

# РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 623, 534.8, 517.977

DOI: 10.17587/mau.23.197-208

**С. Н. Васильев**, акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, [vassilyev\\_sn@mail.ru](mailto:vassilyev_sn@mail.ru),

**А. А. Галеев**, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, [galaev@ipu.ru](mailto:galaev@ipu.ru),

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,

**В. В. Залетин**, канд. техн. наук, [vzaletin@mail.ru](mailto:vzaletin@mail.ru), **К. С. Кулаков**, канд. техн. наук, [kulakov@pro-sm.ru](mailto:kulakov@pro-sm.ru),

**М. В. Сильников**, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, [director@pro-sm.ru](mailto:director@pro-sm.ru),

**Е. И. Якушенко**, акад. РАН, д-р техн. наук, [ukushenko@pro-sm.ru](mailto:ukushenko@pro-sm.ru),

НПО "Специальных материалов", г. Санкт-Петербург

## Совместное использование мехатронных систем для организации эффективного противодействия координированному действию торпед противника

Рассмотрена задача группового применения множественных источников широкополосных шумов высокой интенсивности, действующих в различных точках пространства в течение заданного времени и создающих возможность защищаемому объекту совершить маневр уклонения. Рассмотрены способы образования помех на основе электровзрыва. Предложено в качестве подобных источников использовать мехатронные устройства гидроакустического противодействия, способные двигаться в водной среде и создавать широкополосную помеху заданной интенсивности. Совместное применение мехатронных устройств для защиты морского подвижного объекта (цели) определяет суть задачи управления. Рассмотрен модельный пример применения мехатронных устройств в заданном сценарии.

**Ключевые слова:** электровзрыв, мехатронные устройства гидроакустического противодействия, групповое управление, система самонаведения

### Введение

Ядерное оружие, как это определено в обновленной Военной доктрине Российской Федерации, утвержденной Президентом России В. В. Путиным 25 декабря 2014 г., "будет оставаться важным фактором предотвращения ядерных военных конфликтов и военных конфликтов с применением обычных средств поражения (крупномасштабной войны, региональной войны)" [1, ст. 16]. Исходя из этого посыла можно отметить, что одной из основных задач Российской Федерации по сдерживанию и предотвращению военных конфликтов является "поддержание потенциала ядерного сдерживания на достаточном уровне" [1, ст. 21].

Морские силы ядерного сдерживания формируют большую часть потенциала глубокого ответного удара сил ядерного сдерживания (СЯС) России, поскольку им априори присуща повышенная живучесть благодаря высокой скрытности действий при нахождении в море [2].

Анализ зарубежных программ создания новых систем вооружения, развития совре-

менных концепций применения, направленности боевой подготовки позволяет сделать вывод, что в США и странах западной коалиции проводится активная плановая подготовка Вооруженных сил к ведению войн нового поколения против Российской Федерации.

Боевые действия объединенных Вооруженных сил планируются в единой информационной сети, с широким применением информационных технологий и сетевентрических методов ведения войны [3]. Основу единой информационной сети составляют быстро развертываемые системы освещения воздушной, наземной, надводной и подводной обстановки космического, воздушного и морского базирования, объединенные с системами навигации и связи.

Торпедное оружие (ТО) до настоящего времени остается основным средством как для борьбы с надводными кораблями и подводными лодками, так и средством борьбы самих подводных лодок против надводных кораблей и подводных лодок вероятного противника. Существующие торпеды являются высокоточным, быстродействующим видом оружия, характе-

ризующимся большой дальностью действия, высокой скрытностью применения и значительными информационно-вычислительными возможностями. Так, в состав бортовой аппаратуры торпеды MK-54, состоящей на вооружении США и стран НАТО, входит ЭВМ типа AN/AJK-14 с высокой производительностью (около 1,2 Гфлопс) обработки данных, адаптивными алгоритмами поиска, распознавания целей и наведения торпеды [4]. Торпеда MU-90 Impact, состоящая на вооружении некоторых стран НАТО, по данным иностранных источников, с высокой эффективностью способна разобраться с ситуацией из 10...12 целей, включая ложные [5], выделить из реальных приоритетную цель и поразить ее с вероятностью не менее 0,9 [6]. При этом классификация цели осуществляется по 12 параметрам [6].

Для наведения торпедного оружия в настоящее время используются активно-пассивные системы самонаведения (ССН) автономных торпед, а также системы наведения по каналу связи с удаленным оператором [7]. В последнем случае наведение торпеды осуществляется по проводам, а в качестве средства целеуказания выступает бортовой гидроакустический комплекс (ГАК) подводной лодки, осуществляющей атаку. Поскольку между атакующей торпедой и средствами освещения обстановки и обработки информации ПЛ имеется непосредственная проводная связь, данный высокоточный комплекс торпедного оружия обеспечивает поражение целей с больших дистанций. При этом, если пассивная ССН торпеды работает в частотном диапазоне от 10 кГц (MK54) [7] до 15 кГц (Black Shark), то активная — в диапазоне 25 кГц (MK54)...30 кГц (Black Shark). В режиме "телеуправления" с использованием ГАК подводной лодки (например, AN/BQQ-X) задействуется рабочий диапазон частот от 200 Гц до 5,5 кГц. В условиях сетецентрических методов ведения войны целеуказания могут поступать и от иных средств подводного наблюдения, таких как радиогидроакустические буи с диапазоном частот от 30 Гц до 5 кГц [8], гидроакустические комплексы надводных кораблей с частотным диапазоном от 3 Гц до 3 кГц [9].

Таким образом, для эффективного противодействия торпедному оружию необходимо создать устройство гидроакустического противодействия (ГПД), способное сформировать широкополосную гидроакустическую помеху в диапазоне частот от 3 Гц до 30 кГц.

**Справка:** устройства ГПД предназначены для создания гидроакустических помех, ложных гидроакустических целей, искажения спектрально-временных характеристик гидроакустических полей. Одной из наиболее распространенных в мире систем ГПД стала американская AN/SLQ-25 "Никси". Только в ВМС США ею оборудованы более 200 кораблей. Испытания "Никси" завершены в 1970 г., а в 1974 г. она принята на вооружение ВМС США. На подводных лодках получили распространение самоходные постановщики помех — своеобразные торпеды, после запуска имитирующие акустические параметры субмарины. В частности, в СССР в 1974 г. на вооружение был принят самоходный многоцелевой прибор ГПД МГ-74 "Корунд". По своему внешним обводам, основным составным частям, энергосиловой установке, системе управления движением, вспомогательным системам и устройствам, элементам стыковки с торпедным аппаратом прибор аналогичен электрической торпеде. В режиме подавления приборы излучают мощные гидроакустические помехи; в режиме ловушки имитируют ходовые шумы и эхосигналы подлодки, маневрируя по программе, соответствующей поведению субмарины при уклонении от противолодочных сил и от самонаводящихся торпед.

Средства искусственного интеллекта (ИИ), в том числе на основе нейронных сетей [10, 11], используемые в системах интеллектуального управления (СИУ) ТО, обеспечивают высокую вероятность попадания торпеды в цель. Система интеллектуального управления структурно и функционально объединяет в себе ССН и приборный отсек (ПО) торпеды. По оценкам западных источников, вероятность поражения морского подводного объекта (МПО) одной торпедой превышает 95 % [5]. При залповой стрельбе вероятность уничтожения МПО приближается к 100 % и переходит из расчетной категории в практическую.

Несмотря на активные исследования в области создания и применения противоторпедной защиты (ПТЗ), включающей ГПД и антиторпедную защиту (АТ), до настоящего времени в спектре мнений известных зарубежных специалистов нет единого мнения о действительно высокоэффективной системе ПТЗ. Кроме того, постоянное расширение возможностей систем наведения торпед снижает эффективность применения средств ПТЗ, что обуславливает необходимость их совершенствования.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что для защиты МПО от

торпедного оружия целесообразно исключить поступление в СИУ ТО информации о среде функционирования МПО, тем самым блокировав возможности поиска, распознавания и выбора целей с наведением автономного ТО. Для этого предлагается существенно увеличить уровень акустической помехи в диапазоне действия гидроакустической станции (ГАС) обнаружителя (при телеуправлении) и системы автономного самонаведения ТО.

К средствам ГПД, создающим искусственные помехи, относятся устройства, которые организуют заградительную или прицельную помеху с целью затруднить прием СИУ автономного ТО или ГАС обнаружителя первичного или вторичного сигнала от МПО, а также специальные имитаторы, называемые ложными целями, источник шумов которых удаляется в сторону от защищаемого объекта, уводя торпеды в сторону от него.

В данной работе предлагается использовать множественные источники широкополосных шумов высокой интенсивности, действующие в различных точках пространства в течение заданного времени и создающие возможность защищаемому объекту совершить маневр уклонения. Подобные источники являются мехатронными устройствами, способными двигаться в водной среде и создавать широкополосную помеху заданной интенсивности. Совместное применение мехатронных устройств для защиты МПО (цели) определяет суть задачи управления. Эти задачи относятся к задачам планирования автономных групповых миссий управляемых источников помех с оптимизацией траектории уклонения цели.

При решении такой задачи необходимо учитывать, что торпеда может двигаться по двум типам траекторий: догонной и коллизионной. На догонных траекториях вектор скорости, совпадающий с осью торпеды, направлен на цель. Коллизионные траектории имеют постоянный угол упреждения между вектором скорости торпеды и направлением на цель. Он является параметром, который выбирается перед выстрелом на основании данных о цели. Некоторые ССН используют методы пропорционального наведения, в случае когда вектор скорости направлен на точку упреждения, задаваемую решением торпедного треугольника.

Известно, что дальность хода современных торпед достигает 15...20 км. Основную часть дистанции торпеда проходит под действием

системы автономного управления, что заметно снижает вероятность поражения цели. Чтобы избавиться от этих недостатков, были разработаны противолодочные торпеды с системами управления по проводам. В последние годы они получают все большее распространение, поскольку, как считают зарубежные специалисты, они обеспечивают большую вероятность поражения цели по сравнению с другими системами управления торпедами и не подвержены действию помех. Создание таких торпед расценивается на западе как одно из наиболее важных усовершенствований подводного оружия в послевоенный период.

В иностранной печати подчеркивается, что положительное свойство торпед, управляемых по проводам, состоит в том, что при стрельбе такими торпедами нет необходимости иметь точные данные об элементах движения цели и рассчитывать точку залпа. Можно выстрелить торпедой на основе приближенных данных и в дальнейшем корректировать ее движение в район цели. Таким образом, торпеды могут выстреливаться сразу же после обнаружения противника, что резко повышает вероятность попадания в цель, особенно на больших дальностях. Управление торпедой по проводам дало возможность устраниć помехи от собственных шумов и увеличить скорость ее движения до 60 уз.

Современные шланговые системы телеуправления имеют высокую надежность и практически не налагают ограничений на маневрирование ПЛ. Кроме того, вследствие связи между торпедой и средствами освещения обстановки и обработки информации ПЛ реализуется высокоточный комплекс ТО, обеспечивающий поражение целей с больших дистанций.

## Явление электровзрыва

В современных средствах тактического противодействия для создания акустической помехи применяются пьезоэлектроакустические излучатели, имеющие ограниченные частотный и динамический диапазоны. Вследствие этого данные устройства не могут одновременно воздействовать и на ССН автономного ТО, и на ГАС обнаружителей для подавления теленаведения. Соответственно, вероятность успешного наведения ТО на МПО остается достаточно высокой.

Подводный электровзрыв [12] вследствие электрогидравлического эффекта [13] в макси-

мальной степени удовлетворяет требованиям организации мощной широкополосной помехи. В этом случае давление во фронте ударной волны достигает  $10^8$  Па, температура —  $40\ 000$  °C, интегральный уровень звукового давления на расстоянии 50 м — 175 дБ, что на 40...70 дБ, в зависимости от частотного диапазона, превышает уровни шумоизлучения морского подводного объекта и отраженного эхо-сигнала. На рис. 1 представлена осциллограмма уровня подводного шума, сформированного электровзрывом мощностью 2 кДж. Ширина спектра подводного электровзрыва составляет от единиц герц до десятков килогерц (рис. 2) и перекрывает частотные диапазоны всех гидроакустических средств наблюдения, вне зависимости от носителя (подводные лодки (ПЛ), надводные корабли (НК), авиация, ТО) (рис. 3).

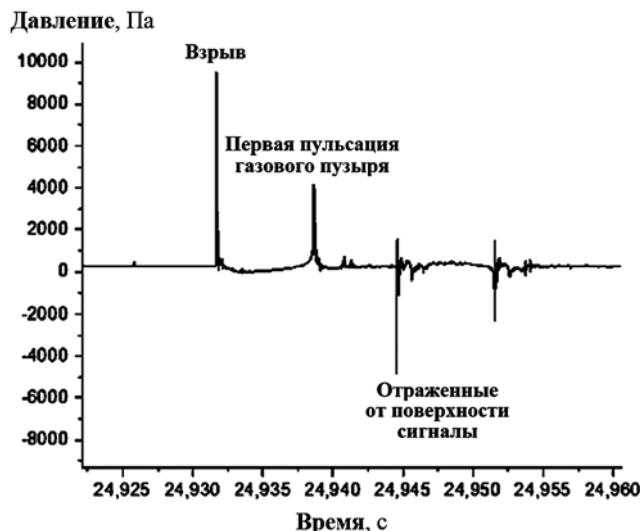


Рис. 1. Осциллограмма уровня давления, формируемого подводным электровзрывом мощностью 2 кДж

Fig. 1. An oscillogram of the pressure level formed by an underwater electric explosion with a power of 2 kJ

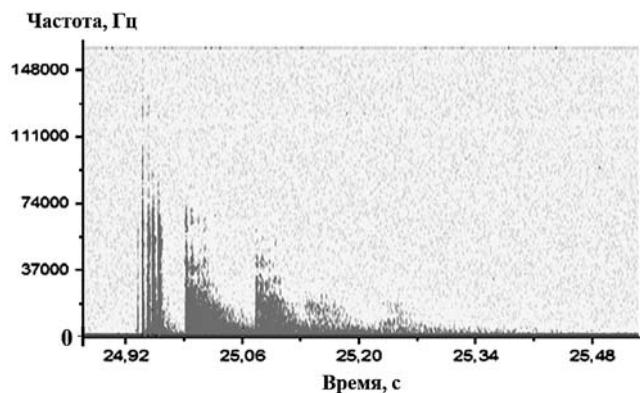


Рис. 2. Спектр подводного электровзрыва мощностью 2 кДж

Fig. 2. The spectrum of an underwater electric explosion with a capacity of 2 kJ

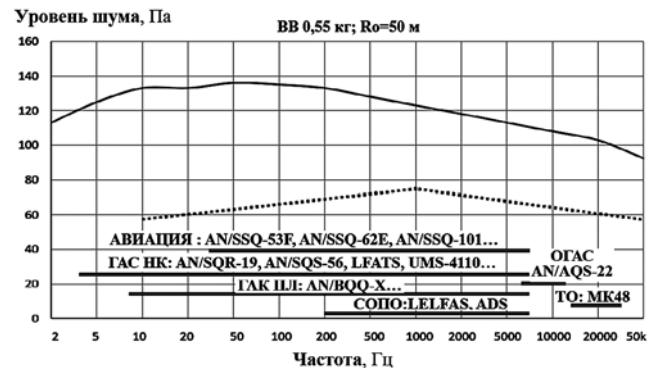


Рис. 3. Спектр электровзрыва и диапазоны рабочих частот обнаружителей

Fig. 3. Electric explosion spectrum and operating frequency ranges of detectors

Таким образом, вследствие высокого уровня акустической помехи на поверхностях антенн бортовых ГАС обнаружителей (ПЛ, НК, опускаемых вертолетных станций, авиационных буев) существенно снижаются дальности обнаружения МПО, и, соответственно, применение теленаведения ТО становится невозможным. СИУ автономного ТО также теряют функции самонаведения на МПО, что существенно уменьшает вероятность поражения МПО торпедным оружием.

### Мехатронное устройство гидроакустического противодействия

Структурная схема предлагаемого устройства ГПД, по сути являющегося мехатронной системой и названного авторами "Петарда", изображена на рис. 4. Внешний вид мехатронного модуля устройства ГПД представлен на рис. 5.

Мехатронная система ГПД представляет собой набор взаимодействующих друг с другом (см. рис. 4) модулей:

- приема гидроакустических сигналов;
- излучения гидроакустических сигналов;
- управления движением;
- формирования гидроакустической помехи, а также узлов: приводов, движителя, рулей управления, разрядной системы и т. д.

В структуре системы информационно-логического взаимодействия устройства ГПД, представленной на рис. 6, определены следующие основные мехатронные модули: входной, анализирующее-командный, управления параметрами движения и управления параметрами высоковольтного разряда.

*Входной модуль* объединяет гидроакустическую antennу, предварительные и основные усилители, аналого-цифровой преобразователь.



Рис. 4. Структура предлагаемого устройства ГПД

Fig. 4. The structure of the proposed hydroacoustic counteraction device

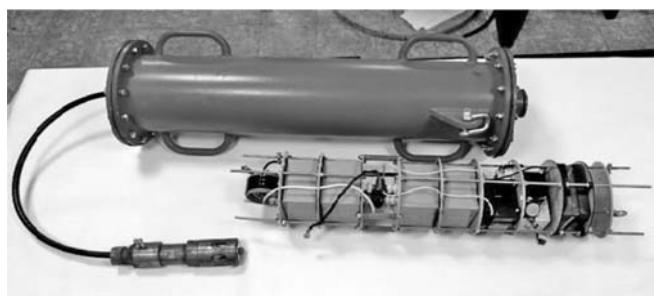


Рис. 5. Внешний вид мехатронного модуля устройства ГПД

Fig. 5. Appearance of the mechatronic module of the hydroacoustic counteraction device

Анализирующее-командный модуль — это прежде всего высокопроизводительный процессор, алгоритмическое и программное обеспечение. При этом высокая производительность,

достигающая  $10^{15}$  флопс [14], и миниатюризация современных вычислительных устройств позволяют создать аппаратные средства обработки результатов измерений с минимальными габаритными размерами и массой.

Модуль управления параметрами высоковольтного разряда обеспечивает управление параметрами (амплитудой и периодом следования) высоковольтных разрядов в водной среде.

Модуль управления параметрами движения обеспечивает необходимые режимы движения по курсу, скорости и глубине мехатронной системы ГПД.

Все модули объединены между собой шинами передачи данных.

Информация о параметрах окружающей среды и внешней обстановке поступает от входного модуля на анализирующе-командный модуль, где выполняется оценка тактической ситуации и вырабатываются команды на модуль управления параметрами движения и модуль управления параметрами высоковольтного разряда.

Из рассмотренных модулей мехатронной системы наибольший интерес представляет модуль управления параметрами высоковольтного разряда (ММУ ПВР) (рис. 7).

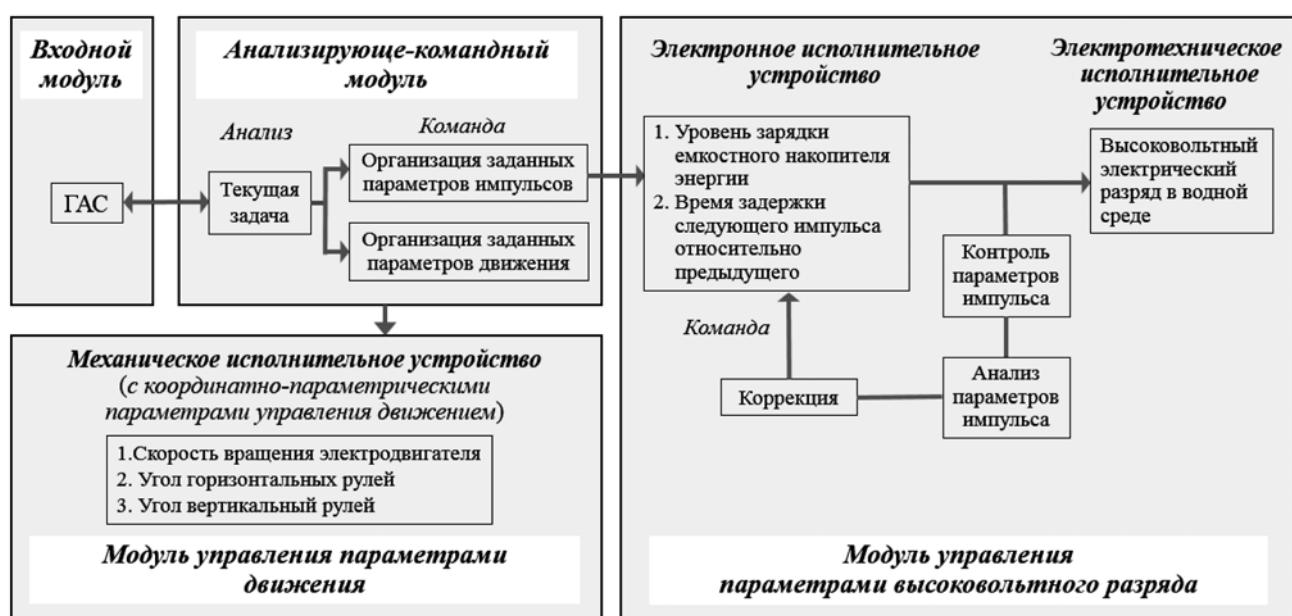


Рис. 6. Информационно-логическое взаимодействие мехатронных модулей системы ГПД

Fig. 6. Information and logical interaction of mechatronic modules

- Основными элементами модуля являются:
- емкостной накопитель электроэнергии;
  - зарядное устройство;
  - источник питания;
  - погружная электроразрядная система;
  - устройства коммутации (К1 и К2);
  - схема измерения в составе датчиков тока и напряжения, а также аналого-цифрового преобразователя;
  - исполнительные устройства управления (И1 и И2) коммутаторами.

Зарядное устройство предназначено для зарядки емкостного накопителя энергии до заданного уровня напряжения, причем уровень зарядки определяется временем замкнутого состояния коммутатора К1. Чем больше времени коммутатор К1 находится в замкнутом состоянии, тем больше уровень зарядки емкостного накопителя энергии. При замыкании коммутатора К2 запасенная электроэнергия поступает на погружную электроразрядную систему (ПЭРС), которая обеспечивает формирование высоковольтного электрического разряда через разрядный промежуток и преобразование электрической энергии в гидродинамический импульс.

Контроль параметров электрического импульса через ПЭРС осуществляется с помощью схемы измерения в составе датчиков тока и напряжения, а также аналого-цифрового преобразователя.

Общее управление, порядок излучения гидродинамических импульсов, анализ ресурса и состояния системы, а также качества высоковольтного разряда осуществляется бортовым компьютером.

При управлении параметрами высоковольтного разряда (амплитудой и периодом следования импульсов) возможно имитировать различные "поведенческие" признаки мехатронной системы (рис. 8).

Так, в случае увеличения периода следования импульсов и при одновременном уменьшении амплитуды возможно

имитировать удаление объекта при фактическом движении параллельным курсом с постоянной скоростью (вариант 1), а в случае уменьшения периода следования импульсов и увеличения амплитуды — имитировать приближение объекта (вариант 2).

Стендовые и натурные испытания работоспособности ММУ ПВР, проведенные, соответственно, в марте—июне 2021 г. на материальной базе НПО "Спецматериалов" (г. Санкт-Петербург) и в июне 2021 г. на гидроакустическом полигоне АО морского подводного оружия "Гидроприбор" в бухте Владимировская Ладожского озера, подтвердили возможность управления параметрами импульса. При стендовых испытаниях генерировались серии импульсов с различной амплитудой (рис. 9).

На рис. 10 (см. вторую сторону обложки) представлена раскадровка съемки импульса, генерируемого модулем, камерой высокоскоростной съемки. Здесь с интервалом 4 мс отображе-



Рис. 7. Мехатронный модуль управления параметрами высоковольтного разряда (ММУ ПВР)

Fig. 7. Mechatronic module for controlling high-voltage discharge parameters

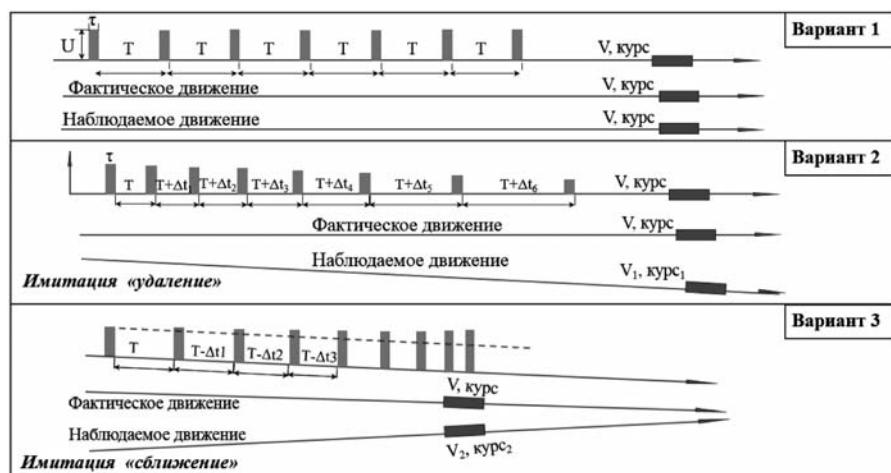


Рис. 8. Имитация "поведенческих" признаков мехатронной системы

Fig. 8. Imitation of "behavioral" signs of a mechatronic system

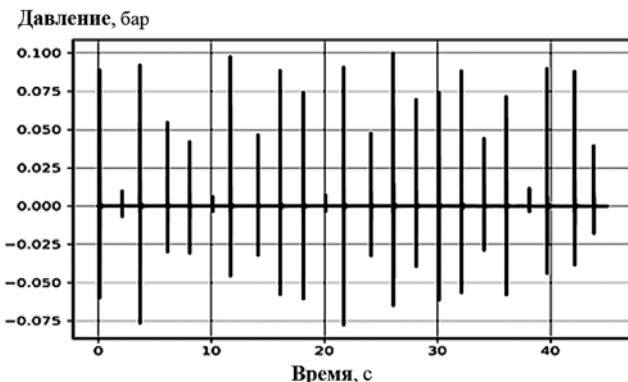


Рис. 9. Серия из 23 импульсов с различной амплитудой, сгенерированных ММУ ПВР

Fig. 9. A series of 23 pulses with different amplitudes

на картина явлений, возникающих в результате срабатывания установки: пробой водной среды и искровой разряд (0 мс), взрывное расширение канала разряда и образование пузыря (4 мс), максимальный объем пузыря (8 мс), его схлопывание (12 мс) и затухающие пульсации (16 мс).

В ходе натурных испытаний ММУ ПВР была верифицирована физико-математическая модель мехатронного устройства на базе электрогидравлического эффекта как источника мощной широкополосной гидроакустической помехи (рис. 11, см. вторую сторону обложки).

По результатам стендовых и натурных испытаний получено подтверждение эффективности работы модуля.

В связи с актуальностью защиты МПО от ТО, для сокращения временного и материального ресурсов на разработку новой мехатронной системы ГПД систем самонаведения ТО и ГАС обнаружителей возможна ее реализация на базе уже разработанной малогабаритной торпеды ММТ [15, 16] со следующими тактико-техническими характеристиками:

Длина, мм . . . . .	3200
Калибр, мм . . . . .	324
Масса ВВ, кг . . . . .	60
Дальность действия ССН, м . . . . .	2500
Глубина хода, м . . . . .	до 600
Скорость хода, уз. . . . .	до 50 (более 25 м/с).

Использованная в качестве экспериментального носителя ММУ ПВР торпеда состоит из следующих основных элементов: головного отсека (ГО) с ССН; боевого зарядного отделения со взрывчатым веществом и взрывателями (БЗО); приборного отсека (ПО); энергосилового отсека (ЭСО) с движителем и рулями управления [15] (рис. 12, см. вторую сторону обложки).

Для преобразования торпеды в систему ГПД предлагается заменить БЗО на электроэнергетическую установку с электродными парами, которая имеет те же габаритные и весовые характеристики (рис. 13, см. вторую сторону обложки).

В данной установке необходимо доработать плату управления, расположенную в приборном отсеке, ориентированную на более мощный процессор и программное обеспечение для решения задач ГПД, тем самым создать СИУ ГПД, объединяющую в себе ССН и ПО и отличную от СИУ ТО.

### Задача группового управления

Классические законы наведения, наиболее ярким примером которых является пропорциональная навигация (ПН), демонстрировали свою эффективность в алгоритмах наведения на цель вплоть до начала 1970-х гг. Однако к середине 1970-х гг. возможности ПЛ-целей по прогнозированию траекторий атакующего ТО показали, что оружие с наведением по принципу ПН может быть неэффективным против них. 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, используемые в интеллектуальных ССН. Примерно в это время вычислительная мощность, необходимая для реализации таких передовых алгоритмов, была уже вполне достаточной для того, чтобы сделать их применение практическим. 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). Доступность информации об ускорении цели для закона наведения варьируется в зависимости от возможностей и типа датчика наведения и конкретной формулировки закона наведения. Как правило, в современных формулировках делается явное предположение о динамических характеристиках цели, торпеды и возможностях автопилота. Оказывается, что ПН является оптимальным законом наведения в отсутствие временной задержки в автопилоте

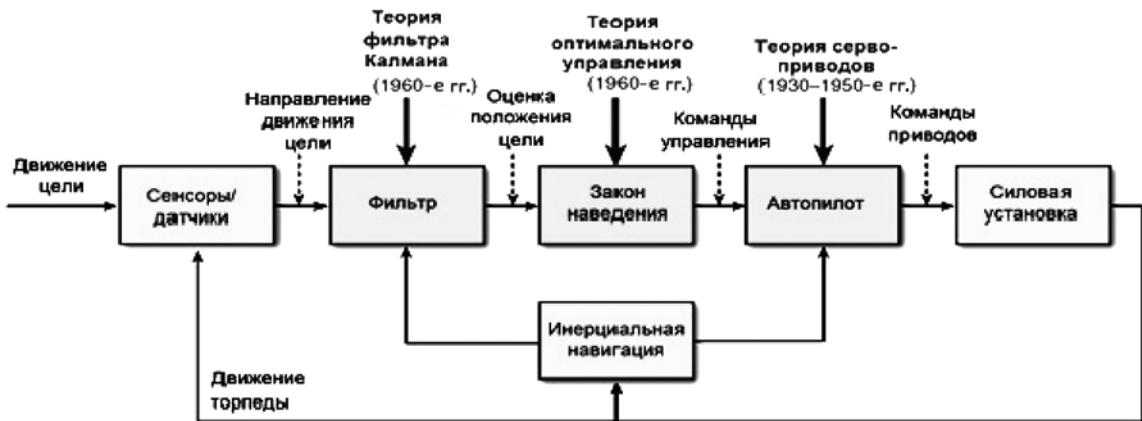


Рис. 14. Традиционная топология наведения, навигации и управления для управляемой торпеды  
Fig. 14. Traditional guidance, navigation and control topology for a guided torpedo

(и при некоторых других предполагаемых условиях). Характер обратной связи закона наведения при самонаведении позволяет торпеде корректировать неточные прогнозы маневра цели и другой немодулированной динамике (как показано на рис. 14). Отметим, что требование повышения производительности продолжает стимулировать разработчиков оптимальных законов наведения, частично заставляя учитывать (включать) более подробную динамику перехватчиков и их целей [17–23], что значительно усложняет задачу противодействия ССН ТО.

Для обеспечения эффективного противодействия ССН торпед, особенно при залпе, необходимы согласованные действия мехатронных систем ГПД (агентов). При этом следует иметь в виду, что централизованное управление системами ГПД по акустическому каналу практически невозможно вследствие высокого уровня помех, формируемой самими системами ГПД. Оптический канал имеет весьма малый радиус действия и неприемлем для координации действия систем ГПД на удалении сотни метров. Для такой системы не может быть централизованного органа (лидера) управления поведением каждого агента. При этом локальные и, в достаточной степени, случайные взаимодействия устройств ГПД должны привести к возникновению "квазиинтеллектуального" глобального поведения всей системы противодействия ТО.

Задача совместного использования мехатронных систем для организации эффективного противодействия скоординированному действию торпед противника относится к области решения задачи в условиях противодействия и неполноты информации (PP/TP, PP — path planning; TP — trajectory planning) [16, 17].

Решение данной задачи должно привести к созданию методов и алгоритмов совместного применения мехатронных устройств и поиска их оптимальных траекторий при противодействии одиночному или скоординированному действию торпед противника.

В общем случае задачи в условиях противодействия и неполноты информации решаются следующими методами:

- планирование миссий управляемых объектов, в том числе и групповые;
- дифференциальные игры, в том числе с ложной целью и АТД.

При этом критериями задач в различных постановках выступают:

- ресурсные критерии;
- вероятностные критерии;
- информационные критерии;
- временные критерии;
- точностные критерии;
- гибридные критерии;
- векторные критерии.

Перейдем к математической формализации проблемы. Будем считать, что ставится задача противодействия одиночной торпеде. Известный алгоритм ССН торпеды позволяет оценивать направление ее движения при наличии искусственных помех. Пусть решающее правило определяет положение цели  $\hat{r}(t)$  при ее реальном нахождении в точке  $r(t)$  в некоторой декартовой системе координат. Текущие положения мехатронных устройств будем задавать векторами  $r_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число мехатронных устройств, а положение торпеды — вектором  $r_0(t)$ . Тогда решающее правило будет иметь вид

$$\hat{r}(t) = \Phi(r(t), r_0(t), r_1(t), \dots, r_N(t)). \quad (1)$$

Для описания движения цели и мехатронных устройств можно использовать упрощенные модели динамики этих объектов, считая что

$$r(t) = \phi(r(t), r_0(t), r_1(t), \dots, r_N(t), u(t)), \quad (2)$$

$$r_i(t) = u_i(t), \quad (3)$$

где  $u(t)$ ,  $u_i(t)$  — управления цели и мехатронных устройств соответственно.

При реализации додонной траектории торпеда управляется по закону

$$r_0(t) = v_0 \frac{\hat{r} - r_0}{|\hat{r} - r_0|}, \quad (4)$$

где  $v_0$  — скорость торпеды.

Терминальным критерием задачи является расстояние между целью и торпедой в заданный момент времени  $T$ , а именно

$$R[u, u_1, \dots, u_N] = |r(T) - r_0(T)|. \quad (5)$$

Задача оптимизации заключается в максимизации критерия (5):

$$\max_{u, u_1, \dots, u_N} R[u, u_1, \dots, u_N] \quad (6)$$

при динамических ограничениях (1)–(4).

Данная задача может быть решена методами оптимального управления, например, при условии, что уравнение (1) является алгебраическим. На основании наблюдений вырабатываются команды по параметрам генерации электровзрывов и режимам движения каждой мехатронной системой ГПД. По сути, это одноранговая самоорганизующаяся сеть, характерной особенностью которой является способность агентов к коллективному поведению при решении общей целевой задачи и взаимодействию между собой для решения этой задачи [18]. 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 и выбирать наиболее приемлемые сценарии поведения в задаче противодействия ТО. Другие задачи требуют дополнительных исследований и разработки методов их решения. 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.

Другое допустимое упрощение — дискретизация исходной задачи. Вместо непрерывных функций, определенных на континууме значений времени  $t$ , рассмотрим значения всех определенных ранее функций в моменты времени  $\{t_i\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, K$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, K$ , которые, например, могут быть выбраны из множества моментов, в которые проводятся измерения. Тогда дифференциальные уравнения заменяются на конечноразностные, а задача оптимизации любого из функционалов станет задачей конечномерной оптимизации, для решения которой разработано большое число методов. Если временные промежутки  $t_i - t_{i-1}$ ,  $i = 1, \dots, K$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, K$ , невелики, можно считать, что каждый из объектов движется по отрезку прямой при  $t \in [t_{i-1}; t_i]$ ,  $i = 1, \dots, K$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, K$ . В таком случае траектории движения объектов будут представлять собой  $K$ -звенные ломаные, а вычисления, возникающие при применении методов оптимизации, могут быть проведены аналитически, и задача оптимизации может быть сведена к решению серии СЛАУ, что позволяет надеяться на ускорение вычислений. Это важно в связи с ограниченностью энергоресурсов рассматриваемых объектов и времени на принятие решения.

### Пример сценария применения

В данном сценарии рассматривается случай атаки одиночной торпеды на носитель, который движется под углом к оси  $X$ . В задаче пехвата важно соотношение скоростей рассматриваемых объектов. Скорость торпеды (Атакующего)  $v_A$  выше скорости носителя (Цели)  $v_T$  и скорости автономных источников шумов (Зашитников)  $v_D$ , причем скорость Цели выше скорости Зашитника:

$$v_A = 15 \text{ м/с}; v_D = 5 \text{ м/с}; v_T = 10 \text{ м/с}.$$

ССН торпеды реагирует на первичное акустическое поле объектов и в начале атаки во всех сценариях сосредоточена на шуме носителя. Рассматривается моделирование для простейших физических моделей распростране-

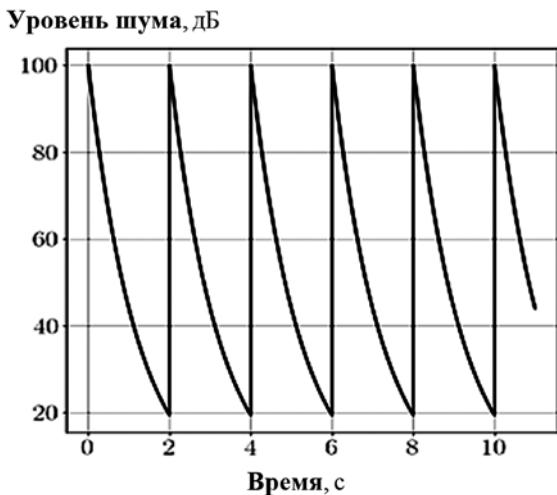


Рис. 15. Зависимость излучаемого Зашитником шума от времени  
Fig. 15. Dependence of the noise on time

ния сигналов в среде и динамических моделей движения подводных объектов, которое тем не менее дает понять перспективность предлагаемого подхода и тактик применения устройств.

Гидроакустический сигнал, излучаемый носителем, считается постоянным и равным 60 дБ. Сигнал, непрерывно излучаемый Зашитником, представляет собой гидроакустические импульсы с постоянным периодом 2 с, интенсивность которых меняется по экспоненциальному закону за эти 2 с от 100 до 20 дБ. Зависимость такого сигнала от времени приведена на рис. 15.

Полагаем, что в среде сигналы затухают обратно пропорционально квадрату расстояния. Предлагаемая тактика защиты состоит в запуске в разные моменты времени носителем двух

устройств, которые должны обмануть ССН торпеды, тем самым дав возможность носителю избежать атаки и покинуть район действия средств. Начальное расстояние между торпедой и носителем равно  $S_0 = 10$  км. Полное время моделирования  $T = 30$  мин, что соответствует запасу топлива торпеды.

Результаты моделирования приведены на рис. 16. На графике слева показан случай в отсутствие устройств защиты, а справа — в случае их применения. Видно, что наличие защитников позволяет носителю избежать уничтожения. Выбором моментов запуска и направления движения мехатронных устройств можно добиться и лучшего результата, решая задачу оптимизации, поставленную ранее.

### Заключение

В статье предложен подход к организации противодействия ТО вероятного противника на основе совместного применения мехатронных устройств, использующих явление электровзрыва для противодействия ССН ТО и решая групповую задачу управления в целях защиты МПО от поражения. Преданный класс задач предполагает использование атакуемым мехатронных устройств, играющих роль мобильных защитников, в качестве которых может выступать как самоходный источник помех, отвлекающий на себя атакующий объект (ракету или торпеду) путем

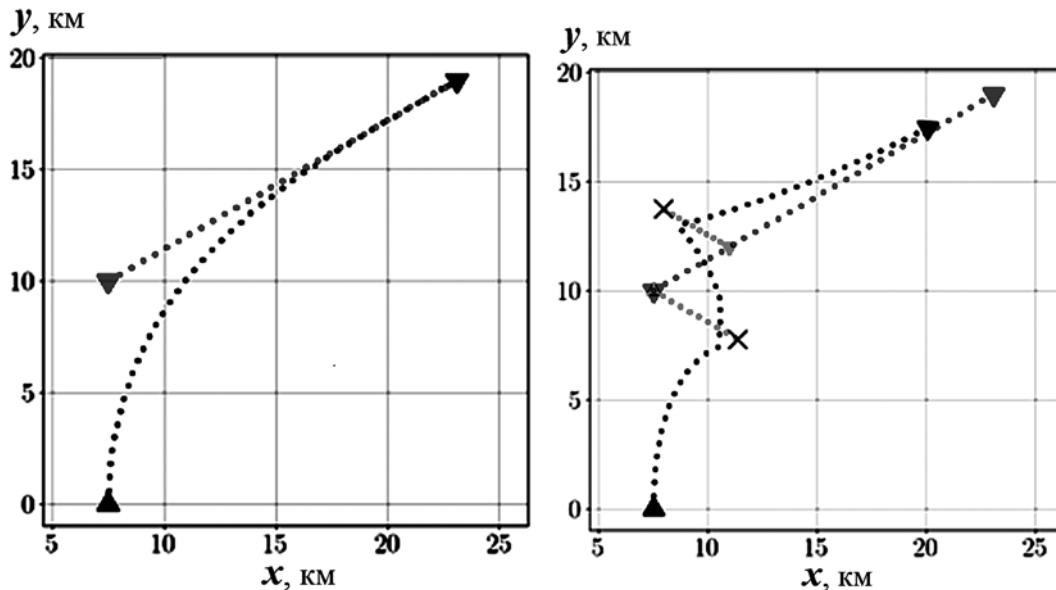


Рис. 16. Траектории движения объектов  
Fig. 16. Object movement trajectories

его перехвата, так и ударный РТК, направленный на уничтожение опасного объекта. Характерной особенностью рассмотренных задач является неполнота априорной информации о дистанции до атакующего объекта и возможность мгновенного использования активных средств. Показано, что наличие даже только второго защитника целесообразно, так как 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. При заданных в рассмотренных моделях условиях по стартовым позициям, скоростям и запасу хода в случае реального отвлечения торпеды на защитников при следовании построенным схемам выпуска защитников торпеде не хватит запаса топлива на поражение основной цели.

#### Список литературы

1. "Военная доктрина Российской Федерации" (утв. Президентом РФ 25.12.2014 N Пр-2976).
2. Аничкина Т. Б., Есин В. И. Стратегическое ядерное оружие Российской Федерации // Россия и Америка в XXI веке. 2015. № 1. С. 1.
3. Савин Л. В. Сетецентрическая и сетевая война. Введение в концепцию. М.: Евразийское движение. 2011. 130 с.
4. Жемчужин Е. Ф., Сильников М. В. Системы наведения торпедного оружия ВМС США // Вопросы оборонной техники. 2020. Т. 16. № 9–10. С. 88–93.
5. Кислов Ф. Основные тенденции развития торпедного оружия ВМС стран НАТО // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 7. С. 46–52.
6. Луцкой А. О противоторпедной защите российских подводных лодок. URL: topwar.ru (дата обращения: 10 декабря 2013).

7. Климов М. Об облике современных торпед подводных лодок // Арсенал Отечества. 2015. № 1. (15).
8. Нарашивание средств "подводной войны" // Военно-промышленный курьер. 30.01.2012.
9. Гидроакустический комплекс AN/SQR-19 // Военное оружие и армия мира. URL: <http://warfor.me>
10. Климов М. Морское подводное оружие: проблемы и возможности // Военно-промышленный курьер. Ч. I. 06.06.2010; Ч. II. 09.06.2010.
11. Степанов А. Основные направления применения искусственного интеллекта в вооруженных силах ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 1. С. 30–35.
12. Лаврентьев Э. В., Кузян О. И. Взрывы в море. Л.: Судостроение, 1977. 157 с.
13. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
14. Каляев И. А. Догнать и перегнать. О гонке суперкомпьютеров в мире // Научная Россия. URL: [Scientificrussia.ru](http://Scientificrussia.ru) (дата обращения: 03.05.2021).
15. Малогабаритный противолодочный комплекс "Пакет -Э/НК" с антиторпедой. URL: <http://bastion-karpenko.ru/paket/>
16. Малогабаритная тепловая противолодочная торпеда ММТ / торпеда-компонент комплекса "Пакет". URL: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-482.html>.
17. Galyaev A. A, Lysenko P. V, Yakhno V. P. 2D Optimal Trajectory Planning Problem in Threat Environment for UUV with Non-Uniform Radiation Pattern // Sensors. 2021. Vol. 21, Iss. 2. P. 396.
18. Palumbo N. F., Blaukamp R. A., Lloyd J. M. Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // HOMING MISSILE GUIDANCE AND CONTROL. 2010. Vol. 29. P. 1.
19. Rubinovich E. Ya. Two Targets Pursuit-Evasion Differential Game with a Restriction on the Targets Turning // IFAC-PapersOnLine. 2018. P. 503–508.
20. Rubinovich E. Ya. Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // Dynamic Games and Applications. 2019. Vol. 9. P. 851–857.
21. Eloy G., Casbeer D. W., Pachter M. Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // IET Control Theory and Applications. 2017. Vol. 17, N. 11. P. 2985–2993.
22. Galyaev A. A, Lysenko P. V, Rubinovich E. Y. Optimal Stochastic Control in the Interception Problem of a Randomly Tacking Vehicle // Mathematics. 2021. N. 9(19). P. 2386.
23. Buzikov M. E., Galyaev A. A. Minimum-time lateral interception of a moving target by a Dubins car // Automatica. 2022. Vol. 135. P. 109968.

## Joint Use of Mechatronic Systems to Organize Effective Counteraction to the Coordinated Action of Enemy Torpedoes

**S. N. Vassilyev<sup>1</sup>**, vassilyev\_sn@mail.ru, **A. A. Galyaev<sup>1</sup>**, galaev@ipu.ru, **V. V. Zaletin<sup>2</sup>**, vzaletin@mail.ru,  
**K. S. Kulakov<sup>2</sup>**, kulakov@npo-sm.ru, **M. V. Silnikov<sup>2</sup>**, director@npo-sm.ru,  
**E. I. Yakushenko<sup>2</sup>**, yakushenko@npo-sm.ru,

<sup>1</sup> V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,  
 Moscow, 117997, Russian Federation,

<sup>2</sup>NPO Special Materials, St. Petersburg, 194044, Russian Federation

*Corresponding author: Galyaev Andrey A., Corresponding Member of RAS, Dr. of Eng., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation, e-mail: galaev@ipu.ru*

*Accepted on 11 December, 2021*

#### Abstract

*The article proposes an approach to the organization of counteraction to the probable enemy on the basis of the joint use of mechatronic devices using the phenomenon of electric explosion to counteract homing systems and solving a group control*

task in order to protect the target from defeat. The above class of tasks involves the use by the attacked of mechatronic devices that play the role of mobile defenders, in the quality of which can act as a self-propelled source of interference, distracting the attacking object (missile or torpedo) by intercepting it, and a shock RTK aimed at destroying a dangerous object. A characteristic feature of the considered tasks is the incompleteness of a priori information about the distance to the attacking object and the possibility of instant use of active means. It is shown that the presence of even only a second defender is advisable, since it significantly increases the interception time compared to the case of only one defender. Also, an additional defender increases the probability of choosing one of the defenders for the intermediate pursuit instead of the main target. Under the conditions set in the considered models for starting positions, speeds and power reserve, in the case of a real torpedo attack on defenders, when following the constructed schemes for the release of defenders, the torpedo will not have enough fuel to defeat the main target. The methods of interference formation based on electric explosion are considered. It is proposed to use mechatronic hydroacoustic counteraction devices capable of moving in an aquatic environment and creating broadband interference of a given intensity as such sources. A model example of the use of mechatronic devices in a given scenario is considered.

**Keywords:** electric explosion, mechatronic devices of hydroacoustic counteraction, group control, homing system

For citation:

**Vassilyev S. N., Galyaev A. A., Zaletin V. V., Kulakov K., Silnikov M. V., Yakushenko E. I.** Joint Use of Mechatronic Systems to Organize Effective Counteraction to the Coordinated Action of Enemy Torpedoes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 197–208.

DOI: 10.17587/mau.23.197-208

## References

1. **Military** Doctrine of the Russian Federation (approved by the President of the Russian Federation on December 25, 2014 N Pr-2976) (in Russian).
2. **Anichkina T. B., Esin V. I.** Strategic nuclear weapons of the Russian Federation, *Russia and America in the XXI century*, 2015, no. 1, pp. 1 (in Russian).
3. **Savin L. V.** Network-centric and network warfare. Introduction to the concept, Moscow, Eurasian Movement, 2011, 130 p. (in Russian).
4. **Zhemchuzhin E. F., Silnikov M. V.** Torpedo weapon guidance systems of the US Navy, *Issues of defense technology*, 2020, vol. 16, no. 9–10, pp. 88–93 (in Russian).
5. **Kislov F.** The main trends in the development of torpedo weapons of the Navy of NATO countries, *Foreign Military Review*, 2002, no. 7, pp. 46–52 (in Russian).
6. **Lutskoy A.** On anti-torpedo protection of Russian submarines, available at: topwar.ru (date of access December 10, 2013) (in Russian).
7. **Klimov M.** About the appearance of modern torpedoes of submarines, *Arsenal of the Fatherland*, 2015, no. 1 (15) (in Russian).
8. **Building** up the means of "underwater warfare", *Military-industrial courier*, 30.01.2012 (in Russian).
9. **AN/SQR-19** Hydroacoustic complex, *Military weapons and armes of the world*, available at: <http://warfor.me> (in Russian).
10. **Klimov M.** Marine underwater weapons: problems and opportunities, *Military-industrial courier*, part I. 06.06.2011; part II. 09.06.2010 (in Russian).
11. **Stepanov A.** The main directions of the use of artificial intelligence in the armed forces of leading foreign countries, *Foreign Military Review*, 2021, no. 1, pp. 30–35 (in Russian).
12. **Lavrentiev E. V., Kuzyan O. I.** Explosions at sea, Leningrad, Shipbuilding, 1977, 157 p.
13. **Yutkin L. A.** Electrohydraulic effect and its application in industry, Leningrad, Mechanical Engineering, 1986, 253 p.
14. **Kalyaev I. A.** Dognat' i peregnat'. O gonke superkomp'terov v mire, *Nauchnaya Rossiya*. available at: [Scientificrussia.ru](http://Scientificrussia.ru) (date of access 03 may 2021) (in Russian).
15. **Small-sized** anti-submarine complex "Package -E/NK" with an anti-torpedo, available at: <http://bastion-karpenko.ru/paket/>
16. **Small-sized** thermal anti-submarine torpedo MM / torpedo is a component of the Package complex, available at: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-482.html>.
17. **Galyaev A. A., Lysenko P. V., Yakhno V. P.** 2D Optimal Trajectory Planning Problem in Threat Environment for UUV with Non-Uniform Radiation Pattern, *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 2, p. 396.
18. **Palumbo N. F., Blaukamp R. A., Lloyd J. M.** Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques, *HOMING MISSILE GUIDANCE AND CONTROL*, 2010, vol. 29, p. 1.
19. **Rubinovich E. Ya.** Two Targets Pursuit-Evasion Differential Game with a Restriction on the Targets Turning, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, pp. 503–508.
20. **Rubinovich E. Ya.** Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information, *Dynamic Games and Applications*, 2019, vol. 9, pp. 851–857.
21. **Eloy G., Casbeer D. W., Pachter M.** Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender, *IET Control Theory and Applications*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 2985–2993.
22. **Galyaev A. A., Lysenko P. V., Rubinovich E. Y.** Optimal Stochastic Control in the Interception Problem of a Randomly Tacking Vehicle, *Mathematics*, 2021, no. 9(19), p. 2386.
22. **Buzikov M. E., Galyaev A. A.** Minimum-time lateral interception of a moving target by a Dubins car, *Automatica*, 2022, vol. 135, p. 109968.