

# Применение высокопроизводительных компьютерных технологий для проектирования и отладки аппаратуры корабельных систем управления

**НИЦ** “Курчатовский институт” обладает компетенцией в применении высокопроизводительных вычислительных технологий (HPC – High Performance Calculating) для решения широкого круга задач гидро- и газодинамики, теплопереноса, нейтронной физики, прочности и вычислительного материаловедения.

Применение таких технологий является общемировой тенденцией и направлено на:

- ▶ повышение обоснованности проектно-конструкторских решений;
- ▶ сокращение сроков проектирования и повышение качества изделий;
- ▶ уменьшение необходимости создания дорогостоящей полномасштабной экспериментальной базы;
- ▶ создание новых материалов.



Рис. 1

В НИЦ “Курчатовский институт” построено несколько суперкомпьютеров, которые входят в российский топ 50, их общая производительность составляет порядка 300 терафлопс (рис. 1). Вычислительные ресурсы НИЦ “Курчатовский институт” используются в том числе:

- ▶ для решения задач расчетного обоснования при проектировании и сопровождении эксплуатации атомных электростанций (АЭС), кораблей и судов с ядерной энергетической установкой, для создания новых материалов на основе нано- и биотехнологий. Для этих целей используются суперкомпьютеры, представляющие собой сильно связанные кластеры, которые объединены системной сетью InfiniBand;
- ▶ для осуществления вычислений с высокой пропускной способностью на базе ГРИД-технологий, нацеленных на обработку и анализ данных, получаемых с мегаустановок. В настоящее время в НИЦ “Курчатовский институт” поступают данные (петабайты в год) от экспериментов, выполняющихся на Большом адронном коллайдере. Для этих задач используется слабо связанные кластеры, петабайтные массивы хранения данных и программное обеспечение промежуточного уровня Globus Toolkit.

В дальнейшем планируется вести обработку данных других международных экспериментов, в том числе: европейского рентгеновского лазера на свободных электронах XFEL, европейского центра по исследованию ионов и антипротонов FAIR, международного термоядерного экспериментального реактора ITER.

Кроме того, в Центре построен и аттестован вычислительный кластер для выполнения закрытых расчетов.

В НИЦ “Курчатовский институт” наработан большой объем технологий имитационного моделирования по многим направлениям моделирования корабельных систем. Все созданные в НИЦ “Курчатовский институт” технологии совместимы между собой.

Основные задачи, решаемые НИЦ “Курчатовский институт” при создании технологий моделирования:

- ▶ разработка, совершенствование и распараллеливание кодов и программных комплексов;
- ▶ верификация и кросс-верификация отечественных и импортных кодов и программных комплексов под задачи создания перспективных корабельных РУ, ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и объекта в целом;

- ▶ адаптация и сопряжение отечественных и импортных кодов и программных комплексов;
- ▶ создание технологической среды визуальной разработки комплексных математических моделей технически сложных объектов (КММ ТСО);
- ▶ проведение экспериментальных исследований для верификации кодов и программных комплексов;
- ▶ внедрение программной технологии имитационного трехмерного моделирования.

## Виртуальная ГЭУ

В НИЦ “Курчатовский институт” разработана технология создания виртуальной главной энергетической установки (ГЭУ) корабля на основе комплексной математической модели (рис. 2). “Виртуальная ГЭУ” применяется при проектировании объекта в части отработки технических решений, при разработке алгоритмов управления и выдачи исходных данных изготовителю аппаратуры системы управления (СУ), созданию и отладке аппаратуры системы управления ГЭУ. Математическая модель (“Виртуальная ГЭУ”) сопровождает весь жизненный цикл корабля: от стадии формирования технического задания до эксплуатации, в том числе при модернизации СУ. Модель используется также в качестве основы всережимного тренажера операторов, который позволяет отрабатывать действия личного состава, в том числе в любых аварийных ситуациях.

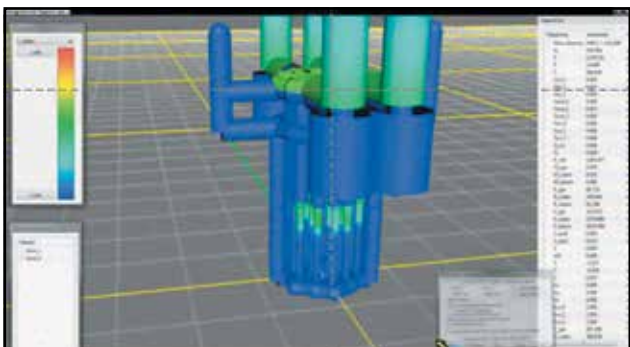


Рис. 2

Среда комплексного математического моделирования AMAI позволяет объединять различные расчетные коды в единую комплексную модель, обеспечивает моделирование алгоритмов и аппаратуры СУ.

Шина обмена данными, имеющая в основе идеологию стандарта IEEE 1516, позволяет по стандартизованному протоколу связывать математическую модель объекта управления, математическую модель СУ и аппаратуру СУ.

## Современные цифровые СУ

Переход на цифровые системы управления современными ЯЭУ, большой объем автоматизации управления, в том числе и системами, реализованными на новых принципах управления (регулирование расходом питательной воды, ходовыми клапанами и клапаном травления и др.), предъявляет повышенные требования к обоснованию разрабатываемых алгоритмов управления и их программно-аппаратной реализации.

- Для современных СУ характерно:
- ▶ увеличение числа автоматизированных функций объекта;
  - ▶ снижение человеческого фактора при эксплуатации объекта;
  - ▶ рост сложности алгоритмов управления;
  - ▶ усложнение процесса выдачи задания на разработку аппаратуры СУ;
  - ▶ увеличение срока пуско-наладочных работ аппаратуры СУ;
  - ▶ увеличение роли СУ в обеспечении отказоустойчивости объекта в целом.

Качество СУ зависит от качества аппаратных и программных средств. В свою очередь качество программных средств находится в прямой зависимости от ошибок программистов (технических ошибок) и ошибок в формировании алгоритмов управления.

Методика проверки аппаратной части СУ хорошо отработана, существуют соответствующие нормативные документы, специальные методики проверок и т.д. Ошибки программистов выявляются и устраняются также стандартными методами, существует специальное программное обеспечение для тестирования разрабатываемых программ, разрабатываются сценарии тестирования и т.д.

Однако выявление ошибок в исходных данных на разработку СУ или разное понимание алгоритмов управления между разработчиком аппаратуры СУ и проектантом объекта, а также ошибки, возникающие при комплексировании, выявить достаточно сложно в связи с тем, что отсутствует нормативная база для обеспечения комплексных проверок аппаратуры СУ, включающая алгоритмы управления, уставки, законы регулирования и т.д. В судостроении никогда не было практики выполнять комплексные проверки системы управления до начала швартовых испытаний. Безусловно, существуют функциональные проверки, они могут выполняться при полном комплексировании системы управления, однако такие проверки не обеспечивают возможность проверить корректность алгоритмов, уставок и законов регулирования.

Впервые НИЦ “Курчатовский институт” в качестве научного руководителя создания и эксплуатации ядерных энергетических установок предложил проводить комплексную проверку аппаратуры системы управления на базе комплексной математической модели по итогам комплексных швартовых испытаний АПЛ “Юрий Долгорукий” проекта “Борей”.

Решение задачи отладки СУ в части корректности алгоритмов управления возможно только с использованием комплексной математической модели объекта управления (КММ ОУ) высокого уровня, которая с максимальной степенью достоверности в реальном масштабе времени имитирует все режимы работы ОУ.

## Технология отладки СУ ГЭУ на основе ПАК

Современные вычислительные технологии, разработки НИЦ “Курчатовский институт” в области матема-

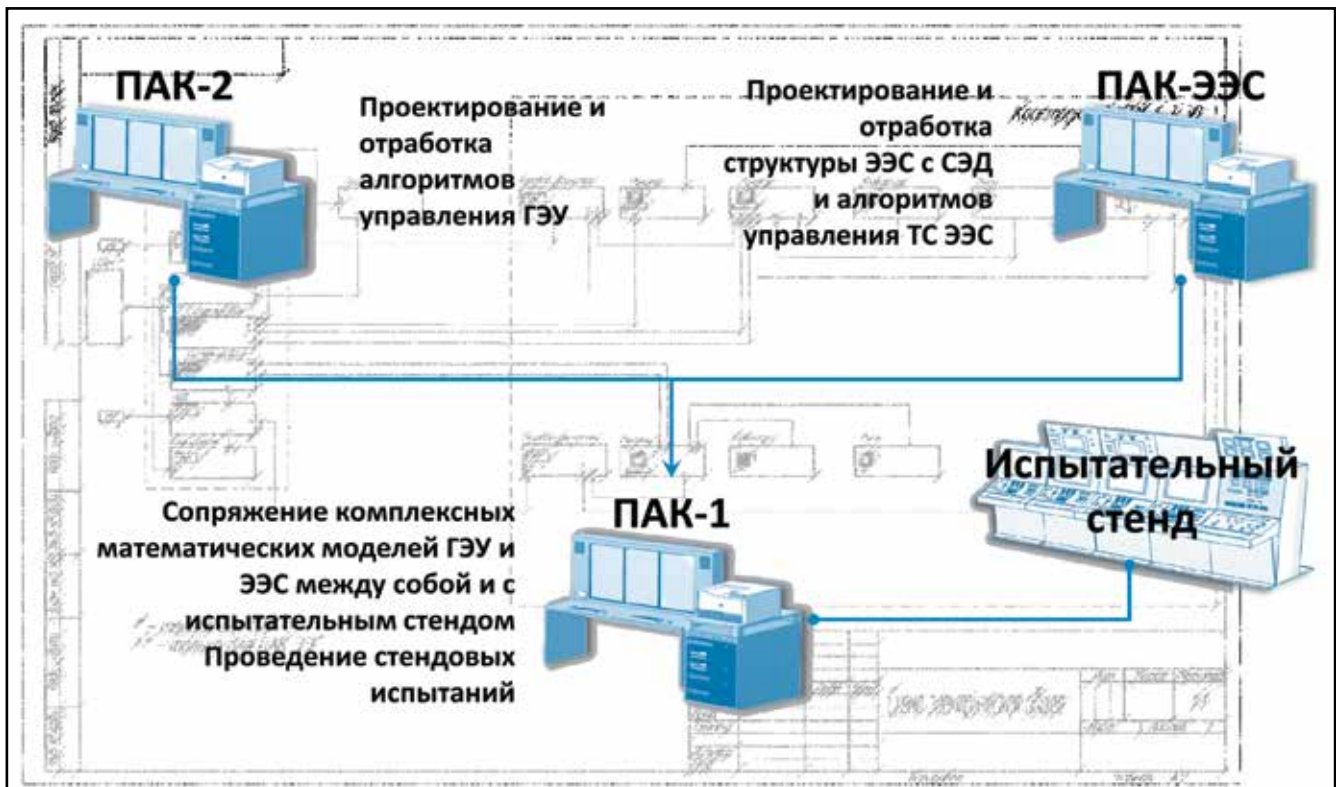


Рис. 3

тического моделирования, уровень автоматизации проектирования ОАО «ЦКБ МТ «Рубин» и технологическая оснащенность ОАО «Концерн «НПО «Аврора» позволили выйти с предложением на Министерство обороны Российской Федерации об отработке системы управления ГЭУ на базе математической модели для новых проектируемых кораблей. Главное командование ВМФ поддержало данную инициативу, и в настоящий момент технология внедряется в ОАО «ЦКБ МТ «Рубин». Она реализуется тремя программно-аппаратными комплексами: ПАК-1, ПАК-2 и ПАК-ЭЭС (рис. 3).

ПАК-2 и ПАК-ЭЭС предназначены для моделирования параметров ГЭУ и электроэнергетических систем в режиме реального времени, проверки алгоритмов управления и законов регулирования при формировании исходных данных на создание аппаратуры системы управления.

ПАК-1 предназначен для комплексной проверки аппаратуры системы управления посредством подключения математических моделей ГЭУ и ЭЭС к испытательному стенду ОАО «Концерн «НПО «Аврора» (изготовитель аппаратуры системы управления). ПАК-1 поставляется в ОАО «Концерн «НПО «Аврора». Он объединяет функциональность ПАК-2 и ПАК-ЭЭС, а также предоставляет возможность сопряжения с испытательным стендом с помощью устройства сопряжения. ПАК-1 может работать в режиме ПАК-2, в режиме ПАК-ЭЭС и в режиме сопряжения моделей с испытательным стендом изготовителя аппаратуры системы управления.

Этапы, на которых необходимо применение комплексных математических моделей:

- ▶ определение статических и динамических характеристик ОУ, создание исходных алгоритмов управления, комплексная отладка алгоритмов управления (с учетом их взаимного влияния) во взаимодействии с комплексной математической моделью (КММ ОУ);
- ▶ обоснование тактико-технических требований ТЗ на разработку СУ и ее составных частей (систем автоматического регулирования (САР) и управляющих систем (УС) непрерывного и дискретного действия), в том числе исполнительных механизмов и первичных преобразователей;

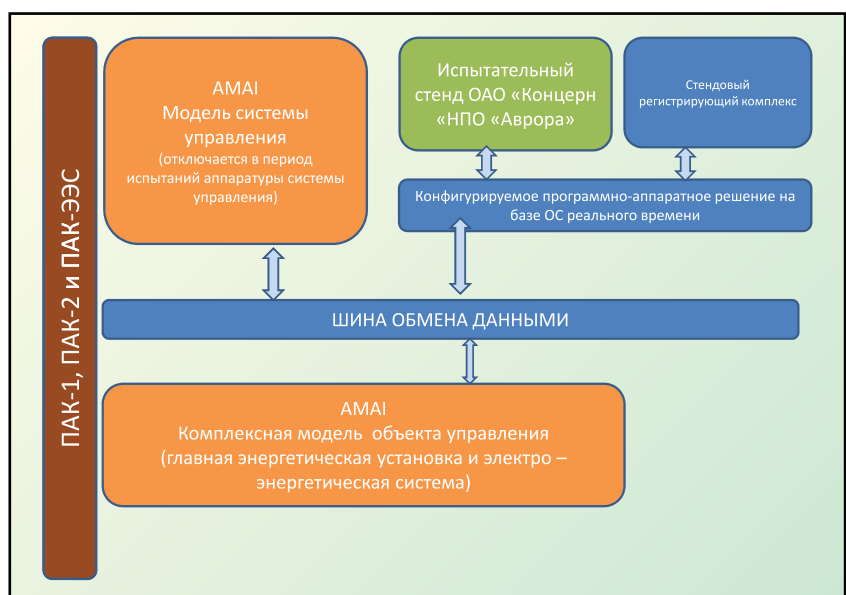


Рис. 4

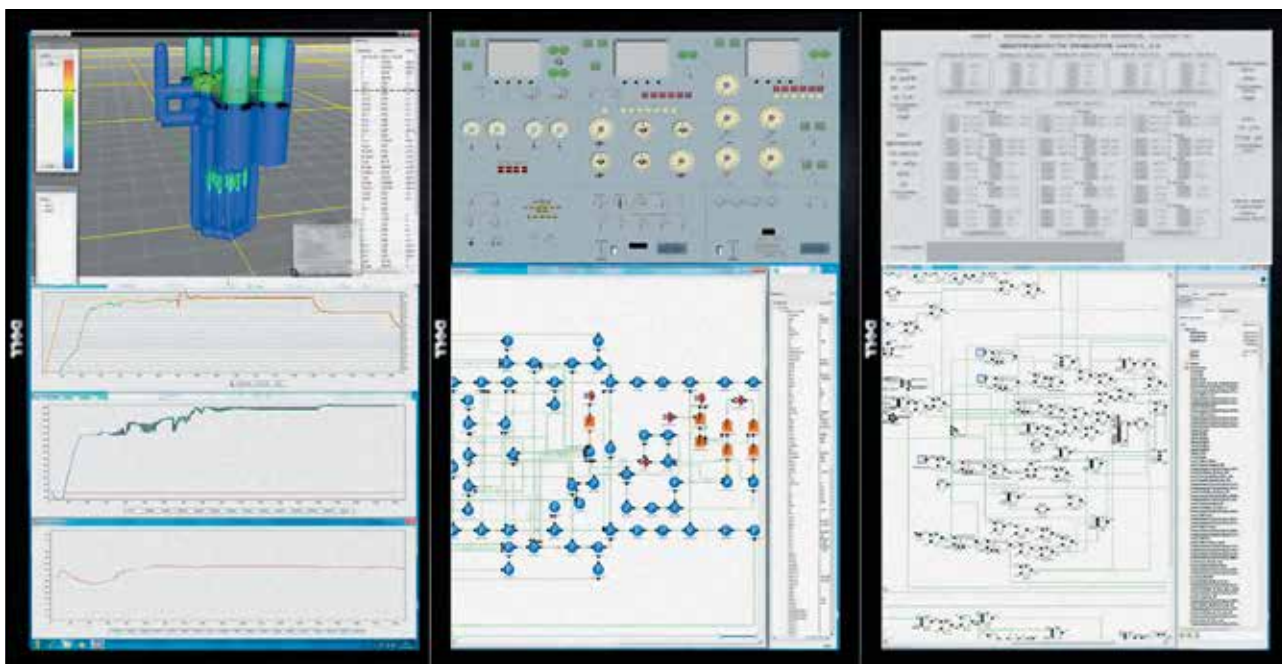


Рис. 5

- ▶ численная реализация алгоритмов управления, создание архитектуры ПО СУ;
- ▶ комплексная отладка ПО СУ (с учетом взаимного влияния его составных частей) во взаимодействии с КММ ОУ;
- ▶ комплексная стендовая отладка аппаратуры СУ, в том числе в комплекте с исполнительными механизмами;
- ▶ испытания корабля, эксплуатация, подготовка личного состава (на тренажерах операторов).

При создании программно-аппаратного комплекса использовалась федеративная модель интеграции математических моделей. Эта концепция соответствует положениям стандарта IEEE1516, предписывающего обеспечить равенство всех моделей между собой, обмен данными в стандартизированном виде посредством общей интеграционной шины и механизма управления модельным временем.

Комплексные математические модели ГЭУ и ЭЭС, модели алгоритмов управления, а также устройство сопряжения с испытательным стендом подключаются к шине в виде отдельных программ (федератов) (рис. 4). Это позволяет производить совместный расчет математических моделей ГЭУ и ЭЭС, а также обеспечивает стандартизацию протоколов информационного обмена и позволяет легко заменять программную реализацию модели системы управления ГЭУ и ЭЭС на реальную аппаратуру системы управления.

В состав функционального программного обеспечения программно-аппаратных комплексов входят:

- ▶ **математические модели:** модель ПТУ рассчитывается расчетным кодом (РК) Serpent, модель ППУ рассчитывается РК РАСНАР; модель ЭЭС с СЭД рассчитывается РК КодЭкс;
- ▶ **шина распределенного моделирования** – обеспечивает совместный расчет математических моделей и передачу параметров между ними. В состав шины включена система логирования, позволя-

ющая документировать все передаваемые между моделями расчетные параметры;

- ▶ **среда визуального моделирования AMAI** – обеспечивает создание, отладку и вычисления расчетных схем математических моделей;
  - ▶ **средство трехмерной визуализации Viron-S** – обеспечивает трехмерную визуализацию модели ГЭУ в процессе расчета;
  - ▶ **имитаторы пультов управления** – используются совместно с моделями системы управления для управления работой моделей ГЭУ и ЭЭС с СЭД;
  - ▶ **средство мониторинга DBS Chart** – используется для визуализации и анализа параметров, передаваемых между моделями ОУ и СУ, как в случае использования модели системы управления, так и при управлении с испытательного стенда.
- Интерфейс ПАК-2 (рис. 5) включает в себя:
- ▶ 3D-визуализацию объекта управления с графическим отображением рассчитываемых параметров цветом и в виде графиков переходных процессов;
  - ▶ прототипы видеокадров системы управления;
  - ▶ расчетную теплогидравлическую схему;
  - ▶ структуру системы управления.

Описанная технология внедряется НИЦ “Курчатовский институт” в ОАО “ЦКБ МТ “Рубин” и ОАО “Концерн “НПО “Аврора”. Математические модели создаются в кооперации с ОАО “Калужский турбинный завод” и АО “ОКБМ Африкантов”. В настоящий момент технология внедряется для трех проектируемых кораблей, отладка аппаратуры системы управления по данной технологии планируется в 2016-2017 годах.

А. М. Ганжинов, И. А. Колесников,  
В. В. Куштан, В. И. Ромашкин, В. С. Устинов,  
НИЦ “Курчатовский институт”  
М. В. Зима, В. И. Калинин,  
И. Ю. Констанденко, П. А. Федотов,  
ОАО “ЦКБ МТ “Рубин”

# VII Международный форум поставщиков атомной отрасли «АТОМЕКС 2015»



атомекс


13-15 октября 2015 года  
МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



РОСАТОМ

[www.atomeks.ru](http://www.atomeks.ru)

АТОМЭКСПО

Телефон: +7 (495) 66-33-821  
E-mail: [atomeks@atomexpo.com](mailto:atomeks@atomexpo.com)  
Присоединяйтесь к нам на  - Атомекс Форум