

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР-1000 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА, УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ

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].

Вкладом в решение 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. Автоматизированные системы управления энерго-

блоками многофункциональны и, помимо традиционных вопросов контроля, решают диагностические задачи, выступают в качестве системы интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах управления и планирования. Основой большинства таких систем является имитационная модель энергоблока, позволяющая проводить моделирование различных состояний и режимов его 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, ТЭЦ и АЭС, в частности [5, 6, 7, 8]. В настоящее время работа по разработке и реализации в виде автоматизированного программного комплекса единой имитационной модели технологических процессов в основном и вспомогательном оборудовании энергоблоков электростанций проводится также и в НТУ «Харьковский политехнический институт» на кафедре парогенераторостроения [3, 9, 10, 11].

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 создание концептуальных и математических моделей, программ, выполнение широкого спектра целенаправленных числен-

ных экспериментов, обработку и интерпретацию результатов этих экспериментов - имитационного моделирования [12, 13]. 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 концептуальных подходов, применяемых при решении задач анализа, управления и синтеза сложных систем.

Энергоблок АЭС представляет собой сложную техническую систему. Данному объекту присущи все основные признаки такой системы: целостность; наличие подсистем и связей между ними, то есть наличие структуры; возможность обособления или абстрагирования от окружающей среды; связи с окружающей средой по обмену ресурсами; подчиненность всей организации системы одной цели.

Важнейшей системной характеристикой энергоблока является его тепловая схема, которая при имитационном моделировании представляется ориентированным технологическим графом (рис. 1). Узлы графа - технологическое оборудование, входящее в состав тепловой схемы. Ориентация дуг графа совпадает с направлением движения рабочих веществ и теплоносителей и передачи механической, тепловой и электрической энергий в технологических связях установки.

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 энергоблока образуются структурные блоки, формируются объекты, с помощью которых описывается основное технологическое оборудование и которые находятся в иерархическом подчинении (рис. 2). 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 системы регенеративного подогрева питательной воды, теплофикационной установки, испаритель, деаэрактор и другие.

В условиях широкого использования

парадигмы объектно-ориентированного программирования указанное множество понятий является общепринятым во многих языках и системах программирования.

Ориентированный технологический граф [5, 14], описывающий структуру энергоблока, можно представить в виде:

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

где  $N_i, N_j$  - имена технологических элементов, входящих в структуру энергоблока;

$R_i$  - множество элементов, в которые направляются исходящие из элемента  $N_i$  технологические связи;

$\leftrightarrow$  - знак двустороннего соответствия;

$m$  - число технологических элементов в структуре энергоблока, каждый из которых характеризуется определенной совокупностью числовых параметров (исходными данными для расчета).

Имитационная модель энергоблока может быть представлена следующим образом:

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

где  $\Omega(\chi)$  и  $\varphi_i(\chi)$  - функциональные отношения, описывающие показатели эффективности энергоблока как технической системы ( $\Omega(\chi)$ ) и технологические процессы, протекающие в нем ( $\varphi_i(\chi)$ );

$i$  - номер функционального отношения;

$s$  - число отношений в имитационной модели;

$\chi = \langle X, Y, G^T, \Lambda, \aleph \rangle$  - информационная структура имитационной модели, в которой

$X$  - вектор независимых параметров оборудования энергоблока;

$Y$  - вектор зависимых параметров оборудования энергоблока;

$G^T$  - технологический граф;

$\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_r)$  - вектор параметров, описывающих влияние внешних условий эксплуатации энергоблока;

$\aleph$  - вектор параметров, описывающих

уровень детализации имитационного моделирования;

$M_s$  - область всех возможных функциональных состояний оборудования энергоблока, которые могут быть описаны с помощью имитационной модели.

Система функциональных отношений (2) включает уравнения термодинамики, гидравлики, тепломассообмена, уравнения состояния воды и водяного пара, кинематических и теплофизических свойств рабочих веществ и теплоносителей, конструктивные и технико-экономические зависимости. Эта система

характеризуется следующими особенностями: количество функциональных отношений в ней исчисляется сотнями, она нелинейная (а в ряде выражений - трансцендентная), содержит неявные функции. Количественный и качественный состав соотношений системы (2) зависит от структуры тепловой схемы энергоблока, то есть от логической информации, описываемой с помощью технологического графа  $G^T$ , а также от целей решаемых задач (задачи управления, оптимизационные расчеты, технико-экономические исследования и другие).

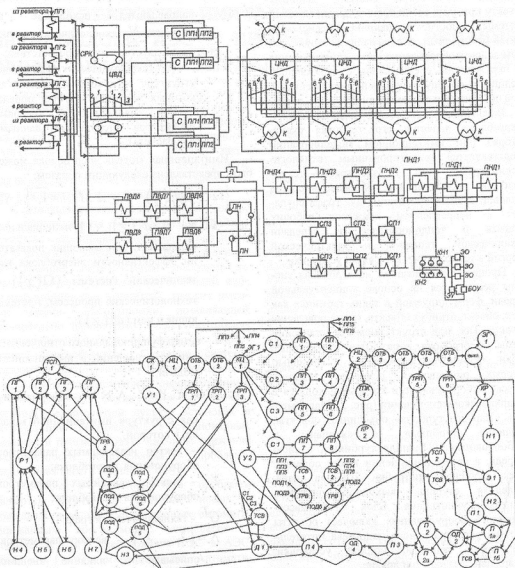


Рис. 1. Развернутая тепловая схема и технологический граф энергоблока АЭС мощностью 1000 МВт

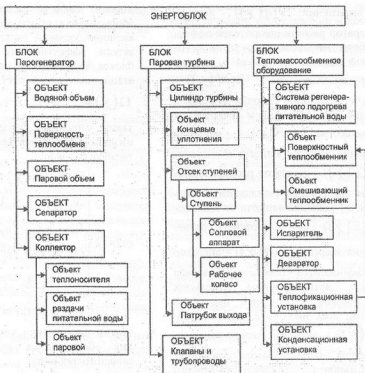


Рис. 2. Иерархия основных объектов при разработке имитационной модели энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000

Перечисленные особенности характеризуют систему отношений, описывающую энергоблок как многопараметрическую систему с переменной структурой. Известно, что успех в решении структурно-параметрических задач во многом зависит от эффективности выбора математических средств их описания. Наиболее подходящими для решения этого класса задач являются математические методы, использующие понятия логико-числовых операторов, которые принимают конкретные числовые значения в зависимости от логической информации, содержащейся в структуре технологического графа  $G^T$ . По этой причине имитационная модель энергоблоков АЭС (2) организована в виде логико-числовых операторов, состав, количество и порядок которых зависят от структуры тепловой схемы энергоблока и целей использования модели.

Имитационная модель энергоблока условно состоит из внутренней и внешней частей. Внутренняя часть представляет собой набор логико-числовых операторов, определенных информационной структурой модели  $\chi$ , а внешняя - совокупность методов решения задач расчетов. Такая организация имитационной

модели энергоблока привела к тому, что и управление этой моделью делится на внутреннее и внешнее.

Внутреннее управление обеспечивает автоматическое функционирование логико-числовых операторов имитационной модели как единого целого. В результате формируется и решается система функциональных отношений, описывающая конкретную тепловую схему энергоблока.

Имитационная модель энергоблока АЭС в операторной форме имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} & \Psi(q(\chi)) | \Psi(M(\chi)) = 0; \\ & \Psi(P(\chi)) = 0; \\ & \Psi(T(\chi)) = 0; \\ & \Psi(E(\chi)) = 0; \\ & \Psi(\eta(\chi)) = 0; \\ & \Psi(e(\chi)) = 0; \\ & \Psi(d(\chi)) = 0; \\ & \chi \in M_s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В этом выражении:  $\Psi(q(\chi))$  - логико-числовой оператор расчета показателей эффективности работы энергоблока брутто и нетто (электрической мощности, удельного расхода теплоты и других показателей);  $\Psi(M(\chi))$  - оператор расчета расходов рабочих веществ и теплоносителей по уравнениям сохранения количества вещества;  $\Psi(P(\chi))$  - оператор расчета давлений рабочих веществ и теплоносителей;  $\Psi(T(\chi))$  - оператор расчета термодинамических параметров (энтальпий, температур и других) рабочих веществ и теплоносителей;  $\Psi(E(\chi))$  - оператор расчета уравнений сохранения энергии;  $\Psi(\eta(\chi))$  - оператор расчета коэффициентов полезного действия парогенератора, всей турбины, отдельных цилиндров, отсеков и ступеней проточной части турбины, всех насосов и всего энергоблока;  $\Psi(e(\chi))$  - оператор расчета внутренних параметров парогенератора, турбины, теплообменника, насосного и другого оборудования;  $\Psi(d(\chi))$  - оператор диагностики и расчета надежности состояния оборудования и схем энергоблоков. Все перечисленные операторы являются логико-числовыми.

Внешнее управление имитационной моделью энергоблока предназначено для имитации различных функциональных состояний энергоблока путем изменения параметров оборудования и структуры тепловой схемы. Оператор внешнего управления представляет собой двухместный логико-числовой оператор  $\text{var}(\chi, \Sigma)$ , который с помощью множества формализованных математических процедур  $\Sigma$  может осуществлять целенаправленные изменения всех числовых и логических переменных имитационной структуры модели  $\chi$ . В состав  $\Sigma$  также входят: методы решения задач нелинейного программирования (методы многопараметрической оптимизации), методы планирования эксперимента и статистической обработки его результатов (регрессионный и дисперсионный анализ данных), идентификация математических моделей оборудования и другие методы.

С помощью имитационной модели энергоблоков АЭС могут быть решены многие задачи, возникающие при их эксплуатации:

- задачи анализа влияния параметров оборудования, структуры тепловых схем и внешних условий эксплуатации на показатели эффективности работы энергоблоков, то есть задачи определения эксплуатационных характеристик вида:

$$\Omega(\chi) = f(X, Y, G^T, \Lambda, \aleph); \quad (4)$$

- задачи структурно-параметрической оптимизации показателей эффективности работы энергоблоков:

$$\text{extr}_{\Omega, \chi} \left\{ \begin{array}{l} \Omega(\chi) | \varphi_i(\chi) = 0; \\ X_{\min} \leq X \leq X_{\max}; \\ Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}; \\ G^T \in (G_1^T, G_2^T, \dots, G_k^T); \\ \Lambda \in (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r); \\ \aleph = \text{const}; i = \overline{1, s} \end{array} \right\}; \quad (5)$$

- задачи диагностики технического состояния оборудования на основе анализа зависимостей вида:

$$(X, Y, G^T, \Lambda) = \psi(\Omega(\chi)); \quad (6)$$

- задачи оптимального распределения электрических и тепловых нагрузок во времени  $t$  между  $n$  энергоблоками электростанции в зависимости от технического состояния их оборудования с целью достижения оптимальных средних показателей эффективности работы всей электростанции  $\Omega_{\text{станция}}$ :

$$\Omega_{\text{станция}} = \text{extr} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Omega_i \begin{pmatrix} X_i(t), \\ Y_i(t), \\ G_i^T(t), \\ \Lambda_i(t), \\ \aleph(t) = \text{const} \end{pmatrix} \right]; \quad (7)$$

где  $\Omega_i \begin{pmatrix} X_i(t), Y_i(t), G_i^T(t), \\ \Lambda_i(t), \aleph(t) = \text{const} \end{pmatrix}$  - показатель эффективности  $i$ -го энергоблока;

- задачи оценки эффективности работы энергоблоков в течение прогнозируемого периода их эксплуатации на основе анализа

показателей надежности  $R(t)$  (например, вероятности безотказной работы) их тепловых схем и оборудования:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega(\chi, R(t)) | \varphi_i(\chi, R(t)) = 0; \\ \chi \in M_s; i = \overline{1, s} \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Разработанный на базе описанной имитационной модели автоматизированный комплекс программ имеет блочную (модульную) структуру с иерархической упорядоченностью (рис.3).

На верхнем уровне автоматизированного комплекса программ (рис. 3) 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 работы с базой данных (БД) предназначен для хранения информации, которая накапливается в процессе эксплуатации энергоблока. Структурно БД разделяется на собственно базу данных, выполняющую непосредственное хранение последних, и систему управления БД, которая обеспечивает интерфейсный доступ к хранящимся записям.

Блок программ идентификации, связанный с блоком информации контрольно-измерительных приборов (КИП) энергоблока, предназначен для повышения адекватности математиче-

ских моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании и достоверности диагностических выводов о его техническом состоянии в случаях несоответствия количества расчетных параметров моделей и данных измерений КИП во время эксплуатации энергоблока.

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

Блок программ модификации параметров ТС управляет вводом и коррекцией исходных данных, необходимых для расчета параметров технологических процессов в оборудовании энергоблока, а также управляет работой подпрограмм транслятора, осуществляющих лексическую и синтаксическую обработку директив, вводимых пользователем.

Блок программ термодинамических расчетов параметров технологических процессов в оборудовании энергоблока управляет расчетом различных версий ТС и определяет тепловые и энергетические показатели эффективности работы всего энергоблока.

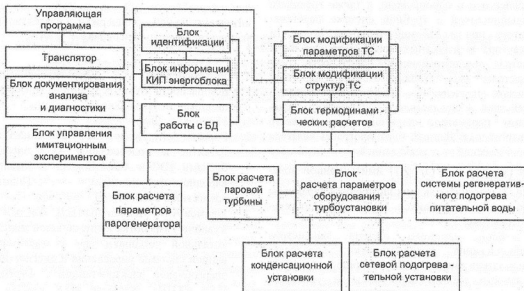


Рис. 3. Схема основных программных блоков

Программы, входящие в блок, представляют собой программную реализацию следующих логико-числовых операторов имитационной модели (3): оператора  $\Psi(M(\chi))$ , определяющего значения расходов для всех элементов и связей схемы энергоблока (узлов и дуг технологического графа  $G^T$ ); оператора  $\Psi(P(\chi))$ , который определяет давление рабочего вещества и теплоносителя в элементах и связях ТС (узлах и дугах  $G^T$ ); оператора  $\Psi(T(\chi))$ , рассчитывающего термодинамические параметры рабочих веществ и теплоносителей в элементах и связях ТС (узлах и дугах  $G^T$ ); оператора  $\Psi(\nabla E(\chi))$ , определяющего энергетические (тепловые) показатели для каждого элемента схемы (узла технологического графа  $G^T$ ); оператора  $\Psi(\eta(\chi))$ , рассчитывающего КПД всей схемы и отдельных ее элементов (узлов графа  $G^T$ ); оператора  $\Psi(q(\chi))$ , определяющего энергетические и тепловые показатели энергоблока с точностью, необходимой для решения конкретной задачи.

Блок программ расчета параметров парогенератора ПГВ-1000 для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 определяет его паропроизводительность и параметры нагреваемого рабочего вещества в водяном и паровом объемах агрегата, в сепарационном устройстве, паровом коллекторе и паропроводе, а также греющего теплоносителя в трубной системе парогенератора при задаваемой тепловой мощности реактора и известных конструктивных параметрах теплопередающей поверхности; осуществляет расчет теплового баланса парогенератора, определяет его коэффициент полезного действия и осуществляет связь между расчетами параметров парогенератора и всего энергоблока. Данный блок программ является программной реализацией операторов  $\Psi(e(\chi))$  и  $\Psi(\eta(\chi))$  имитационной модели (3), рассчитывающих внутренние параметры объектов, относящихся к блоку «Парогенератор» (рис. 2).

Блок программ расчета параметров оборудования турбоустановки определяет показатели энергетической и тепловой эффективности работы паротурбинной установки (электрической мощности, удельного расхода

теплоты и других), управляет блоками программ расчета параметров ее отдельных технических систем (турбины, конденсационной установки, системы регенеративной подогрева питательной воды, теплофикационной установки) и осуществляет связь между расчетами параметров турбоустановки и всего энергоблока.

В блок программ управления имитационным экспериментом включены программы, реализующие статистические методы планирования эксперимента и обработки его результатов с помощью многофакторных данных регрессионного и дисперсионного анализа, методы многопараметрической оптимизации, методы ранжирования параметров и некоторые другие. Этот блок программ представляет собой программную реализацию логико-числового оператора  $\text{var}(\chi, \Sigma)$  для внешнего управления имитационной моделью (3) применительно к перечисленным математическим методам.

Блок программ документирования, анализа и диагностики накапливает результаты расчета параметров технологических процессов во всем оборудовании энергоблока, проводит диагностику и расчет надежности его состояния и осуществляет сравнительный анализ технико-экономических показателей качества функционирования энергоблока (показателей выработки электрической и тепловой энергии).

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.

#### Литература

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 / НПЦ «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. Лыхвар Н.В. Гибкие математические модели энергоустановок для оптимизации режимов работы ТЭЦ/ Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сборник научных трудов.-Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. - Харьков, 2003 г. - С. 413-419.
  8. Лыхвар Н.В. Моделирование теплоэнергетических установок с использованием интерактивной схемной графики // Проблемы машиностроения. - 2003. - № 1. - С. 30-41.
  9. Потанина Т.В., Сфимов О.В., Меньшикова О.Д. Алгоритмізація та програмування розрахунку горизонтального парогенератора для імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000// Вісник «Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація». - Львів:Національний універс. «Львівська політехніка», 2006. - № 561. - С. 3-7.
  10. Моль Л.С. Автоматизированный оперативный выбор схем технологических процессов энергоблоков электростанций с учетом показателей надежности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07/ Л.С. Моль. - Х.: НТУ «ХПИ», 2004. - 163 с.
  11. Ефимов А.В., Адель Аль-Тувайни, Меньшикова Е.Д., Гаркуша Т.А. Идентификация математических моделей технологических процессов в энергетическом оборудовании при решении задач диагностики // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2003. - Вып. 3. - С.20-23.
  12. В. Девид Кельтон, Аверилл М. Лоу. Имитационное моделирование. Классика CS. - СПб.: Питер; К.: Изд. группа ВНР, 2004. - 847 с.
  13. В.В. Zeigler, Н. Praehofer, Т.Г. Kim, "Theory of Modeling and Simulation", Academic Press, 2000. - 510 p.
  14. Палагин А.А. Автоматизация проектирования тепловых схем турбоустановок. - К.:Наук. думка, 1983. - 160 с.