопределённости.

Основное назначение предлагаемой модели – обоснование требований к комплексу объектов базирования, тылового и технического обеспечения соединения кораблей в ходе решения задачи оптимизации состава и характеристик объектов на начальных этапах обоснования создания (развития) комплекса. Естественно, что на последующих этапах обоснования комплекса требуется применение математического аппарата, более адекватно отражающего структурные и функциональные особенности объектов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегическое применение военно-морского флота (военно-морских сил). Сайт: [https://war\\_peace\\_terms.academic.ru/](https://war_peace_terms.academic.ru/)
2. Расчётно-снабженческая единица. Справочник по терминологии в оборонной сфере. Сайт: <https://dictionary.mil.ru/folder/123103/item/129296/>.
3. Боевая устойчивость // Военный энциклопедический словарь / Гл. ред. А.П. Горкин. – Москва: Большая Российская энциклопедия, 2001. Т.1. С. 194.
4. Цикличность и нормы эксплуатации кораблей. Сайт: [https://studwood.ru/2131269/tehnika/tsiklichnost\\_normy\\_ekspluatatsii\\_korabley](https://studwood.ru/2131269/tehnika/tsiklichnost_normy_ekspluatatsii_korabley).
5. **Назаров А.А., Терпугов А.Ф.** Теория массового обслуживания: учебное пособие. – 2-е изд., испр. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 228 с.

**M.V.Silnikov, V.I.Lazorkin** (JSC «Scientific-Production Association of Special Materials», St. Petersburg). **Model for optimization of composition and characteristics of objects of basing, logistics and technical support of ships.**

The article presents a methodical approach to the justification of stage-by-stage development of the complex of basing, logistics and technical support facilities of the warships on the criterion of the warships' combat stability at the initial stages of justification.

The task of optimizing the composition and characteristics of facilities is carried out taking into account the entry of new ships in the compound, the deployment of new facilities in a naval theater of war (NTW), losses of ships and material reserves as a result of enemy action, the use of active protection and engineering measures to ensure the survivability of objects.

С.Н. ВАСИЛЬЕВ, А.А. ГАЛЯЕВ  
(ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)  
В. В. ЗАЛЕТИН, К.С. КУЛАКОВ  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)  
О.А. САВИЦКИЙ  
(АО АКИН, Москва)  
М.В. СИЛЬНИКОВ, Е. И. ЯКУШЕНКО  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ГЕОСРЕДЫ**

*В работе рассматриваются вопросы формирования периодических импульсных гидроакустических сигналов, в результате электрогидравлического эффекта, для решения задачи зондирования донных структур.*

### **Введение.**

Геологическая среда характеризуется высокой степенью неоднородности, и, как следствие, сильным поглощением упругих волн, растущим с повышением несущей частоты зондирующих импульсов. Формирование поля зондирующих сигналов, способных проникать в геосреду и одновременно обеспечивать высокую разрешающую способность является сложной инженерно-технической задачей.

Для решения этой задачи предлагается использовать мехатронную систему, в состав которой входит малогабаритный излучатель импульсного типа, работающий на электрогидравлическом эффекте (эффект Юткина) и генерирующий периодическую последовательность гидроакустических импульсов.

### **Подводный малогабаритный излучатель.**

#### ***Электрогидравлический эффект.***

Несмотря на широкое использование в хозяйственной жизни [1] и давнюю историю изучения этого физического явления, не все его детали до сих пор в достаточной степени уточнены. Причиной этого можно считать относительную сложность этого быстроразвивающегося динамического нелинейного процесса, который, в определенной степени, имеет также случайный характер [2].

Рассматриваемое явление можно разделить на два процесса: инициализация разряда и последующее образование, и колебания пузыря.

Разряд инициализируется посредством подключения конденсатора, заряженного на высокое напряжение, обкладки которого подключены к электродам, погруженным в жидкость. Электрическое поле между двумя электродами приводит к электрическому пробоем жидкости и образованию проводящего плазменного канала. В результате протекания высоких импульсных токов через канал, плазма нагревается, и канал расширяется, преобразуясь в пульсирующий пузырь.

Эти два процесса, электрический разряд и последующие колебания пузыря, взаимосвязаны, и зависимость пульсации полости от параметров разряда может представлять особый интерес для исследований.

Электроразрядные источники импульсных давлений, как и взрывные, характеризуются высокой плотностью энергии, которая в данном случае образуется в локальном объеме канала разряда в результате внешнего электрического поля. Быстрое расширение канала за счет высокого давления и температуры, сопровождающееся формированием ударного гидродинамического поля в жидкости и позволяет классифицировать этот процесс как электровзрыв. Сам процесс преобразования электрической энергии в механическую, и все многообразие физических явлений его сопровождающих, описывается термином "электровзрывное преобразование энергии".

Взрывное выделение энергии в конденсированной среде (вода в первом приближении считается несжимаемой жидкостью) позволяет наиболее полно использовать энергию взрыва (электровзрыва) для механического воздействия (разрушения) [3]. Для

подводного электровзрыва характерны отсутствие разлета осколков и значительно ослабленная воздушной ударной волн. Последний факт связан со значительной разницей акустических сопротивлений сред:  $\rho_{\text{вод}}c_{\text{вод}}$  много больше  $\rho_{\text{возд}}c_{\text{возд}}$ .

Излученная энергия может быть найдена интегрированием потока энергии через поверхность, охватывающую сферу[4]:

$$W_{\text{ак}} = 4\pi r^2 \int_0^\infty \frac{(p-p_0)^2}{\rho c_0} dt \quad (1)$$

где:  $p$  - давление в канале разряда;  $p_0$  - давление окружающей среды;  $\rho$  - плотность окружающей среды;  $c_0$  - скорость звука в среде.

Если принять, что акустическая энергия, излученная в волне в воде и воздухе, имеет одно и тоже значение, то величины давлений будут различаться как:

$$\frac{p_{\text{вод}}}{p_{\text{возд}}} \sim \sqrt{\frac{\rho_{\text{вод}}c_{\text{вод}}}{\rho_{\text{возд}}c_{\text{возд}}}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot 1000}{331 \cdot 1.225}} \sim 60 \quad (2)$$

Таким образом акустическое возмущение в воде и воздухе при обладании одинаковой энергии будут различаться в 60 раз. Вместе с тем, для создания волн давления с большой амплитудой в воздухе требуется больше энергии, чем в воде. Данный эффект применительно к подводному взрыву химического ВВ [5] в литературе называют гидравлическим взрыванием, а применительно к подводному электрическому разряду электрогидравлическим эффектом (ЭГ-эффект). Так, для создания ударной волны (УВ) в воздухе с одним и тем же давлением во фронте подводной УВ, в воздухе надо затратить в  $10^4$  раз больше энергии, чем в воде. В этом, собственно, и состоит физическая суть ЭГ – эффекта.

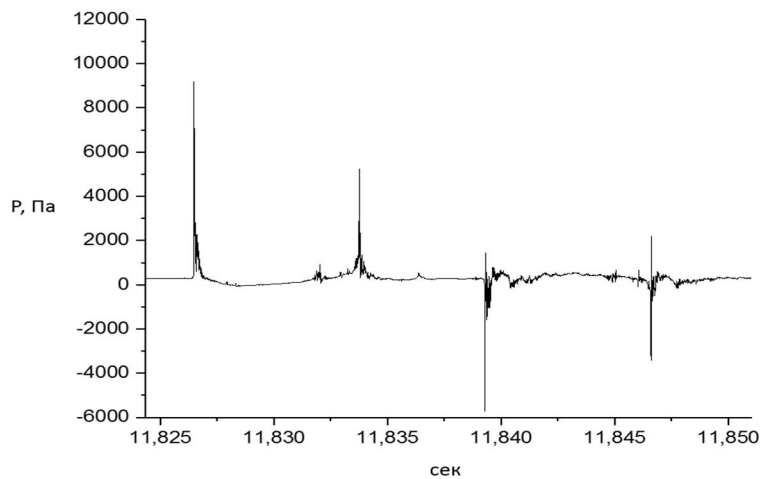


Рис.1 – Оциллограмма уровня давления, формируемого подводным электровзрывом мощностью 2 кДж на расстоянии 50 метров.

Частотный диапазон подводного электровзрыва составляет от единиц герц до десятков килогерц (рис.2)

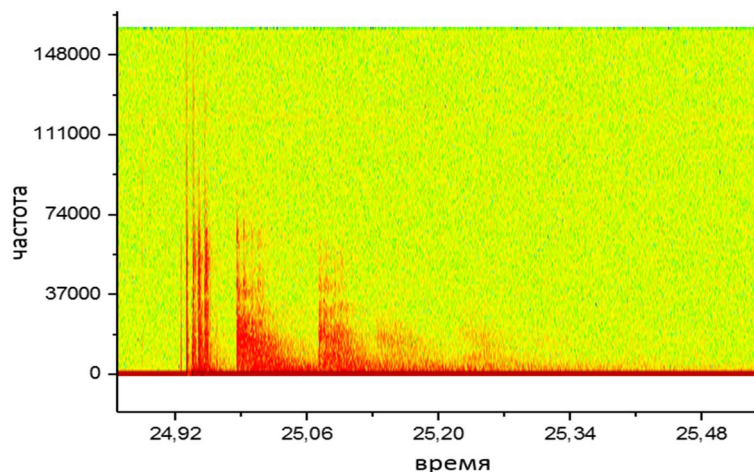


Рис. 2 – Спектр подводного электровзрыва мощностью 2 кДж

**Генерация периодических импульсных сигналов.**

В НПО СПЕЦМАТЕРИАЛОВ разработан и испытан в натуральных условиях мехатронный модуль управления параметрами высоковольтных разрядов, при работе которого генерировалась последовательность гидроакустических импульсов с заданными параметрами (рис.3).

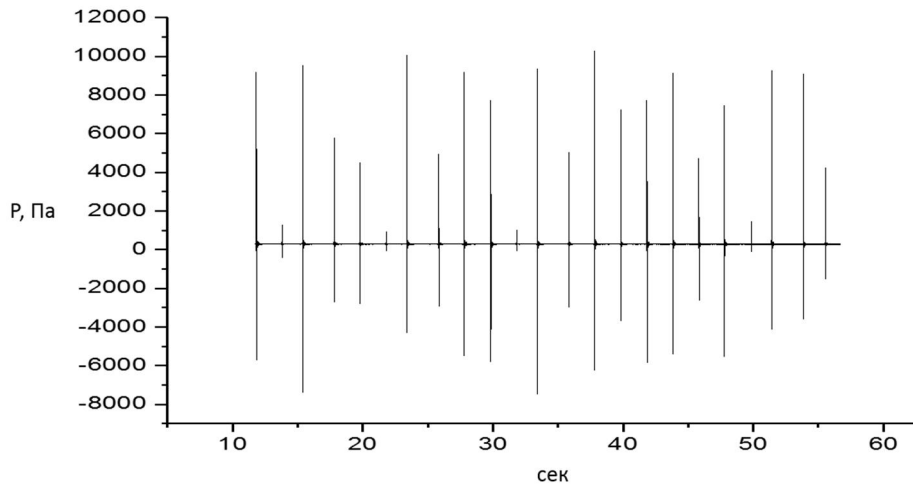


Рис. 3 – Периодическая последовательность гидроакустических импульсов сформированных энергетической установкой с накопленной энергией 2 кДж на расстоянии 50 метров

**Заключение.** Таким образом, разработанный НПО СПЕЦМАТЕРИАЛОВ мехатронный модуль управления параметрами высоковольтных разрядов, в максимальной степени удовлетворяет решению задачи повышения эффективности сейсмоакустического зондирования геологической среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности Л., Машиностроение 1986 253с, ил.
2. Лаврентьев Э.В., Кузян О.И. Взрывы в море. Л.: Судостроение, 1977-157 с
3. Яковлева Б.Е., Масляников В.А. Взрыв под водой. М.: Военное издательство МО, 1963
4. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва. Н.: Издательство сибирского отделения РАН, 2000
5. Николаевский В.Н. Подводные и подземные взрывы. М.: Мир, 1974

**Vassilyev S.N., Galyaev A.A.** (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow), **Zaletin V.V., Kulakov K.S.** (JSC «Scientific-Production Association of Special Materials», St. Petersburg), **Savitsky O.A.** (JSC "Acoustic Institute named after Academician A.N. Andreyeva ", Moscow), **Silnikov M.V., Yakushenko E.I.** (JSC «Scientific-Production Association of Special Materials», St. Petersburg). **Application of the electrohydraulic effect for the formation of periodic pulsed hydroacoustic signals for sensing the geo-environment.**

The paper deals with the formation of periodic pulsed hydroacoustic signals, as a result of the electrohydrovlic effect, to solve the problem of sounding bottom structures.

С.Н. Васильев, А.А. Галяев  
(ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва),  
В. В. Залетин, К.С. Кулаков  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург),  
О.А.Савицкий  
(АО АКИН, Москва),  
М.В. Сильников, Е. И. Якушенко  
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)

## СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДОННЫХ СТРУКТУР

*В работе рассматриваются вопросы группового применения подводных мехатронных систем, использующих явление электровзрыва для формирования зондирующего сигнала, и решающих групповую задачу зондирования геосреды.*

**Введение.** Сейсмоакустическое зондирование является наиболее эффективным методом исследования донных структур на глубины до нескольких километров. При этом, как известно, геологическая среда характеризуется высокой степенью неоднородности, и, как следствие, сильным поглощением упругих волн, растущим с повышением частоты зондирующих импульсов. Поэтому, характерные частоты зондирования находятся в диапазоне от единиц до нескольких десятков Герц.

Формирование поля зондирующих сигналов, способных проникать в геосреду и одновременно обеспечивать высокую разрешающую способность является сложной инженерно-технической задачей.

Для реализации когерентного источника направленного излучения требуется активная антенная решетка протяженностью сотни метров, что технически нереализуемо. Одновременно, традиционные способы генерации зондирующих сигналов (пневмопушки, электродинамические и т.д) позволяют формировать одиночные импульсы, энергия которых распределена в широком частотном диапазоне. При этом доля энергии в НЧ диапазоне незначительна.

Таким образом, для эффективного сейсмоакустического зондирования донных структур необходимо сконцентрировать энергию зондирующего поля в заданном низкочастотном диапазоне.

Для решения этой задачи предлагается использовать группу подводных мехатронных систем, в состав каждой входит малогабаритный излучатель импульсного типа. Формирование заданного низкочастотного гидроакустического поля происходит за счет когерентного сложения гидроакустических полей, сформированных каждой из мехатронных систем.

При этом, должно быть обеспечено достаточно точное взаимное позиционирование мехатронных систем в пространстве и синхронизация их работы во времени.

### **Подводная мехатронная система.**

**Электрогидравлический эффект.** Для решения задач импульсного излучения в максимально степени удовлетворяет высоковольтный электрический разряд в водной среде (электровзрыв) [1]. При этом, давление во фронте ударной волны достигает до  $10^8$  Па, температура до  $40\ 000^\circ\text{C}$ . [2], интегральный уровень звукового давления на расстоянии 50 метров - 175 дБ. На рис.1 представлена осциллограмма уровня подводного шума, сформированного электровзрывом мощностью 2 кДж на расстоянии 50 метров.

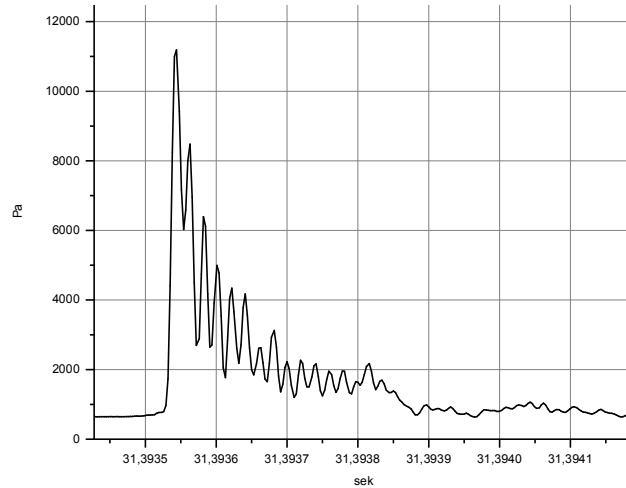


Рис.1. Осциллограмма уровня давления, формируемого подводным электровзрывом мощностью 2 кДж.

Частотный диапазон подводного электровзрыва составляет от единиц герц до десятков килогерц (рис.2)

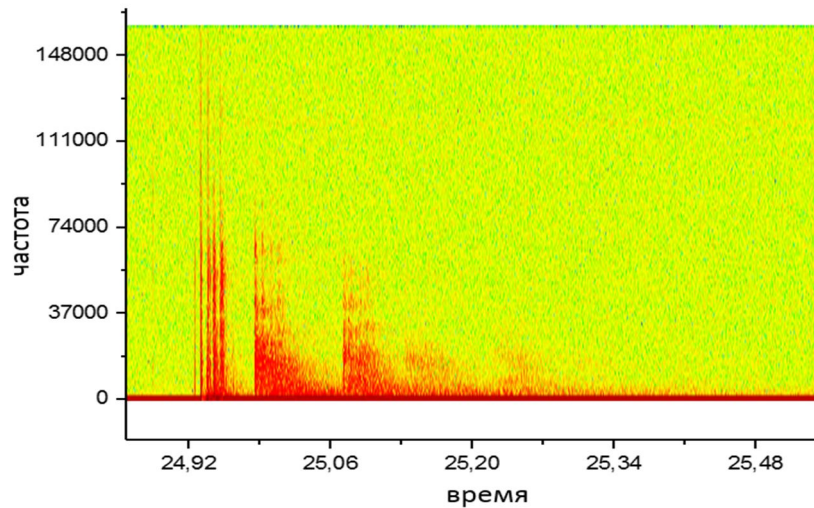


Рис.2. Спектр подводного электровзрыва мощностью 2 кДж.

**Групповое применение подводных мехатронных систем.** При решении задачи сейсмоакустического зондирования группой ПМПУ необходимо как взаимное позиционирование каждого элемента группы, так и привязка всей группы к глобальной системе координат. Позиционирование каждого элемента группы осуществляется методом запрос-ответ относительно центра подвижной системы координат (ПСК), связанной с одним из элементов группы. Для этого на каждом элементе группы сформирована измерительная база из двух звукоприемников, расположенных вдоль оси мехатронной системы и удаленных друг от друга на расстояние  $l_0$ . При этом дистанция  $r_i$  от центра ПСК до  $i$ -го элемента в первом приближении определяется как

$$r_i = \frac{c}{2}(t_i - \delta t), \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в воде,  $t_i$  – задержка между запросом и ответом  $i$ -го элемента группы, фиксируемая первым приемником,  $\delta t$  – аппаратная задержка между моментами приема запроса и ответом.

Пеленг на  $i$ -й элемент группы вычисляется по формуле

$$\cos\theta_i = \frac{l_0}{c} \cdot \frac{1 + \left(\frac{c}{l_0}\right)^2 (t_i - t'_i)(t_i - \delta t)}{t_i - \delta t}, \quad (2)$$

где  $t'_i$  – задержка между запросом и ответом  $i$ -го элемента группы, фиксируемая вторым приемником.

Привязка к глобальной системе географических координат может быть осуществлена, например, методом длинной базы с использованием пингеров и транспондеров, размещенных на донной поверхности.

На основании полученной информации вырабатываются команды по параметрам генерации электровзрывов и режимам движения каждого ПМПУ.

По сути, это одноранговая самоорганизующаяся сеть, характерной особенностью которой является способность агентов к коллективному поведению при решении общей целевой задачи и взаимодействующих между собой для решения этой задачи [6].

**Заключение.** Таким образом, в работе предложен подход к решению задачи повышения эффективности сейсмоакустического зондирования геологической среды на основе совместного применения подводных мехатронных устройств, использующих явление электровзрыва для формирования зондирующего сигнала и решающих групповую задачу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев Э.В., Кузян О.И., Взрывы в море. Л.: Судостроение, 1977-157 с.
2. Юткин Л.А., Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности Л., Машиностроение 1986 253с, ил.
3. Kalyaev I.A., Dognat' i peregnat'. O gonke superkomp'terov v mire. Nauchnaya Rossiya. Scientificrussia.ru, 03 may 2021.
4. Galyaev A.A., Lysenko P.V., Yahno V.P., 2D Optimal Trajectory Planning Problem in Threat Environment for UUV with Non-Uniform Radiation Pattern // Sensors. 2021. Volume 21, Issue 2. С. 396 [https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/396/review\\_report](https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/396/review_report).
5. Galyaev A.A., Lysenko P.V., Yahno V.P., Algorithm for Optimal Two-Link Trajectory Planning in Evasion from Detection Problem of Mobile Vehicle with Non-Uniform Radiation Pattern // Advances in Systems Science and Applications. 2021. 21(2). С. 71-82 <https://ijassa.ipu.ru>
6. Леонов А.В., Экспериментальная оценка возможности использования алгоритма муравьиной колонии AntHocNet для решения задачи маршрутизации в FANET. Научно-технические ведомости СПбГПУ, Том 10, № 1, 2017 Информатика. Телекоммуникации. Управление

**Vassilyev S.N., Galyaev A.A.** (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow), **Zaletin V.V.,**

**Kulakov K.S.** (JSC «Scientific-Production Association of Special Materials», St. Petersburg), **Savitsky O.A.** (JSC «Acoustic Institute named after Academician A.N. Andreyeva», Moscow), **Silnikov M.V., Yakushenko E.I.** (JSC «Scientific-Production Association of Special Materials», St. Petersburg). **Joint use of underwater mechatronic systems to increase the efficiency of seismoacoustic sounding of bottom structures.**

The paper discusses the issues of group application of underwater mechatronic systems that use the phenomena of electric explosion to form a probing signal, and solve the group problem of sounding the geological environment.