

На правах рукописи

Sign

Щекатуров Александр Михайлович

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ ТП ЯДЕРНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ПРИМЕНЕНИЕМ
МОДЕЛЬНО–ОРИЕНТИРОВАННОГО
ПОДХОДА

Специальность 05.14.03 —

«Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Козлов Олег Степанович

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество**,
доктор технических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник
Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным длин-
ным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего профессиональ-
ного образования с длинным длинным длинным
длинным названием

Защита состоится DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов на заседании дис-
сертационного совета NN на базе Название учреждения по адресу: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Автореферат разослан DD mmmmmmmm YYYY года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
NN, д-р физ.-мат. наук

Sign

Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Атомная электростанция (АЭС), судно или корабль с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) на борту, атомная подводная лодка (АПЛ) — одни из самых сложных технических изделий, созданных человечеством. Конструирование новых ядерных энергетических установок всегда связано с большим количеством научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, совместной работой коллективов специалистов, плотной кооперации нескольких предприятий, многоитерационных расчетов и этапов проектирования, в том числе оптимизационного и поискового характера. При создании ЯЭУ требуется учитывать не только процессы, протекающие внутри установки, но также и внешние условия её эксплуатации.

Разработка ЯЭУ предусматривает решение двух важных проблем. Первая — обеспечение безопасности объектов использования атомной энергии, вторая — повышение экономичности и конкурентоспособности. Обе проблемы в значительной степени связаны с обеспечением качества и надёжности управления ЯЭУ. Развитие методов проектирования автоматизированных систем управления (АСУ) с целью выявления ошибок проектирования алгоритмов на ранних стадиях, оптимизации регуляторов, анализа устойчивости как регулирующих контуров так и объекта регулирования, представляет значительный практический и научный интерес. Результаты расчётов в обоснование безопасности ЯЭУ при различных сценариях и режимах работы являются одной из важных частей проектирования и процедуры лицензирования проекта ЯЭУ. Проекты энергоблоков АЭС наряду с обоснованием безопасности должны проходить процедуру верификации — проверки проекта и его отдельных частей на моделях и экспериментальных данных, что соответствует рекомендациям МАГАТЭ [1]. В актуальной ревизии Европейских требований (EUR(D)) проект АЭС должен сопровождаться «инженерным симулятором» или моделирующим комплексом, который помимо верификации проектных решений должен использоваться как средство исследования динамических свойств установки на ранней стадии проектирования и поддержки эксплуатирующей организации. Для решения задач по обоснованию безопасности установки и исследованию её динамических свойств необходимо совершенствовать и развивать расчетные методы моделирования динамики установки

и создания комплексных математических моделей, развивать расчётные коды и интеграционные интерфейсы между ними.

АСУ ЯЭУ является важным компонентом установки, на который накладываются многочисленные требования, зачастую противоречащие друг другу. Система управления должна иметь определенное быстродействие, резервирование, обеспечивать требуемое качество управления, необходимый эшелонированный уровень защиты, в т.ч. “от дурака”, при этом должна обеспечиваться возможность ручного управления технологическим процессом в пределах нормальной эксплуатации, “безударное” переключение из одного режима в другой, вывод диагностической информации на “верхний” уровень, архивирование сигналов с заданным тактом и т.д. и т.п. Можно утверждать, что специалисты, создающие алгоритмы АСУ, должны детально разбираться в физике явлений и технологии процессов, протекающих в ЯЭУ.

С развитием микропроцессорной техники увеличивается степень использования микроконтроллеров в управляющих контурах; в настоящее время можно говорить о программном обеспечении (ПО) АСУ, разработка которого является нетривиальной инженерной задачей. Сложность заключается в том, что как правило технологи плохо умеют программировать, а профессиональные программисты малознакомы с технологией и особенностями ЯЭУ, как объекта управления. В общем случае технолог формулирует идеи алгоритмов управления на языке который ему ближе (в том числе на обычном русском языке и языке функциональных блок-схем), а программист интерпретирует и реализует идеи, как он их понял, в виде программы для целевого контроллера и операционной системы. При этом между конкретной реализацией программиста и первоначальными идеями технолога невольно возникает большая погрешность, которую приходится устранять на этапе комплексной отладки и/или пуско-наладочных работах. Особо остро проблемы такого рода проявляются на ходовых испытаниях морской техники, когда судно уже вышло в море.

В последние годы наибольшее развитие получило модельно-ориентированное проектирование (МОП, [2], [3], [4]) систем управления, вышедшее (де-факто) на уровень стандарта при создании ПО АСУ практически во всех отраслях промышленности. При модельно-ориентированном подходе основным является создание математической модели, адекватно описывающей ди-

намику проектируемого объекта. Применительно к ядерной технике подход МОП справедлив и оптимален, если бы не технические сложности его реализации, а именно: всережимная модель динамики ЯЭУ, достаточно подробно описывающая динамические характеристики установки, сама по себе является сложным в создании и ускоспециализированным программным обеспечением, требующим применения расчетных кодов (теплогидравлических, нейтронно-физических, электрических и других). Расчетные коды — отдельные программы, в течение многих лет разрабатываемые в конструкторских бюро атомной отрасли и не предназначенные для интеграции и проведения совместных расчетов с какими-либо САПР алгоритмов АСУ. Замкнутые аналитические решения для расчета кинетики нейтронов, расчета полей температур в конструкциях реактора, расчет теплового баланса первого и второго контуров, возможны только в ограниченном числе случаев и, чаще всего, в стационарных состояниях. Поэтому актуальным является развитие численных методов расчета для комплексного моделирования динамики ЯЭУ, поскольку для оценки корректности спроектированных регуляторов и алгоритмов автоматического управления необходим либо испытательный стенд, либо адекватная математическая модель, с приемлемой точностью воспроизводящая поведение реальной установки.

В связи с этим тема «Методика разработки ФПО АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода» является актуальной.

Целью данной работы является создание и практическая отработка в нескольких проектах методики разработки функционального ПО АСУ ТП ЯЭУ, как последовательного набора конкретных этапов, позволяющих не только спроектировать алгоритмическую часть АСУ ТП, но и провести расчетную проверку работы алгоритмов на комплексной математической модели динамики ЯЭУ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор и анализ современных подходов к разработке программного обеспечения АСУ;
2. Выполнить анализ нескольких проектов моделирования ЯЭУ и разработки АСУ ТП ЯЭУ, выделить общие стадии и этапы;

3. Разработать этапы создания математической модели динамики ЯЭУ, предназначенной для совместного расчета и моделирования с системой управления;
4. Разработать способы создания моделей типового и уникального оборудования ЯЭУ, способы автоматизации привязки технологических сигналов и переменных к аппаратуре АСУ ТП и к моделям этой аппаратуры;
5. Разработать этапы создания, отладки (локальной, удалённой) алгоритмической части АСУ и стендовых испытаний АСУ ТП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Концепция «сквозного» проектирования алгоритмов управления и регулирования.
2. Методы создания автономных математических моделей и комплексной математической модели динамики ЯЭУ в среде SimInTech.
3. Модельно-ориентированный подход к проектированию алгоритмической части АСУ ТП ЯЭУ.

Научная новизна:

- разработана концепция «сквозного» проектирования алгоритмов на базе среды динамического моделирования SimInTech, с применением полного набора инструментов, предоставляемых средой,
- впервые разработана логически завершённая методика, регламентированный перечень и последовательность этапов создания сложной динамической модели ЯЭУ (с применением специализированных расчетных кодов), пригодной как для выполнения расчетов, так и для проверки работы алгоритмов,
- была выполнена практическая отработка методики в нескольких проектах, на разных стадиях жизненного цикла ЯЭУ.

Практическая значимость: основными результатами диссертационной работы можно считать следующие (скорректировать!):

1. Предложена методика комплексного математического моделирования ЯЭУ, включая как моделирование физических процессов, так и процессов протекающих в контурах управления.
2. Впервые составлена методика «сквозного» проектирования алгоритмов АСУ ТП ЯЭУ, начиная от идеи технолога и заканчивая авто-

математическим программированием и реализацией алгоритмов в аппаратуре;

3. Было выполнено оригинальное исследование построения математической модели, сформирован шаблон и структура функциональных блок-схем алгоритмической части АСУ ТП для типовой ЯЭУ атомного ледокола;
4. Проведены расчеты в обоснование безопасности и расчетная проверка работы алгоритмов управления, выполнен анализ устойчивости регуляторов ЯЭУ;
5. Проведена оптимизация алгоритмов управления;

Внедрение результатов работы. Результаты исследований диссертационной работы внедрены:

- в ОКР «Поставка и доработка программного комплекса САПР для процесса проектирования и отладки алгоритмов управления КСУ ТС «Сталь-М»;
- в работу по теме «Доработка программного комплекса разработки математических моделей и алгоритмов управления ГЭУ для проекта 945М»;
- в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу «Разработка динамической модели РУ СВБР-100 в программной среде «SimInTech»;
- в работы по разработке на базе SimInTech программного обеспечения, предназначенного для создания математической модели ЯЭУ стенда комплексной отладки и испытаний КСУ ТС «Котлин-220», его установку, наладку и сопровождение процесса испытаний КСУ ТС «Котлин-220» в части разработанного ПО;
- в работу по созданию «Программно-технического комплекса средств автоматического регулирования реакторного отделения Балаковской АЭС 1 блока».

Также, результаты диссертации внедрены в производственную деятельность АО «Атомпроект» и АО «Концерн НПО «Аврора».

(сделать) Достоверность полученных результатов обеспечивается . . .
Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены в виде **статей** в отраслевых журналах, в **отчетах** о НИР, а также в виде докладов:

- На научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Теплофизика-2012), 24-26 октября 2012 года в Государственном научном центре Российской Федерации – Физико-энергетическом институте имени А.И. Лейпунского, г.Обнинск.
- На международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2013» и «Компьютерное моделирование 2015» (КОМОД-2013, КОМОД-2015), 3-5 июля 2013 года и 1-3 июля 2015 года, соответственно, в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.
- На международном научно-техническом форуме, посвященном моделированию ЯЭУ и созданию тренажеров, в 2013 году в Пекине (Nuclear Training & Simulation China Forum 2013).
- На международном семинаре, посвященном применению модельно-ориентированного подхода при проектировании ядерной техники в 2014 году в Пекине (Nuclear Life Cycle Workshop 2014).
- На межотраслевом научно-техническом семинаре «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла», 20-22 октября 2015 года в "Научно-исследовательском технологическом институте имени А.П.Александрова г.Сосновый Бор.
- На научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения» (Теплофизика-2015), 06-09 октября 2015 года в Государственном научном центре Российской Федерации – Физико-энергетическом институте имени А.И. Лейпунского, г.Обнинск.

(сделать) Личный вклад. Автор принимал активное участие ...

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена обзору и анализу современных тенденций при разработке АСУ ТП ядерных энергетических установок.

Вторая глава посвящена способам к моделированию, которые используются при создании математических моделей динамики ЯЭУ. Проведён сравнительный обзор различных подходов, разработаны точечные математические модели отдельных единиц оборудования и комплексная модель динамики СВБР-100.

Третья глава посвящена исследованию и разработке концепции сквозного проектирования алгоритмической части АСУ ТП.

В четвертой главе приведено описание разработанной методики проектирования ФПО АСУ ТП ЯЭУ.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе анализа современных тенденций проектирования программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ сформулирован тезис и предложена методика комплексного математического моделирования ЯЭУ, включая как моделирование физических процессов, так и процессов протекающих в контурах управления...
2. Численные исследования показали, что математические модели в точечном приближении достаточны как по точности так и скорости счёта (на современных вычислительных средствах) для анализа динамики ЯЭУ и проведения совместных расчетов с алгоритмами управления...
3. Математическое моделирование показало возможность создания всережимных моделей ЯЭУ, на базе которых возможна отладка алгоритмов управления, анализ устойчивости регуляторов, выполнение расчётов в обоснование безопасности установки. Комплексная

всережимная модель динамики является прототипом для создания тренажёра и виртуальной АЭС...

4. Для выполнения поставленных задач по разработанной методике было сформировано несколько шаблонов для разных проектов и выполнено моделирование в необходимом объёме (АСММ, СВБР-100, САР РО БалАЭС-1), как модели объекта управления так и модели алгоритмов управления...

Публикации автора по теме диссертации

1. Модельно ориентированное проектирование в SimInTech / А. М. Щекатуров [и др.] // Атомный проект. — 2014. — Т. 17. — С. 54—58.
2. *Щекатуров А. М.* Разработка и применение комплексной динамической модели реакторной установки СВБР-100 для проектирования опытно-промышленного энергоблока // Сборник тезисов IV конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2013), г.Обнинск. — 09.2013.
3. Программное обеспечение SimInTech для программирования приборов систем управления / А. М. Щекатуров [и др.] // Атомная энергия. — 2012. — Т. 113, № 56. — С. 354—357.
4. Моделирование энергоблока с реакторной установкой с жидкометаллическим теплоносителем в программном комплексе SimInTech / А. М. Щекатуров [и др.] // Университетский научный журнал. — 2013. — № 5. — С. 140—152.
5. *Щекатуров А. М.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech // Университетский научный журнал. — 2015. — № 15. — С. 80—87.
6. Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech / А. М. Щекатуров [и др.] // Сборник тезисов межотраслевого научно-технического семинара «Расчетные и экспериментальные

исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла», г.Сосновый Бор. — 11.2015.

7. Технология сквозного проектирования системы автоматического регулирования реакторного отделения АЭС в среде SimInTech / А. М. Щекатуров [и др.] // Сборник тезисов межотраслевого научно-технического семинара «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла», г.Сосновый Бор. — 11.2015.
8. *Щекатуров А. М.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech // Сборник тезисов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2015)», г.Обнинск. — 07.2015.
9. *Щекатуров А. М.* Концепция модельно-ориентированного проектирования АЭС с использованием программного комплекса SimInTech // Сборник тезисов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2012)», г.Обнинск. — 10.2012.
10. *Щекатуров А. М.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech // Сборник тезисов международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2015» (КОМОД-2015), г.Санкт-Петербург. — 07.2015.
11. Создание комплексной модели динамики реакторной установки с жидкометаллическим теплоносителем с использованием среды разработки SimInTech / А. М. Щекатуров [и др.] // Сборник тезисов международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2013» (КОМОД-2013), г.Санкт-Петербург. — 07.2013.

Список литературы

1. Defence in depth in nuclear safety // INSAG-10. — 1996.

2. Колесов Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2004. — 240 с.
3. Джонс Д., Маккай Б. Модельно-ориентированное проектирование систем управления: моделирование и тестирование до реализации в аппаратуре // Control Engineering Россия. — 2013. — Т. 47, № 5. — С. 62—64.
4. Эзекоев А. Г., Цыгвинцев А. Н., Зотов И. С. Создание комплексной математической модели ЯЭУ в среде САПР «МВТУ-4» // Материалы XI молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее-2013». — ОАО «ЦКБ МТ «Рубин». Санкт-Петербург : Сб. трудов конференции, 2013. — С. 176—178.
5. Козлов О. С., Тимофеев К. А., Ходаковский В. В. Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем // Информационные технологии. — 2005. — № 9. — С. 20—25.
6. Кавун О. Ю., Куно М. Я., Фейман В. Г. Программа ТРР для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей // Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов. — НЕЙТРОНИКА-97. Обнинск : Сб. трудов семинара, 10.1998. — С. 111—118. — МАЭ РФ.
7. Василенко В., Тотъменинов Л., Черныш Ю. Инструментальные средства программирования судовых информационно-управляющих комплексов в среде ОСРВ QNX // Современные технологии автоматизации. — 2008. — № 3. — С. 78—84.
8. Ходаковский В. В. Разработка математического и программного обеспечения расчётов динамики систем управления, элементов реакторных и других установок: дис. ... канд. / Ходаковский Виктор Владимирович. — Москва, 2-я Бауманская, д. 5 : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 06.2000.
9. Проблемы и принципы математического моделирования динамики сложных уникальных систем / Ф. М. Митенков [и др.] // Математическое моделирование. — 2007. — Т. 19, № 5. — С. 39—44.

10. Программный комплекс МВТУ версия 4.0. Описание интерфейса графической оболочки. — 06.2006. — Отчет о НИР. Кафедра Э7, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана каф. Э-7.
11. Опыт создания моделирующего комплекса для АЭС с РУ БН-1200 / В. А. Болнов [и др.] // Атомный проект. — 2014. — № 19. — С. 62—63.