1. **Анализ предметной области**

Автономные безэкипажные суда (АБС, USV — Unmanned Surface Vehicle (беспилотные надводные аппараты), ASC — Autonomous Surface Craft, ASV — Autonomous Surface Vehicle (автономные надводные аппараты)) – это автономные или дистанционно управляемые суда, выполняющие широкий спектр задач при перемещении в открытом море, вдоль береговой линии, и на различных поверхностных водоемах. Данные средства оснащены системами навигации, датчиками и, при необходимости, вооружением, что позволяет им действовать как поодиночке, так и в составе групп. Существует множество сфер применения надводного беспилотного флота.

В оборонной сфере надводные аппараты используются для разведки, наблюдения и патрулирования акваторий, сопровождения корабельных групп, охраны портов и критически важной инфраструктуры. Датчики и интеллектуальные системы способны обнаруживать и отслеживать вражеские корабли, подводные лодки, мины и другие средства противника. Некоторые модели несут на борту системы радиоэлектронной разведки и подавления (РЭР и РЭБ), комплексы противокорабельных и противолодочных вооружений, а также мобильные системы ПВО ближнего действия.

В мирных целях АБС применяются для задач картографирования морского дна, мониторинга показателей окружающей среды, наблюдения за морской фауной, а также для сбора метео- и океанографических данных. АБС часто участвуют в установке и техническом обслуживании подводного и прибрежного оборудования, включая сейсмодатчики и буйковые системы.

АБС могут использоваться в логистических целях для доставки грузов и людей, для эвакуации пострадавших или доставки медицинской помощи в чрезвычайных ситуациях.

Среди преимуществ беспилотных технологий можно выделить саму центральную идею – беспилотные суда не требуют присутствия экипажа корабля на борту, что помогает избежать человеческих жертв при участии флота в военных конфликтах, и в частности в задачах разминирования, разведки и патрулирования. Также, отсутствие экипажа позволяет использовать судно в шторм без риска для жизни моряков.

Другим преимуществом является снижение затрат на каждый выход судна в море – применение беспилотных аппаратов снижает операционные затраты на зарплату, питание, спасательные средства и, зачастую, на топливо, благодаря малогабаритности судна. Также, будет исключено проведение рискованных и дорогостоящих спасательных операций для экипажа.

Применение безэкипажных средств позволяет сделать каждую отдельную миссию одинаково повторяемой и точной. Автоматизация позволяет избавиться от человеческого фактора в ходе миссии (передвижения и выполнения задачи), что делает результат операции более предсказуемым, зависящим исключительно от планирования миссии внешним оператором и работы техника по обслуживанию судна.

Работа исправного автономного судна может проводиться непрерывно, с заходом в порт исключительно для пополнения запасов топлива и дополнительных средств выполнения миссии (при наличии), в то время как судну с экипажем необходимо останавливаться для пополнения провизии, отдыха или смены экипажа. Применение безэкипажных технологий позволяет использовать меньший флот для непрерывного патрулирования акватории.

Из известных на данный момент реальных операций с применением АБС можно выделить разведывательные операции Военно-морских сил (ВМС) США с применением USV Arabian Fox MAST-13 в Ормузском проливе летом и осенью 2022 года для усиления контроля над Корпусом Стражей Исламской Революции (КСИР).

Вице-адмирал Брэд Купер, командующий NAVCENT и 5-м флотом ВМС США отметил, что интеграция новых многофункциональных безэкипажных платформ в повседневные операции флота позволяет лучше следить за ситуацией на море, повышая осведомлённость о ситуации в регионе и усиливая сдерживание КСИР Ирана. Также, он заявил, что безэкипажные надводные аппараты помогут обеспечить транзит грузов через Ормузский пролив, который считается «бутылочным горлышком» для транзита нефти, где в последние годы произошло множество инцидентов с участием Ирана.

Важно отметить, что АБС в этих операциях применялись совместно с другими средствами ВМС США, включая беспилотные летательные аппараты, вертолеты, самолеты и военные корабли, что свидетельствует о возможности интеграции АБС в сложные военные операции с применением авиации и традиционного военного флота, что расширяет тактические и стратегические возможности военно-морских сил.

​Во время проведения специальной военной операции ВМС Украины совместно со Службой Безопасности Украины (СБУ) и Главным Управлением Разведки (ГУР) активно использовали беспилотные надводные аппараты для противодействия Военно-морскому флоту Российской Федерации в Черном море. Целью этих операций было ослабление контроля России над акваторией, атаки на дальнобойные средства, используемые для уничтожения военных объектов на территории Украины, а также нарушение логистики российской армии.

17 июля 2023 года два дрона SeaBaby атаковали Крымский мост, повредив его опоры и дорожное полотно, что привело к значительным повреждениям и частичной приостановке движения. ​

14 сентября 2023 года БНА SeaBaby атаковал российский малый ракетный корабль на воздушной подушке проекта 1239 «Самум» возле входа в Севастопольскую бухту. Удар пришелся на правую кормовую часть судна, вызвав значительные повреждения и потерю хода. Корабль был отбуксирован в порт с заметным креном на правый борт. ​

11 октября 2023 года - повреждение патрульного корабля «Павел Державин» в результате атаки с использованием экспериментального оружия на беспилотных надводных аппаратах. ​

13 октября 2023 года - атака на российский малый ракетный корабль проекта 21631 «Буян-М» с применением беспилотных надводных аппаратов, что привело к повреждениям судна. ​

Для ГУР был разработан БНА MAGURA V5, который также использовался в ряде операций:​

4 августа 2023 года - атака на большой десантный корабль «Оленегорский горняк» в Новороссийске, в результате атаки судно получило значительные повреждения и было отбуксировано в порт. ​

5 августа 2023 года был совершен удар по танкеру «SIG», перевозившему топливо, что вызвало пожар на борту. ​

По заявлению западных СМИ, из 27 судов, которые были потоплены или выведены из строя за время СВО, 11 были поражены беспилотными надводными судами.

Идея беспилотных судов существует на протяжении многих лет. Первое их упоминание связано с применением брандеров – судов, начиненных горючими материалами или взрывчаткой, предназначенными для поджога деревянных кораблей. Идея с дистанционно управляемыми судами развивалась и в XX веке.

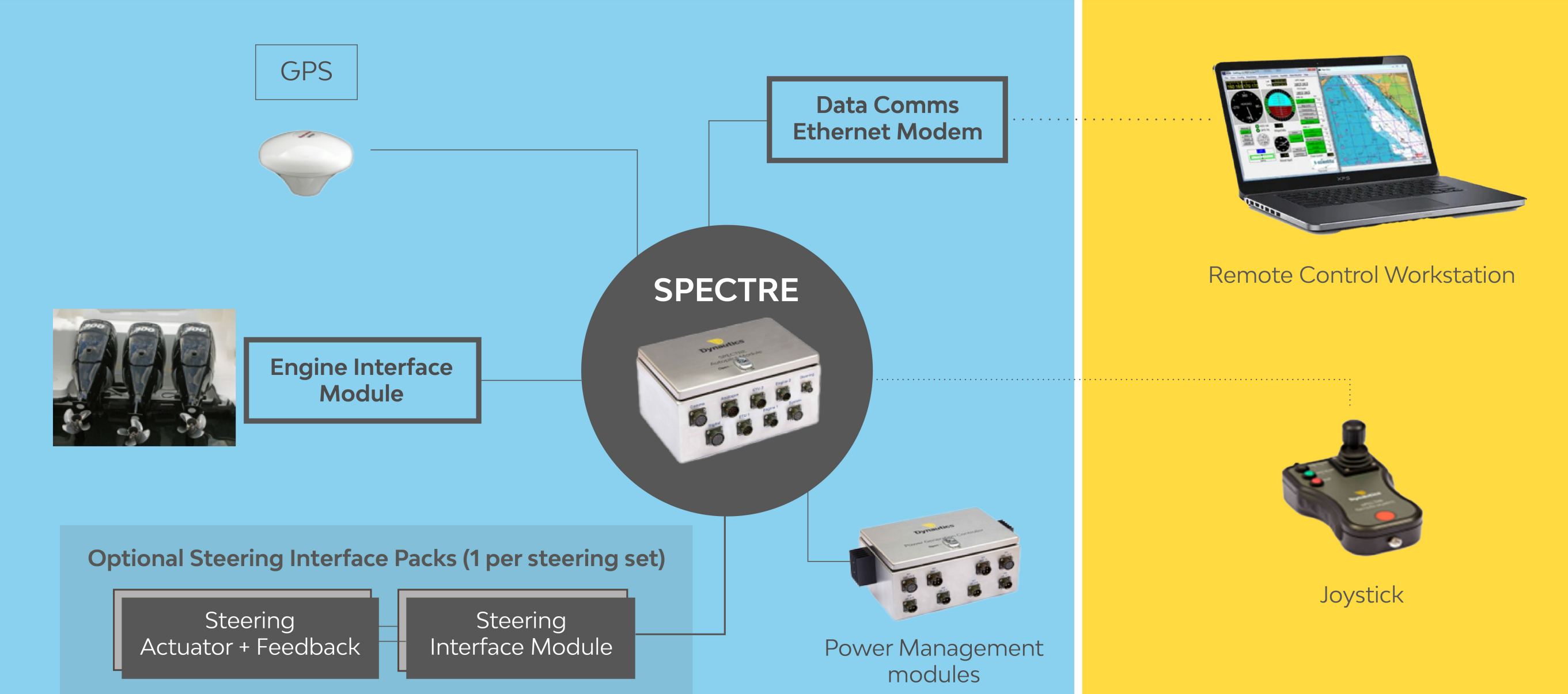
С развитием электроники, навигационных систем и искусственного интеллекта концепция беспилотных судов стала как никогда актуальна. Наибольшее развитие эта концепция получила в военной сфере, где автономные надводные суда используются для разведки и ударных операций.

Большой опыт в создании и применении таких средств имеют ведущие военно-морские державы — США, Израиль, Великобритания и Китай. Например, США кроме малогабаритных аппаратов активно развивают крупные автономные корабли (такие как Sea Hunter и Orca XLUUV), Израиль внедряет универсальные патрульные АБС типа Seagull. Развитие АБС стало неотъемлемой частью современного морского противостояния и обозначило переход флотов всего мира к новому поколению «плавучих платформ» без надобности задействования экипажа.

**1.1 Обзор существующих систем управления АБС**

​Система управления АБС – это совокупность программных и технических средств, обеспечивающих автономность и внешнюю управляемость судна. Система предоставляет решения для навигации, управления движением, сбора данных и взаимодействия с внешними связанными системами. Рассмотрим существующие на данный момент системы управления, информация о которых доступна в публичном доступе.

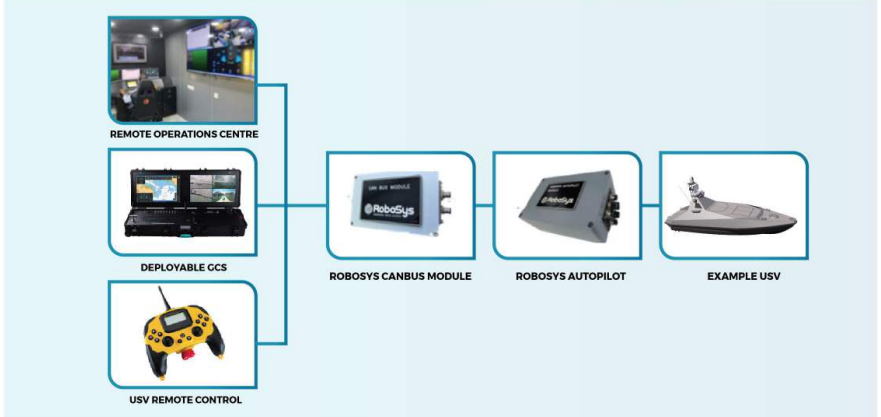
«Dynautics» - предлагает интеллектуальные системы управления для безэкипажных надводных и подводных аппаратов. В ассортименте компании системы автопилота, дистанционного управления, навигации, связи и управления питанием судна. В числе проектов, где применяются системы компании - морские миссии без экипажа в области энергетики и добычи полезных ископаемых на шельфе, океанографии, морского транспорта, а также в секторе обороны и безопасности. Система управления АБС представлена на Рисунке 1.



*Рисунок 1 –Схема взаимодействия компонентов системы Dynautics*

Одна из новейших разработок компании - интеллектуальный автопилот «SPECTRE 2» - система, интегрирующаяся практически в любое судно, с возможностью управления различными типами двигателей, включая электродвигателт. Требует установки дополнительного оборудования от производителя, а также модулей управления питанием. Среди возможностей автопилота – управление судном с помощью джойстика на расстоянии до 20 морских миль (в зоне прямой видимости) и/или спутника «Iridium» для связи и управления за горизонтом со станции управления. Также, в состав автопилота входит модуль предотвращения столкновений, стабилизированный магнитный компас, показывающий крен, тангаж, курс и скорость. Стоимость системы зависит от сложности работ по установке и уровня автоматизации, и не распространяется в открытых источниках.

«RoboSys» - компания использует современные технологии искусственного интеллекта и машинного обучения. По заявлениям разработчиков, продукты компании могут обеспечить масштабируемый уровень автономности вплоть до полной 4-й степени IMO для любого моторного судна (полная автономность, операционная система судна способна самостоятельно принимать решения и совершать действия). Архитектура системы управления показана на Рисунке 2.



*Рисунок 2 –Схема взаимодействия компонентов RoboSys*

«RoboSys USV Autopilot» - гибкий аппаратный модуль, который может быть легко интегрирован с различными системами управления судном от компании и двигательными установками судна, работающими с одним или двумя двигателями и индивидуальными или сдвоенными гидроструями. Модуль способен обеспечить обмен данными с аналоговым и цифровым бортовым оборудованием. Может быстро переключаться между дистанционным управлением судном и полной его автономностью. Модуль интегрируется с модулем искусственного интеллекта «Voyager AI», включающим систему предотвращения столкновений и избегания мели COLGRES. Модуль искусственного интеллекта может осуществлять автономную навигацию при потере связи с управляющей станцией. Система интегрирована с программным обеспечением (ПО) для управления судном «Voyager AI Survey». Автономные миссии для судна могут быть импортированы из таких программ для планирования как «EIVA», «Hypack» и «Qinsy». Система использует датчики судна, данные радара, AIS, ARPA и данные других источников, обеспечивая автономность до 4-й степени IMO на скорости до 45 узлов. Стоимость системы также определяется в частном порядке.

**1.2 Преимущества и недостатки существующих систем управления**

Подведем итоги и выделим функциональные элементы существующих систем, разберем их архитектуру и использующиеся технологии.

**Решения Dynautics:**

* Одна система для беспилотных надводных и подводных аппаратов;
* Большие возможности для масштабирования благодаря модульной архитектуре;
* Наличие автопилота;
* Возможность дистанционного управления в пределах видимости с помощью джойстика;
* Возможность управления за горизонтом с помощью спутниковой связи «Iridium»;
* Средства дистанционного управления питанием судна;
* Совместимость с различными типами двигателей, включая электрические;
* Встроенный модуль предотвращения столкновений;
* Встроенный в судовой модуль магнитный компас с базовыми навигационными датчиками;

«SPECTRE» - это модульная система, включающая аппаратные и программные решения, которые интегрируются в существующие платформы и судовые системы. Для управления двигателем используется проприетарный модуль контроля, модули для управления рулением, управления питанием, GPS модем для связи. Система соединена и управляется оператором с удаленной рабочей станцией, сводя задачу управления АБС до прокладывания маршрута и наблюдения за ходом миссии.

**Решения Robosys:**

Система использует искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение для обеспечения автономности.

* Модульная масштабируемая система
* Поддержка аналоговых и цифровых бортовых устройств, и датчиков
* Встроенная в модуль ИИ система предотвращения столкновений и избегания мели.
* Поддержка миссий из «EIVA», «Hypack», «Qinsy».
* Использование данных множества источников для принятия автономных решений.
* Взаимодействие с проприетарным ПО для управления.
* Возможность работы с различными типами двигателей и платформ.
* Полная автономия при потере связи с управляющей станцией.

«Voyager AI» предоставляет возможность полной автономности судна, что не могут себе позволить прочие продукты на рынке систем беспилотных судов, что делает систему от «RoboSys» одной из самых технологичных и удобных на рынке. Применение нейросетей – современное решение в задаче распознавания объектов. ИИ отлично справляется с анализом окружения в реальном времени, и на основании данных с судовых датчиков и изображения с камер позволяет судну маневрировать для предотвращения столкновений с подводными и надводными объектами. Система использует ИИ также для планирования и перестроения сложных маршрутов, зачастую превосходя человеческие возможности по времени и эффективности.

Современные системы управления судами достигли высокого уровня автономности. Системы позволяют человеку полноценно управлять судовым оборудованием и контролировать его состояние удаленно. Последние разработки компаний в области систем для АБС совпадают с мировыми трендами и направлены на интеграцию ИИ-модулей для частичного или полного контроля над судном в назначенной миссии, что значительно облегчает работу оператору. Текущая цель для разработчиков систем – создание ИИ-модуля, который будет способен выполнить миссию полностью автономно, без участия оператора.

Недостатки современных систем связаны с высокой стоимостью разработки, что связано с необходимостью обучения ИИ-модуля на большом (порядка нескольких десятков тысяч изображений с маркерами) количестве данных. Создание большого набора данных для тренировки нейросети для ИИ-модуля – дорогостоящая и продолжительная задача. Из-за сложности систем компания-разработчик зачастую самостоятельно занимается установкой оборудования на судно и его настройкой, что замедляет процесс интеграции и повышает стоимость внедрения системы.

**1.3 Сравнение различных подходов к управлению группой дронов (централизованное, децентрализованное, гибридное)**

Автоматическое управления группой АБС не характерно для гражданских систем и зачастую разрабатываются по заказу ВМФ и являются некоммерческими.  
 В задаче управления группой можно выделить несколько базовых направлений:

**Централизованное управление**

В этом подходе все решения о действиях группы судов принимаются центральным управляющим модулем, которое получает информацию от всех аппаратов, принимает решение и рассылает приказы в ответ. Ситуационные приказы также могут отдаваться оператором группы и передаваться во все аппараты для исполнения.​

Среди преимуществ - высокая координация, предсказуемость. Централизованный контроль обеспечивает согласованность действий всей группы. Такой подход​ располагает к глобальному планированию миссии и возможности сэкономить на модулях управления каждым отдельным АБС.​

Однако, с увеличением числа АБС нагрузка на центральный управляющий модуль (ЦУ) пропорционально возрастает, и выход из строя ​ЦУ приведет к потере управления всей группой. Кроме того, радиопомехи могут помешать управлению АБС и приводить к столкновениям и проблемам с навигацией.

**Децентрализованное управление**

В противоположном описанному выше подходу при децентрализованном управлении каждое судно принимает решения самостоятельно, основываясь на локальной информации и взаимодействии с другими судами группы.​

Система легко расширяется, локальное принятие решений на уровне члена группы позволяет создавать большие флоты АБС, не нагружая отдельный управляющий модуль. Отказ оборудования одного или нескольких АБС не влияет на функционирование всей группы, так как каждый аппарат автономен и способен выполнить задачи миссии самостоятельно.

В то же время, без централизованного контроля может возникнуть коллизия в решениях членов группы, приводящая к столкновениям и непредсказуемому поведению аппаратов. Каждый дрон должен обрабатывать информацию, поступающую с собственных бортовых систем и систем «соседей», что требует большей вычислительной мощности, необходимой каждому аппарату группы.

**Гибридное управление**

Гибридное управление в равной степени воплощает элементы централизованного и децентрализованного подходов. Способов реализации такого подхода может быть несколько. Различия в реализациях обусловлены переменной «степенью свободы» аппаратов группы. Правильный выбор «степени свободы» может обеспечить достаточный уровень гибкости системы, сохраняя ее централизованность, а также предоставить возможность глобального планирования миссии сохранением гибкости ее исполнения.

Такая система требует реализацию сложных алгоритмов взаимодействия между центральным модулем и подчиненными АБС. Кроме того, необходима качественная связь между участниками группы для четкой координации действий.

Основные характеристики подходов к управлению группой представлены в таблице 1

*Таблица 1 – Характеристики систем управления*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Централизованное управление** | **Децентрализованное управление** | **Гибридное управление** |
| Координация действий | Высокая | Средняя | Высокая |
| Масштабируемость  системы | Низкая | Высокая | Средняя |
| Отказоустойчивость | Низкая | Высокая | Высокая |
| Гибкость | Низкая | Высокая | Высокая |
| Сложность реализации | Низкая | Средняя | Высокая |

**1.4 Исследование нормативной базы и стандартов, касающихся морской навигации**

Нормативная база морской навигации включает в себя комплекс международных и национальных стандартов, направленных на обеспечение безопасности судоходства и стандартизации оборудования и протоколов обмена данными. Из четырех международных конвенции о судоходстве, для АБС релевантны SOLAS (международная конвенция по охране человеческой жизни на море) и MARPOL (международная конвенция по предотвращению загрязнения вод)

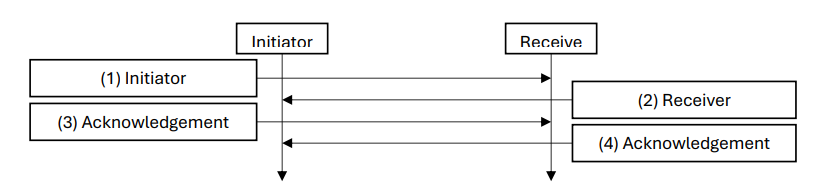
Рассмотрим конвенцию SOLAS в главах, касающихся требований к судовому оборудованию (требования также описаны в российском морском реестре судоходства).

Глава 4 конвенции, раздел «эксплуатационные требования» определяет требования к оборудованию связи судна. Требования отличаются в зависимости от морского района. В общем случае, суда должны иметь УКВ радиоустановку, обеспечивающую передачу и прием цифровых избирательных вызовов (ЦИВ) на частоте 156,525 МГц и радиотелефонных сообщений на частотах 156,3 МГц, 156,65 МГц и 156,8 МГц. Судно должно быть оборудовано приемником НАВТЕКС для приема передач международной службы НАВТЕКС в районах, где она доступна.

Согласно главе 5 конвенции каждое судно должно быть оснащено магнитным компасом или его аналогами для определения курса судна, пеленгатором или другим средством взятия пеленгов по дуге горизонта в 360 градусов. Суда должны быть оснащены приемниками GPS/GNSS (глобальных навигационных систем) для определения координат. Для гражданских судов требуется установка радиолокационных отражателей. По возможности рекомендуется использование ECDIS, СОЭНКИ или ЭКС (электронных картографических систем).

Для соответствия требований MARPOL безэкипажное судно необходимо оборудовать датчиками утечки топлива и смазочных жидкостей, а при установке двигателя внутреннего сгорания важно соблюдать требования приложения 6 о воздушных выбросах.

Для АБС также является релевантным международный кодекс для морских автономных судов (MASS), разработанный международной морской организацией IMO. Согласно кодексу предъявляются требования по кибербезопасности, предполагающие реализацию строгих механизмов аутентификации и авторизации для предотвращения несанкционированного доступа к системам судна (Рисунок 3)



*Рисунок 3 - Высокоуровневый пример инициатора, инициирующего обмен данными для передачи управления с аутентификацией и подтверждениями*

Согласно требованиям, оператор судна вне зависимости от уровня автономности АБС должен иметь возможность вмешаться в работу систем судна при совершении кибератаки на подконтрольный аппарат. Система должна каким-либо способом обозначить проблемы, связанные с кибератакой, иметь сценарии ответа на кибератаку, включая действия при создании помехи сигнала и спуфинг.

Другой важный аспект – необходимость обеспечения информационной осведомленности. Судно должно быть оснащено радаром, камерой, лидаром и акустическим сенсором для сбора информации об окружающей среде.​ Собранные судовым оборудованием данные должны обрабатываться в реальном времени для формирования полной картины обстановки.​ Системы должны быть способны обнаруживать, идентифицировать и отслеживать другие объекты, включая суда, навигационные знаки и препятствия. На основе собранной информации системы должны прогнозировать развитие ситуации и принимать решения для безопасного и эффективного управления судном.

Рассмотрим некоторые международные технические стандарты МЭК. Для передачи данных между бортовыми устройствами используется набор стандартов IEC 61162. IEC 61162-1 использует последовательную передачу данных с фиксированной скоростью порядка 4800 бод для point-to-point соединений между двумя устройствами. Стандарт ​IEC 61162-3 основан на протоколе Controller Area Network (CAN) и позволяет объединять множество устройств в одну сеть с возможностью одновременной передачи данных. IEC 61162-3 используется для соединения десятков устройств в одну сеть, с помощью кабелей DeviceNet и обеспечивает высокую скорость обмена данными между устройствами (до 250 КБит/с)

Стандарт IEC 61993-2 устанавливает требования к автоматической идентификационной системе (AIS). AIS передает данные о судне, содержащие его индетификатор, позицию, курс и скорость. Система совершает обмен данными с судовым оборудованием, используя стандарты IEC 61162.

**2 Разработка концепции и технического задания**

На основе анализа существующих систем, международных норм и опыта применения АБС, сформулируем концепцию новой системы управления АБС.

Цель проекта - создание интеллектуальной распределённой платформы управления группой АБС, способной:

1. Выполнять координированные миссии (разведка, патрулирование, охрана, доставка, использование доп. оборудования);
2. Работать в условиях как полной автономии, так и дистанционного или гибридного контроля;

*Таблица 2 – Режимы контроля*

|  |  |
| --- | --- |
| **Режим** | **Характеристики** |
| **Дистанционный режим** | Все решения по навигации и эксплуатированию оборудования выдаются в ручном режиме для каждого члена группы, включена выдача информационных сообщений от ИИ модуля судна оператору. |
| **Автономный режим** | Каждое судно действует автономно по заданному сценарию; решения принимаются бортовым ИИ модулем. Информирование оператора в критических ситуациях (отказ оборудования, потеря сигнала, невозможность выполнения миссии) |
| **Гибридный режим** | Оператор назначает ситуационные приказы (построение в формацию, отклонение от глобального маршрута), за исключением приказов группа действует самостоятельно, согласно плану миссии. |

1. Быть устойчивой к кибератакам и потере связи;
2. Соответствовать международным нормам (IMO MASS, SOLAS).

**2.1 Определение архитектуры**

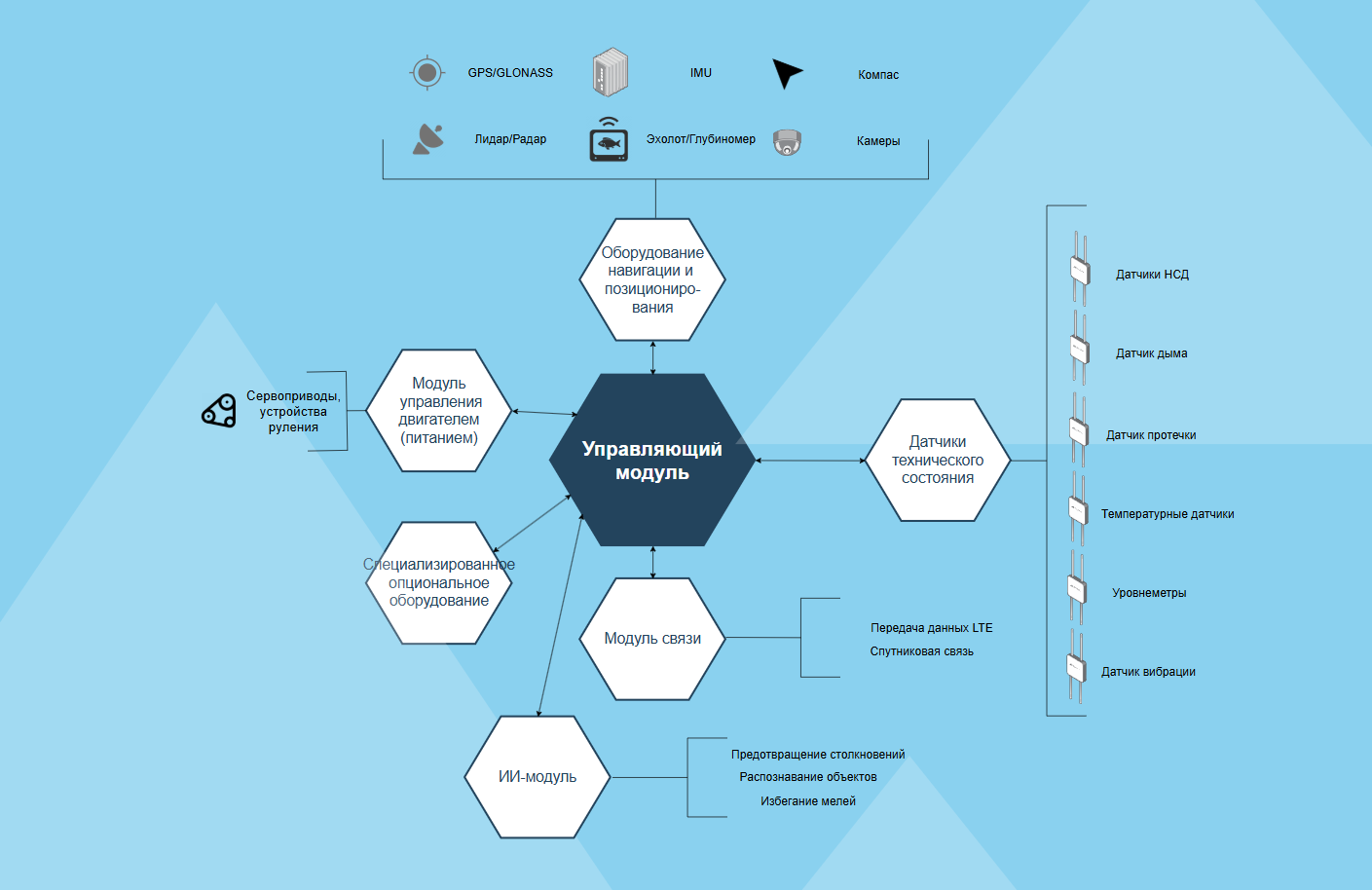
Верхний уровень архитектуры проекта приведен на Рисунке 4 и пояснен в Таблице 3

  
*Рисунок 4 – Компоненты верхнего уровня*

*Таблица 3 – Компоненты верхнего уровня*

|  |  |
| --- | --- |
| **Компонент** | **Назначение** |
| **Береговой управляющий модуль** | Прием телеметрии, дистанционное вмешательство |
| **Бортовой управляющий модуль** | Взаимодействие с бортовым оборудованием, предобработка сигналов, телеметрия |
| **Датчики технического состояния** | Получение данных о состоянии судна |
| **Оборудование навигации и позиционирования** | Оборудование для определения положения судна в пространстве и позиционирования на карте |
| **ИИ-модуль** | Анализ данных оборудования осведомления, предотвращение столкновений и избегание мели на основании полученных данных, анализ данных с камеры и распознание объектов. |
| **Модуль связи** | Многоуровневая связь: радиоканал, спутниковая связь, LTE |
| **Платформа управления группой** | Координация взаимодействия между АБС, ситуационная карта, отслеживание состояний и целей, контроль, визуализация миссии, телеметрия, аварийное вмешательство, создание миссий |
| **Дополнительное оборудование** | Например, метеодатчики, средства установки буйков |

Рассмотрим систему, установленную на АБС в приближении. Более подробная схема приведена на Рисунке 5 и пояснена в Таблице 4

  
*Рисунок 5 – Компоненты верхнего уровня*

*Таблица 4 – Судовые компоненты системы*

|  |  |
| --- | --- |
| **Компонент** | **Примечание** |
| Бортовой управляющий модуль |  |
| **Датчики технического состояния** | | |
| Датчики несанкционированного доступа |  |
| Датчик дыма |  |
| Датчик протечки |  |
| Температурные датчики |  |
| Уровнеметры топлива (или датчик напряжения и тока) |  |
| Датчик вибрации |  |
| **Оборудование для навигации и позиционирования** | | |
| GNSS (GPS, GLONASS) |  |
| IMU (инерциальный модуль) |  |
| Компас (магнитный или гироскопический) |  |
| AIS-трансивер |  |
| Лидар/радар |  |
| Эхолот/глубиномер |  |
| Камеры (оптические, ИК, НВ) |  |
| **Прочее оборудование** | | |
| Модуль управления двигателем (питанием) | Модуль управления с сервоприводами рулевого управления |
| ИИ-модуль |  |
| Модуль связи | Спутник, LTE, радио, Каналы телеметрии, видео, управления |
| **Специализированное опциональное оборудование** | | |
| Метеодатчики |  |
| Гидрохимические датчики |  |
| Система сброса полезной нагрузки |  |
| Солнечные панели |  |

Необходимо выбрать протоколы взаимодействия между элементами системы. Взаимосвязи компонентов и протоколы/интерфейсы показаны в Таблице 5.

*Таблица 5 – Взаимодействие компонентов системы*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Связь между компонентами** | **Назначение** | **Протокол / Интерфейс** | **Примечание** |
| Датчики тех. состояния - Бортовой модуль | Данные состояния систем | CAN bus | Быстрый, надёжный полевой протокол для промышленных датчиков |
| Датчики навигации (GNSS, IMU, компас) - Борт. модуль | Данные позиционирования, курс | NMEA 2000 (CAN) | Совместимость с морским оборудованием |
| Камеры - ИИ-модуль | Видеопоток | RTSP (по Ethernet) | Сжатие через H.264, обработка ИИ |
| Эхолот, лидар, радар - ИИ-модуль | Данные обнаружения препятствий, глубина | Ethernet + ROS2 topics | Интеграция через ROS-среду |
| Бортовой модуль - ИИ-модуль | Передача сенсоров, управляющие данные | ROS2 (DDS over UDP) | Low-latency, поддержка pub-sub |
| ИИ-модуль - Модуль управления движением | Команды руления, скорости | CAN bus |  |
| Бортовой модуль - Модуль связи | Отправка телеметрии, видео, команд | Ethernet (MQTT over TCP/IP) | Устойчив к переменчивому каналу связи |
| Модуль связи → Центр управления (через LTE/спутник) | Удалённый мониторинг, команды управления | MQTT over VPN | Лёгкий протокол, хорошо работает в условиях высокой задержки |
| Береговой модуль → Платформа управления группой | Координация флота, визуализация | HTTPS + WebSocket | Веб-интерфейс и интерактивный обмен событиями |
| Доп. оборудование → Бортовой модуль | Метео/гидро данные, сброс оборудования | UART / I2C | Легкое управление оборудованием |

Цепочки взаимодействия:

**Телеметрия**Датчики → Бортовой модуль → MQTT-сообщения → Модуль связи → LTE/спутник → VPN → MQTT-брокер (Береговой модуль)

**Видеопоток**

Камера → RTSP поток → ИИ-модуль / видеокодер → Ethernet → Модуль связи → VPN → RTSP сервер (или WebRTC) на берегу

**Команды управления**

Оператор (через GUI) → HTTPS → Береговой модуль → MQTT / ROS2 → USV через VPN