

ДИНАМИЧЕСКИЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТЛАДКИ И ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И ДИНАМИЧЕСКИМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ МОРСКИХ НАДВОДНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

М.М. Азаров, А.А. Шалыто, С.Б. Баранов (Санкт-Петербург)

Введение

В развитии технологий ситуационного управления в настоящее время разработчиками морской техники и морских транспортных систем (МТ МТС) все большее внимание уделяется вопросам мониторинга системных показателей качества функционирования сложных технических систем и объектов, мониторинга и прогнозирования обстановки в интересах поддержки принятия решений и обоснования выбора оптимальных решений, обеспечения эффективного ситуационного управления [1].

Важными этапами при разработке любых технических систем с цифровыми вычислителями являются разработка и автономная отладка их программного обеспечения (ПО), а также комплексная отладка ПО. Эти этапы важны и для систем морского назначения, и, в частности, систем автоматического управления движением и динамическим позиционированием (САУД и ДП) морских надводных подвижных объектов (МНПО) – кораблей и судов различных типов.

На этапе разработки и автономной отладки ПО осуществляется разработка программ-компонентов и комплексов, а также их тестирование. Автономная отладка подразумевает проверку и устранение ошибок ПО. Одним из этапов автономной отладки является тестирование отдельных компонентов ПО на виртуальных стендах. К тестируемым компонентам ПО САУД и ДП относятся в том числе и алгоритмы управления техническими средствами (ТС) движительно-рулевого комплекса (ДРК) МНПО и видеокдры системы. Таким образом, важнейшим элементом виртуального стенда является динамический моделирующий комплекс (ДМК), который объединяет в себе все аппаратные и программные компоненты, необходимые для отладки ПО и алгоритмического обеспечения в условиях моделирования замкнутых контуров управления. Этот комплекс также может использоваться и на этапе комплексной отладки ПО в составе системы на стенде с целью проверки функционирования ПО на штатном оборудовании по прямому назначению с имитацией внешней среды и объекта управления – корпуса МНПО с ТС ДРК.

Данный доклад посвящен описанию ДМК, разработанному в АО «Концерн «НПО «Аврора» с целью обеспечения отладки и тестирования ПО и алгоритмов управления, создаваемых в концерне САУД и ДП.

В качестве примеров моделирующих комплексов в области морского приборостроения и управления движением морских подвижных объектов можно привести ряд зарубежных разработок. Одним из немногих аналогов ДМК для систем САУД и ДП является разработанный специалистами Marine Cybernetics и Норвежского университета науки и технологий (Norwegian University of Science and Technology) моделирующий программно-аппаратный комплекс того же назначения, что и описанный в докладе ДМК, но с отличающимся функционалом [1]. В работе [2] представлено описание графического моделирующего комплекса для автономного необитаемого подводного аппарата, в статье [3] – описание имитационного моделирующего комплекса для обследовательского подводного аппарата. В монографии [4] представлена процедура построения математических моделей подводных аппаратов, надводных катеров

и кораблей, а также рассмотрены вопросы построения моделирующих комплексов для исследования замкнутых систем управления надводными и подводными подвижными объектами. В работе [5] дано описание программного комплекса для моделирования движения морских подвижных объектов (в том числе при автоматическом управлении), разработанного на базе ПО Simulink Toolbox.

Структура и состав ПО ДМК

ДМК для САУД и ДП реализован на базе виртуальной машины (ВМ) VMware под управлением операционной системы реального времени (ОСРВ) QNX (4.25, Neutrino 6.41) и состоит из следующих связанных между собой программных компонент:

1. общесистемное ПО (ОПО) САУД и ДП с ядром ОС РВ QNX, доработанное для применения в ДМК;
2. штатное функциональное ПО (ФПО) САУД и ДП;
3. средства разработки ПО, включающие в себя компилятор языка C/C++;
4. ПО имитатора динамики движения МНПО (корпуса судна) и ТС ДРК, внешних возмущений, действующих на корпус судна;
5. ПО имитатора пультов управления САУД и ДП;
6. ПО имитации сопрягаемых систем (имитатор интегрированной мостиковой системы (ИМС));
7. ПО редактора коэффициентов алгоритмов САУД и ДП.

На рис. 1 приведена структурная схема ДМК с представлением его составных частей.

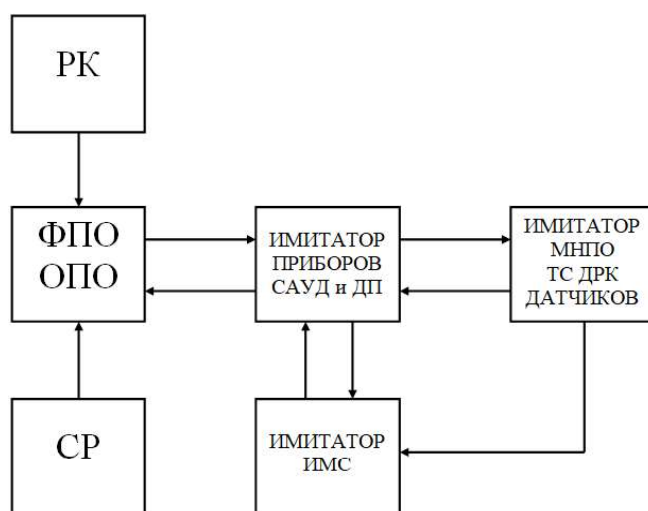


Рис. 1. Структурная схема ДМК

РК – редактор коэффициентов, ФПО – функциональное программное обеспечение, ОПО – общесистемное программное обеспечение, СР – средства разработки ПО, МНПО – морской надводный подвижный объект.

Рассмотрим программные модули и компоненты ДМК более подробно.

Доработанное для применения в ДМК ОПО САУД и ДП включает в себя ядро ОС РВ QNX и программные компоненты, в число которых входят ПО внутрисистемных межприборных и межсистемных сетей, ПО взаимодействия с модулями ввода-вывода и т. д. Штатное ФПО формируется на основе загрузочного модуля (ЗМ) для установки в систему, но, кроме того, включает в свой состав исходные тексты программ. Средствами ДМК реализована возможность разработки и отладки программного кода ФПО благодаря встроенному компилятору языка C/C++.

В ДМК осуществляется запуск ОПО и штатного ФПО САУД и ДП. ФПО реализует два основных вычислительных процесса. Первый из них – расчетная часть, которая включает алгоритмы управления, обработки данных, логику включения режимов и программную реализацию протоколов обмена данными с внешними системами. Второй вычислительный процесс – штатные видеокadres САУД и ДП и программная часть отображения данных на них. Отображение штатных видеокadres системы осуществляется в виртуальной машине ДМК на экране технологического компьютера (ноутбука). С помощью данных видеокadres осуществляется контроль параметров движения МНПО при моделировании функциональных режимов САУД и ДП.

ПО имитатора динамики движения МНПО (корпуса судна) и ТС ДРК, включает в себя следующие программные модели:

1. модель гидродинамики корпуса МНПО;
2. модель аэродинамики надводной части корпуса МНПО;
3. модели приводов поворота рулевых машин (РМ) вертикальных рулей (ВР), винторулевых колонок (ВРК), модели гребных двигателей (ГД);
4. модели расчета сил (тяг) и моментов, формируемых ТС ДРК – ВРК, ВР, ГД, подруливающими устройствами (ПУ);
5. модели внешних возмущений, действующих на подводную и надводную части корпуса судна – ветровое возмущение, течение, волнение;
6. расчетная часть, формирующая систему дифференциальных уравнений динамики движения МНПО в горизонтальной плоскости и с помощью реализованных численных методов вычисляющая вектор состояния МНПО. Вектор состояния включает в себя такие параметры, как метрические координаты местоположения (в земной метрической системе координат (СК): ось X направлена на Север, ось Y на Восток), геодезические координаты местоположения (широта, долгота), угол курса, угловая скорость по курсу, продольная и поперечная линейная скорости МНПО относительно грунта в судовой (связанной) СК, северная и восточная составляющие линейной скорости МНПО относительно грунта, угол дрейфа.

Перечисленные выше математические модели и вычислительные блоки реализованы в виде отдельной программной библиотеки математических моделей МНПО, ТС ДРК и внешних возмущений. Модель движения МНПО конфигурируется на основе входных данных, которые определяют параметры объекта управления (его массу, момент инерции, присоединенные массы и момент инерции, размерения корпуса), состав и параметры ТС ДРК, координаты их расположения на МНПО в связанной СК.

На рис. 2 представлен видеокادر имитатора динамики движения МНПО. Посредством нажатия на виртуальную кнопку «Параметры» в области видеокadra «Модель» осуществляется вызов виртуального окна задания начальных условий моделирования. В данном окне осуществляется ввод таких начальных условий движения МНПО, как начальные координаты (широта, долгота), скорость хода, курсовой угол.

В области видеокadra «Возмущения» производится выбор типов действующих на корпус судна внешних возмущений, имитация которых будет осуществляться. Возможен выбор ветрового воздействия, течения и волнения. Рядом расположены виртуальные кнопки вызова окон задания параметров внешних возмущений, в которых оператор вводит такие параметры, как угол направления действия возмущения (в земной метрической системе координат) и соответствующий параметр интенсивности возмущения.

На видеокadre находятся виртуальные кнопки открытия окон с задаваемыми параметрами для различных сопрягаемых с САУД и ДП систем, например, для системы управления единой электро-энергетической системой (СУ ЕЭЭС).

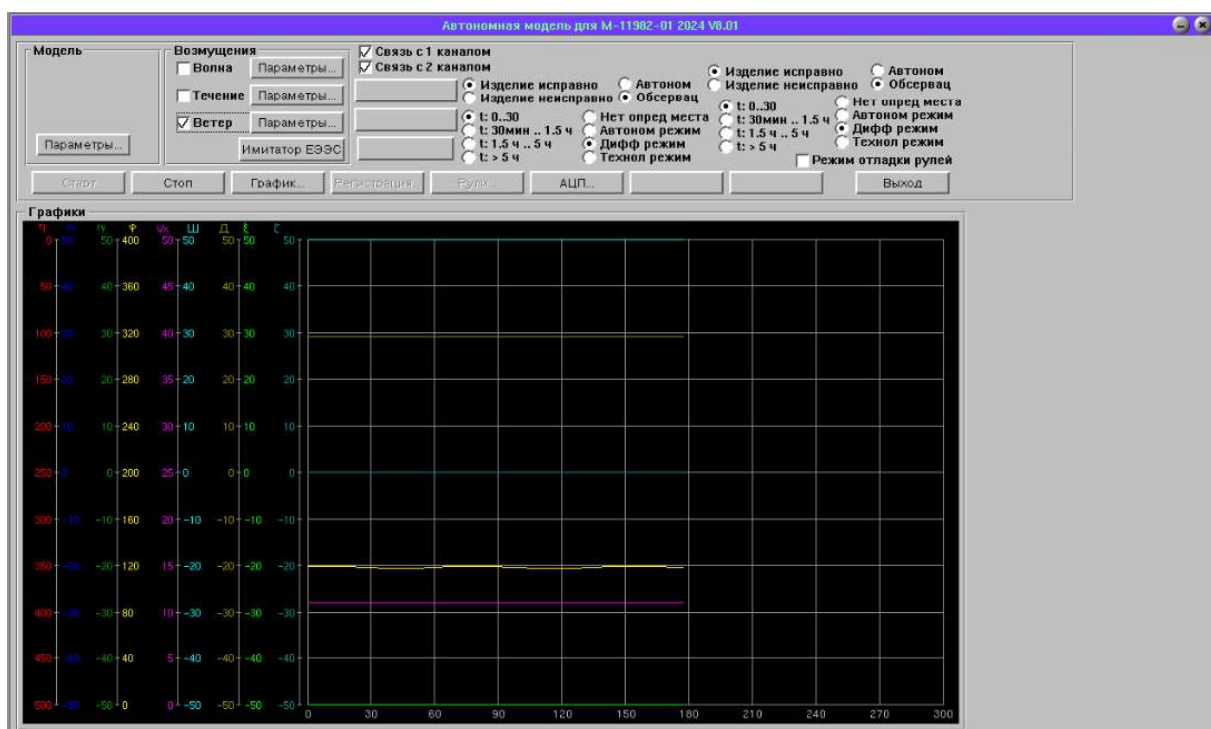


Рис. 2. Видеокادر имитатора динамики движения МНПО

Кроме того, на данном видеокadre размещены виртуальные кнопки включения режима моделирования (запуск расчетов) и остановки моделирования – соответственно кнопки «Старт» и «Стоп». Ниже расположена область вывода графиков параметров движения МНПО и параметров ТС ДРК, список которых задается в окне, вызываемом нажатием виртуальной кнопки «График».

ПО имитатора пультов управления САУД и ДП предназначено для имитации включения функциональных режимов САУД и ДП, работы индикаторов (табло и кнопок-табло), сигнализирующих о состоянии самой системы и сопрягаемых с ней систем, комплексов и датчиков, а также имитации вычислительных процессов в пультовых приборах. В процессе моделирования работы САУД и ДП оператор с помощью видеокadre имитатора пультов задает функциональные режимы работы системы, относящиеся к режимам управления, и в соответствии с включенным режимом осуществляется моделирование процессов управления.

На рис. 3 представлен пример видеокadre ПО имитатора пультов управления САУД и ДП.

В САУД и ДП реализованы две группы режимов управления – управление движением (УД) и управление динамическим позиционированием (ДП).

Группа режимов УД включает:

- удержание МНПО на заданном курсе при управлении частотами вращения гребных винтов (ГВ) ГД или ВРК с помощью рукояток управления из состава локальной системы управления (ЛСУ) ВРК/ГД или с помощью джойстика из состава САУД и ДП;
- удержание на заданном курсе при автоматическом удержании МНПО на заданной скорости (скорость-автомат);
- автоматическое удержание МНПО на заданном маршруте при управлении частотами вращения ГВ ГД или ВРК с помощью рукояток управления из состава ЛСУ ВРК/ГД или с помощью джойстика из состава САУД и ДП;
- автоматическое удержание МНПО на заданном маршруте при автоматическом удержании МНПО на заданной скорости (скорость-автомат);

– «следящий» режим, при котором задание частот вращения ГВ ГД или ВРК осуществляется с помощью рукояток управления из состава ЛСУ ВРК/ГД или с помощью джойстика из состава САУД и ДП, а перекладка ВР или ВРК и задание частот вращения ГВ ПУ (при их наличии) осуществляется с помощью моментной рукоятки из состава САУД и ДП;

– режим циркуляции, при котором перекладка ВР или ВРК осуществляется автоматически в целях обеспечения движения с заданной угловой скоростью или заданным радиусом циркуляции, а задание частот вращения ГВ ГД или ВРК осуществляется с помощью рукояток управления из состава ЛСУ ВРК/ГД или с помощью джойстика из состава САУД и ДП.

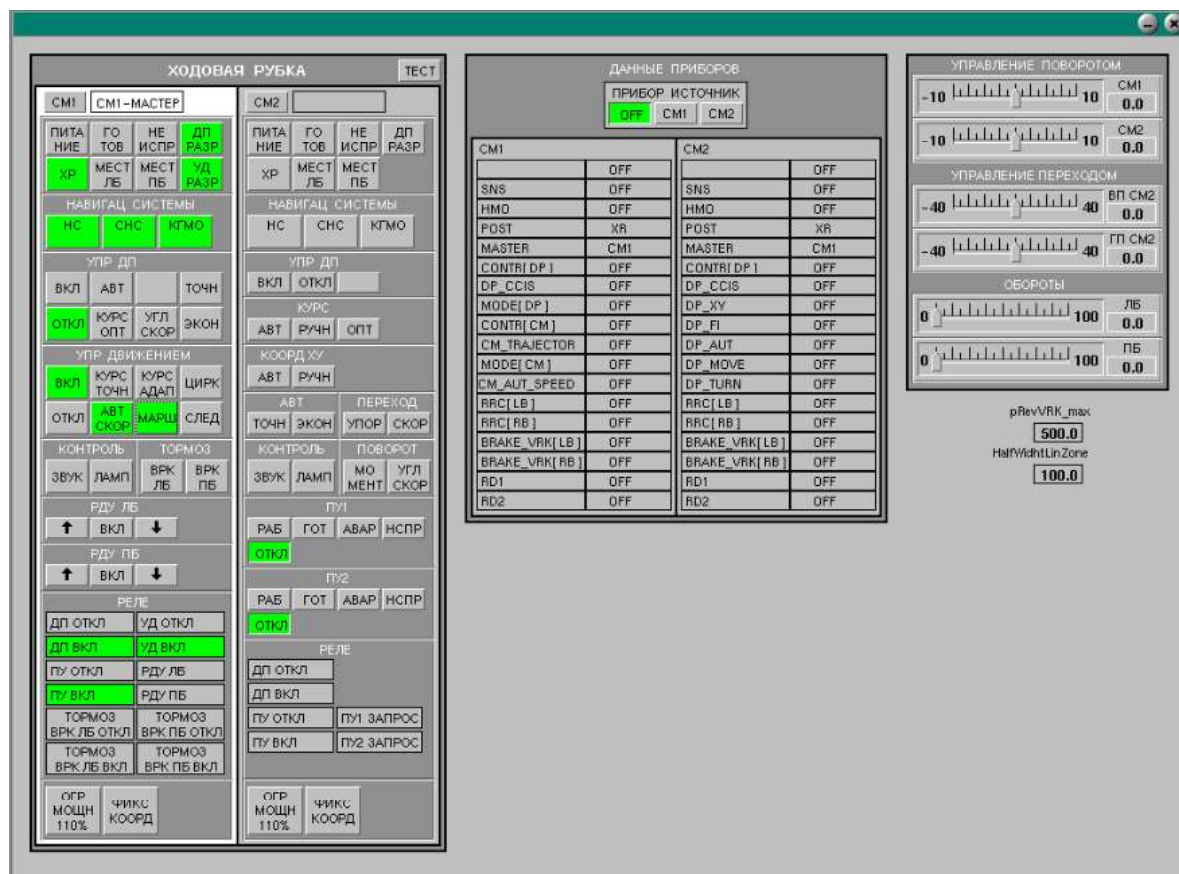


Рис. 3. Видеокادر имитатора пультов управления САУД и ДП

Во всех перечисленных режимах (кроме режимов движения по маршруту) задаваемые параметры, такие как курс, продольная скорость относительно грунта, угловая скорость или радиус циркуляции вводятся пользователем с помощью функциональной клавиатуры на штатных видеокдрах системы на экране монитора технологического компьютера, на котором реализована ВМ с ДМК. В режимах движения по маршруту заданные параметры: координаты маршрутных точек в геодезической СК (широта и долгота), заданная продольная скорость относительно грунта и заданный радиус участка перехода на следующий галс поступают в ФПО САУД и ДП из имитатора ИМС.

Имитация управления рукоятками задания частот вращения ГВ ГД или ВРК осуществляется с помощью специальных графических элементов в правой части видеокдра имитатора пультов управления САУД и ДП.

Группа режимов управления ДП состоит из трех подгрупп режимов – автоматических и полуавтоматических режимов ДП и ручного режима.

В автоматических режимах выполняется автоматическое удержание МНПО в заданной точке и на заданном курсе, а также при задании новых значений координат и курса – автоматический переход МНПО в новую точку и на новый курс. В этих режимах координаты местоположения (в геодезической СК (широта и долгота) или в земной метрической СК) и курс задаются с помощью клавиатуры на отображаемых на мониторе технологического компьютера ДМК штатных видеокadraх системы.

В полуавтоматических режимах происходит автоматическое управление одной группой параметров и ручное управление другой. Основные режимы в этой группе – автоматическое удержание местоположения при ручном (от моментной рукоятки) управлении угловым движением (курсом) и автоматическое удержание на заданном курсе при ручном (с помощью джойстика) управлении поступательным движением судна (по координатам). Реализованы различные варианты этих режимов. Имитация управления моментной рукояткой или джойстиком из состава САУД и ДП осуществляется с помощью программных средств управления отдельными степенями поступательного или углового движений в виде графических элементов в ПО имитатора пультов управления САУД и ДП.

В ручном режиме осуществляется управление движением по курсу и поступательным движением с помощью рукояток управления – моментной рукоятки и двухстепенного джойстика, которые в ДМК имитируются графическими элементами в правой части видеокadra имитатора пультов управления САУД и ДП.

Кроме того, в ДМК проводится имитация режима ограничения мощности и защиты судовой электростанции от перегрузки, в котором выполняется ограничение или сброс в ноль частот вращения ГВ ВРК и ПУ в зависимости от величины резерва по мощности на электростанциях.

Все перечисленные функциональные режимы реализованы в ФПО САУД и ДП, а их включение осуществляется на видеокadre имитатора пультов управления САУД и ДП, на котором в виде графических элементов (в левой части видеокadra) реализованы кнопки-табло стоек пультов САУД и ДП, отвечающие за включение функциональных режимов. При наведении курсора и нажатии (посредством манипулятора типа «мышь» из состава технологического компьютера ДМК) на графические элементы кнопок-табло функциональных режимов включается требуемый функциональный режим управления.

Кроме того, на видеокadre имитатора пультов управления САУД и ДП в левой его части реализованы графические элементы и других кнопок-табло (например, кнопок-табло подачи питания на стойку пульта или периферийные приборы, включения информационных навигационных каналов, включения режима ограничения мощности, проверки подсветки табло и кнопок-табло, отключения звуковой сигнализации и т. д.). На этом видеокadre также реализованы и графические элементы табло и индикаторов, сигнализирующие о работающем poste управления, состоянии навигационных систем и датчиков, состоянии САУД и ДП и сопрягаемых с ней систем.

В этом же программном компоненте ДМК реализовано ПО имитаторов периферийных приборов САУД и ДП, ПО имитаторов задания дискретных сигналов ЛСУ ТС ДРК, СУ ЕЭЭС, навигационных систем и датчиков, датчиков внешних возмущений. Имитация обмена с перечисленными системами и устройствами осуществляется на основе согласованных протоколов сопряжения, реализованных в ФПО САУД и ДП.

В ДМК в виде отдельного программного компонента и, соответственно, отдельного вычислительного процесса, реализован имитатор ИМС. Имитатор ИМС необходим для отработки режимов движения по заданному маршруту. В нем реализован формирователь маршрутных точек, радиусов участков траектории перехода на следующий галс и заданных продольных линейных скоростей (относительно грунта) для каждого из маршрутных галсов. Имитация обмена данными между ИМС и САУД

и ДП в режиме движения по заданной траектории осуществляется в соответствии с реализованным протоколом информационного обмена.

ПО редактора коэффициентов алгоритмов САУД и ДП предназначено для настройки алгоритмов управления САУД и ДП. Пользовательский интерфейс редактора коэффициентов представляет собой видеокادر со списком параметров настройки в виде поля ввода числовых значений и подписи названия параметра. Ввод числового значения параметра осуществляется путем наведения курсора на необходимое поле ввода с помощью манипулятора типа «мышь» из состава технологического компьютера (ноутбука) ДМК и ввода числового значения с помощью его клавиатуры.

Режимы работы ДМК

Перейдем к рассмотрению режимов работы самого ДМК. Таких режимов два:

– режим моделирования и отладки штатного ПО и математических моделей (режим «на столе»);

– режим настройки алгоритмов управления САУД и ДП.

Режим моделирования и отладки штатного ПО и математических моделей предназначен для отладки ФПО САУД и ДП, проверки и доработки алгоритмов управления, включая алгоритмы фильтров-наблюдателей, регуляторов контуров управления, алгоритмы распределения усилий между ТС ДРК и другие алгоритмы, обеспечивающие требуемые качественные и количественные характеристики управления движением и позиционированием МНПО. Кроме того, этот режим предназначен для проверки и доработки математических моделей движения МНПО, ТС ДРК, внешних возмущений. Структурная схема ДМК в режиме моделирования и отладки штатного ПО и математических моделей изображена на рис. 4. Он реализуется без подключения технологического компьютера (ноутбука) ДМК к приборам САУД и ДП.

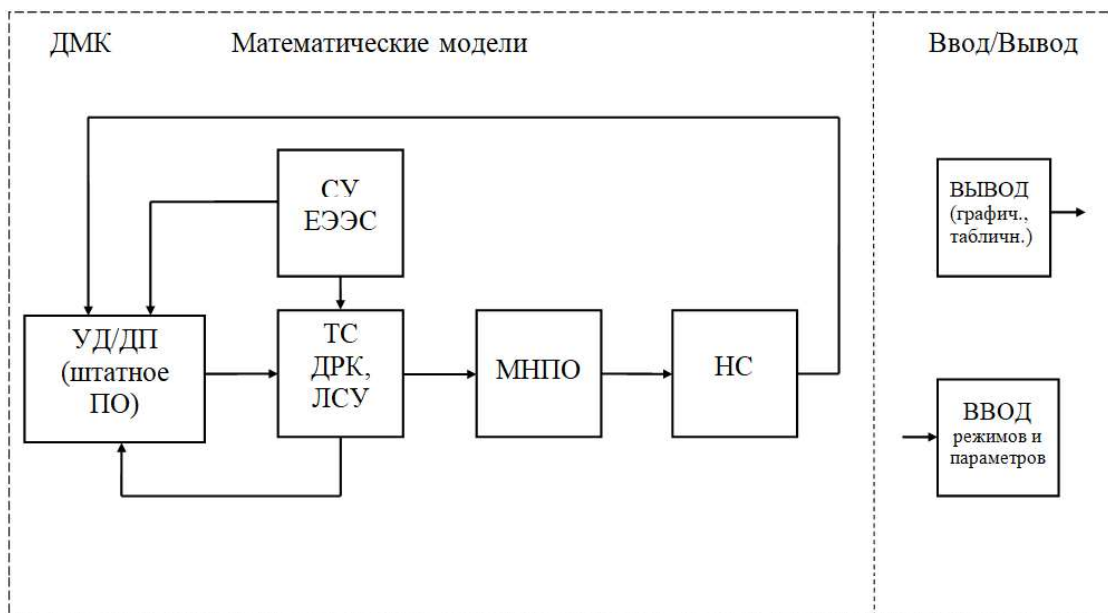


Рис. 4. Структурная схема ДМК в режиме моделирования и отладки штатного ПО и математических моделей:

УД – управление движением, ДП – динамическое позиционирование,
СУ ЕЭЭС – система управления единой электро-энергетической системой,
ТС ДРК – технические средства движительно-рулевого комплекса,
ЛСУ – локальные системы управления,
МНПО – морской надводный подвижный объект, НС – навигационная система.

Работа в этом режиме проводится только на технологическом компьютере (ноутбуке) ДМК, при этом организация замкнутых контуров управления осуществляется с применением ПО САУД и ДП (ОПО и ФПО), размещаемого на компьютере ДМК, и математических моделей движения МНПО, ТС ДРК, ЛСУ, навигационных систем, внешних возмущений, действующих на МНПО. Пользовательский интерфейс ДМК обеспечивает оператору выбор любого из режимов УД или ДП (автоматы и полуавтоматы ДП или УД), а также ввод начальных условий функционирования системы и объекта управления, выбор внешних возмущений и ввод их параметров. ДМК осуществляет вывод в графической или табличной форме информации о выбранных пользователем параметрах движения МНПО, ТС ДРК, навигационной системы, системы управления электроэнергетикой МНПО и т. д.

На рис. 5 представлен штатный видеокادر «МАРШРУТ» САУД и ДП с отображением на нем в графической и числовой форме параметров движения при моделировании движения МНПО в режиме движения по заданному маршруту.

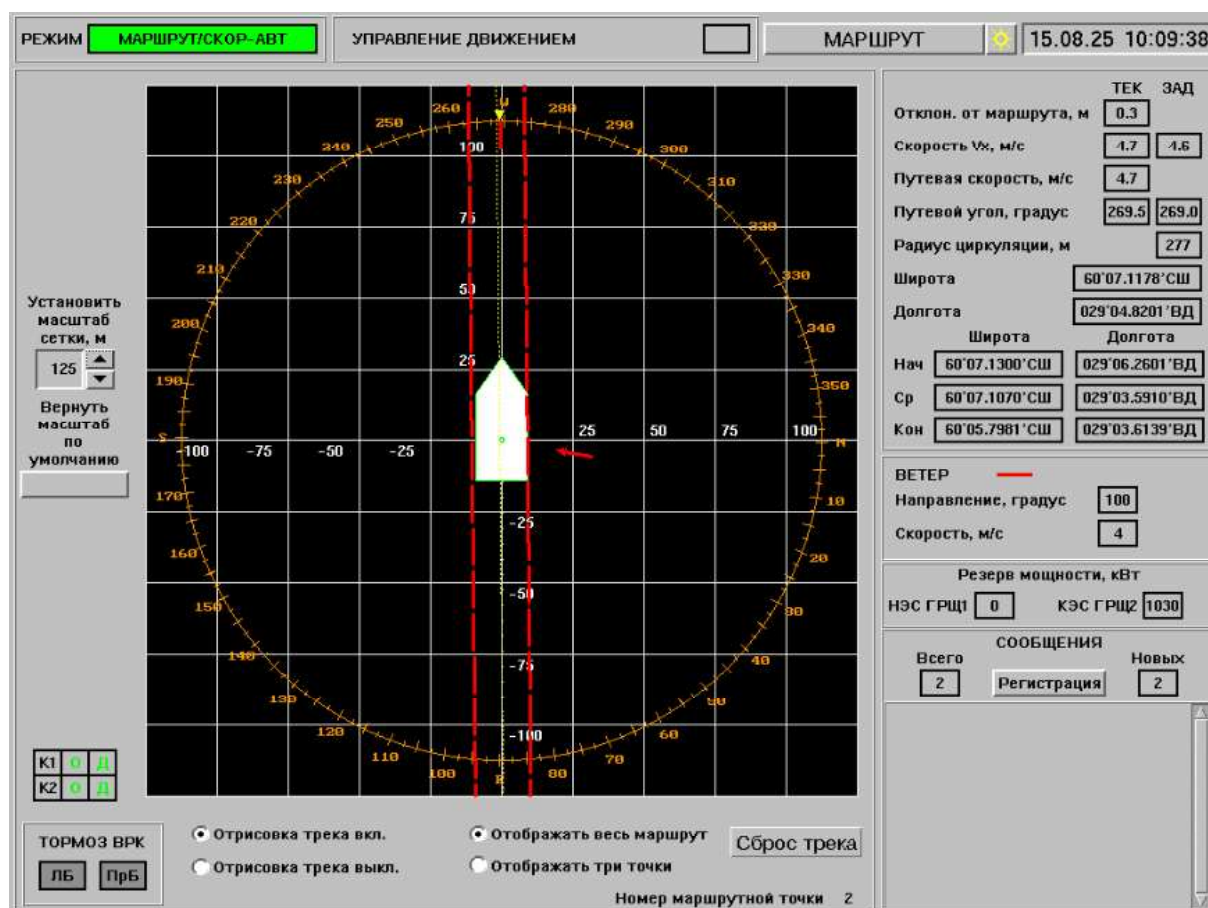


Рис. 5. Видеокادر «МАРШРУТ»

В процессе моделирования и отладки алгоритмов управления САУД и ДП настройка их коэффициентов осуществляется с помощью ПО редактора коэффициентов.

Режим настройки алгоритмов управления САУД и ДП предназначен для настройки алгоритмов УД и ДП в процессе проведения заводских ходовых испытаний (ЗХИ) МНПО и окончательной загрузки программных модулей в приборы САУД и ДП.

Подключение ДМК к приборам САУД и ДП при работе по отладке и настройке алгоритмов САУД и ДП в режимах УД и ДП в процессе проведения ЗХИ осуществляется в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 6. Данная схема поясняет совместную работу ДМК и САУД и ДП в режиме настройки алгоритмов управления системы. Как было указано выше, настройка алгоритмов осуществляется с помощью ПО редактора коэффициентов алгоритмов САУД и ДП.

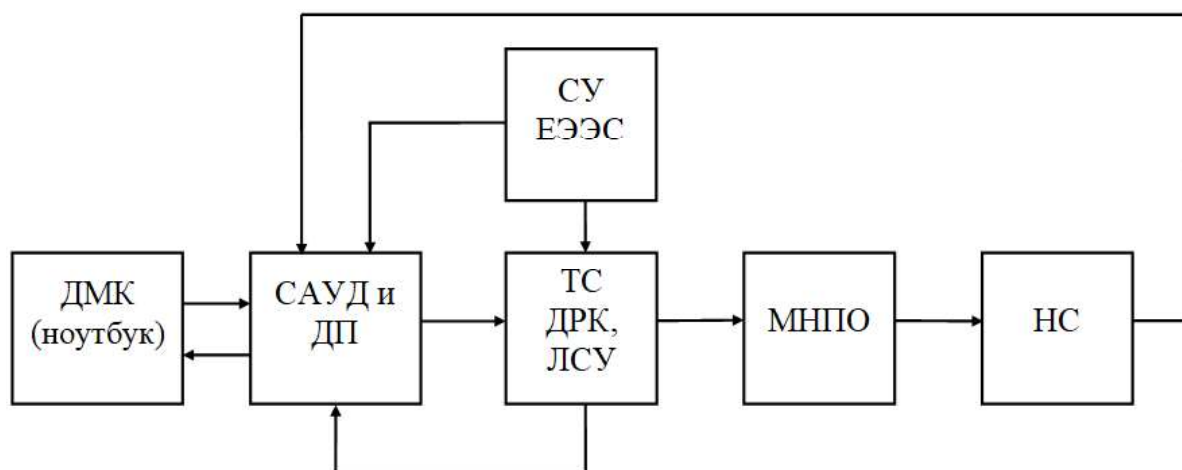


Рис. 6. Режим настройки алгоритмов управления САУД и ДП

В данном режиме после окончания настройки параметров алгоритмов контуров управления режимов УД и ДП штатного ФПО, находящегося на жестком диске технологического компьютера (ноутбука) ДМК, с помощью специальной загрузочной утилиты под управлением ОС QNX осуществляется загрузка исполняемых файлов (отлаженных программных модулей) непосредственно на жесткий или флеш-диск вычислителей в приборах САУД и ДП. Подключение технологического компьютера ДМК к САУД и ДП и обмен данными между ними осуществляется по каналу Ethernet.

Заключение

Перечислим достоинства применения ДМК при разработке и испытаниях САУД и ДП МНПО:

- ДМК, реализованный на базе технологического компьютера (ноутбука), является программно-аппаратным средством разработки ФПО САУД и ДП. Благодаря встроенному компилятору языка C/C++, ДМК обеспечивает разработку и отладку ПО алгоритмов управления САУД и ДП (реализовано в ФПО системы), а также моделей и имитаторов динамики МНПО, гидродинамики корпуса, аэродинамики надводной части корпуса, приводов и гидродинамики ТС ДРК, внешних возмущений, имитаторов внешних систем и датчиков. Отладка ПО осуществляется с применением имитации замкнутого контура управления с использованием перечисленных выше моделей и имитаторов, в том числе имитаторов пультов управления и приборов САУД и ДП, имитаторов сопрягаемых с САУД и ДП систем;

- ДМК обеспечивает возможность настройки алгоритмов управления САУД и ДП для различных функциональных режимов на этапе автономной отладки с применением имитации замкнутого контура управления с использованием моделей и имитаторов. Настройка параметров алгоритмов осуществляется с помощью ПО редактора коэффициентов. Наборы данных параметров алгоритмов управления, полученные на этапе автономной отладки, при условии наличия адекватных математических моделей позволяют сократить время настройки системы на этапе ЗХИ;

– на этапе ЗХИ в процессе испытаний функциональных режимов САУД и ДП ДМК обеспечивает средства настройки параметров алгоритмов управления системы с помощью ПО редактора коэффициентов алгоритмов САУД и ДП;

– после настройки параметров алгоритмов, корректировки ФПО (в случае необходимости), компиляции и сборки файлов ЗМ, возможно подключение ДМК на базе технологического компьютера (ноутбука) к приборам САУД и ДП с целью записи исполняемых файлов ФПО в устройства памяти приборов системы (постоянное запоминающее устройство на основе жесткого диска или флеш-памяти).

Дальнейшее развитие ДМК возможно на пути реализации дополнительных режимов функционирования ДМК. Целесообразна разработка режима тестирования штатного ПО и режима оценки качества математических моделей. В режиме тестирования штатного ПО технологический компьютер с ДМК подключается к приборам САУД и ДП в целях обеспечения работы штатного ПО системы совместно с моделями и имитаторами ДМК, что позволяет проверить работу загруженного в приборы системы ПО на моделях до выхода на ЗХИ.

В режиме оценки качества математических моделей технологический компьютер ДМК подключается к приборам САУД и ДП во время выхода в море и тестирования функциональных режимов системы, при этом осуществляется запись навигационных параметров системы, их обработка в реальном времени и сравнение с данными параллельно работающих моделей имитаторов ДМК. Этот режим позволяет оценить качество разработанных математических моделей динамики движения МНПО и его ТС ДРК.

Описанный программно-аппаратный комплекс ДМК значительно упрощает процесс разработки алгоритмического обеспечения, корректировку ФПО на этапе комплексной отладки, процесс настройки САУД и ДП на этапе ЗХИ, позволяет значительно повысить эффективность этих работ. Тем не менее функционал ДМК не является исчерпывающим, целесообразна разработка дополнительных режимов работы ДМК.

Литература

1. **Johansen T.A., Fossen T.I., Vik. B.** Hardware-in-the-loop Testing of DP systems//Dynamic positioning conference, Control Systems II. Department of Engineering Cybernetics. Norwegian Univ. of Science and Technology. 2005.
2. **Морозов М.А., Туфанов И.Е.** Графический моделирующий комплекс для автономного необитаемого подводного аппарата // Труды 23-й международной конференции по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон-2013». 2013. С.161-165.
3. **Бобков В.А., Морозов М.А. и др.** Имитационный моделирующий комплекс для обследовательского автономного подводного робота // Научная визуализация. 2013. Том 5. №4. С.47-70.
4. **Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.** Методы автоматического управления морскими подвижными объектами. Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета. 2016. 268 с.
5. **Perez T., Smogeli O.N., Fossen T.I., Sorensen A.J.** An overview of the marine systems simulator (MSS): a Simulink Toolbox for marine control systems // Modeling, Identification and Control. 27(4). P. 259-275.