

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС КАК СРЕДСТВО ОТЛАДКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.Г. Зарецкий, Н.А. Марчихина, С.В. Борматинов (Москва)

Переход на цифровые системы управления современными ядерными энергетическими установками, реализованными на новых принципах управления, предъявляет повышенные требования к обоснованию разрабатываемых алгоритмов управления и их программно-аппаратной реализации. При этом проверка системы управления с учетом обратных связей в полном объеме возможно только непосредственно на объекте, это приводит к увеличению сроков проведения испытаний корабля и негативно сказывается на ресурсе оборудования.

НИЦ «Курчатовский институт» выступил инициатором создания и совместно с ведущими проектными предприятиями АО «ЦКБ МТ «Рубин», АО «Концерн «НПО «Аврора», АО «ОКБМ Африкантов» и АО «Калужский турбинный завод» разработал программно-аппаратные комплексы (ПАК), позволяющие проводить отладку и проверку комплексной системы управления техническими средствами (КСУ ТС) до поставки на объект, так как комплексная проверка системы на этапе испытаний дает возможность избежать дополнительных доработок при испытаниях объекта. Создание подобных комплексов обусловлено необходимостью снижения трудоемкости при проведении корабельных швартовых испытаний, за счет выявления ошибок и недочетов на ранней стадии разработки КСУ ТС, что в конечном итоге приводит к сокращению сроков испытаний и повышению качества работы системы в целом.

ПАК может быть использован на нескольких этапах жизненного цикла корабля. На первом – ПАК используется для проектирования и отладки алгоритмов управления главной энергетической установкой (ГЭУ). Изделие поставляется проектанту корабля. ПАК позволяет проверять и изменять алгоритмы управления, отлаживать сформированные алгоритмы, подавая управляющие сигналы с имитаторов пультов управления, аналогичным по форме представления пультам управления ГЭУ. Данное изделие применяется на стадии проектирования алгоритмов управления и формирования технического задания на КСУ ТС, что в свою очередь на раннем этапе позволяет выявить и устранить возможные ошибки, а также оптимизировать алгоритмы управления. Структурная схема ПАК, предназначенного для проектирования и отладки алгоритмов управления, приведена на рисунке 1.

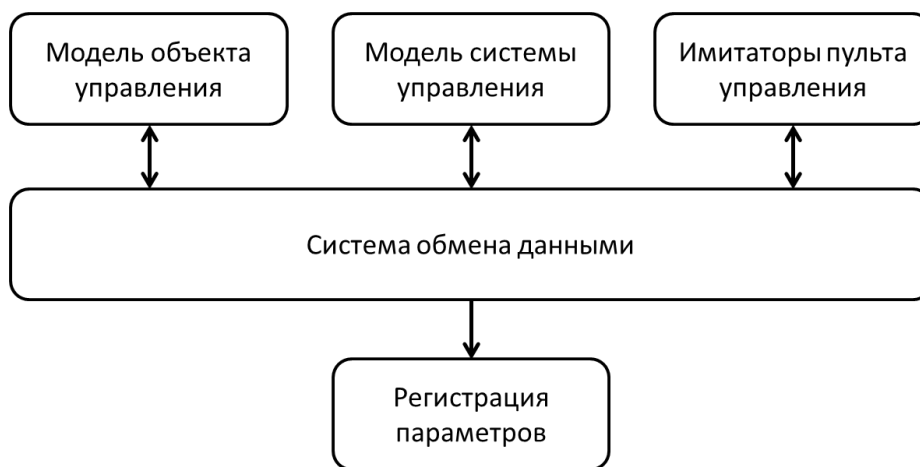


Рис. 1 – Структурная схема ПАК, предназначенного для проектирования и отладки алгоритмов управления

На втором этапе ПАК поступает на стенд завода-изготовителя СУ. Через устройство сопряжения (УСО) ПАК соединяется с аппаратурой штатной СУ по взаимосогласованному протоколу. Структурная схема приведена на рисунке 2. Далее проводится посистемная отладка всех составных частей СУ, а затем – комплексные испытания.

Применение ПАК в ходе межведомственных испытаний штатной СУ позволяет проверить работу системы не только в режимах нормальной эксплуатации, но и в большом спектре нештатных и аварийных ситуаций, например, связанных с потерей теплоносителя или отказами различного оборудования.

На третьем этапе ПАК используется в ходе швартовых испытаний: изменения в СУ сначала проверяются на ПАК, и только после этого вносятся в ПО. Таким образом, любые корректировки сначала будут проверены на модели, что позволит избежать потенциально опасных экспериментальных работ на реальном объекте.



Рис. 2 – Структурная схема ПАК, предназначенного для обеспечения стендовых испытаний КСУ ТС

Основой ПАК является комплексная математическая модель, позволяющая в реальном масштабе времени реализовывать как режимы нормального функционирования установки, так и аварийные режимы, например, связанные с отказами оборудования или разгерметизацией. Разработка комплексной математической модели объекта выполняется с использованием теплогидравлического кода улучшенной оценки *Serpent*. При описании нестационарных, неравновесных процессов в коде используется многоскоростная, трёхфазная модель течения, позволяющая проводить анализ переходных и аварийных режимов в контурах ЯЭУ, в том числе в ситуациях, связанных с потерей теплоносителя. Расчётный код позволяет рассчитывать динамику произвольных гидравлических сетей, а также отдельных систем и оборудования.

Теплогидравлическая часть включает модули расчета динамики турбин, насосов, основанные на решении уравнения количества движения, а также модули расчета динамики компенсаторов и смесительных ёмкостей. Теплогидравлическая сеть может состоять из большого набора элементов самого различного вида: узлы (камеры смешения), насосы, клапана, обратные клапана, инжекторы, баки, местные сопротивления, распределённые и интегральные рёбра (каналы) и т.п.

Нейтронно-физические процессы рассчитываются на основе точечной модели кинетики реактора с учётом плотностного и температурного эффектов. Расчёт температурных полей в твёрдых телах (например, твэлах) проводится по одномерному или интегральному уравнению теплопроводности с использованием замыкающих соотношений для коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления, определяемых в зависимости от режима теплообмена и течения среды.

Для расчёта моделируемых процессов в коде используются методы численного решения дифференциальных уравнений на базе полунеявных разностных схем, что позволяет реализовать высокоскоростные расчеты в реальном времени.

Для моделирования транспортных установок формируется пространственное распределение объектов модели с возможностью динамической корректировки потенциальных силовых полей и углов поворота конструкции.

Математические модели верифицируются по данным уникальной экспериментальной базы, накопленной НИЦ «Курчатовский институт» при проведении регистрации параметров ГЭУ в рамках комплексных швартовых и ходовых испытаний кораблей.

Создание расчетной схемы алгоритмов управления происходит посредством повторения структурной схемы моделируемой системы управления. При этом расчетная схема является многоуровневой и иерархичной.

На верхнем уровне схемы укрупненно отображаются приборы и другие устройства, соединенные между собой в соответствии со структурой системы. Соединения между элементами расчетной схемы осуществляются однонаправленными связями имитирующими кабели, шины или одиночные сигналы. На этом уровне также отображаются элементы соединения с моделью объекта, позволяющие принимать расчетные параметры из объекта и передавать управляющие сигналы. Доступ к этим соединителям может быть произведен с любого уровня иерархии схемы и из любого элемента расчетной схемы.

Каждый уровень вложенности расчетной схемы набирается из группирующих элементов, представляющих собой приборы, модули и другие логически связанные группы элементов, а также из различных элементов библиотек (математических, логических, соединительных и прочих). Алгоритмы приборов так же могут быть сгруппированы и располагаться на любом уровне вложенности внутри прибора.

При создании расчетной схемы имеется возможность подробно повторять структуру моделируемой системы, в том числе и с учетом прохождения одного и того же сигнала по различным путям для моделирования дублирования, мажорирования и т.п.

Описанная идеология построения расчетной схемы СУ введена для возможности отработки алгоритмов управления в условиях, приближенных к реальным.

Проектант имеет возможность при необходимости самостоятельно вносить изменения в расчетную схему системы управления и модифицировать алгоритмы с целью их оптимизации.

Взаимодействие с ПАК осуществляется через дисплейный имитатор пульта управления ГЭУ, с помощью которого можно осуществлять управление установкой, как в нормальных, так и в нештатных режимах работы. Задание аварийных ситуаций происходит посредством отдельной панели, на которой расположены виртуальные кнопки и ключи позволяющие выбрать конкретную неисправность. Выбор аварийного события происходит в процессе моделирования. Есть возможность одновременно по усмотрению пользователя задать несколько неисправностей. Неисправности могут отключаться, но последствия их введения остаются, в дальнейшем работа определяется физикой процессов.

Для удобного анализа результатов расчетов информация о состоянии установки предоставляется в виде графиков. Данные протоколируются и могут быть загружены для дальнейшего анализа после окончания расчета.

Комплексные математические модели объекта управления, модели алгоритмов управления, а так же устройство сопряжения с испытательным стендом подключаются к общей интеграционной шине BUS MT в виде отдельных программ (федератов). Это позволяет производить совместный расчет математических моделей объекта и системы управления, осуществить стандартизацию протоколов информационного обмена, а также легко заменять программную реализацию модели сигналами, реализованными в аппаратном испытательном стенде.

Для разработки ПАК применяется специализированная визуальная среда разработки АМАІ, которая позволяет выполнять следующие задачи:

- разработка расчетных схем объекта управления;
- разработка расчетных схем модели системы управления;
- создание комплексных моделей;
- осуществление визуальной отладки, в том числе в пошаговом режиме;
- динамическое отображение всех моделируемых параметров;
- управление расчетом (запуск и остановка моделирования, сохранение и загрузка состояния моделирования).

В настоящее время изготовлены, поставлены и эксплуатируются в АО «ЦКБ МТ «Рубин» программно-аппаратные комплексы для двух проектов. Также проведены проверки штатной системы управления совместно с ПАК в рамках совместных испытаний КСУ ТС на виртуальном стенде НПО «Аврора». В ходе данных испытаний были выявлены замечания в работе КСУ ТС и внесены правки до этапа швартовых испытаний.

Применение ПАК на различных этапах жизненного цикла позволяет решать следующие задачи:

- этап технического задания – формирование исходных алгоритмов системы управления, формирование требований к подсистемам;
- этап технического проекта – анализ влияния структуры системы управления, оценка надежности;
- этап изготовления и испытаний КСУ ТС – отработка функционального программного обеспечения, комплексная проверка аппаратуры КСУ ТС, подтверждение выполнения требований технического задания;
- этап комплексных швартовых испытаний – анализ первопричин нештатного поведения ГЭУ, проверка вносимых изменений в аппаратуру системы управления и конструкцию элементов ГЭУ;
- этап сопровождения эксплуатации – поиск и устранение неисправностей, анализ поведения установки.

Таким образом, программно-аппаратные комплексы должны стать универсальным инструментом для решения различных задач на этапах жизненного цикла корабля, начиная с проектирования и заканчивая эксплуатацией.