

УДК 004.42:004.05:621.039.5

Технология проектирования и отладки программного обеспечения системы управления стендовой ЯЭУ с использованием инструментально-программных комплексов моделирования

С. В. Батраков, Е. И. Дербуков, В. А. Ефимов, Т. В. Романова, В. А. Черного, В. П. Черных, А. А. Шаленинов

ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

Рассматриваются основные технологические процессы проектирования и отладки программного обеспечения (ПО) системы управления ЯЭУ с использованием гибридной комплексной математической модели, в состав которой входят: реперная математическая модель ЯЭУ, эталонная модель алгоритмов функционирования, проекты ПО для штатных программно-технических комплексов системы управления. Описываются особенности применения инструментально-программных комплексов моделирования для реализации технологии. Приводится описание структурной схемы полигона для отладки и испытаний ПО и аппаратуры системы управления в режиме тестовой эксплуатации.

Ключевые слова: системы автоматизации проектирования программного обеспечения, инструментально-программные комплексы моделирования, модельно-ориентированное проектирование, сквозная технология разработки и отладки алгоритмов функционирования.

UDC 004.42:004.05:621.039.5

Techniques for engineering and testing of control system software for nuclear propulsion prototype plants using hardware/software simulation systems

S. V. Batrakov, E. I. Derbukov, V. A. Efimov, T. V. Romanova, V. A. Chernogo, V. P. Chernyh, A. A. Shaleninov

FSUE "Alexandrov NITF", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper discusses techniques for engineering, testing, and debugging of control system software for naval nuclear propulsion prototype plants. The techniques are based on the use of hybrid integrated mathematical models comprising reference mathematical models of nuclear propulsion reactor plants, reference models of operation algorithms, and software projects for standard equipment of control systems. Implementation of the techniques with simulation software and hardware tools is presented. A facility for control system software and hardware testing and debugging in the test run mode is described.

Key words: computer-aided software engineering systems, simulation software and hardware tools, model-oriented engineering, end-to-end technology for development and testing of operation algorithms.

Введение

В процессе создания цифровой системы управления (СУ) стендовой ЯЭУ необходимо предусматривать мероприятия, направленные на уменьшение доработок программного обе-

спечения (ПО) СУ непосредственно на этапе межведомственных (сдаточных) испытаний, а также учитывать высокую вероятность внесения корректировок и модификаций в ПО впоследствии — с учетом выявленных в процессе очередного этапа испытаний особенностей режимов работы ЯЭУ и её характеристик. Эта цель может быть достигнута при переносе основного объема работ по отладке ПО на испытательный полигон, где появляется возможность обнаружить и устранить максимальное количество ошибок и дефектов в ПО, загруженном и выполняемом на штатных программно-технических средствах (ПТС) в рабочей конфигурации функционально-самостоятельных комплектов аппаратуры СУ. Комплект аппаратуры функционирует во взаимодействии с имитатором объекта управления, в качестве которого используется математическая модель, созданная с помощью различных инструментально-программных средств. Соответственно, повышение качества ПО приведёт к значительному уменьшению объема отладочных работ при подготовке и проведении межведомственных и приёмосдаточных испытаний.

Использование модели объекта при проектировании алгоритмов функционирования

Существенное повышение качества алгоритмов функционирования (управления, контроля и сигнализации) может быть достигнуто на основе автоматизации работ по созданию ПО с отработкой алгоритмов на комплексных математических моделях объекта до поставки аппаратуры СУ ЯЭУ, а впоследствии — при внесении модификаций и корректировок в ПО. Целесообразность такого подхода была отмечена пятнадцать лет назад [1, 2], и с тех пор различные предприятия вели работы в указанном направлении [3, 4, 5]. Применение математических моделей в качестве генератора сигналов при отладке алгоритмов функционирования сложных технических объектов является традиционным [6].

На первом этапе создания СУ широкое распространение получили логико-математические модели, отличительной особенностью которых является приближённое моделирование динамики объекта и логическое формирование условий «срабатывания» алгоритмов. По мере продвижения работ в области создания цифровых систем управления и с развитием средств вычислительной техники появилась возможность использования реперных математических моделей. Реперная модель верифицируется по множеству точек (реперов) с экспериментальными данными, поэтому по качеству генерируемых сигналов реперная модель приближается к реальному объекту управления. Именно это обстоятельство позволяет перенести на специализированный полигон основной объём работ по отладке ПО цифровой СУ и практически полностью завершить работы по комплексированию компонент ПО в единый проект без выхода на объект.

Особенностями реперной модели объекта управления являются:

- работа в реальном масштабе времени;
- полномасштабность, т.е. учет всех технологических систем и технических средств (для которых предусматривается автоматизация управления), моделирование полного набора сигналов системы управления и контролируемых параметров;
- всережимность — способность воспроизводить спецификационные переходные эксплуатационные режимы, в том числе и аварийные, предусмотренные, в частности, в техническом обосновании безопасности ЯЭУ;
- верификация модели по исходным данным, полученным от заводов-изготовителей комплектующих элементов ЯЭУ, а также по результатам автономных испытаний от-

дельных элементов ЯЭУ и специальных тестовых экспериментов, проведённых на объектах-аналогах и стендах-прототипах.

Реперные модели аккумулируют большой объём разнородной информации и данные различных конструкторских организаций, в которых могут использоваться разные программные коды при обосновании проектных решений. Поэтому при построении моделей ЯЭУ и СУ целесообразно использовать средства автоматизации моделирования. Такие средства должны иметь в своём составе универсальную графическую оболочку с набором элементов, соответствующих моделям различных технических средств, что позволяет формировать модели в виде расчётных схем технологических систем ЯЭУ. Примером такой системы автоматизации моделирования являются инструментально-программные комплексы (ИПК) ТЕРМИТ и SimInTech. Имеется многолетний опыт применения этих комплексов для создания сложных математических моделей объектов атомной энергетики, объединяющих математические модели, подготовленные различными коллективами разработчиков [7]. Графические оболочки указанных ИПК предоставляют возможность визуализации процесса моделирования в самых разных формах — динамический вывод параметров и сигналов, интерактивное задание управляющих воздействий и уставок, редактирование коэффициентов и параметров, что упрощает и ускоряет процесс отладки алгоритмов функционирования. Редактор технологических схем обеспечивает одновременную работу со всем комплексом математических моделей, описывающих объект управления, в том числе функционально-различного назначения: схемы теплогидравлические, электроэнергетические, автоматики и пр. При этом между ними организован обмен данными в реальном времени.

Проблемы модельно-ориентированного проектирования

В настоящее время использование описания физических систем и алгоритмов в виде математических моделей перешло на качественно иной уровень: активно развивается так называемое модельно-ориентированное проектирование систем. При автоматизации процесса проектирования и отладки ПО необходимо обеспечить взаимодействие разработчиков алгоритмов функционирования различных систем (т. е. технологов и специалистов по автоматизации в составе КБ-проектанта ЯЭУ) и разработчиков, непосредственно реализующих эти алгоритмы при создании ПО, загружаемого в аппаратные средства СУ ЯЭУ (т. е. системотехников, математиков, программистов и специалистов по автоматизации в составе организации-разработчика СУ). Это взаимодействие должно быть основано на решении следующих задач:

- создание единой базы данных со стандартизированным кодированием и описанием всех используемых в СУ сигналов;
- автоматизация моделирования алгоритмов на различных этапах их разработки и отладки, т. е. создание математической модели, имитирующей работу системы управления в рамках комплексной реперной математической модели объекта управления;
- унифицированное описание алгоритмов в рамках системы, используемой для автоматизации моделирования; такое описание должно соответствовать стандартам языков, используемых производителями программируемых контроллеров (например, в соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016, в виде графических диаграмм функциональных блоков FBD, а также возможном использовании элементов последовательных функциональных схем SFC при реализации отдельных алгоритмов в виде конечных автоматов);
- обеспечение автоматизированного контроля внесения изменений в модели и возможности сохранения предыдущих версий.

Такое взаимодействие должно обеспечиваться на протяжении основных этапов жизненного цикла создания СУ ЯЭУ: от разработки технического задания до пусконаладочных работ, испытаний и эксплуатации, а также при последующих модернизациях и ремонтах.

Технология разработки и отладки алгоритмов функционирования с использованием моделей

Основные технологические процессы разработки и отладки алгоритмов функционирования при использовании моделей состоят в следующем:

1. Разработка алгоритмов осуществляется в виде диаграмм функциональных блоков (блок-схемы) с помощью пакетов автоматизации моделирования в составе ИПК. Язык диаграмм функциональных блоков является графическим языком программирования и представляет собой совокупность функциональных блоков, соединённых линиями связи. Функциональные блоки представляют собой оператор (или набор операторов) преобразования входных сигналов в выходные. Используемый пакет должен содержать библиотеку функциональных блоков (снабжённых спецификациями), которые соответствуют наборам функциональных блоков в составе промышленных САПР автоматизации программирования контроллеров, используемых в приборах управления СУ. Графический интерфейс должен обеспечивать создание, оперативное редактирование алгоритмов управления, а также настройку числовых значений их параметров, а именно:

- возможность разделения алгоритма на составные части;
- возможность переноса (копирования) любой функциональной операции или группы операций в виде графического объекта из одного алгоритма в другой алгоритм;
- формирование комплексного проекта ПО с использованием иерархической структуры, которая позволяет объединить проекты, подготовленные различными разработчиками, но которые имеют уникальные кодировки сигналов и элементов в соответствии с принятой системой классификации и кодирования;
- возможность расширения проекта алгоритмов в процессе разработки;
- возможность изменения числовых значений параметров и уставок в динамическом режиме, то есть в процессе выполнения алгоритма при моделировании.

2. Для реализации общего проекта алгоритмов необходима общая база данных на основе единой системы классификации и кодирования автоматизируемых технических средств, сигналов и алгоритмов с их однозначной идентификацией и стандартизированным описанием. При кодировании учитывается назначение, тип и формат сигналов, принадлежность к конкретным техническим средствам и алгоритмам. Интерфейс базы данных должен обеспечивать разработчику поиск, навигацию и использование кодов сигналов и автоматизируемых технических средств при проектировании алгоритмов управления. При объединении в общий проект локальных алгоритмов и математических моделей технологических систем объекта управления ИПК моделирования должен обеспечивать автоматизацию процесса согласования обмена сигналами между различными составными частями проекта алгоритмов функционирования и комплексной математической моделью объекта управления. Поскольку формирование базы сигналов начинается уже на стадии проектирования алгоритмов, это обстоятельство облегчает решение задачи разделения аппаратуры СУ ЯЭУ на функционально-самостоятельные комплекты (подсистем СУ ЯЭУ) исходя из «ёмкости» аппаратуры таких комплектов по количеству входов/выходов, по «связности» алгоритмов в части обмена сигналами.

3. Имеющиеся в составе ИПК моделирования средства генерации расчётных программ должны позволять преобразовывать алгоритмы, выполненные в графической среде, в расчётные модули, которые автоматически становятся моделью, имитирующей работу системы управления. В сочетании с имеющимися средствами графической визуализации выполнения алгоритмов эта особенность позволяет оценить заложенные в проект решения и оптимизировать параметры алгоритмов уже на ранних стадиях проектирования.

На начальном этапе проверка алгоритмов может выполняться по разомкнутой схеме: разработчик задаёт в графической оболочке значения входных сигналов алгоритма и отслеживает сформированные значения выходных сигналов алгоритма. По мере разработки математических моделей объекта управления и автоматизируемых технических средств проверка алгоритма осуществляется по замкнутой схеме: сигналы обратных связей (то есть значительной части входов алгоритма) генерирует математическая модель объекта управления. В процессе проверки и отладки алгоритмов отдельных подсистем СУ может быть сформирована комплексная математическая модель, в которой объединяются математические модели локальных систем управления (подсистем СУ). Эта комплексная модель должна включать в свой состав также модуль инициирования и моделирования отказов и неисправностей технических средств, моделирования неисправностей в технологическом оборудовании и аварий в технологических системах для проектной проверки алгоритмов функционирования в полном объёме.

4. Графическая среда ИПК моделирования должна позволять оперативно оформлять функциональные схемы алгоритмов согласно требованиям к проектно-конструкторской и эксплуатационной документации. Для этого необходимо разработать шаблоны формирования отчётности на различных этапах реализации проекта, в том числе для выдачи исходных данных организации-разработчику СУ от КБ-проектанта ЯЭУ. Формирование отчётности по проекту осуществляется путём автоматического преобразования графических схем в формат, используемый для просмотра или вывода документации на печать. Исходные данные в виде функциональных схем практически исключают возможность некорректной интерпретации алгоритмов управления различными группами разработчиков СУ при реализации алгоритмов управления на штатной аппаратуре.

5. Для проведения отладки алгоритмов ПО на полигоне необходимо организовать обмен данными между аппаратурой системы управления (реализующей алгоритмы) и функционирующей в реальном масштабе времени комплексной математической моделью технологических систем ЯЭУ. Первоначально разработанная комплексная модель с помощью сетевых средств может быть состыкована с программно-техническими средствами в составе пультов управления. Это позволяет в полном объёме проверить полноту и правильность представления информации об объекте управления, т.е. устранить ошибки и дефекты в ПО, реализуемом на программно-технических средствах верхнего уровня.

Гибридная комплексная математическая модель

На последующих стадиях полигонной отладки происходит поэтапная замена математических моделей алгоритмов подсистем СУ алгоритмами, выполняемыми на приборах управления из состава штатной аппаратуры СУ. Таким образом, происходит переход к гибридной комплексной математической модели, где часть алгоритмов управления выполняется в составе модели, а часть алгоритмов — на программно-технических средствах из состава штатной аппаратуры СУ. При этом обмен данными обеспечивается с помощью сетевых средств. Основная цель, которая преследуется на данном этапе — проверка корректности функционирования ПО на штатных приборах управления.

Дискуссионным остаётся вопрос о возможности автоматизированной конвертации функциональных схем модели алгоритмов в проект ПО для загрузки в контроллеры приборов управления СУ. Производители контроллеров повышенной надёжности и безопасности (линейки Safety) ограничивают возможности загрузки в эти контроллеры программных проектов, разработанных без использования фирменной САПР. Закрытость САПР фирмы-производителя служит препятствием для автоматической конвертации функциональных схем модели автоматики и импорта их в САПР. Поэтому преждевременно, по-видимому, исключать из технологии этап разработки ПО, загружаемого в приборы управления. Разработка этого проекта должна осуществляться с помощью САПР фирмы-производителя контроллера на основе исходных данных в виде всесторонне отлаженной модели алгоритмов. Можно упростить этот процесс и значительно уменьшить число ошибок, если разработчики алгоритмов создадут и будут использовать библиотеку функциональных блоков, «изоморфных» блокам библиотеки САПР фирмы-производителя. В этом случае реализация функциональных схем в графическом редакторе САПР не будет требовать особой квалификации разработчика функционального ПО.

Далее в проверку включаются аппаратные средства связи приборов управления с объектом управления — приборы ввода/вывода и приборы сопряжения, то есть происходит переход к проверке и отладке алгоритмов в составе функционально-самостоятельных комплектов аппаратуры подсистем СУ ЯЭУ. Для связи этих комплектов с моделью требуются дополнительные технические средства, которые будут рассмотрены в разделе «Особенности полигонной отладки алгоритмов». На этой стадии проверки и отладки обеспечивается выявление и устранение ошибок в адресации сигналов системы управления (привязки их к каналам ввода/вывода), а также ошибок в организации обмена сетевыми сигналами между подсистемами СУ, как на нижнем, так и на верхнем уровне (пульта управления). На всех этапах отладки алгоритмов имеется возможность проверки полноты и правильности представления информации на программно-технических средствах в составе пультов управления и местных постов управления.

Завершающим этапом являются заводские испытания ПО, т. е. проверка системы управления в штатной конфигурации во всех предусмотренных программой испытаний ситуациях, требующих реакции со стороны алгоритмов управления.

Основные преимущества сквозной технологии

Основные преимущества использования технологии проектирования и отладки ПО с использованием моделирующих комплексов следующие:

- проектировщики алгоритмов (КБ-проектант ЯЭУ) и разработчики СУ используют единую базу данных и сигналов, унифицированные программные форматы и документы, что исключает возможность неправильной интерпретации алгоритмов, снижает трудозатраты на устранение неверных трактовок проектных решений;
- на всех этапах обеспечивается наглядность выполнения алгоритмов функционирования при отладке и расчётной проверке, что упрощает поиск ошибок и настройку параметров алгоритмов, обеспечивающих управление как дискретными, так и непрерывными процессами, например, настройку параметров контуров регулирования, исходя из показателей качества и устойчивости переходных процессов;
- обеспечивается автоматизация контроля внесения изменений в алгоритмы функционирования и фиксация дат обнаружения и устранения ошибок, что позволяет накопить значительный объём статистической информации, которая может и должна быть использована для учёта надёжности ПО в расчётах общей надёжности СУ ЯЭУ;

- на этапе проектирования алгоритмов формируются требования к программно-техническим средствам по объёму входных и выходных сигналов, циклограмме (темпу) обмена информацией, качеству переходных процессов;
- отлаженные проектные алгоритмы функционирования в совокупности с реперной математической моделью объекта составляют ядро тренажёрной модели, что позволит опережающими темпами создать функциональный и полномасштабный тренажёр СУ ЯЭУ.

Главное преимущество рассмотренного порядка проектирования и отладки алгоритмов функционирования состоит в том, что значительная часть работ выносится на полигон, а в аппаратуру СУ ЯЭУ загружаются проекты отлаженного на полигоне ПО. Опыт использования такого подхода при создании систем управления ЯЭУ подтверждает значительное сокращение временных и финансовых затрат на разработку ПО.

Особенности реализации технологии при использовании различных инструментально-программных комплексов моделирования

На предприятиях, занимающихся проектированием ЯЭУ и систем управления, используются различные инструментально-программные комплексы моделирования. В настоящее время ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» имеет значительный опыт в использовании ИПК ТЕРМИТ для создания комплексных математических моделей ЯЭУ и апробированную технологию разработки и отладки алгоритмов систем управления, включая заводские испытания штатного ПО. АО «СПМБМ «Малахит» накопил опыт в использовании ИПК SimInTech для автоматизации разработки алгоритмов комплексных систем управления техническими средствами ЯЭУ и отработал технологический процесс отладки таких алгоритмов совместно с математической моделью объекта управления [4].

Таким образом, возникает задача — объединить в моделирующем комплексе для проектирования и отладки алгоритмов системы управления:

- математическую модель ЯЭУ и локальных систем управления, разработанную на базе средств ИПК ТЕРМИТ;
- математическую модель алгоритмов СУ ЯЭУ, разработанную с помощью средств ИПК SimInTech.

Интеграцию этих моделей целесообразно осуществлять на базе ИПК ТЕРМИТ, т. к. в его составе имеются проверенные средства комплексирования моделей, созданных различными группами разработчиков с использованием различных систем автоматизации моделирования, причём такой масштабной математической модели, как, например, виртуальный энергоблок АЭС-2006 [7], в составе которого использовалась, в частности, математическая модель алгоритмов управления, реализованная с помощью ИПК SimInTech.

Для интеграции моделей необходимо обеспечить их согласованную работу в режиме *on-line* с возможностями пошаговой отладки. Это означает, что:

- должна быть обеспечена синхронизация (по модельному времени) счёта и взаимного обмена информацией между моделями;
- должно быть обеспечено выполнение с пульта управления моделирующим комплексом команд (пуск, останов-пауза, чтение/запись состояния объединённой модели), а также задание аварий и изменение параметров модели;
- должны быть обеспечены возможности просмотра и визуализации графических рас-

чётных схем и функциональных планов обеих моделей, видеокадров и динамических графиков.

В рассматриваемой технологии выбран вариант реализации, в котором управление совместной моделью, а также информационный обмен между ними выполняется клиентской частью ИПК ТЕРМИТ, а именно, блоком формирования, запуска и управления задачами в режиме *on-line*. Данный способ реализации не требует внесения изменений в программный код ИПК SimInTech. Для управления серверной частью ИПК SimInTech и обмена информацией используются функции COM-сервиса системной оболочки, а также функции удалённой работы с базой сигналов SDB в составе указанного комплекса. Схема работы при этом достаточно проста: клиентская часть ИПК ТЕРМИТ выдаёт управляющие команды и необходимые параметры серверным частям обоих комплексов. После выполнения команды «счёт одного шага» принимаются (по протоколу TCP/IP) значения расчётных параметров ИПК ТЕРМИТ и передаются в ИПК SimInTech, потом принимаются значения управляющих сигналов от ИПК SimInTech и передаются в серверную часть ИПК ТЕРМИТ. Далее процесс повторяется. Таким образом, обеспечивается синхронизация счёта и обмена информацией между моделями. При этом возможен как автоматический, так и пошаговый режимы работы. Начальные состояния объединённой модели («фотографии») хранятся в базе данных ИПК ТЕРМИТ. Перед выдачей команды «чтение фотографии» соответствующие части фотографии переписываются из базы данных в рабочие пространства ИПК ТЕРМИТ и ИПК SimInTech, а после выполнения команды «запись фотографии» — наоборот, переписываются из рабочих пространств в базу данных ИПК ТЕРМИТ. Списки расчётных параметров и сигналов для обмена генерируются на стадии формирования и запуска задачи в ИПК ТЕРМИТ. Исходной информацией при этом служит привязка сигналов ИПК ТЕРМИТ к соответствующим сигналам базы сигналов SDB. Обмен информацией серверной части ИПК ТЕРМИТ с программируемыми управляющими контроллерами в составе СУ осуществляется по сетевому протоколу в асинхронном режиме, а с программно-техническими средствами в составе пульта управления — по протоколу TCP/IP, также в асинхронном режиме.

Структура полигона

Отладка программно-технических средств СУ ЯЭУ на полигоне может проводиться последовательно: для различных программно-технических комплексов (ПТК), реализующих функционально-самостоятельные комплекты аппаратуры (подсистемы управления) в совокупности с аппаратурой верхнего уровня (пульты управления). Программное обеспечение ПТК — штатное: функциональное и системное, реализующее функции системы управления. При отладке в качестве объекта управления используется комплексная математическая модель ЯЭУ и алгоритмов функционирования, разработанная в процессе проектирования алгоритмов управления. Эта модель реализуется в виде расчётно-моделирующего комплекса (РМК), в составе которого имеется пульт управления РМК.

Структура полигона для отладки ПТК приведена на рисунке. Связь между ПТК и РМК обеспечивается с помощью задатчика сигналов и сетевых средств.

На этапе разработки рабочей документации должна быть подготовлена программа-методика испытаний ПТК на полигоне, которые имеют своей целью:

- комплексную отладку функционального и системного ПО системы управления;
- проверку соответствия решений, принятых в техническом проекте системы управления, требованиям ТЗ по результатам экспериментально-эксплуатационной оценки функциональных возможностей и параметров разработанного ПТК.

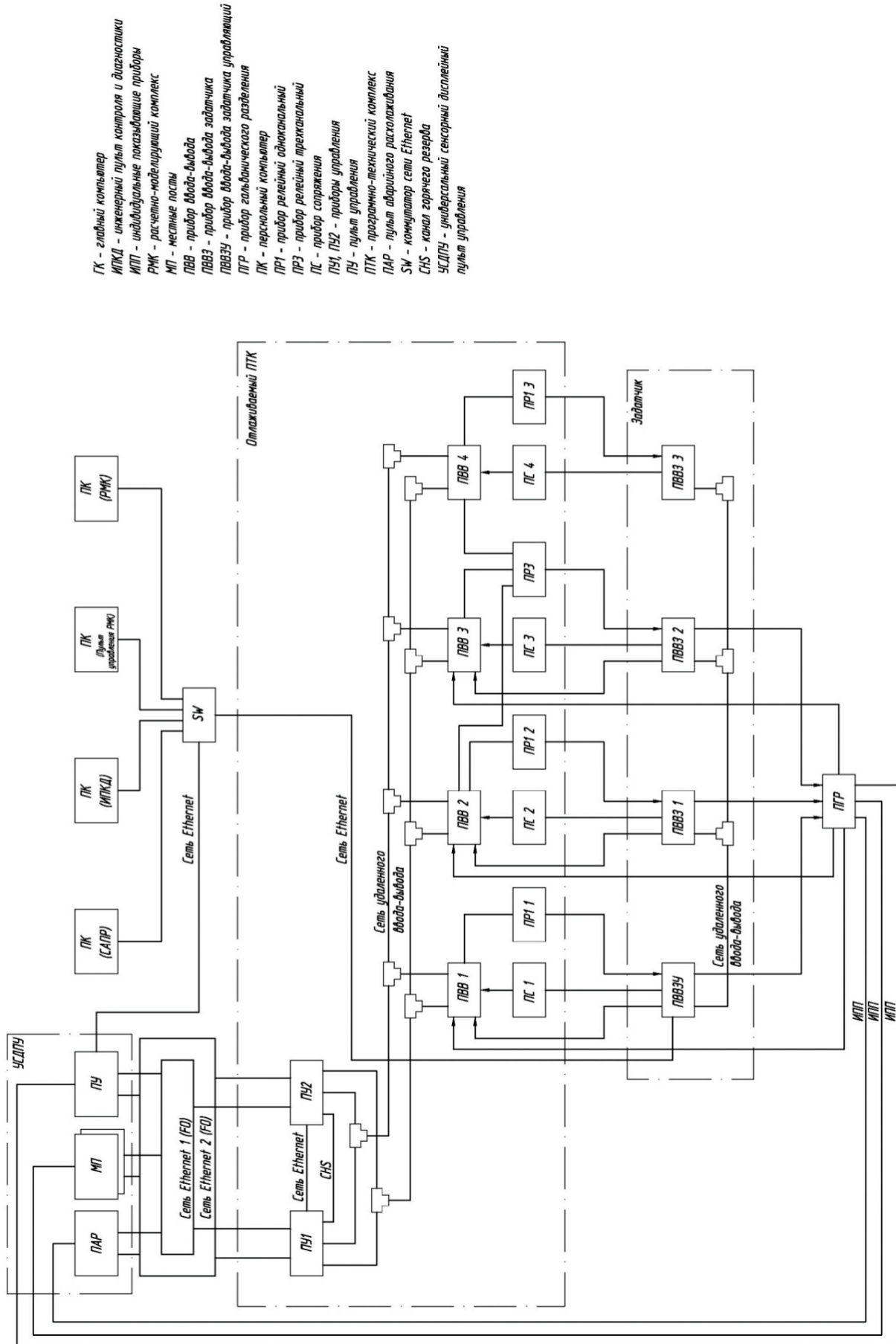


Рис. Структурная схема программно-технических средств полигона для проектирования и отладки ПО

Полигон объединяет следующие компоненты:

- РМК, в составе которого имеются комплексная многорежимная математическая модель динамики ЯЭУ реального времени и математическая модель алгоритмов функционирования, реализованные на ЭВМ высокой производительности (главный компьютер);
- пульт управления РМК, который используется как рабочее место разработчика ПО СУ;
- ПК, обеспечивающий работу САПР, с помощью которых разработано ПО контроллеров в составе приборов управления и программно-технических средств в составе пультов управления;
- программно-технические средства задатчика сигналов обмена между РМК и отлаживаемого ПТК;
- комплект аппаратуры отлаживаемого ПТК;
- универсальный сенсорный дисплейный пульт управления (УСДПУ) [8], имитирующий приборы пульта управления ЯЭУ, пульта аварийного расхолаживания и местных постов управления¹⁾;
- ЭВМ, выполняющая функции инженерного пульта контроля и диагностики аппаратуры системы управления (ИПКД);
- сетевые средства связи Ethernet, обеспечивающие обмен информацией РМК с задатчиком сигналов и аппаратурой пультов управления, USB или COM-порты — для загрузки проектов программного обеспечения в контроллеры приборов управления и задатчика сигналов.

Функционирование ЯЭУ имитируется комплексной математической моделью динамики, разработанной с помощью ИПК ТЕРМИТ. РМК состоит из взаимосвязанных моделей технологических систем ЯЭУ, управление которыми осуществляется с помощью СУ ЯЭУ, а также моделей автоматизируемых технических средств (исполнительные механизмы) и контрольно-измерительных приборов. Разрабатываемые математические модели должны обеспечивать возможность реализации вводных по авариям технологического оборудования и отказам технических средств в объёме, необходимом для проверки всех функций СУ ЯЭУ.

В составе РМК имеется математическая модель алгоритмов управления техническими средствами в составе технологических систем, реализованная с помощью ИПК SimInTech и выполняющая функции эталонной математической модели штатного функционального ПО. В эталонной модели алгоритмов реализованы также сценарии отказов на уровне моделей электрических схем управления исполнительными механизмами (запорная и регулирующая арматура, электродвигатели), включая цепи сигнализации, а также отказов блоков питания и преобразования. Эталонная модель алгоритмов необходима для отладки программного обеспечения функционально-самостоятельного комплекта аппаратуры во взаимодействии со смежными подсистемами и каналами управления.

Особенности полигонной отладки алгоритмов

При отладке и предварительных испытаниях СУ программное обеспечение загружается в следующей конфигурации:

¹⁾ В дальнейшем УСДПУ замещается комплектами аппаратуры, реализующими указанные пульта.

- проект системного и функционального программного обеспечения для ПТС в составе УСДПУ и ИПКД функционирует в полном объёме;
- проект системного и функционального программного обеспечения для ПТС функционирует в объёме отлаживаемого ПТК;
- функции смежных подсистем управления выполняются эталонной моделью алгоритмов системы управления в составе РМК.

Управление функционированием РМК осуществляется с пульта, с помощью которого разработчик ПО имеет возможность:

- запуска и останова математической модели;
- считывания и записи исходных состояний;
- инициирования моделей отказов технических средств и аварий технологического оборудования;
- инициирования моделей имитации показаний контрольно-измерительных приборов, обеспечивающих «срабатывание» алгоритмов управления и сигнализации и т. д.

Контроль выполнения программ, загруженных в ПТС в составе пультов управления и в приборы управления в составе испытываемого комплекта аппаратуры, осуществляется с использованием САПР (применяемых для разработки ПО), обеспечивающих режим анимации (animation mode) выполнения программ, что позволяет разработчикам ПО оперативно обнаруживать и устранять ошибки. В процессе отладки и испытаний все обнаруженные ошибки и дефекты в ПО необходимо фиксировать в журнале с указанием даты и времени обнаружения, даты и времени устранения, категории ошибки (приводит к невыполнению функции, вызывает нарушение выполнения функции, приводит к выполнению функции с отклонениями в отображении информации или её регистрации). Накопленная статистика используется в качестве исходных данных при оценке надёжности программного обеспечения.

Задатчик сигналов включает в свой состав:

- приборы ввода-вывода задатчика (ПВВЗ), предназначенные для приёма дискретных сигналов типа «сухой контакт» от СУ ЯЭУ, а также для выдачи дискретных сигналов и аналоговых сигналов (4–20 мА) постоянного тока;
- прибор ввода-вывода задатчика управляющий (ПВВЗУ), предназначенный, как и приборы ПВВЗ, для приёма и выдачи дискретных и аналоговых сигналов; кроме того, прибор ПВВЗУ включает в свой состав процессорный модуль, головной модуль сети удалённого ввода-вывода и коммуникационный модуль сети Ethernet, что позволяет прибору ПВВЗУ управлять по сети удалённого ввода-вывода другими приборами ПВВЗ, а по сети Ethernet обращаться к ЭВМ в составе РМК.

В процессе отладки ПТК могут быть выполнены следующие виды работ по отладке не только алгоритмов функционирования, но и затрагивающие проверку информационных функций, функций контроля и обеспечения отказоустойчивости:

- обработка измерительной информации и представление её на пультах;
- автоматизированное дистанционное управление исполнительными механизмами по командам оператора с пульта;
- формирование в управляющих системах безопасности сигналов в смежные локальные системы управления;

- автоматизированное управление режимами функционирования ЯЭУ;
- проверка и отладка ПО в условиях моделирования нормальной эксплуатации оборудования ЯЭУ (отладка эталонных алгоритмов), моделирования неисправностей оборудования, задействованного в алгоритме управления, имитации неисправностей в аппаратуре СУ ЯЭУ, реализующей алгоритм функционирования;
- проверка проведения технологических режимов, требующих сочетания функций автоматического управления и автоматизированного дистанционного управления;
- проверка функций контроля и формирования сигналов о неисправностях и отказах;
- проверка устойчивости к единичным отказам системных и функциональных модулей;
- устойчивость к отказам электропитания;
- подтверждение некоторых эксплуатационных характеристик программно-технических средств СУ ЯЭУ.

Заключение

Предложена сквозная технология проектирования и отладки ПО системы управления стендовой ЯЭУ, основанная на применении инструментально-программных комплексов моделирования, начиная с этапа разработки алгоритмов функционирования и заканчивая процессом отладки на полигоне функционально-самостоятельных комплектов аппаратуры (подсистема или канал управления) в режиме тестовой эксплуатации. Использование технологии позволяет существенно сократить время разработки и повысить надежность программного обеспечения: проверить алгоритмы функционирования; выявить и устранить значительный объем ошибок и дефектов ПО; подтвердить экспериментальным путём основные эксплуатационные характеристики аппаратуры до поставки на стенд, а в последующем — обеспечить всестороннюю проверку и отладку проектов ПО при внесении изменений в алгоритмы функционирования по результатам этапов испытаний.

Литература

1. Сквозная интегрированная технология создания систем управления ЯЭУ / В. А. Василенко, Е. И. Дербуков, В. Н. Зимаков, А. И. Колесников, В. П. Черных, А. М. Чупалов, А. А. Шаленинов // Системы управления и обработки информации: научно-технический сборник / НПО «Аврора». — СПб, 2001. — Вып. 3.
2. Астров В. В. Вопросы создания интегрированных систем управления ядерными энергетическими установками кораблей / В. В. Астров, В. С. Василенко, Л. В. Тотменинов // Системы управления и обработки информации: научно-технический сборник. — НПО «Аврора». — 2000. — Вып. 1.
3. Технология отработки систем управления ЯЭУ транспортного назначения на стенде завода-изготовителя с использованием имитационно-моделирующих комплексов / С. Н. Сурин, В. А. Василенко, В. В. Ивличев, А. П. Горбуров // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: периодический рецензируемый научно-технический сборник / гл. ред. В. А. Василенко. — Сосновый Бор: ФГУП НИТИ, 2016. — Вып. № 3 (5). — С. 8–12.
4. Замуков В. В. Внедрение сквозной технологии разработки алгоритмов управления сложными техническими системами ВМФ / В. В. Замуков, И. И. Курдюков, Е. Н. Раз-

- уваев // Судостроение. — 2012. — № 2.
5. Щекатуров А. М. Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech / А. М. Щекатуров, В. А. Тимофеев, О. С. Козлов // Университетский научный журнал. — 2015. — № 15.
 6. Зимаков В. Н. Об опыте разработки и использования новой технологии отладки систем управления / В. Н. Зимаков // Автоматизация в промышленности. — 2008. — № 7.
 7. Программно-технический комплекс «Виртуальный энергоблок АЭС с ВВЭР» (ПТК «ВЭБ») для проверки проектных решений АЭС-2006 [Электронный ресурс] / В. И. Безлепкин, В. О. Кухтевич, Е. П. Образцов, Ю. А. Мигров, А. А. Шаленинов, А. А. Деулин. — URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/documents/mntk2013-168.pdf>.
 8. Программно-технический комплекс с универсальным сенсорным дисплейным пультом управления для создания тренажёрных систем / С. П. Витин, Д. В. Лялюев, Д. Б. Тепляков, В. П. Черных // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: периодический рецензируемый научно-технический сборник / гл. ред. В. А. Василенко. — Сосновый Бор: ФГУП НИТИ, 2016. — Вып. № 3 (5). — С. 71–74.