
УДК 621.311.25

А. В. Ефимов, д-р техн. наук, **Т. В. Потанина**, аспирантка
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический ин-т»
(Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел.: (057) 7076555, (057) 7076087, E-mail: potanina@kpi.kharkov.ua)

Анализ функционирования энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 на основе имитационного моделирования

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

Описано методи розробки імітаційної моделі енергоблока АЕС з реактором ВВЕР-1000, а також реалізація її у вигляді автоматизованого програмного комплексу. Технологічну схему енергоустановки при імітаційному моделюванні розділено на структурні блоки і об'єкти ієрархічного підпорядкування. Програмний комплекс має модульну структуру.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энергоблок, имитационная модель, технологический граф, математическая модель технологической схемы.

Задачи обеспечения надежной, эффективной и безопасной эксплуатации таких крупных энергетических объектов, какими являются ТЭС и АЭС не теряют своей актуальности. Многочисленные работы по созданию новых и совершенствованию существующих автоматизированных программных комплексов в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами энергоблоков электростанций [1—5] направлены на решение данной проблемы. Основой функционирования большинства таких систем является имитационная модель энергетического объекта, позволяющая проводить моделирование различных режимов функционирования.

Рассмотрим модель энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, построенную на основе комплексного метода исследования сложных технических систем — имитационного моделирования, которое является одним из наиболее широко используемых мощных инструментариев, применяемых при решении задач анализа, управления и синтеза сложных систем. Энергоблок

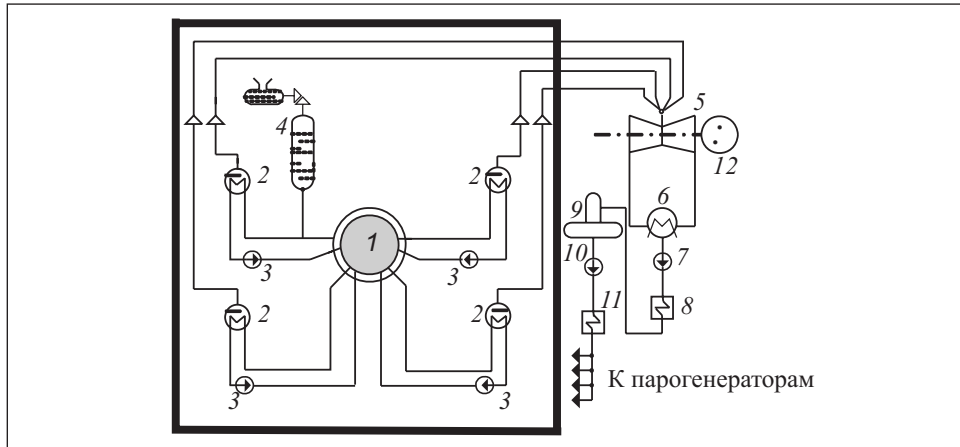


Рис. 1. Технологическая схема энергоблока АЭС с ВВЭР-1000: 1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — главный циркуляционный насос; 4 — компенсатор объема; 5 — турбина; 6 — конденсатор; 7 — конденсатный насос; 8 — группа подогревателей низкого давления; 9 — деаэрактор; 10 — питательный насос; 11 — группа подогревателей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

современной ядерной установки представляет собой сложную техническую систему. Важнейшей системной характеристикой энергоустановки является технологическая схема (ТС) (рис. 1). При структурном представлении схемы энергоустановки образуются структурные блоки, формируются объекты, находящиеся в иерархическом подчинении, с помощью которых описывается основное технологическое оборудование.

Для передачи формальной структуры энергоустановки используется ориентированный граф [3, 6]. Узлы графа — технологическое оборудование, входящее в состав ТС. Ориентация дуг графа совпадает с направлением движения теплоносителей и передачи механической, тепловой и электрической энергий в технологических связях установки.

Таким образом, структуру ТС можно представить в виде технологического графа:

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

где N_i, N_j — имена элементов ТС; m — число элементов в схеме энергоустановки; R_i — множество имен элементов, к которым направляются исходящие из элемента N_i технологические связи.

Математическая модель ТС энергоблока представляет собой формализованную запись числовых и логических переменных системы и имеет вид

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

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, $\chi = \langle X, Y, G^T, \Lambda, \aleph \rangle$. Здесь 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, т.е. множество логических функций, определенных на предметных переменных G^T , а также режимных параметрах использования модели.

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

Технологические процессы, происходящие в основном и вспомогательном оборудовании энергоблока, описываются в модели многопараметрической системой с переменной структурой (включающей равенства, неравенства, таблицы, логические условия). Эта система включает уравнения термодинамики, теплообмена, уравнения состояния воды и водяного пара, кинематических и теплофизических свойств рабочих сред, конструктивных и технико-экономических зависимостей. Система существенно нелинейна, содержит неявные функции. Ее количественный и качественный состав зависит от логической информации, описываемой графом G^T и от целей исследования. Наиболее эффективным средством описания структурно-параметрических задач являются логико-числовые операторы, составленные из гибридных функций [6], представляющих собой алгебраическое произведение числовой функции и функции предикатов:

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

где $\Phi(x_1, \dots, x_l)$ — 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; $1 \leq i < n \leq l$, $1 \leq j < m \leq l$.

Разработанный на основе имитационной модели программный комплекс имеет блочную (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 объектно-ориентированных языков).

Блок программ, обслуживающих базу данных (БД), предназначен для хранения различной информации, которая накапливается в процессе эксплуатации энергоблока. В структуру БД входят собственно БД, выпол-

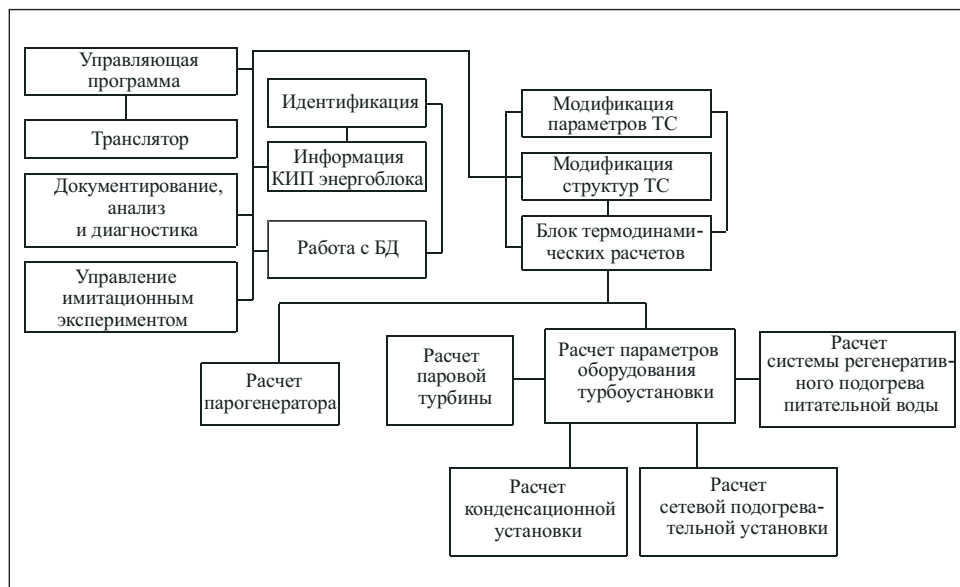


Рис. 2. Схема основных программных блоков

няющая непосредственное хранение данных, и система управления БД, которая, используя индексно-произвольный метод, обеспечивает интерфейсный доступ к хранящимся записям.

Модификация структур ТС энергоблока осуществляется блоком программ, который проверяет возможность связи энергетического, тепломеханического, парогенерирующего, насосного и иного оборудования как технологического процесса. Этот блок управляет работой семантических подпрограмм транслятора, осуществляющих такие изменения в структуре, как подключение, отключение, переключение, замену, исключение и включение оборудования в ТС, а также определяет возможность технологических связей между оборудованием.

Блок программ модификации параметров технологических процессов управляет вводом исходных данных, необходимых для расчета параметров технологических процессов энергоблока и проведением их коррекции, а также работой лексического и синтаксического блоков транслятора, осуществляющих соответствующую обработку директив, вводимых пользователем.

Блок программ термодинамического расчета параметров технологического процесса управляет расчетом различных схем с определением тепловых и энергетических показателей и представляет собой программную реализацию следующих логико-числовых операторов:

сохранения количества вещества, который решает уравнения расходов рабочего вещества или теплоносителей для каждого элемента ТС установки, т.е. узла технологического графа G^T ;

давления, определяющего давление рабочего вещества в элементах и связях схемы — узлах и дугах графа G^T ;

энтальпии, который определяет энтальпии и рабочие температуры рабочих веществ и теплоносителей в энергетическом и теплообменном оборудовании;

энергии, определяющего 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 или температур теплоносителя и рабочего вещества и паропроизводительности парогенератора.

Блок расчета параметров оборудования турбоустановки состоит из блока программ подробного расчета параметров в проточной части турбины, блока расчета параметров конденсационной и сетевой подогревательной установок и блока 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 анализа.

Документирование, анализ и диагностика происходят в блоке программ, накапливающих результаты расчета параметров технологического процесса, диагностики состояния оборудования на основе вероятностного прогнозирования изменения во времени эксплуатационных характеристик и технико-экономических показателей качества функционирования энергоблока.

Взаимосвязанные блоки идентификации и информации контрольно-измерительных приборов (КИП) энергоблока предназначены для адекватности математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании и достоверности выводов о его техническом состоянии в ситуациях несоответствия числа расчетных параметров моделей и данных измерений КИП во время эксплуатации энергоблока.

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

Methods of developing imitative model of NPP power unit with VVER-1000 and its realization as automated program complex are described. The technological scheme of power set by imitative simulation is divided into structure blocks and objects of hierarchical subordination. The program complex has modular structure.

1. *Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д., Адель Аль Тувайни* Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций // Вестн. НТУ «ХПИ». — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2001. — Вып. 7. — С. 72—80.
2. *Программа «ТРР»* для моделирования нестационарных и установившихся процессов в энергетическом оборудовании ТЭЦ: Отчет о НИР / НПЦ «ПРИОРИТЕТ», Инв. № НТО 001/1997. — М. : НПЦ «Приоритет», 1997. — 120 с.
3. *Палагин А.А., Ефимов А.В.* Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. — Киев : Наук. думка, 1986. — 132 с.
4. *Палагин А. А., Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д.* Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. — Киев : Наук. думка, 1991. — 192 с.
5. *Ефимов А. В., Меньшикова Е. Д., Потанина Т. В. и др.* Моделирование решения задачи поверочного расчета парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // Вестн. НТУ «ХПИ». — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2005. — Вып. 29. — С. 15—20.
6. *Палагин А. А.* Автоматизация проектирования тепловых схем турбоустановок. — Киев : Наук. думка, 1983. — 160 с.

Поступила 07.08.06;
после доработки 04.12.06

ЕФИМОВ Александр Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой парогенераторостроения Национального технического университета «Харьковский политехнический ин-т». В 1976 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — вопросы оптимизации работы энергетических объектов.

ПОТАНИНА Татьяна Владимировна, ст. преподаватель кафедры высшей математики Национального технического университета «Харьковский политехнический ин-т». В 1990 г. окончила Харьковский госуниверситет. Область научных исследований — теория управления, экстремальные задачи функций нескольких переменных.