

К. В. Черненко, А. В. Молчанов,  
С. А. Егоров, А. С. Куценко

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

*Приведена информационно-управляющая система малогабаритного телеуправляемого подводного аппарата разработки НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Рассмотрены особенности построения контуров управления, информационно-измерительного комплекса аппарата, вычислительных аппаратных и программных архитектур борта аппарата и пульта оператора.*

**E-mail:** sm42@sm.bmstu.ru

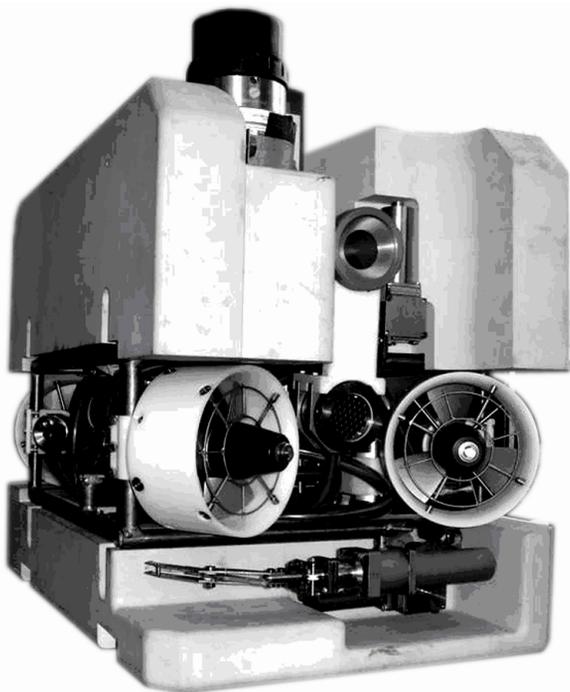
**Ключевые слова:** система управления, подводный аппарат.

Информационно-управляющая система (ИУС) представляет собой набор необходимого оборудования (датчиков, вычислителей, периферийных плат и пр.) и программного обеспечения для реализации взаимодействия подсистем комплекса, формирования управляющих сигналов на движители, лебедку, на другое оборудование и выдачи оператору требуемой информации о состоянии подсистем, параметрах движения аппарата. Условно ИУС можно разделить на бортовую и пульттовую части.

Основой бортовой ИУС телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) являются алгоритмы системы управления (СУ). Прочие аппаратно-программные компоненты ИУС служат для обеспечения работы СУ. Требования к структуре и составу компонентов ИУС формируются на основе требований к СУ, которые, в свою очередь, формируются по требованиям, предъявляемым к аппарату: число управляемых координат, точность стабилизации управляемых координат и т.д. На рис. 1 показан внешний вид разрабатываемого в НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана малогабаритного обзорного ТПА, особенностями которого являются:

- 6 управляемых координат: курс, дифферент, крен, марш, лаг, вертикаль (глубина, отстояние);
- отсутствие программных режимов работы;
- малые габаритные размеры и масса;
- нежесткие требования к стабилизации углового положения.

Из-за отсутствия необходимости реализации программных режимов движения СУ ТПА состоит только из локальных контуров управления движением. Для работы данных контуров требуется информация с позиционных датчиков и производные по соответствующим



**Рис. 1. Внешний вид ТПА**

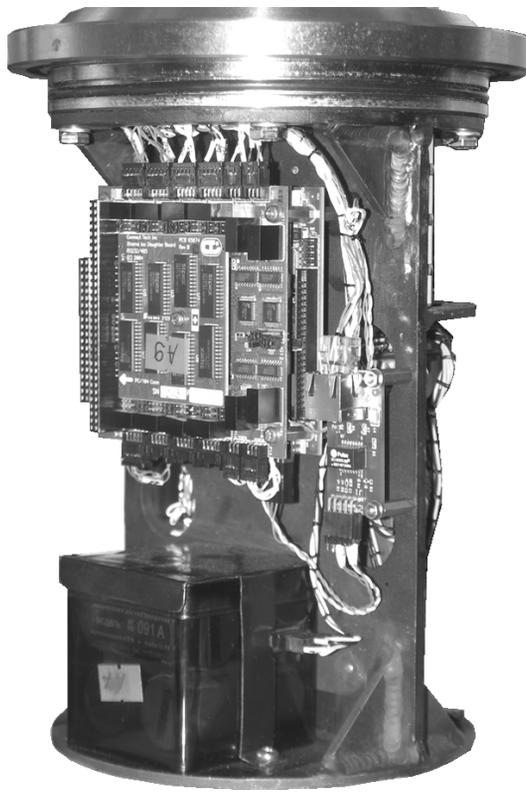
координатам. Всю необходимую информацию о параметрах движения для системы управления формирует информационно-измерительный комплекс (ИИК), состоящий из аппаратной (набор измерителей) и программной частей (алгоритмы обработки показаний датчиков). На основе установленных требований определен следующий состав аппаратной части ИИК: цифровой магнитный компас (МК) с тремя акселерометрами и тремя магнитометрами в своем составе, три датчика угловых скоростей (ДУС), прецизионный датчик давления для измерения глубины, эхолот для измерения отстояния, измеритель линейных смещений по данным с телевизионной камеры для реализации режима динамического позиционирования — система видеостабилизации (СВС). При этом МК и три ДУС объединяются в единую бесплатформенную систему ориентации (БСО), алгоритмы которой, благодаря использованию принципа инвариантности, позволяют уменьшить основные погрешности указанных измерителей и сделать показания по углам ориентации безынерционными. Для получения скоростей по глубине и отстоянию от дна показания соответствующих датчиков дифференцируются после предварительной фильтрации. В свою очередь, СВС не входит в состав бортовой ИУС и выполнена в виде отдельного вычислительного модуля, поставляющего данные о смещениях по основному каналу связи через пульт управления. С учетом требований по точности, стоимости и массогабаритным характери-

стикам в качестве указанных измерителей были выбраны следующие датчики: цифровой магнитный компас TCM-XB (США), трехосевой волоконно-оптический гироскоп VG091-3D (Россия), датчик давления D10 (Германия), эхолот PSA-916 (США). Все датчики имеют цифровой последовательный интерфейс, что позволяет упростить процедуру их встраивания и сузить требования к периферии центрального вычислителя.

В качестве вычислительного ядра используется одноплатная ЭВМ формата PC104 Core Module 620 (Ampro, США) с центральным процессором Geode LX800 (тактовая частота 500 МГц). Выбор данного фактора обусловлен жесткими требованиями по массогабаритным характеристикам, а производительность – отсутствием ресурсоемких алгоритмов и минимизацией энергопотребления и тепловыделения. Кроме того, данная ЭВМ имеет встроенный видеоадаптер и позволяет, помимо карт Compact Flash, подключать стандартный жесткий диск, что обеспечивает удобство работы с вычислителем на этапе отладки. В качестве основной платы периферии используется 12-портовая плата гальванически развязанных последовательных интерфейсов Xtreme 104 Iso (Connect Tech Inc), обеспечивающая подключение всех необходимых датчиков и контроллеров к центральному вычислителю.

На рис. 2 показан внешний вид приборного блока ТПА, где на переднем плане видны блок трех ДУС (внизу), плата периферии и ЭВМ (над блоком ДУС). На рис. 3 приведена структурная схема бортовой ИУС.

Отдельно рассмотрим выбор бортовой операционной системы. Поскольку алгоритмы управления и фильтры ИИК должны работать в реальном масштабе времени, а бортовой вычислитель находится внутри прочного корпуса, что, в свою очередь, затрудняет замену носителя данных в случае аппаратных и программных сбоев, операционная система должна иметь высокую отказоустойчивость. С таких позиций наилучшим образом себя зарекомендовала операционная система реального времени (ОСРВ) QNX. Следует отметить, что компания SWD – основной дистрибьютер QNX в России – распространяет еще и переработанный защищенный вариант данной ОС для встраивания в системы с повышенными требованиями к защите информации, в том числе системы военного назначения. Кроме того, ОС постоянно поддерживается и имеет гибкие возможности по распределенному сетевому вычислению и удаленному администрированию, при этом в отличие от Linux, набирающего популярность в сфере встраиваемых систем, QNX обеспечивает жесткое реальное время, имеет лучшую масштабируемость и более гибкие возможности по диспетчеризации многопоточных задач; QNX – POSIX совместима, что позволяет с минимальными затратами усилий и времени использовать уже имеющийся код, ранее написанный под Linux, и наоборот.



**Рис. 2. Внешний вид приборного блока ТПА**

Для повышения надежности работы было принято решение выбрать многопоточную архитектуру программного обеспечения. Программа состоит из следующих потоков:

- центральный поток: отвечает за обработку алгоритмов СУ, ИИК и модели аппарата (для предварительной отработки алгоритмов). Для тактирования работы центрального потока используется таймер с частотой 100 Гц. На данной частоте работают алгоритмы ИИК, включая фильтры датчиков и алгоритмы БСО. Частота замыкания алгоритмов СУ составляет 20 Гц и получается программным делителем. Данный подход позволяет снизить требования к производительности вычислителя. При этом частота замыкания остается существенно выше частоты среза;

- поток центрального канала связи отвечает за обмен информацией с пультом управления. Обмен по центральному каналу связи осуществляется в режиме запрос-ответ с частотой 10 Гц, при этом мастером является пульт управления (ПУ). Для удобства настройки ТПА на этапе испытаний в протоколе обмена информацией с ПУ помимо основных пакетов введены еще технологические пакеты, реализующие механизм модификации коэффициентов СУ и ИИК;

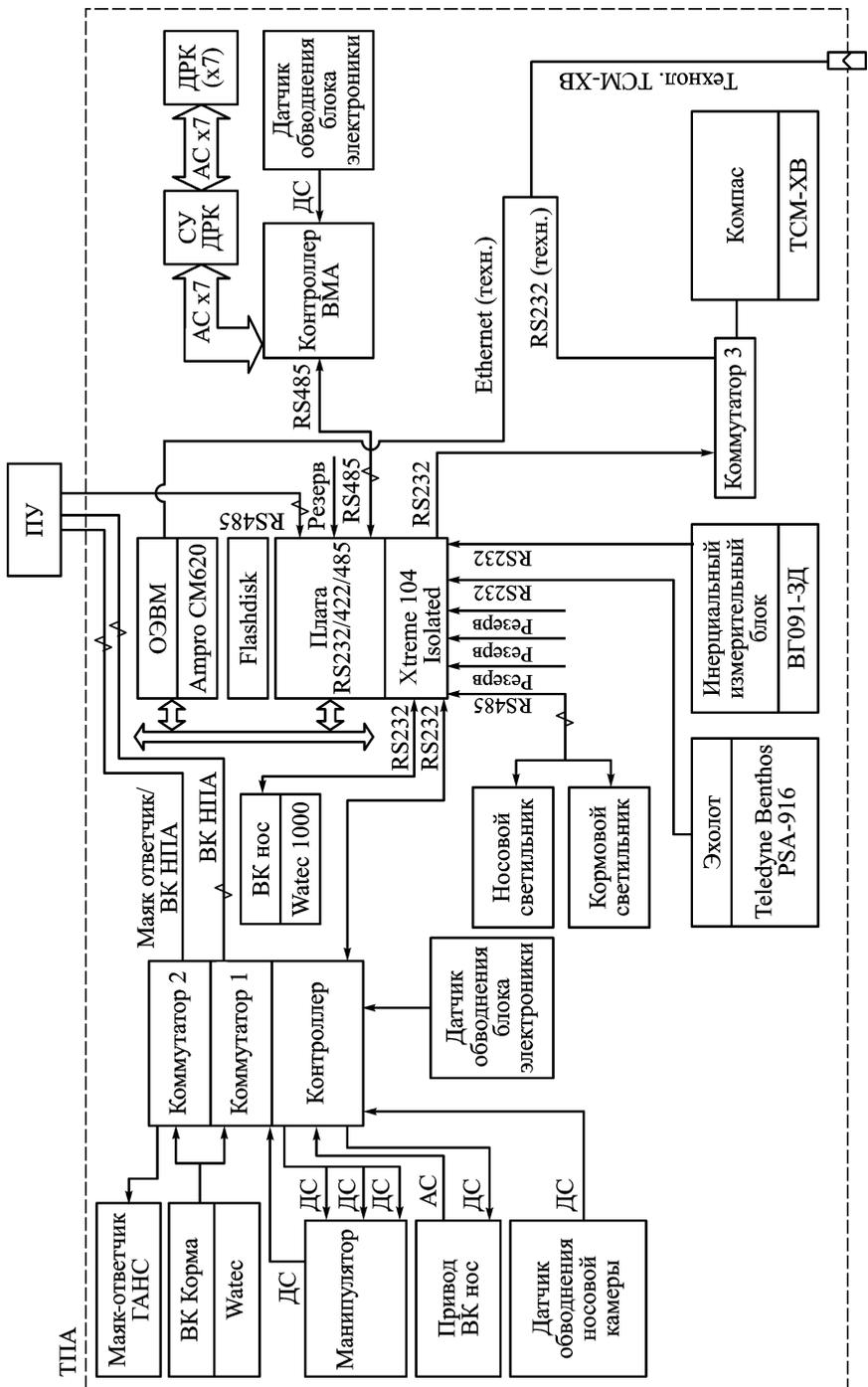


Рис. 3. Схема информационных связей бортовой ИУС ТПА

- потоки обмена с датчиками и контроллерами отвечают за опрос периферийных устройств и распаковку сообщений, приходящих от них. Для простоты реализации и гарантированного высвобождения процессорного времени обработка информации, поступающей с датчиков, ведется по задержкам, подбираемым на основании частоты выдачи информации конкретным периферийным устройством.

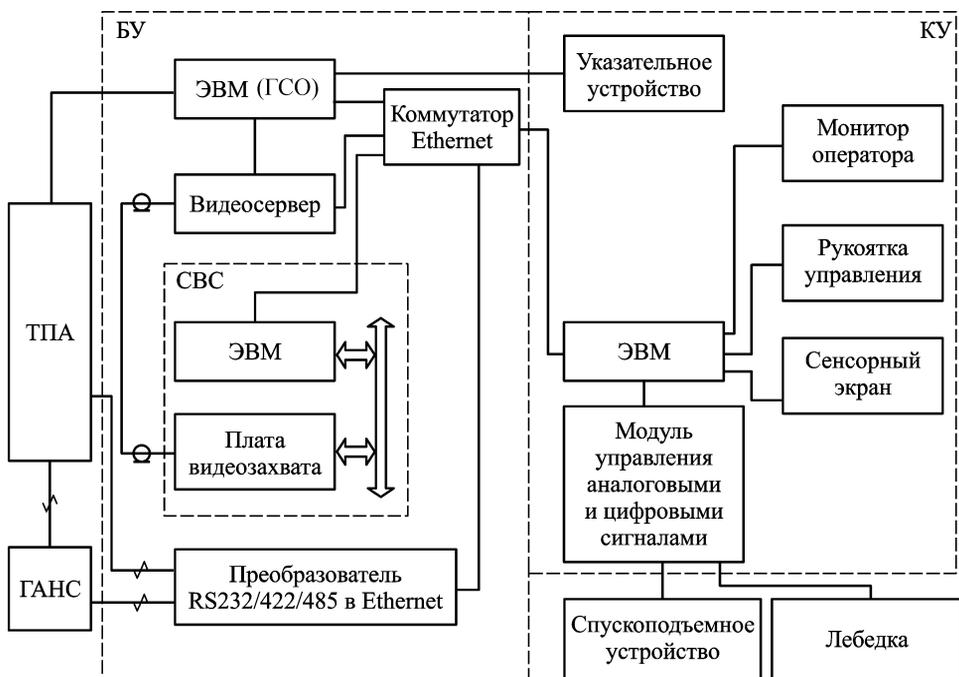
Основным преимуществом данной архитектуры является сохранение работоспособности СУ в целом при отказе отдельных компонентов, а также более эффективное использование ресурсов процессора.

Описанные программно-аппаратные решения позволяют придать бортовой ИУС надежность и делают ее удобной для отладки и дальнейшей модификации.

Аппаратное обеспечение пультовой части ИУС размещено в двух блоках ПУ – блоке управления (БУ) и консоли управления (КУ) (рис. 4).

В состав БУ входят: модуль СВС, видеосервер Axis 241Q с четырьмя каналами, ЭВМ управления и отображения информации с гидролокатора секторного обзора (ГСО), преобразователь RS232/485/422 в Ethernet (Moxa NPort), коммутатор Ethernet.

Система видеостабилизации состоит из вычислителя Advantech PCM-3380F и платы видеозахвата RTD MSMS104+. Для работы СВС используется поворотная носовая ТВ-камера ТПА. Для перевода СУ в режим динамического позиционирования по данным СВС она должна



**Рис. 4. Схема информационных связей пультовой ИУС ТПА**

быть наклонена вниз на угол  $70^\circ$  от горизонта. Рассчитанные параметры движения ТПА передаются по локальной сети на КУ и далее на борт ТПА. Во время работы СВС оператор может получать изображение с носовой или кормовой ТВ-камеры.

Все размещенные в БУ преобразователи данных, получаемых от оборудования комплекса, имеют интерфейс Ethernet, что позволило объединить их в единую сеть и снизить число кабелей между КУ и БУ. На уровне ОС драйвер преобразователя RS232/485/422 в Ethernet представляет последовательные порты в виде стандартных устройств ЭВМ.

Консоль управления (рис. 5) включает в себя органы управления ТПА (сенсорный экран, рукоятка управления движением (РУД), указательное устройство, кнопки управления ГСО) и монитор для отображения телеметрии и изображения с ТВ-камер, одноплатную ЭВМ формата EPIC Neptune (Diamond Systems). Данная ЭВМ имеет:

- встроенный видеоадаптер с аппаратной поддержкой OpenGL 1.3 и декодированием видеопотока MPEG-2;
- два выхода сети Ethernet — один используется для подключения к БУ, второй выведен на технологический разъем КУ;
- встроенный источник питания с диапазоном входного напряжения 8...28 В.



Рис. 5. Консоль управления

По осям РУД проводится управление курсом, маршем и лагом ТПА. Две кнопки, размещенные на рукоятке, управляют движением по вертикальной оси.

Все кнопки управления режимами и подсистемами ТПА, другим оборудованием комплекса размещены на сенсорном экране (рис. 6). Экран разделен на две области: постоянный набор кнопок и вспомогательные кнопки.

Постоянно отображаются кнопки управления движением ТПА, режимами работы СУ, лебедкой, наклоном ТВ-камеры. Часть постоянных кнопок задает отображаемый набор вспомогательных кнопок. Вспомогательные кнопки обеспечивают включение/выключение подсистем комплекса, управление манипулятором ТПА, выбор воспроизводимого канала видеосервера, выбор режима работы носовой

ПИТ	СХВАТ ЗАКР	СХВАТ ОТКР	СВЕТ НОС -	СВЕТ НОС +	8
ПС	СХВАТ ЛЕВ	СХВАТ ПРАВ	СВЕТ КОРМА -	СВЕТ КОРМА +	6
ГАНС	ИО ЛЕВ	ИО ПРАВ	СЛК АВТ	---	ЭКРАН ГСО
ТНПА	ВК РЕЗЕРВ	ВК ТРАССА		ВКК	Линия МО
ОПА					
ЭКРАН ОПЕР	ГЛ	РУЧ	АВТ	СВС	МЛ
ЗВУК	ОТ	КРЕН -	КРЕН +	0.0	0.0
ВК РЕЖИМ	ГМК	Т	В	0	ДИФФ +
ВКНВ	ГА	-	+	Ф	ДИФФ -
ВКНН					

Рис. 6. Сенсорный экран

ТВ-камеры, настройки ГАНС, управление выводом диагностической информации.

В качестве операционной системы ПУ выбрана ОС Linux (за исключением ЭВМ ГСО) исходя из доступности драйверов, наличия документации, описывающей практически все возможности данной ОС, поддержки высокоуровневой графики, возможности оптимизации процесса загрузки, малого размера встраиваемого образа.

Указательное устройство, размещенное на КУ, подключено к ЭВМ ГСО и эмулирует работу манипулятора типа “мышь”. Выход ЭВМ подключен на вход видеосервера. Оператор может выполнять настройку и просматривать изображение от ГСО (Tritech Super SeaKing) вместо изображения с ТВ-камер. ЭВМ ГСО функционирует под управлением ОС Windows, что обусловлено использованием штатного программного обеспечения локатора.

Программа КУ сделана многопоточной. Первый (центральный) поток занимает обработчик графического интерфейса (экранные кнопки сенсорного экрана и телеметрия с ТПА) и в нем недопустимо формирование задержек, так как в эти моменты прекращается обработка нажатия экранных кнопок.

Второй поток работает с частотой 100 Гц. В нем формируется логика взаимодействия с ТПА и ГАНС, обработка сигналов РУД (фильтрация и ограничение сигнала). С использованием делителя частоты (до 10 Гц) осуществляется запись данных в порты всех устройств.

Третий поток обеспечивает чтение данных со всех портов и анализ поступающей информации.

Четвертый поток отвечает за обработку видеосигнала с видеосервера. С экранных кнопок сенсорного экрана задается отображаемый канал видеосервера или квадратор (изображения со всех четырех каналов, уменьшенные по высоте или горизонтали в два раза).

Для окончательной отработки алгоритмов ИУС в полунатурном эксперименте и реальных условиях используется внешняя технологическая ЭВМ. Она может подключаться к технологическому разъему на БУ или КУ, в обоих случаях она имеет доступ ко всем устройствам в сети, что позволяет контролировать их и настраивать в процессе отладки комплекса. Конфигурационные файлы КУ, устройств в БУ и ТПА (хранящиеся на КУ и записываемые на ТПА по внешней команде) могут быть изменены удаленно, по сети.

Из специального программного обеспечения на данной ЭВМ установлен программный комплекс МВТУ 3.0. Он взаимодействует с программой консоли управления по протоколу UDP и может подключаться в процессе работы комплекса без выключения питания или перезапуска программы КУ. Из комплекса МВТУ 3.0 через КУ отправляется запрос на ТПА с идентификаторами требуемых переменных из СУ,

ИИК и технологических параметров программного обеспечения аппарата. Аналогично могут быть запрошены переменные и данные из программы КУ.

Также из комплекса МВТУ 3.0 можно подать команду на запись конфигурационного файла на ТПА с КУ после его изменения. Другая команда позволяет выполнить обратную операцию.

Для программы КУ реализована только функция загрузки нового файла коэффициентов. Для чтения и проверки текущих значений коэффициентов файл доступен по локальной сети.

Другая группа подаваемых из комплекса МВТУ 3.0 команд позволяет изменять режим работы программного обеспечения КУ, БУ, ТПА с основного режима на технологический, что обеспечивает доступ к дополнительным возможностям отладки и настройки систем комплекса.

В настоящее время выполнена отработка алгоритмов и программного обеспечения ТПА, ПУ в лабораторных условиях и при испытаниях ТПА в гидроканале ЦАГИ.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012