

УДК 551.46.077:629.584

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДГОТОВКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ МИССИИ АНПА

Г. Д. Елисеенко, А. М. Павин

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН¹

Описывается разработанный в ИПМТ ДВО РАН комплекс программ, предназначенный для подготовки и сопровождения миссии автономных необитаемых подводных аппаратов. Особенностью данного комплекса является объединение в себе функций поста оператора и навигатора АНПА, что позволяет решать задачи формирования миссии, проведения предстартовой подготовки аппарата к запуску, обеспечивать навигационное сопровождение подводного робота и выполнять функции телеуправления на одном компьютере обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) позволяют выполнять различного рода задачи, такие как патрулирование, поиск, обследование объектов морского дна, задачи морской нефтегазодобывающей отрасли и многие другие [1]. Перед запуском оператору необходимо произвести диагностику состояния робота, при необходимости устранить неисправности, составить и проверить миссию для выполнения работ. Во время миссии оператор следит за поведением и состоянием аппарата, его координатами, скоростью, глубиной и высотой движения. При возникновении нештатных ситуаций (например, отклонение от заранее заложенной траектории) или поломке оборудования оператор должен иметь возможность вмешаться в процесс управления путем коррекции движения или остановки мис-

сии. После завершения работы необходимо сохранить все полученные аппаратом данные для последующего анализа и обработки.

Для решения поставленных задач необходимо иметь специализированное программное обеспечение (ПО) подготовки и сопровождения миссии АНПА. В Институте проблем морских технологий (ИПМТ ДВО РАН) ведутся активные исследования в области разработки и использования подобного ПО для подводных аппаратов. Результатом исследований стало создание специализированного программного комплекса, называемого «Мастером запуска», который позволяет при помощи графического интерфейса пошагово подготовить АНПА к запуску, запустить и контролировать

¹ 690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел/факс: (423) 2432416. E-mail: pavin@bk.ru, eliseenko_g@mail.ru

процесс выполнения миссии, а также сохранить и структурировать данные из бортовых накопителей информации после подъёма аппарата. В данной работе описываются принципы построения и функционирования данного комплекса, приводится алгоритм всего цикла работы с аппаратом от создания миссии до сохранения результатов её выполнения.

■ **Взаимодействие программных модулей АНПА с постами управления и связи**

Взаимодействие оператора АНПА с аппаратом производится через пост управления, который состоит из компьютера и судового блока. На рис. 1 приведена типичная для аппаратов ИПМТ ДВО РАН схема взаимодействия судовой (или береговой) системы наблюдения с подводным роботом. Как правило, для наблюдения за аппаратом выделяются один компьютер поста управления и один компьютер поста навигатора. При этом подготовка миссии, её моделирование, загрузка на аппарат и выгрузка полученных данных производится на посту управления, а наблюдение за аппаратом и его управление в процессе выполнения миссии – на посту навигатора. Исключение составляет управление аппаратом по радиомодему, которое производится с поста управления, т.к. радиомодем физически соединен с блоком системы управления. Данная схема является исторически сложившейся и обусловлена как наличием разных операционных систем на компьютерах сети (*QNX* – на компьютерах подводного робота и компьютере управления; и *Windows* – на компьютере навигатора), так и физическим подключением радиомодема и гидроакустиче-

ской навигационной системы (ГАНС) к соответствующим судовым блокам. При разработке нового кроссплатформенного программного обеспечения аппаратов ИПМТ данный подход был несколько модернизирован. Поскольку все компьютеры (как аппаратов, так и постов управления и навигации) находятся в общей сети, то ничто на физическом уровне не запрещает управлять аппаратом с любого из этих компьютеров. Таким образом, компьютеры поста управления и навигации можно сделать взаимозаменяемыми, дублирующими друг друга или оставить только один из них. При этом имеет смысл отказаться от двух различных комплексов программ подготовки миссии, слежения за аппаратом и управления в пользу одного, который к тому же может функционировать одновременно на нескольких компьютерах для обеспечения надежности всего программно-аппаратного комплекса.

Взаимодействие постов наблюдения и управления с подводным аппаратом на физическом уровне обеспечивается

с помощью следующих интерфейсов:

1) сетевого интерфейса *Ethernet*, если аппарат находится на берегу или борту обеспечивающего судна и подключен к сети;

2) по радиомодему, если аппарат находится на поверхности или на борту судна обеспечения;

3) по гидроакустическому каналу, если аппарат находится в воде.

Таким образом, наличие транспортного уровня между компьютерами по каждому из доступных интерфейсов позволяет построить комплекс программ управления и наблюдения за аппаратом, который может быть запущен одновременно на любом количестве компьютеров наблюдения. Для решения задачи обмена данными по сети между компьютерами с разными операционными системами была использована специализированная библиотека интерфейсных функций. В ИПМТ давно ведутся исследования по созданию кроссплатформенной библиотеки передачи данных [2].

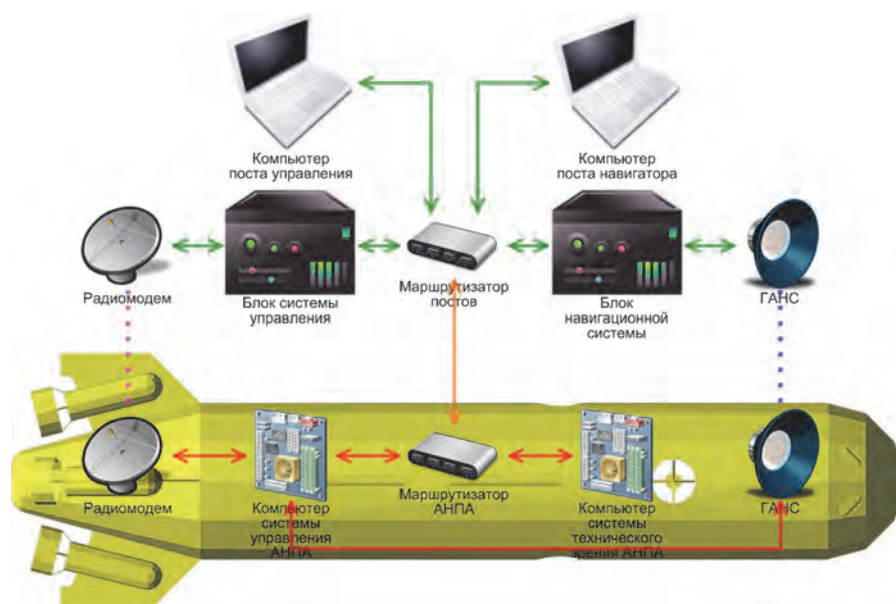


Рис. 1. Схема физического взаимодействия программно-аппаратного комплекса АНПА с постами управления и связи

■ Мастер запуска

Взаимодействие с АНПА начинается с главного окна мастера запуска (рис. 2), в котором отображается вся необходимая информация для подготовительных работ и контроля выполнения миссии. Конструктивно окно разделено на несколько частей. В центральной части на координатной сетке или карте местности отображаются траектория, местоположение и курс АНПА. Причём все данные, отображаемые в мастере запуска, могут быть получены как из самого аппарата, так и из программ моделирования.

С точки зрения программы эти данные абсолютно равноценны и отличаются только наличием флага моделирования в пакете от конкретной системы. Таким образом, обеспечивается многократная проверка функционирования комплекса на модельных данных.

На рис. 2 приведён пример проведения модельного эксперимента движения аппарата по траектории в виде квадрата. В нижней части окна расположен бортовой журнал, в котором отображаются все сообщения подсистем аппарата. Можно видеть, что при проведении модельного экспе-

римента в него попали сообщения от подпрограмм миссии (агентов управления) о смене галсов. Правая часть экрана отображает данные, которые поступают по всем каналам связи, в том числе и акустическому, во время функционирования аппарата под водой. В интерфейсе программы принята единая стилистика: если какой-либо параметр поступает и находится в корректном диапазоне, то он отображается зелёным или синим цветом, при выходе за диапазон – красным, отсутствующий параметр выделяется зачеркиванием. Контролируемые параметры и их

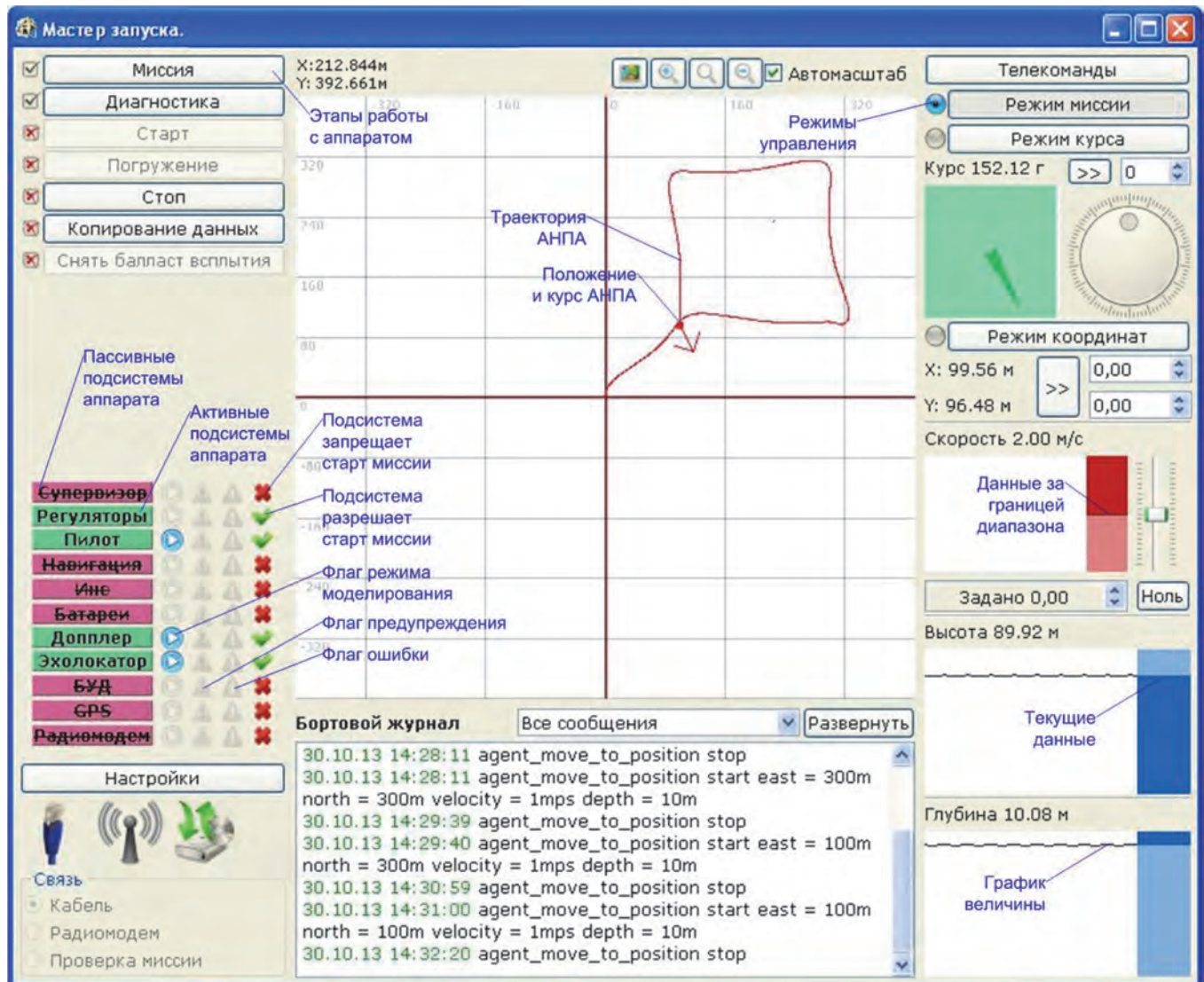


Рис. 2. Главное окно программы подготовки и сопровождения миссии АНПА

фактические значения располагаются рядом для удобного сравнения текущих и требуемых величин. Поэтому здесь же (в правой части экрана) располагаются выбор режима функционирования аппарата, параметры ручного управления по радиомодему и вызов команд управления по акустическому каналу (телекоманды). В левой части экрана располагаются выбор этапов работы с аппаратом (верхняя часть) и список подсистем аппарата с одновременной индикацией их состояния и возможностью вызова приложения для работы с конкретной подсистемой.

■ Создание миссии и подготовка к запуску

Полный цикл подготовки и запуска миссии состоит из нескольких этапов (рис. 3): подготовка миссии, диагностика аппарата, старт, погружение аппарата и завершение работ. Под миссией понимается специальная программа управления, предназначенная для автономного функционирования подводного аппарата под водой и выполнения им поставленных задач. Используемые последние десять лет на аппаратах ИПМТ миссии представляли собой специализированный код на языке C, который компилировался с ядром системы управления и участвовал в формировании траектории во время автономного плавания подводного робота. Разработки в области формирования нового языка написания миссии [3, 4] привели к появлению другого способа задания действий аппарата. На текущий момент существует реализация языка в виде скрипта, запускающего уже скомпилированные подпрограммы управления аппаратом. Такой подход обеспечивает формирование

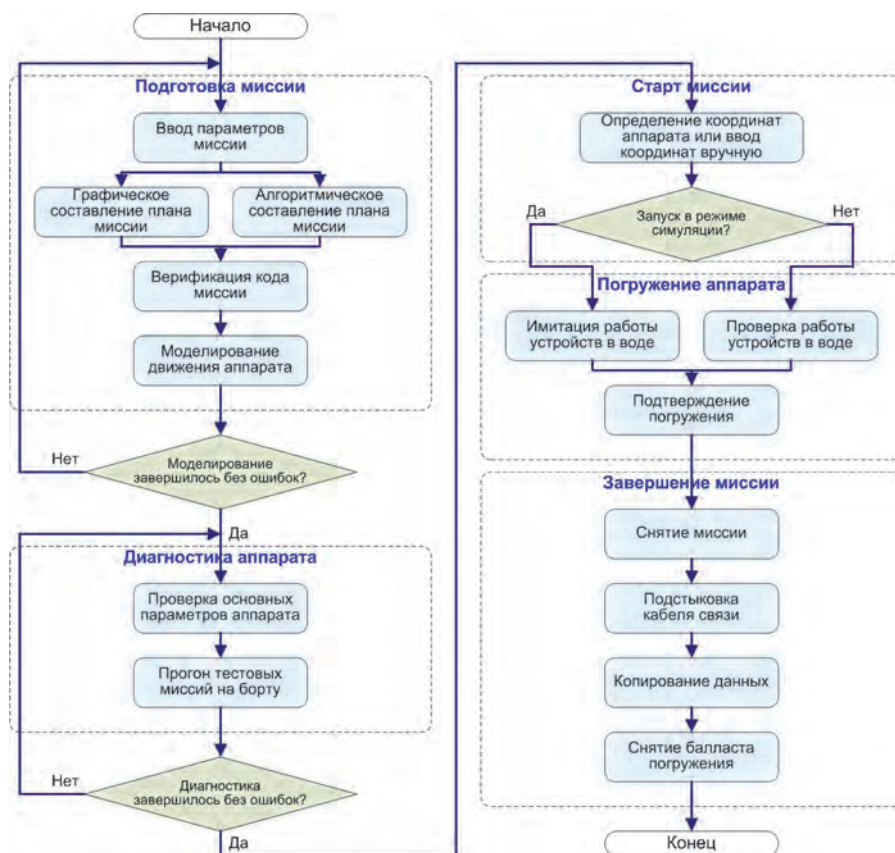


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подготовки и запуска миссии

миссии без необходимости перекомпиляции какого-либо модуля системы управления, что позволяет загружать миссии без подъёма аппарата из воды по радио- или акустическому модему. При этом уменьшается время, необходимое на запуск аппарата с новым заданием и увеличивается надёжность системы в целом, т.к. все основные модули управления не подвергаются изменениям.

Основу языка написания миссии составляет скрипт *mission.bat*, который успешно интерпретируется как в операционных системах *Windows*, так и в *Unix*-системах, поскольку представляет собой простое перечисление исполняемых файлов с набором входных параметров (рис. 4 – справа). В этом скрипте вызываются программы (агенты) движения аппарата, управления устрой-

ствами, а также специальные программы обнаружения и обследования каких-либо объектов (рис. 4 – слева). Полный текст программы управления состоит из 3 файлов: *scenario.bat*; *plan.bat*; *mission.bat* и одного файла с параметрами запуска: *startup.ini*. Вызов файла *mission.bat* происходит в начале скрипта *plan.bat* и завершается вызовом подпрограммы всплытия без сброса балласта. В свою очередь, файл *plan.bat* аналогично включен в скрипт *scenario.bat* и завершается вызовом подпрограммы всплытия со сбросом балласта. При этом пользователем составляется только файл миссии, что исключает возможность завершения работ без финального всплытия аппарата. На рис. 4 приведён пример типовой миссии движения по квадрату на глубине 10 м с заданной скоростью

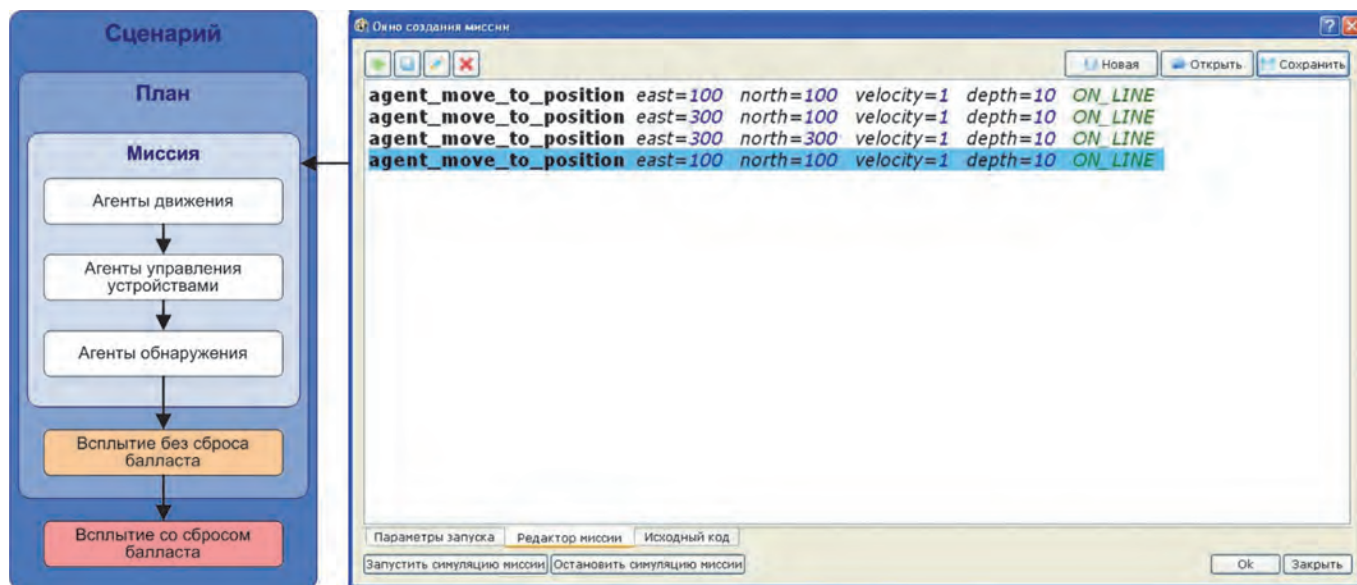


Рис. 4. Создание типичной миссии поведения подводного аппарата

1 м/с. Опция *ON_LINE* указывает программе движения осуществлять выход в точку не по наикратчайшему расстоянию, а вдоль линии (при наличии течений и большого радиуса разворота аппарата эти траектории могут отличаться).

■ Моделирование поведения АНПА

После окончания составления миссии производится её

проверка путём моделирования поведения АНПА [5] на компьютере поста управления (без необходимости использования самого робота). Заложенная в архитектуру программного обеспечения аппаратов ИПМТ концепция позволяет производить ускоренную симуляцию с использованием реального кода миссии и некоторых программных компонент самого робота. На рис. 5 приведена схема моделирования поведе-

ния АНПА по «короткому контуру», т.е. без участия подключения к аппарату. При этом только программа симуляции является специфичной компонентой, не участвующей в работе АНПА во время реального запуска. При проведении моделирования данный модуль порождает информационные сообщения от имени навигационной системы с частотой до 10000 раз в секунду. Остальные модули «не подозревают», что работают не с реальными, а модельными данными, что повышает надёжность проверки системы за счёт отсутствия в программном коде веток типа «если моделирование, то действие № 1, иначе – действие № 2».

Программа симуляции принимает от регулятора команды управления двигателями, рассчитывает новые кинематические параметры аппарата и публикует их в качестве сообщений навигационной системы. Расчёт шестимерных векторов скорости $v(t)$ и местоположения $x(t)$ аппарата в текущий момент времени t производится на основе значений этих величин на предыдущем шаге $t-1$:

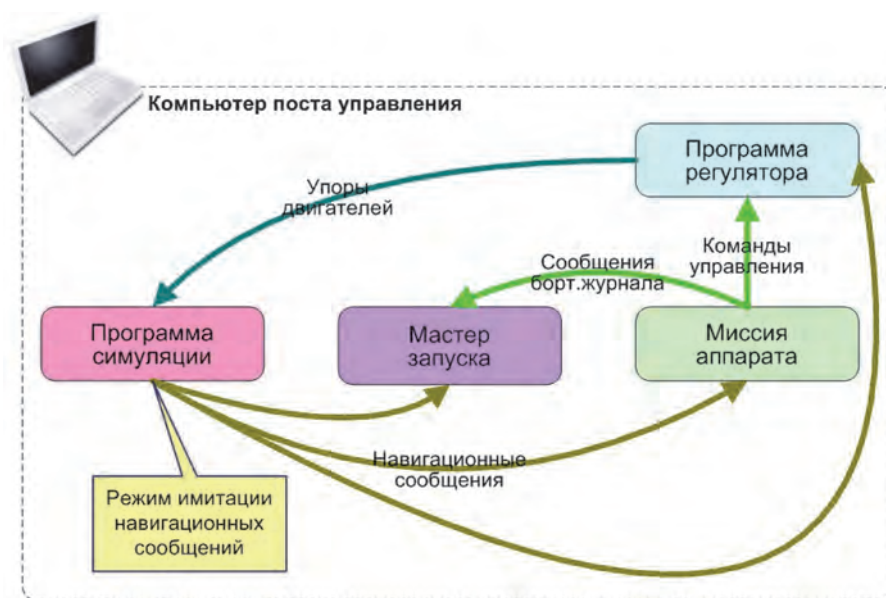


Рис. 5. Схема моделирования поведения АНПА по «короткому контуру» (без участия подключения к аппарату)

$$\begin{cases} \vec{v}(t) = \vec{v}(t-1) + dt \cdot \vec{a} \\ \vec{x}(t) = \vec{x}(t-1) + dt \cdot \vec{v}(t) + \frac{dt^2}{2} \cdot \vec{a} \end{cases} \quad (1)$$

где dt – время интегрирования, которое при ускоренной симуляции больше реального промежутка времени (до 1 сек), при этом количество навигационных циклов (следовательно, и ускорение времени) за это время может достигать 10000; $\vec{a}$ – шестимерный вектор ускорения аппарата по курсу, дифференту, крену, на север, на восток, вверх в абсолютной системе координат (СК).

В свою очередь, вектор ускорений аппарата в абсолютной СК рассчитывается путём аффинных преобразований вектора ускорений $\vec{a}'$ из локальной СК (связанной с аппаратом):

$$\begin{cases} \vec{a} = G(\varphi, \psi, \theta) \cdot \vec{a}' \\ \vec{a}' = M^{-1} \cdot (\vec{f}_T + \vec{f}_A + \vec{f}_G + \vec{f}_R) \end{cases} \quad (2)$$

где $G(\varphi, \psi, \theta)$ – матрица аффинных преобразований из локальной в глобальную СК; φ, ψ, θ – курс, дифферент и крен аппарата; M – тензор инерции аппарата; $\vec{f}_T + \vec{f}_A + \vec{f}_G + \vec{f}_R$ – сумма действующих на аппарат сил в связанной с аппаратом СК ($\vec{f}_T$ – сила тяги движительно-го комплекса, $\vec{f}_A$ – архимедова сила, $\vec{f}_G$ – гравитационная сила, $\vec{f}_R$ – сила сопротивления жидкости).

Таким образом, циклическое применение формул (1) и (2) позволяет рассчитывать траекторию аппарата и публиковать сообщения навигационной системы, которые, в свою очередь, потребляются программами-агентами миссии, формирующими галсы движения аппарата. Далее галсы движения поступают в регулятор АНПА и преобразуются

в вектор упоров двигателей, который опять поступает на вход программы симуляции, тем самым замыкая цикл моделирования (рис. 5). Если по результатам моделирования оператора устраивают результаты прохождения траектории, не возникло опасных ситуаций (наподобие «выбрасывания на берег»), отсутствуют аварии, хватает заряда батарей для выполнения миссии и т.д., то можно переходить к диагностике аппарата с последующим запуском миссии на борту АНПА.

■ *Диагностика аппарата, запуск и завершение миссии (рис. 6)*

Проверка работоспособности всех систем подводного робота на предмет возможности выполнения составленной программы-миссии производится на этапе диагностики. На этом этапе осуществляется запуск тестовой (диагностической) миссии, в ходе которой идет анализ различных параметров АНПА. Выделяется два класса подсистем подводного робота: обязательные, которые безусловно должны находиться в работоспособном состоянии (например, программа навигационно-пилотажных датчиков, блок управления двигателями) и дополнительные, работоспособность которых необходима при выполнении не всех миссий (например, фотосистема необходима только при съёмке дна). При обнаружении проблем в работе хоть одной из необходимых аппарату систем дальнейший запуск миссии на борту невозможен путем блокировки кнопки «старт» (см. рис. 2 – слева вверх).

При разработке мастера запуска в его архитектуру изначально закладывалась легкая

масштабируемость и адаптация ко всем созданным и создаваемым в будущем аппаратам. Поэтому для решения задачи диагностики (как предстартовой, так и во время функционирования) кроме прогонки тестовых миссий имеется механизм отображения аварий и ошибок всех необходимых в данной конфигурации подсистем аппарата. Для этого в мастере запуска имеется специальный конфигурационный файл, содержащий имена всех компонент аппарата и некоторые их настройки (например, название системы на русском языке, период публикации сообщений и др.). Во время работы АНПА каждая программа системы управления публикует сообщение контрольно-аварийной системы, где указывается, в каком состоянии находится этот модуль. Мастер запуска потребляет эти сообщения, отображает состояния соответствующих систем (см. рис. 2 – слева над кнопкой «настройки») и может запретить старт миссии при наличии критических ошибок в каком-либо модуле. При необходимости можно вызвать окно работы с соответствующей подсистемой, устранить возникшие ошибки и продолжить работу. Если все необходимые подсистемы разрешают старт миссии (рис. 2 – зелёные галочки напротив соответствующих подсистем), то активируется кнопка «старт».

Во время запуска миссии (см. рис. 5) необходимо ввести её название и стартовые навигационные параметры (координаты точки старта, которые считываются с GPS или вводятся вручную). Здесь же проверяется и подтверждается исходный код миссии и производится запуск в реальном или симуляционном режиме. Симуляция существу-

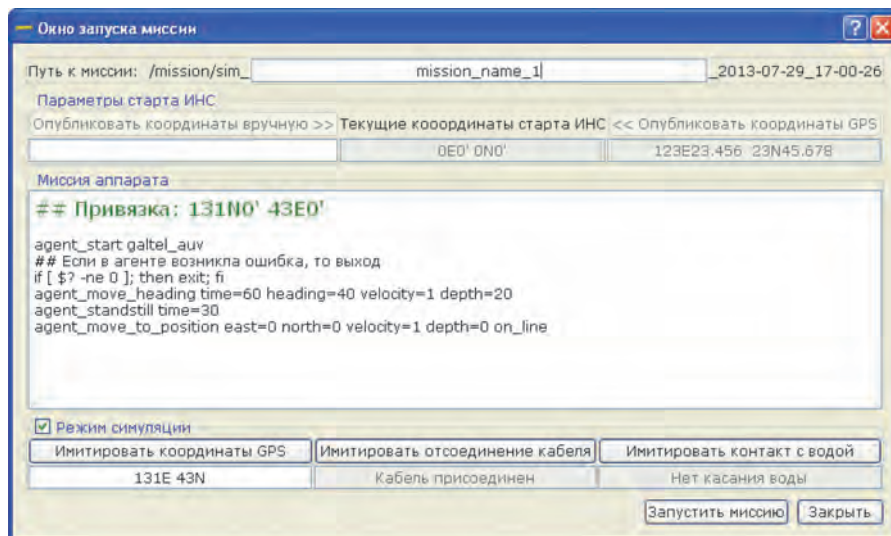


Рис. 6. Окно запуска миссии

ет для прогонки на аппарате составленных миссий в реальном времени. В отличие от ускоренной симуляции в этом режиме задействованы все системы подводного робота (рис. 7), что позволяет проверить ра-

боту всех устройств аппарата в приближённых к реальным условиям. При этом ведётся обмен со всеми устройствами аппарата и обрабатываются их ошибки. Во время симуляции необходимо изменение некото-

рых реальных навигационных данных на модельные, поэтому такие программы, как драйвер навигационно-пилотажных датчиков, эхолотационная система, доплеровский лаг и некоторые другие, потребляют модельные данные и при публикации своих сообщений подменяют свои параметры.

После запуска миссии на аппарат копируются файлы настроек и исходный код файла *mission.bat*, который запускается на компьютере системы управления. В случае успешного копирования возможны отстыковка кабеля связи и спуск аппарата на воду, если миссия стартовала в реальном режиме или сразу начинается выполнение программы в режиме симуляции. При погружении аппарата в воду запускается контрольно-аварийная система, которая собирает информа-

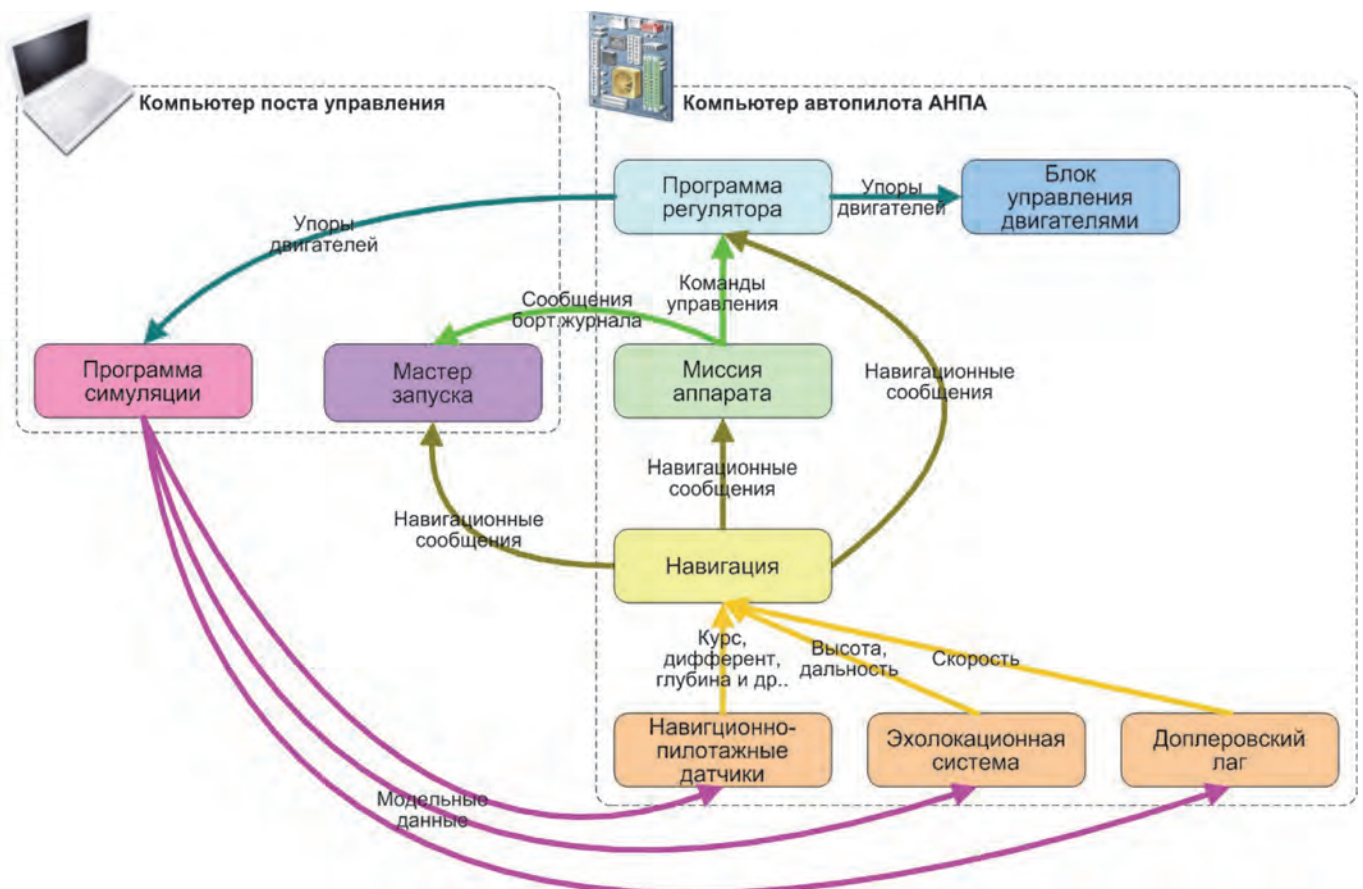


Рис. 7. Проведение симуляции миссии в режиме реального времени на борту аппарата

цию от подсистем АНПА и под- держивает аппарат на плаву до тех пор, пока не будет по- дана команда на погружение. В это время аппарат буксиру- ется в точку старта (при не- обходимости) или отводит- ся по телеуправлению. При наличии радиосвязи возможно управление аппаратом по по- верхности с помощью органов управления, расположенных в правой части мастера запуска (см. рис. 2). Для этого в главном окне программы предусмотре- но два режима перемещения: движение курсом и в задан- ную точку. После достижения точки старта отдаётся команда на старт миссии с помощью на- жатия кнопки «погружение», что ведёт к началу выполнения программы-задания. В ходе вы- полнения миссии оператор мо- жет наблюдать за основными параметрами аппарата (курсом, скоростью, глубиной, высо- той и траекторией его движе- ния) в независимости от того, по какому каналу связи про- изводится обмен (радиомодем, акустическая связь или оптока- бель – для аппаратов типа *TSL* [6]). При необходимости вме- шательства в процесс движения аппарата под водой посылают- ся команды телеуправления по акустическому каналу связи (телекоманды), набор которых, как правило, ограничен (около 20). Для их отправки вызывает- ся соответствующее диалоговое окно из правой верхней части мастера запуска (рис. 2).

По завершении программы- задания аппарат всплывает и удерживается на поверхности до тех пор, пока не послана ко- манда остановки миссии. Оста- новка миссии означает снятие всех программ-заданий, т.е. аппарат остаётся без управле- ния (в т.ч. поддерживающего его на поверхности при отри- цательной плавучести). Поэто-

му снятие миссии происходит только после зацепления аппа- рата спуско-подъёмным меха- низмом, например, краном. По- сле подъёма аппарата на палубу и подключения к нему кабеля связи возможно копирование данных на пост управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное в ИПМТ ДВО РАН программное обеспечение подготовки и сопровождения миссии АНПА решает весь ком- плекс задач, связанных с ра- ботой аппарата по заложенной программе. Объединение по- стов управления и навигации в одном ПО позволяет отказать- ся от двух специализированных мест оператора и уменьшить стоимость всего программно- аппаратного комплекса, обе- спечивающего работу АНПА. Легкая масштабируемость ком- плекса реализована выделением общих функций в едином интер- фейсе и вызовом специфичных для каждого аппарата подпро- грамм. Такой подход позволяет создавать специализированное место оператора под любой ав- тономный аппарат независимо от используемых на нём си- стем. Особенностью комплекса является применение реальных компонент аппарата (регулято- ра и программ-агентов миссии) в процессе моделирования пове- дения робота. К перспективам развития можно отнести дора- ботку интерфейса пользователя в процессе эксплуатации реаль- ных аппаратов. Также возмож- но включение функций управ- ления с внешних устройств (например, джойстика), что де- лает возможным использование данного ПО для телеуправляе- мых аппаратов. Авторы выра- жают признательность Инзар- цеву А.В. и Багницкому А.В. за неоценимый вклад в разра- ботку данного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Д.Г., Смирнов С.В., Чудаков М.И. О применении необи- таемых подводных аппаратов в мор- ской нефтегазодобывающей отрасли. Подводные исследования и робото- техника. 2013. № 15. С. 23–32.
2. Наумов Л.А., Боровик А.И., Баль Н.В. RCE – программная плат- форма для системы управления АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 12. С. 18– 25.
3. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А. В. Планирование и осуществление действий обследо- вательского подводного робота на базе поведенческих методов. / Подводные исследования и робототехника. 2013. № 15. С. 4–15.
4. Багницкий А.В., Инзар- цев А.В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемо- го подводного аппарата в задачах об- следования акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 10. С. 17–24.
5. Inzartsev A., Kiselyov L., Medvedev A., Pavin A. Autonomous Underwater Vehicle Motion Control during Investigation of Bottom Objects and Hard-to-Reach Areas // Motion Control ed. by Federico Casolo, Vienna: In-Tech Publishers, 2010. P. 207–228.
6. Киселев Л.В, Инзарцев А.В, Матвиенко Ю.В. Создание интел- лектуальных АНПА и проблемы ин- теграции научных исследований // Подводные исследования и робото- техника. 2006. № 1. С. 6–17.

