

Основные принципы построения автономных необитаемых подводных аппаратов

К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉av.vagin@bk.ru

Аннотация. Для решения поисково-обследовательских задач, проведения морской грунтовой съемки, обследования подводной ситуации используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Принципы проектирования АНПА определяются целями его будущего применения (миссией использования) и требуемыми характеристиками для решения возлагаемых задач. Эти характеристики при проектировании АНПА определяют очень многое – начиная от оборудования, гидроакустических средств и заканчивая формой и цветом.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, поисково-обследовательские задачи, робототехника

Для цитирования: Аббакумов К. Е., Вагин А. В. Основные принципы построения автономных необитаемых подводных аппаратов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-5-13.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Basic Principles of Building Autonomous Unmanned Underwater Vehicles

K. E. Abbakumov, A. V. Vagin✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉av.vagin@bk.ru

Abstract. Autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) are used to solve search and survey tasks, conduct marine ground surveys, and survey the underwater situation. The AUV design principles are determined by the goals of its future use (mission of use) and the required characteristics for solving the assigned tasks. These characteristics are decisive in the design of AUVs, from equipment, hydroacoustic means to shape and color.

Keywords: unmanned underwater vehicle, search and survey tasks, robotics

For citation: Abbakumov K. E., Vagin A. V. Basic Principles of Building Autonomous Unmanned Underwater Vehicles // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-5-13.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В настоящее время в современной гидроакустической технике выделяют два класса подводных аппаратов: обитаемые подводные (ОПА), предусматривающие присутствие челове-

ка на борту и необитаемые подводные аппараты (НПА), или как их называют, беспилотные. НПА, представляющие собой объект исследования в данной статье, подразделяются на три типа: бук-

сируемые, управляемые по кабелю самоходные и автономные самоходные [1].

Буксируемые НПА (БНПА), которые в зарубежной классификации имеют название Towed Operated Vehicle (TOV), оснащены радиоэлектронными бортовыми системами заданного назначения, отличительной особенностью которого служит наличие гибкой связи в виде кабель-троса между судном обеспечения (СО) и самим аппаратом. Кабель-трос выполняет функцию питания и информационной связи с НПА, а также буксировки аппарата за СО. Через кабель-трос на аппарат поступают сигналы управления, а обратно передаются массивы данных, содержащие результаты работы бортовых систем. Полученные данные подвергаются обработке и визуализации на экране судовой системы управления (ССУ) в режиме реального времени, а также архивируются с целью последующей обработки в береговой лаборатории [2].

Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой (ГАНС-УКБ), образованная гидроакустическим маяком-ответчиком (ГМО), размещенным на БНПА и судовой пеленгационной антенной, обеспечивает определение дистанции от ГМО до фазового центра антенны и курсового угла между носовой частью и строительной осью судна и направлением ГМО. Полученные координаты передаются в ССУ для последующего отображения, а также пространственной привязки (с учетом навигационных данных) и корректировки результатов обследования.

Увеличение глубины погружения влечет к удлинению кабеля-троса, что в свою очередь вызывает затруднение эксплуатации системы «СО–БНПА», увеличиваются массогабаритные характеристики судового оборудования. Несмотря на ряд ограничений, буксируемые системы отличаются большей оперативностью в получении информации, что имеет существенное значение при поисковых работах [3].

Детальное обследование объектов на поверхности дна требует точной стабилизации аппарата над дном. Маневренные возможности БНПА существенно ограничены. В этом случае целесообразно использовать самоходные телеуправляемые НПА (ТНПА).

ТНПА, которые в зарубежной классификации имеют название Remotely Operated Vehicle (ROV), оснащены радиоэлектронными бортовыми системами заданного назначения и связаны с СО кабель-тросом, выполняющим функции инфор-

мационного и управляющего канала, а также линиями энергосбережения. В отличие от предыдущего типа НПА, ТНПА может самостоятельно перемещаться относительно СО на расстоянии, не превышающем длину кабеля. ТНПА приводится в движение движителями, жестко закрепленными на раме аппарата. С помощью пульта управления ССУ ТНПА наводится на объект работы.

Как и НПА предыдущего типа, ТНПА ограничены по маневренности. Ограниченная зона маневрирования ТНПА также обусловлена механической связью с СО. Отсутствие кабельной связи с СО, характерное для автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) позволяет использовать их при решении более широкого круга задач практически на любых глубинах [4].

АНПА, которые в зарубежной классификации имеют название Autonomous Underwater Vehicle (AUV), – это автоматические самоходные носители радиоэлектронной аппаратуры, способные двигаться по программной траектории, выполнять требуемые работы и по окончании программы всплывать или возвращаться на СО. Связь с аппаратом в подводном положении осуществляется по гидроакустическому каналу связи, а электроснабжение – с использованием аккумуляторов. Полоса пропускания канала связи ограничена, поэтому результаты работы АНПА записываются на накопитель, а после подъема аппарата считываются, обрабатываются и отображаются на экране ССУ.

В режиме реального времени на СО передаются информационные массивы, содержащие соответствующие коды о текущем состоянии бортовых устройств, кинематических параметрах движения аппарата, глубине, отстоянию от дна, параметрах навигационного препятствия впереди по курсу АНПА.

При выполнении миссии оператор может выполнить его коррекцию или прервать выполнение, отправив соответствующие команды на аппарат. Траектория аппарата координируется по данным ГАНС-УКБ [5].

Схематичное представление системы «СО–АНПА» представлено на рис. 1.

Таким образом, опыт создания и использования автономных обитаемых подводных аппаратов в различных странах представляется достаточно редким и, в определенной мере, оказывается результатом «завоевания» автономными аппа-



Рис. 1. Схематичное представление СО-АНПА

Fig. 1. Schematic representation of SO-AUV

Подводные работы, выполняемые с применением НПА

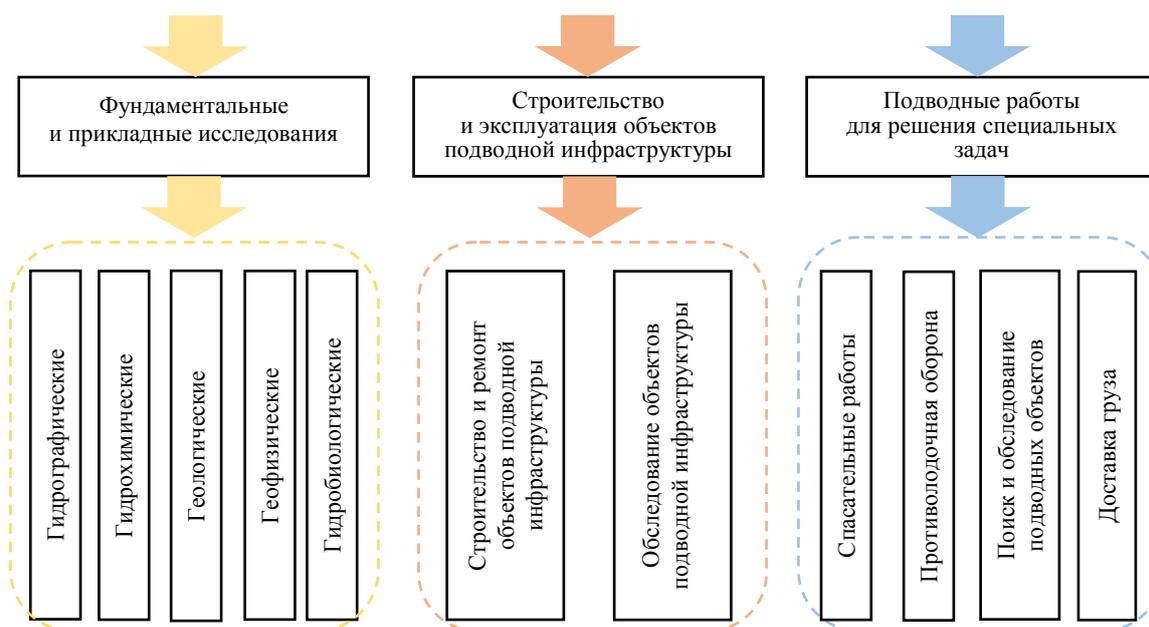


Рис. 2. Подводные работы, решаемые АНПА

Fig. 2. Underwater work solved by AUV

ратами своего места в комплексе подводных технических средств.

Задачи, решаемые с использованием АНПА. Выделим основные функциональные задачи, для решения которых применяются НПА, используя в качестве классификационного признака виды выполняемых работ.

При достаточно высокой степени обобщения количество видов подводных работ можно свести

к трем: фундаментальные и прикладные исследования, строительство и эксплуатация объектов подводной инфраструктуры, работы для решения специальных задач (рис. 2).

Фундаментальные исследования носят научный характер. Под прикладными исследованиями подразумеваются работы, направленные на изучение океана с целью определения количественных характеристик природных факторов, оказы-

вающих влияние на функционирование морских сооружений, на организацию добычи промысловых объектов, а также на эффективность выполнения задач флотом. К природным факторам, изучение которых возможно с использованием НПА, относятся: гидрофизические, гидрохимические, геологические, геофизические и гидробиологические. Изучение физико-химических свойств – температуры, давления, солености, плотности, скорости звука и т. д. – выполняется в рамках гидрофизических и гидрохимических факторов. Изучение состава, физических свойств, геоморфологии донных осадков выполняется в рамках геологических и геофизических факторов.

Задачи подводного строительства и эксплуатации объектов подводной инфраструктуры не требуют специального пояснения. АНПА полезны при подъеме деталей, замене подводного оборудования, перемещения на грунте объектов, подводных стыковочных операциях и т. д.

Спасательные аппараты с возможностью принятия на борт экипажа аварийных подлодок в настоящий момент получают новый облик, становясь практически ТНПА со спасательной капсулой. Так, например, в 2008 г. в эксплуатацию был введен Submarine Rescue Diving and Recompression System (SRDRS) «Falcon», при помощи которого российская подводная лодка Б-871 «Алроса» в рамках учений НАТО продемонстрировала возможность спасения своего экипажа [4].

Исторически наибольшее практическое значение в развитии НПА имели обзорно-поисковые задачи. В дальнейшем обзорно-поисковые задачи усложнились, благодаря включению в них функций обследовательского характера. Современные аппараты способны выполнять поиск и обследование довольно разнообразных подводных объектов: минно-подобные объекты, затопленные источники радиоактивных и отравляющих веществ, затонувшие суда различных типов, гражданские самолеты и т. д.

Предложенная классификация дает достаточно полное представление об основных подводных работах, однако не позволяет добиться однозначности в определении класса используемого аппарата. Для этого рассмотрим подводные работы и оценим возможности их автоматизации. С этих позиций работы можно разделить на три группы.

Работы первой группы характеризуются тем, что аппарат перемещается в толще воды. Наиболее пригодны для выполнения работ первой группы БНПА и ТНПА, а также АНПА простей-

шего типа, управляемые по жесткой временной программе с навигационной привязкой траектории к локальным координатам [2].

Особенность работ второй группы заключается в необходимости функционирования аппарата вблизи дна или подводного объекта. Такие работы могут осуществлять два типа аппаратов: аппарат, буксируемый за средством доставки морского десанта, и АНПА.

Работы третьей группы характеризуются сложностью и точностью выполняемых операций с учетом изменений внешней обстановки, и на сегодняшний день требуют непосредственного участия оператора в управлении аппаратом. К данной группе относятся работы, связанные со строительством и ремонтом объектов подводной инфраструктуры, а также спасательные работы.

Гидроакустические средства АНПА. Ведущая роль в комплексе радиоэлектронного бортового оборудования АНПА отводится гидроакустическим средствам (ГАС).

К основным функциям ГАС в составе АНПА относится получение гидроакустической информации о подводной обстановке в интересах решения следующих задач [6]:

- гидрофизические исследования (определение скорости звука в воде; стратификация течений в толще воды, определение направления и модуля скорости течения);

- геофизические исследования (определение отражательной способности различных грунтов);

- гидробиологические исследования (определение размеров биологических объектов, биомассы в косяках рыб и в других биологических скоплениях);

- противолодочная оборона (обнаружения сигналов, рассеянных подводными объектами);

- геологические исследования (стратификация донного грунта);

- поиск и обследование подводных объектов (в том числе объектов подводной инфраструктуры);

- обеспечение безопасности движения АНПА.

Другое направление использования ГАС в составе АНПА – это определение параметров, непосредственно связанных с процессом управления движением АНПА в среде:

- формирование навигационных параметров НПА (определение координат и вектора скорости движения НПА);

- обеспечение звукоподводной связи между АНПА и СО.

Из всего многообразия задач, решаемых при проведении геологических исследований с использованием АНПА, остановимся на картографировании подводного рельефа и стратификации донных осадков.

Как известно, базовый тип карт подводного рельефа – это батиметрические карты. Для отражения морфологии и типов рельефа используют геоморфологическое направление в морской картографии. Традиционным средством батиметрической съемки служит многолучевой эхолот (МЛЭ), измеряющий относительные глубины по широкому сектору обзора перпендикулярно направлению движения носителя. Перспективным средством изучения рельефа дна является интерферометрический гидролокатор бокового обзора (ИГБО). Традиционные гидролокаторы бокового обзора (ГБО), однолучевые и многоканальные, также не утрачивают свою актуальность и широко применяются в гидрографии для первичной оценки типа верхнего слоя грунта [7].

Для более полной характеристики дна важно знать информацию о распределении и составе грунта по глубине. Такие сведения необходимы для обеспечения нужд мореплавания и народного хозяйства: выбора мест якорных стоянок, устройства гидротехнических сооружений, прокладки подводных кабелей, нефтепроводов и пр. В последние годы интерес к изучению грунтов возрос в связи с расширением добычи в шельфовой зоне полезных ископаемых. Для классификации типов донных грунтов и определения состава морских донных осадков широко используются акустические профилографы (ПГ).

Для гидроакустического поиска и обследования объектов на дне наиболее эффективны гидролокаторы бокового, кругового и секторного обзора (ГБО, ГКО, ГСО, соответственно), с помощью которых можно получать двумерные гидролокационные изображения (ГЛИ) обследуемых поверхностей и объектов. В результате оператор имеет возможность видеть пространственное расположение деталей окружающей обстановки и, как следствие, наиболее полно использовать анализирующие возможности для оценки ситуации и принятия решения.

Кроме того, для поиска объектов в толще грунта широко применяются ПГ и параметрический ГБО (ГБО-П), а для формирования цифровой модели обследуемого объекта – МЛЭ или ИГБО [8].

Для функционирования АНПА в экстремальных условиях сенсорная система, в общем слу-

чае, должна обеспечивать обнаружение препятствий впереди по курсу АНПА, определение отстояний АНПА относительно грунта, днища или борта СО. По этой информации система управления движением АНПА формирует оптимальную траекторию, обеспечивающую обход препятствий, а также необходимые подъемы и погружения.

Обнаружение препятствий впереди по курсу АНПА обеспечивается носовым однолучевым навигационным эхолотом (НЭ) или «впередсмотрящим» ГСО, или ГКО, озвучивающим определенный сектор. Выполнение задач по определению отстояний относительно грунта, днища или борта СО обеспечивается совокупностью однолучевых НЭ.

Таким образом, состав гидроакустических средств АНПА определяется возлагаемыми задачами (миссией использования) [9]:

- поиск и обследование,
- обеспечение безопасности движения,
- обеспечение безопасного подледного плавания и всплытия.

Системы и модули АНПА. Возрастающие требования к производительности и качеству выполняемых подводных работ обусловлены постоянным совершенствованием АНПА. К наиболее важным показателям АНПА относятся их автономность, состав и характеристики полезной нагрузки, а также массогабаритные характеристики (МГХ). В связи с этим проектирование и разработка АНПА направлены на повышение уровня технологичности и удобства технического обслуживания.

Разнообразие назначения и физических принципов работы модульного состава АНПА накладывает жесткие, а зачастую и противоречивые требования к концепции конструирования и внутренней системной организации. Функционал АНПА, начиная от оборудования, автономности и заканчивая формой и цветом, напрямую зависит от задач, которые возлагаются на проектируемое изделие, что сопровождается определением цели будущего использования и требуемых характеристик работы [10].

При создании опытного образца каждая модульная система разрабатывается с некоторым запасом, что в последствии позволит обеспечить резерв по размещению дополнительных электронных блоков, введения новых устройств, наращиванию вычислительных мощностей.

Независимо от функционального назначения и возлагаемых задач базовый вариант АНПА содержит стандартные модульные системы, которые приведены на рис. 3.



Рис. 3. Модульный состав аппарата GAVIA
Fig. 3. Modular composition of the GAVIA apparatus

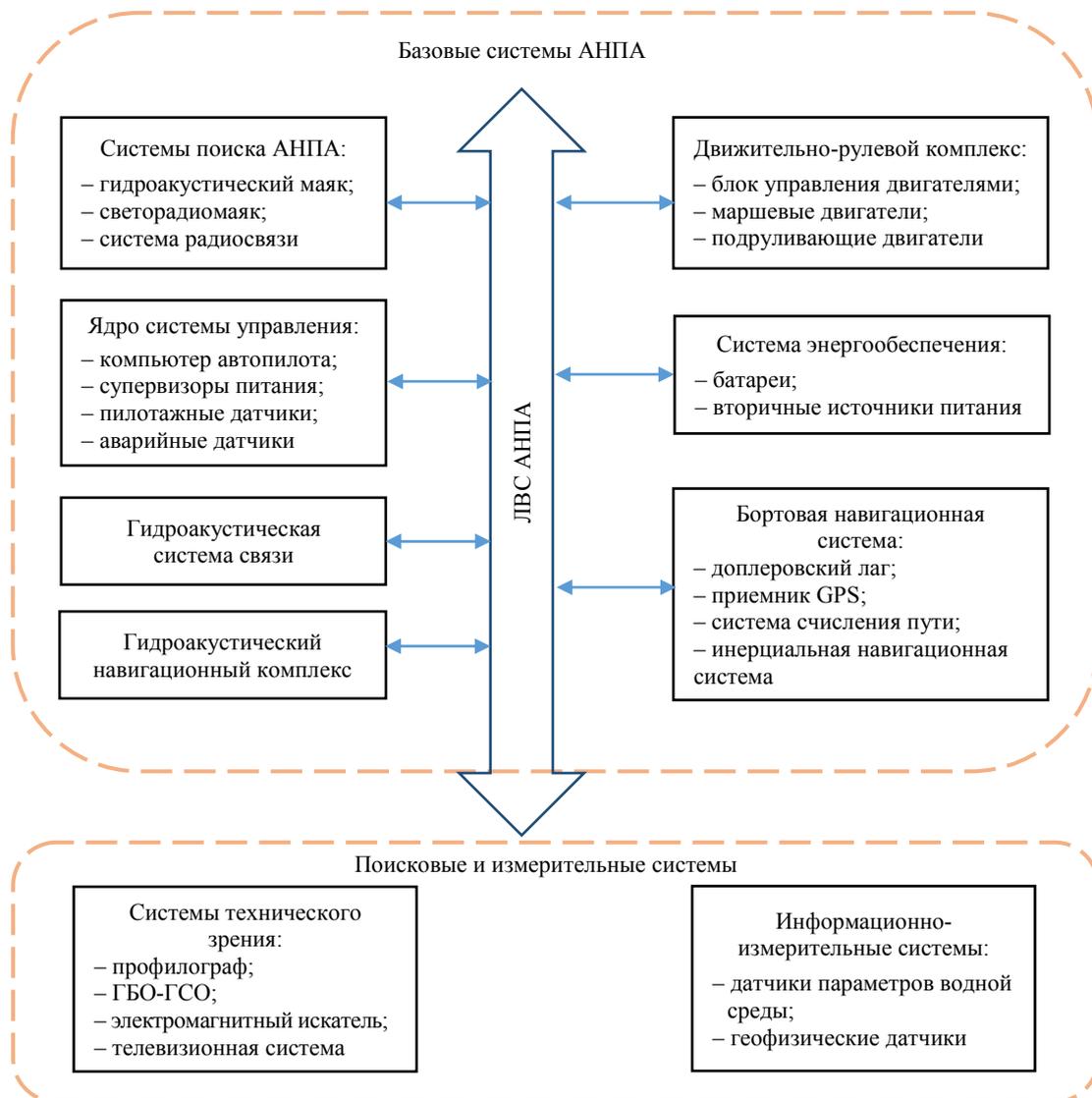


Рис. 4. Функциональная схема ЛВС АНПА
Fig. 4. AUV LAN functional diagram

На рис. 3 представлен АНПА «GAVIA», разработанный исландской фирмой «Hafmynd».

Система управления любого современного подводного аппарата содержит бортовую локаль-

ную вычислительную сеть (ЛВС). В общей структуре ЛВС системы управления можно выделить базовые блоки, обеспечивающие функцио-

нирование АНПА как носителя аппаратуры, и информационно-поисковые (рис. 4).

Базовыми блоками АНПА являются следующие системы и комплексы [1]:

- система поиска АНПА;
- движительно-рулевой комплекс;
- система энергообеспечения;
- система программного управления;
- бортовая навигационная система;
- гидроакустический комплекс навигации и связи;
- поисковые и измерительные системы.

К поисковым и измерительным системам относятся:

- система технического зрения;
- информационно-измерительные системы.

Для формирования управления используются набор пилотажных датчиков и эхолокационная система, а для обеспечения безопасности служат аварийные датчики. Движение организуется с помощью движительно-рулевого комплекса. Дистанционное изменение миссии АНПА может осуществляться при наличии гидроакустической системы связи. Последняя также применяется для оперативного получения данных о текущем состоянии аппарата. Системы поиска АНПА используются для обнаружения АНПА на поверхности после окончания выполнения работ.

Важную роль в конфигурации АНПА играет навигационная система – точность определения координат достигается за счет использования бортовой навигации, включающей инерциальную навигационную систему и доплеровский лаг. При работе АНПА в базе гидроакустических маяков накапливающаяся ошибка счисления пути может быть ликвидирована за счет комплексирования данных бортовой системы навигации и принимаемых на борту откликов маяков длиннобазовой гидроакустической навигационной системы (ГАНС ДБ).

Поисковые системы, входящие в состав системы технического зрения, по способу получения данных можно разбить на несколько групп. К акустическим системам относятся высокочастотные (ВЧ) и низкочастотные (НЧ) гидролокаторы бокового и секторного обзора, а также профилограф. Токпроводящие элементы могут быть обнаружены с использованием электромагнитного искателя (ЭМИ).

Детальная классификация систем и элементов АНПА при использовании только функциональных признаков иногда оказывается трудной ввиду возможной конструктивной принадлежности

функционально однородных устройств к различным системам.

Структура и алгоритмы функционирования систем АНПА определяются не только общей постановкой решаемых задач, но и в значительной степени конструктивными (габариты АНПА, заданный объем прочных контейнеров и др.), техническими (количество внешних линий соединения контейнеров, набор ГАС, автономность и др.) и эксплуатационными (требования к обеспечению надежности и живучести АНПА и др.) ограничениями, взаимосвязь, противоречивость и различная значимость которых обуславливают множество компромиссных решений, как было сказано ранее. Например, с увеличением рабочей глубины погружения аппарата резко возрастают требования к выбору габаритов и бортовой массы, к ее экономичности и надежности [4].

Для аппаратов, предназначенных для работы на больших глубинах, основная часть массы составляет корпусная часть, а на аппаратуру и источники питания отводится меньшая часть массы.

Учитывая массогабаритные характеристики глубоководного аппарата, необходимо принять во внимание долю времени, приходящуюся на погружение и всплытие, которая существенно выше по сравнению с аппаратами для мелких глубин.

Эти технические особенности в свою очередь вызывают увеличение автономности плавания, для обеспечения которой необходима высокая энергоемкость источника питания, а также емкость накопителей информации.

Приведем технические параметры глубоководного автономного необитаемого подводного аппарата «Клавесин-1Р» (Россия, АО ЦКБ МТ «Рубин») (рис. 5), предназначенного для выполнения обзорно-поисковых операций и обследования донных объектов на глубинах до 6000 м.

Масса аппарата – 2500 кг, длина – 5.8 м, диаметр – 0.9 м, рабочая глубина – 6000 м, дальность хода – до 300 км, скорость хода – до 1.5 м/с.

Исходя из рис. 4, АНПА имеет в своем наборе ГАС обзорно-поисковые и исследовательские средства – гидролокатор бокового обзора, электромагнитный искатель, цифровая видеосистема, акустический профилограф, датчики температуры и электропроводности.

Исходя из используемого набора ГАС, АНПА «Клавесин-1Р» предназначен для поиска и обследования донных объектов, акустического профилирования донного грунта и объектов на дне, батиметрическая съемка, видеосъемка морского дна.

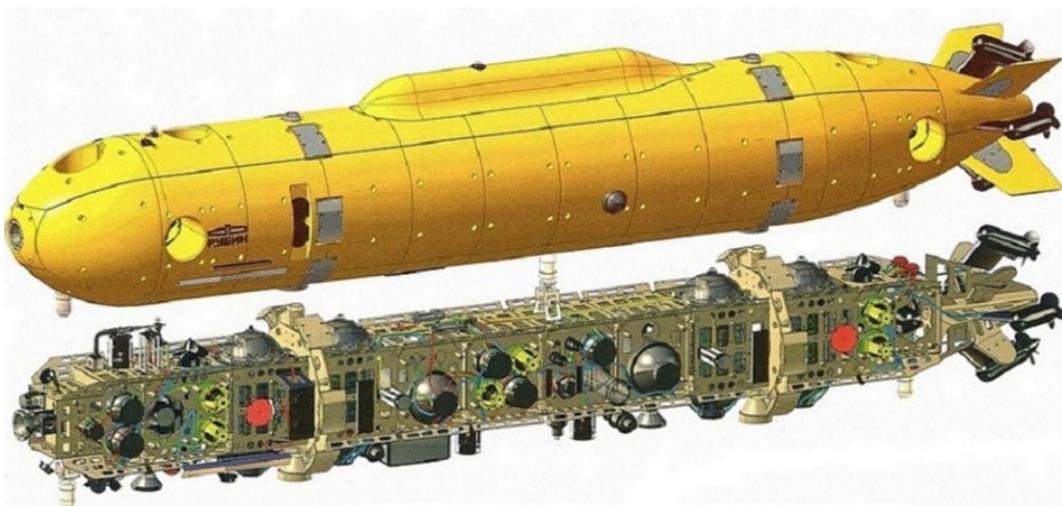


Рис. 5. АНПА «Клавесин-1Р»
Fig. 5. AUV «Klavesin-1R»

Требования к модульному построению бортовых систем
Requirements for the modular construction of on-board systems

Требования	Способ реализации
Размещение модулей	Один или несколько прочных унифицированных контейнеров
Подключение модулей	Общая магистраль, унифицированная схема сопряжения
Связь модулей	Цифровые и аналоговые сигналы
Разветвления магистрали	Иерархия ветвей, связь через контроллеры
Питание модулей	Сигнальные цепи – через магистраль, силовые – через силовую трассу
Управление обменом информацией и контроль состояний	Контроллеры
Обеспечение надежности	Через старшую ветвь магистрали с дублированием питания и сигналов контроля

Расширение функциональных возможностей АНПА сопровождается необходимостью введения в систему управления электронных устройств, создающих высокий уровень помех, в связи с чем также возникает серьезная техническая задача – защита от помех в пределах одного контейнера [3].

Такая задача решается размещением силовых преобразователей напряжения, импульсных светильников и т. п. в специальных герметичных контейнерах. Применение такого подхода к решению задачи повышает требования к характеристикам гермовводов в связи с большим числом применяемых контейнеров и вызывает трудность при унификации функционально законченных блоков.

Вышеприведенные концепции и принципы построения автономных необитаемых подводных аппаратов реализуемы в случае модульного подхода к построению систем управления АНПА. Модульный принцип давно используется в технике при построении различных приборов и устройств для придания гибкости в перестройке

структуры. Модуль – функционально законченное устройство (блок), которое имеет унификацию в части входных/выходных сигналов и способа включения в единую конструкцию.

Требования, которым должна удовлетворять система управления АНПА, построенная по модульному принципу, т. е. основные требования к модульной структуре бортовых систем, приведены в таблице.

Автоматический необитаемый подводный аппарат, принцип конструкции которого предполагает модульную структуру, – это универсальная система автоматизации процесса управления аппаратом при выполнении подводных исследований.

Таким образом, описанные концепции построения автономных подводных аппаратов могут быть реализованы только на основе электронной элементной базы с повышенной степенью интеграции при рациональной организации всех бортовых систем.

Список литературы

1. Агеев М. Д., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Илларионов Г. Ю., Корпачев А. А. Исследовательское проектирование необитаемых подводных аппаратов. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 7–39.
3. Ястребов В. С., Филатов А. М. Системы управления подводных аппаратов. М.: Наука, 1983. 232 с.
4. Агеев М. Д., Ваулин Ю. В., Киселев Л. В. Системы подводной навигации для АНПА // Тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». Владивосток: Дальнаука, 2003. Ч. 2. С. 13–22.
5. Smoot N. Ch. The Marcus-Wake seamounts and guyots as Paleofracture indicators and their relation to the Dutton Ridge // Mar. Geol. 1989. Vol. 88. P. 117–131.
6. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика: учеб. пособие, 2-е изд. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.
7. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1984. 300 с.
8. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
9. Автоматические подводные аппараты / М. Д. Агеев, Б. А. Касаткин, Л. В. Киселев, Ю. Г. Молоков, В. В. Никифоров, Н. И. Рылов // Л.: Судостроение, 1981. 223 с.
10. Никифоров В. В. Автономный робот – разведчик глубоководных полезных ископаемых // Вестн. ДВО АН СССР. 1990. № 4 (37). С. 56–61.

Информация об авторах

Аббакумов Константин Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: keabbakumov@etu.ru

Вагин Антон Владимирович – аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: av.vagin@bk.ru

References

1. Ageev M. D., Kiselev L. V., Matvienko YU. V. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii. M.: Nauka, 2005. 398 s. (In Russ.).
2. Illarionov G. YU., Korpachev A. A. Issledovatel'skoe proektirovanie neobitaemykh podvodnykh apparatov. Vladivostok: Dal'nauka, 1998. S. 7–39. (In Russ.).
3. Yastrebov V. S., Filatov A. M. Sistemy upravleniya podvodnykh apparatov. M.: Nauka, 1983. 232 s. (In Russ.).
4. Ageev M. D., Vaulin YU. V., Kiselev L. V. Sistemy podvodnoy navigatsii dlya ANPA // Tr. VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy». 2003. CH. 2. S. 13–22. (In Russ.).
5. Smoot N. Ch. The Marcus-Wake Seamounts and Guyots as Paleofracture Indicators and Their Relation to the Dutton Ridge // Mar. Geol. 1989. Vol. 88. P. 117–131.
6. Sverdlin G. M. Prikladnaya gidroakustika: ucheb. posobie, 2-e izd. L.: Sudostroenie, 1990. 320 s. (In Russ.).
7. Smaryshev M. D., Dobrovolskij YU. YU. Gidroakusticheskie anteny. Spravochnik po raschetu napravlennykh svojstv gidroakusticheskikh antenn. L.: Sudostroenie, 1984. 300 s. (In Russ.).
8. Urik R. Dzh. Osnovy gidroakustiki / per. s angl. L.: Sudostroenie, 1978. 448 s. (In Russ.).
9. Ageev M. D., Kasatkin B. A., Kiselev L. V., Molokov YU. G., Nikiforov V. V., Rylov N. I. Avtomaticheskie podvodnye apparaty. L.: Sudostroenie, 1981. 223 s. (In Russ.).
10. Nikiforov V. V. Avtonomnyj robot – razvedchik glubokovodnykh poleznykh iskopaemykh // Vestn. DVO AN SSSR. 1990. № 4 (37). S. 56–61. (In Russ.).

Information about the authors

Konstantin E. Abbakumov – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: keabbakumov@etu.ru

Anton V. Vagin – postgraduate student, Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: av.vagin@bk.ru

Статья поступила в редакцию 11.04.2022; принята к публикации после рецензирования 07.05.2022; опубликована онлайн 13.09.2022.

Submitted 11.04.2022; accepted 07.05.2022; published online 13.09.2022.