

Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики

А.В. Ефимов, Т.В. Потанина

В статье описываются методы разработки имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 и реализации ее в виде автоматизированного программного комплекса. Технологическая схема энергоустановки при имитационном моделировании разбивается на структурные блоки и объекты иерархического подчинения. Программный комплекс имеет модульную структуру.

I. ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой современного этапа развития мировой энергетики является увеличение доли АЭС в общем производстве электроэнергии. В то же время, повышенная техногенная опасность этих мощных энергетических объектов определяет актуальность задачи обеспечения их надежного, эффективного и безопасного функционирования.

Специфика технологического процесса на АЭС, обусловленная рядом факторов (необходимостью координированной работы большого числа агрегатов основного и вспомогательного оборудования, ограниченным доступом ко многим помещениям станций, большой единичной мощностью агрегатов), требует высокой степени автоматизации, позволяющей сравнительно небольшому коллективу обслуживающего персонала осуществлять управление энергообъектом. Создание системы управления, автоматически подготавливающей оператору исчерпывающие информационные данные, способной осуществлять поиск оптимальных режимов при пусках, остановках и эксплуатации энергоблоков в стационарных режимах и прогнозировать причины снижения экономичности оборудования – проблема, ожидающая своего решения [1],[2].

Решением этой проблемы являются работы по созданию новых и совершенствованию существующих автоматизированных программных комплексов в составе АСУ ТП энергоблоков ТЭС и АЭС, такие как [3],[4] и многие другие. Эти системы многофункциональны и, помимо традиционных вопросов контроля, решают диагностические задачи, выступают в качестве системы интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах управления и планирования.

Основой функционирования большинства таких систем является имитационная модель

энергетического объекта, позволяющая проводить моделирование различных режимов функционирования.

Работы по созданию имитационных моделей сложных теплоэнергетических объектов на протяжении ряда лет велись в ИПМаш НАН Украины, где коллективом ученых были разработаны имитационные модели конденсационных паротурбинных установок для ТЭС и АЭС, в частности [5],[6]. В настоящее время работа по разработке и реализации в виде автоматизированного программного комплекса единой имитационной модели технологических процессов в основном и вспомогательном оборудовании энергоблоков станций продолжается в НТУ «Харьковский политехнический институт» на кафедре парогенераторостроения [3],[7].

II. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

В данной статье рассматривается модель энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, построенная на основе комплексного метода исследования сложных технических систем с помощью современной вычислительной техники, включающего построение концептуальных, математических и программных моделей, выполнение широкого спектра целенаправленных численных экспериментов, обработку и интерпретацию результатов этих экспериментов – имитационного моделирования [8],[9]. При существующих определенных недостатках этого метода (точность имитационной модели зависит от достоверности исходной информации, требует проведения ряда имитационных экспериментов, ограничены возможности решения задач прогнозирования с помощью имитационного моделирования), он, тем не менее, является одним из наиболее широко используемых мощных инструментариев, применяемых при решении задач анализа, управления и синтеза сложных систем.

А. Концептуальная модель

Энергоблок современной ядерной установки представляет собой сложную техническую систему. Данному объекту присущи все основные признаки системы: целостность; наличие подсистем и связей между ними, т.е. наличие структуры; возможность обособления или абстрагирования от окружающей среды; связи с окружающей средой по обмену

¹Ефимов А.В. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения НТУ «ХПИ», адрес: Украина, 61024, Харьков, пр. Правды 5, кв. 80.

²Потанина Т.В. – аспирантка кафедры парогенераторостроения НТУ «ХПИ», адрес: Украина, 61121, Харьков, ул. Героев Труда 66, кв. 77. e-mail: potanina@kpi.kharkov.ua

ресурсами; подчиненность всей организации системы одной цели.

Важнейшей системной характеристикой энергоустановки является технологическая схема.

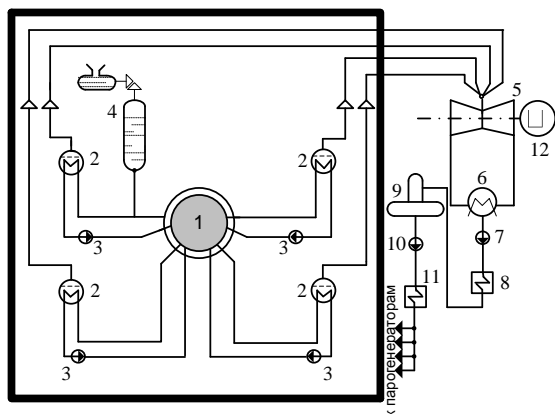


Рис. 1. Технологическая схема энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – компенсатор объема; 5 – турбина; 6 – конденсатор; 7 – конденсатный насос; 8 – группа подогревателей низкого давления; 9 – деаэрактор; 10 – питательный насос; 11 – группа подогревателей высокого давления; 12 – электрогенератор.

Технологическая схема (ТС) энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1000 имеет два контура. Первый – радиоактивный – включает реактор типа ВВЭР и четыре циркуляционные петли охлаждения. Каждая состоит из горизонтального парогенератора ПГВ-1000, главного циркуляционного насоса и главного циркуляционного трубопровода. К одной из петель подсоединен паровой компенсатор давления, поддерживающий в контуре заданное давление воды. Первый контур предназначен для отвода тепла, выделяющегося в реакторе, и передачи его во второй контур в парогенератор. Энергия деления ядерного топлива в активной зоне реактора отводится теплоносителем, прокачиваемым через нее главными циркуляционными насосами. Из реактора теплоноситель по главным циркуляционным трубопроводам поступает в парогенераторы, где отдает тепло котловой воде второго контура и затем главными циркуляционными насосами возвращается в реактор.

Второй контур технологической схемы энергоблока – нерадиоактивный – состоит из парогенераторов, турбины К-1000-60/1500-2 с генератором ТВВ-1000-4 и вспомогательного оборудования машинного отделения. Выработываемый во втором контуре парогенераторов насыщенный пар поступает на турбину. Промежуточная сепарация и двухступенчатый перегрев (отборным и свежим паром) пара после цилиндров высокого давления производится в четырех сепараторах-пароперегревателях. Основной конденсат подвергается очистке на блочной обессоливающей установке и через четыре ступени поверхностных подогревателей низкого давления системы регенерации поступает в деаэраторы. После деаэраторов вода двумя питательными турбонасосами подается в парогенераторы через систему подогревателей высокого давления.

Процесс формализации исследования системы реализуется на основе концептуальной модели, формулируемой в таких терминах как блок, объект, атрибут объекта, схема поведения объекта. Так при структурном представлении схемы энергоустановки образуются структурные блоки, формируются объекты, с помощью которых описывается основное технологическое оборудование и которые находятся в иерархическом подчинении. Например, блок «Паровая турбина» объединяет объекты: «цилиндр турбины» и «клапаны и трубопроводы». «Цилиндр турбины», в свою очередь, в своем подчинении имеет объекты: отсек ступеней, патрубки отборов пара, последняя ступень, выходной патрубок, концевые уплотнения. Блок «Тепломассообменного оборудования» включает объекты систем регенеративного подогрева питательной воды низкого и высокого давлений, испаритель, деаэрактор, теплофикационная установка.

В условиях широкого использования парадигмы объектно-ориентированного программирования, указанное множество понятий является общепринятым во многих языках и системах программирования.

Для передачи формальной структуры энергоустановки удобно использовать ориентированный граф [5],[10]. Узлы графа – технологическое оборудование, входящее в состав технологической схемы. Ориентация дуг графа совпадает с направлением движения теплоносителей и передачи механической, тепловой и электрической энергий в технологических связях установки.

Таким образом, структуру технологической схемы можно представить технологическим графом [5],[10]:

$$G^T \Leftrightarrow \bigcup_{i=1}^m N_i \Leftrightarrow \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j \in R_i} N_j, \quad (1)$$

где N_i, N_j – имена элементов технологической схемы, m – число элементов в схеме энергоустановки, R_i – множество имен элементов, в которые направляются исходящие из элемента N_i технологические связи.

Б. Математическая модель

Математическая модель технологической схемы энергоблока представляет собой формализованную запись числовых и логических переменных системы.

Математическая модель энергоустановки имеет вид:

$$\{\Omega(\chi) | \varphi_i(\chi) = 0, i = \overline{1, s}\}, \quad (2)$$

где Ω и φ_i – функциональные отношения, описывающие качество системы и происходящие в ней физические процессы.

χ – информационная структура функционального состояния объекта, определенная как пятиместный кортеж:

$$\chi = \langle X, Y, G^T, \Lambda, \aleph \rangle, \quad (3)$$

где X и Y – числовые кортежи независимых и зависимых переменных, G^T – технологический граф, $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_r)$ – кортеж внешних связей, \aleph – кортеж управления – множество логических функций, определенных на предметных переменных G^T , а также режимных параметрах использования модели.

Переменные информационной структуры определяются как нечеткие множества, и потому χ является сложным нечетким образованием. Возможность использования теории нечетких множеств для описания и формализации, например, областей допустимых режимов работы оборудования представляется крайне важной. Это связано с тем, что задание жестких ограничений для АСУ ТП и систем автоматики приводят в настоящее время к отключению этих систем диспетчером.

Технологические процессы, происходящие в основном и вспомогательном оборудовании энергоблока описываются в модели системой отношений (равенств, неравенств, таблиц, логических условий). Эта система отношений включает уравнения термодинамики, теплообмена, уравнения состояния воды и водяного пара, кинематических и теплофизических свойств рабочих сред, конструктивных и технико-экономических зависимостей. Эта система существенно нелинейна, содержит неявные функции. Ее количественный и качественный состав зависит от логической информации, описываемой графом G^T и от целей исследования (задачи управления, оптимизационные расчеты, технико-экономические исследования и др.). Перечисленные особенности характеризуют систему отношений, описывающую энергоустановку, как многопараметрическую систему с переменной структурой. Наиболее эффективным средством описания структурно-параметрических задач являются логико-числовые операторы, составленные из гибридных функций [10]: функций, представляющих собой алгебраическое произведение числовой функции и функции предикатов

$$F(x_1, \dots, x_l) = f(x_{i+1}, \dots, x_n) \cdot F(x_{j+1}, \dots, x_m), \quad (4)$$

где $F(x_1, \dots, x_l)$ – гибридная функция l переменных; $f(x_{i+1}, \dots, x_n)$ – числовая функция $n-i$ числовых переменных; $F(x_{j+1}, \dots, x_m)$ – предикат $m-j$ переменных; $1 \leq i < n \leq l, 1 \leq j < m \leq l$.

Отношения Ω и φ_i в (2) представляются в форме логико-числовых операторов в функции от информационной структуры технологического процесса.

В. Программная модель

Разработанный на базе имитационной модели программный комплекс имеет модульную

структуру с иерархической упорядоченностью (Рис.2).

На верхнем уровне находится управляющая программа, организующая работу всего комплекса по выполнению заданий, поступающих от пользователя.

Лексический и синтаксический анализ введенных пользователем директив выполняет специально разработанный транслятор входного языка (по типу проблемно-ориентированных языков).

Блок программ, обслуживающих базу данных (БД), предназначен для хранения различной информации, которая накапливается в процессе эксплуатации энергоустановки. Структура БД разделяется на собственно базу данных, выполняющую непосредственное хранение последних, и систему управления БД, которая, используя индексно-произвольный метод, обеспечивает интерфейсный доступ к хранящимся записям.

Блок программ структурных изменений технологических схем энергоустановки проверяет возможность связи энергетического, тепломеханического, парогенерирующего, насосного и иного оборудования друг с другом с точки зрения смысла технологического процесса. Кроме того, этот блок управляет работой семантических подпрограмм транслятора, осуществляющих следующие изменения в структуре: подключение, отключение, переключение, замену, исключение и включение оборудования в схему техпроцесса; определяет возможность технологических связей между оборудованием.

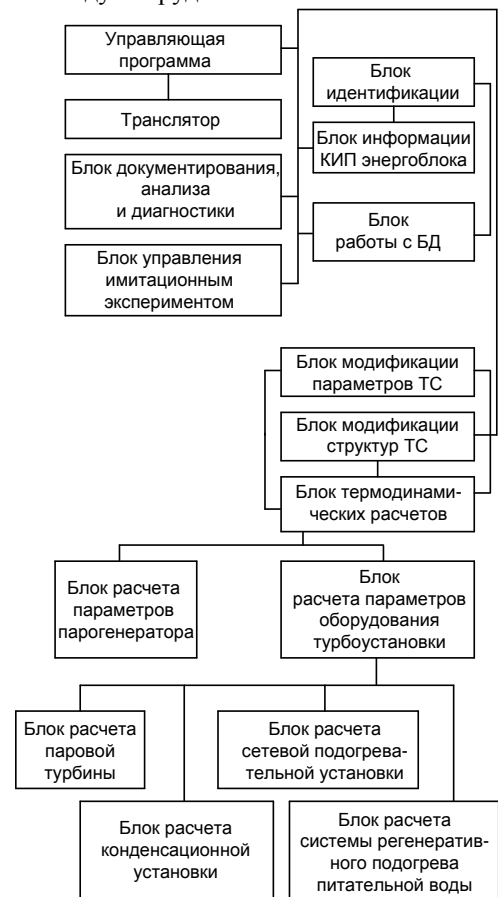


Рис. 2. Схема основных программных модулей.

Блок программ изменения параметров технологического процесса управляет вводом исходных данных, необходимых для расчета параметров технологического процесса энергоустановки и проведением их коррекции, а также управляет работой лексического и синтаксического блоков транслятора, осуществляющих соответствующую обработку директив, вводимых пользователем.

Блок программ термодинамического расчета параметров техпроцесса управляет расчетом различных схем с определением тепловых и энергетических показателей. Программы, входящие в блок, представляют собой программную реализацию ряда операторов: оператора сохранения количества вещества, который решает уравнения расходов рабочего вещества или теплоносителей для каждого элемента технологической схемы установки – узла технологического графа; оператора давления, который определяет давление рабочего вещества в элементах и связях схемы – узлах и дугах графа; оператора энтальпии, который определяет энтальпию и рабочие температуры рабочего вещества в энергетическом и теплообменном оборудовании, оператора энергии, который определяет тепловые и энергетические показатели установки с учетом КПД оборудования. В блок также включена подпрограмма, обеспечивающая необходимую для решения конкретной задачи точность расчетов указанных показателей.

Блок расчета горизонтального парогенератора ПГВ-1000 осуществляет расчет параметров агрегата с известной геометрией каналов теплопередающей поверхности на номинальном и частичных режимах эксплуатации с целью определения энтальпий (температур) теплоносителя и рабочего тела и паропроизводительности парогенератора. Управляющая программа строит структуру тепловой схемы всего энергоблока, организывает вычислительный процесс и вводит исходные данные, необходимые для работы всего комплекса, в том числе для расчета парогенератора, осуществляет взаимодействие параметров ТС и данного агрегата. Входной информацией для расчета являются значения температуры и давления питательной воды, теплоносителя на входе в парогенератор, расхода теплоносителя через парогенератор. Для расчета теплопередающей поверхности исходной информацией являются конструктивные параметры: число труб поверхности, средний диаметр труб. Программа расчета теплового баланса предусматривает расчет параметров теплоносителя и рабочего тела на выходе из парогенератора и расчет его паропроизводительности. В состав программ расчета термодинамических и теплофизических параметров теплоносителя и рабочего тела входят подпрограммы вычисления температуры и степени сухости воды и водяного пара по давлению и энтальпии, расчета скорости, плотности, коэффициента динамической вязкости теплоносителя, критериев Рейнольдса, Прандтля,

вычисления теплопроводности стенки труб по температуре.

Блок расчета параметров оборудования турбоустановки включает в себя: блок программ подробного расчета параметров в проточной части турбины, который проводит расчет процесса расширения пара в направляющих и рабочих лопатках турбины по их сечениям и осуществляет связь между расчетами проточной части и турбоустановкой в целом; блоки расчета параметров конденсационной и сетевой подогревательной установок, расчета системы регенеративного подогрева питательной воды. Кроме того, программами данного блока осуществляется расчет параметров технологического процесса в теплообменном, массообменном и насосном оборудовании.

В блок управления имитационным экспериментом включены программы, реализующие статистические методы планирования эксперимента и его обработки с помощью многофакторных данных регрессионного и дисперсионного анализов.

Блок программ анализа расчетов, диагностики и документации накапливает и печатает результаты расчета параметров технологического процесса, диагностики состояния оборудования на основе вероятностного прогнозирования изменения во времени эксплуатационных характеристик и технико-экономических показателей качества функционирования энергоустановки.

III. ВЫВОДЫ

Разработка имитационной модели технологических процессов ядерных энергоблоков является важным этапом на пути создания единой автоматизированной системы управления энергоблоков АЭС в качестве системы интеллектуальной поддержки деятельности эксплуатационного персонала.

ССЫЛКИ

- [1] Ястребенецкий М.А., Васильченко В.Н. Безопасность атомных станций. Информационные и управляющие системы. – К.: «Техника», 2004. – 472 с.
- [2] Горелик А.Х., Дуэль М.А., Орловский В.А. Развитие и модернизация АСУ энергоблоками ТЭС и АЭС / Доклад на Международном форуме 2000 г. – К.: Новини енергетики, 2000. – № 11. – С. 30-36.
- [3] Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Адель Аль Тувайни. Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 7. – С.72-80.
- [4] Программа «ТРР» для моделирования нестационарных и установившихся процессов в энергетическом оборудовании ТЭЦ: Отчет о НИР / НПП «ПРИОРИТЕТ», Инв. № НТО 001/1997. – М., 1997. – 120 с.
- [5] Палагин А.А., Ефимов А.В. Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1986. – 132 с.
- [6] Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1991. – 192 с.
- [7] Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Потанина Т.В. и др. Моделирование решения задачи поверочного расчета парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // Вестник НТУ

- «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – Вып. 29. – С.15-20.
- [8] В. Девид Кельтон, Аверилл М.Лоу. Имитационное моделирование. Классика CS. – СПб.: Питер; К.: Изд. группа ВНР, 2004. – 847 с.
- [9] В.В. Zeigler, Н. Praehofer, Т.Г. Kim, “Theory of Modeling and Simulation”, Academic Press, 2000. – 510 p.
- [10] Палагин А.А. Автоматизация проектирования тепловых схем турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1983. – 160 с.