

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ И ОЦЕНКА МЕРЫ АДЕКВАТНОСТИ ВСЕРЕЖИМНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРВОГО КОНТУРА ЭНЕРГБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР-1000

Д.В. Лаврентичев, Ю.С. Тверской (ФГБОУВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина)

Разработана всережимная динамическая математическая модель первого контура энергоблока АЭС, отличающаяся инвариантной и варьируемой частями, что обеспечивает удобство конфигурирования и корректировки модели под параметры другого энергоблока АЭС типа ВВЭР. На основе сравнительного анализа реальных трендов моделируемого энергоблока дана оценка меры адекватности имитационной модели.

Ключевые слова: атомная электростанция, математическое моделирование, ядерный реактор, первый контур.

Стратегия развития атомной энергетики предусматривает доведение удельного веса АЭС в общей структуре генерирующих мощностей до уровня 25%, обеспечив при этом их гарантированную безопасность и технологическую работоспособность в широком диапазоне нагрузок с целью возможного участия энергоблоков АЭС в общем первичном регулировании общесистемных параметров [1, 2].

Инновационное направление эффективного решения этих актуальных проблемных задач связано с оснащением энергоблоков многофункциональными АСУТП. Современная технология создания многофункциональных АСУТП электростанций требует (для повышения уровня проектирования и эксплуатации) оценивать управляемость технологического оборудования и эффективность систем управления на более ранних стадиях разработки проекта энергоблока, привлекая для этих целей всережимные математические модели и тренажерные комплексы [3–6].

В основе теории построения высокоточных математических моделей технологических процессов и установок лежат фундаментальные законы неравновесной термодинамики (феноменологический подход), позволяющие получать распределенные трехмерные детерминированные всережимные динамические модели [3, 7].

Для описания исследуемого объекта используются модели с сосредоточенными параметрами. При этом разрабатываемые в соответствии с техническим заданием полномасштабные тренажеры (ПМТ) энергоблоков АЭС создаются, как правило, под готовый проект конкретного энергоблока и на ранних стадиях разработки проекта энергоблока либо еще не созданы, либо не могут быть сконфигурированы для проведения определенных испытаний (модель используется только в качестве тренажера эксплуатационного персонала).

Практически остается нерешенной проблема оценки качества моделей. Актуальность данной проблемы в еще большей степени усиливается в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а полимодельным комплексом [8].

Поэтому задачи, связанные с разработкой математических моделей оборудования АЭС, совершенствованием технологии создания полимодельных комплексов и методов оценки меры адекватности

получаемых результатов, являются важными актуальными задачами современной технологии проектирования.

В настоящей статье представлены результаты разработки динамической математической модели первого контура энергоблока АЭС. Динамическая математическая модель второго контура энергоблока АЭС была опубликована ранее [3, С. 189–205].

Математическая модель

Разрабатываемая математическая модель относится к классу полимодельных комплексов, имеет открытую структуру, элементы которой представляют собой технологические участки оборудования.

Технологическая структура первого контура энергоблока АЭС представляет собой закрытую потоковую систему, содержащую:

- реакторную установку В-320;
- четыре парогенератора ПГВ-1000 М (ПГ-1,2,3,4);
- главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ);
- систему компенсации давления в первом контуре.

Особенности ТП первого контура

Теплота, выделяющаяся внутри матриц тепловыделяющих элементов в результате контролируемой и управляемой ядерной реакции расщепления ядер урана тепловыми нейтронами, отводится теплоносителем первого контура, циркулирующим под давлением, через активную зону корпуса реактора.

Нагретый в реакторе теплоноситель поступает во входной коллектор, распределяется по трубкам и, пройдя через них, отдает свою теплоту воде, находящейся в межтрубном пространстве. Образующийся при нагреве питательной воды насыщенный пар, проходя из парового пространства парогенератора через жалюзийный сепаратор, подвергается сушке и затем через патрубки поступает в паровой коллектор.

При изменении средней температуры теплоносителя первого контура в переходных режимах, связанных с нарушением в работе оборудования и при изменении нагрузки, часть его перетекает из компенсатора в контур или из контура в компенсатор по соединительному трубопроводу. При этом ограничение отклонений давления от номинального значения достигается за счет сжатия или расширения паровой подушки в компенсаторе. Водяной объем также участвует в процессе компенсации давления: при расши-

Таблица 1. Значения основных параметров первого контура при номинальном режиме

	N=100 %	N=80 %
	3000	2400
	320	314
	289,7	286,5
	408,33	361,10
	2,33	2,33
	408,33	361,10
	6,27	6,27
	278,5	274,5

рении пара вода в компенсаторе давления (КД) испаряется, способствуя поддержанию давления, а при сжатии паровой фазы происходит конденсация на поверхности воды, что ограничивает рост давления.

При большом росте давления через сопла, расположенные в верхней части КД, по линии впрыска подается теплоноситель из холодной нитки циркуляционного контура для конденсации пара в паровой подушке. Подача «холодного» теплоносителя замедляет или совсем прекращает рост давления в первом контуре. При понижении давления включаются трубчатые электронагреватели, размещенные под уровнем воды в нижней части КД [4].

При выводе уравнений, описывающих процессы, происходящие в первом контуре, принимались следующие допущения:

1) математическая модель представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (модель с сосредоточенным параметром) и соответствующих уравнений состояния;

2) тепловые потери в окружающую среду пренебрежимо малы (отсутствуют);

3) при изменении температуры теплоносителя запаздывание теплового потока учитывается приближенно;

4) полагается, что изменение давления пара перед турбиной и в парогенераторе одинаково;

5) давление во всех точках КД одинаково и равно сумме давлений пара и азота, при этом сжатие пара в КД происходит по линии насыщения;

6) конденсация пара, нагрев впрыскиваемой воды и ее испарение происходят мгновенно.

Имитационная модель

На основе разработанной математической модели была реализована имитационная модель. При этом в качестве исходных данных использованы конструктивные и режимные параметры реального оборудования. Разработка имитационной модели производилась в универсальной среде моделирования Simulink [9].

Для решения систем дифференциальных уравнений выбран многошаговый метод переменного порядка (ode15s), использующий формулы численного дифференцирования. Выбранный метод решения является адаптивным.

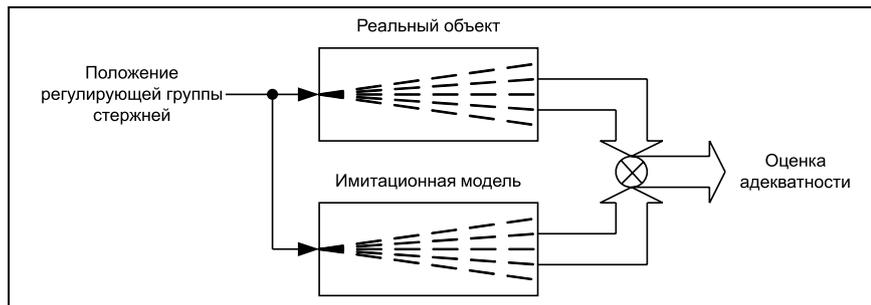


Рис. 1. К методике оценки меры адекватности математической модели

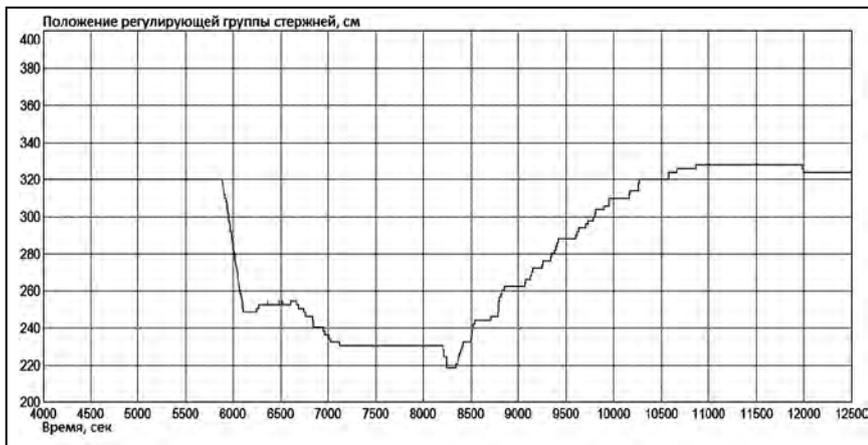


Рис. 2. Положение регулирующей группы стержней (тренд)

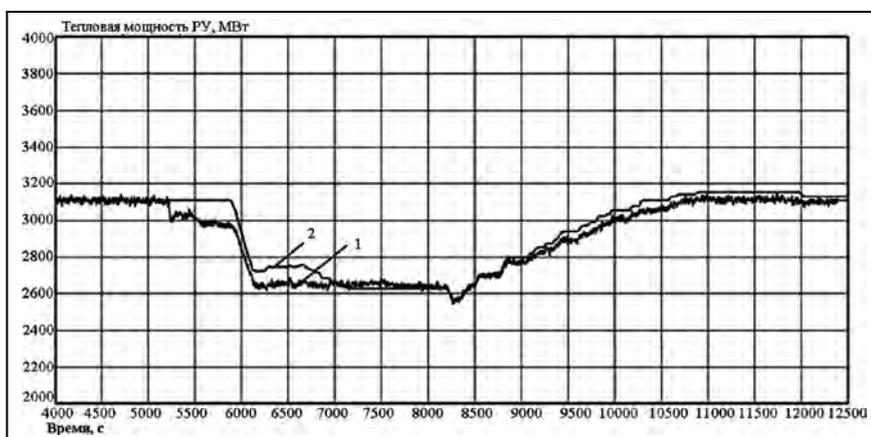


Рис. 3. Тепловая мощность реакторной установки (1 - тренд, 2 - модель)

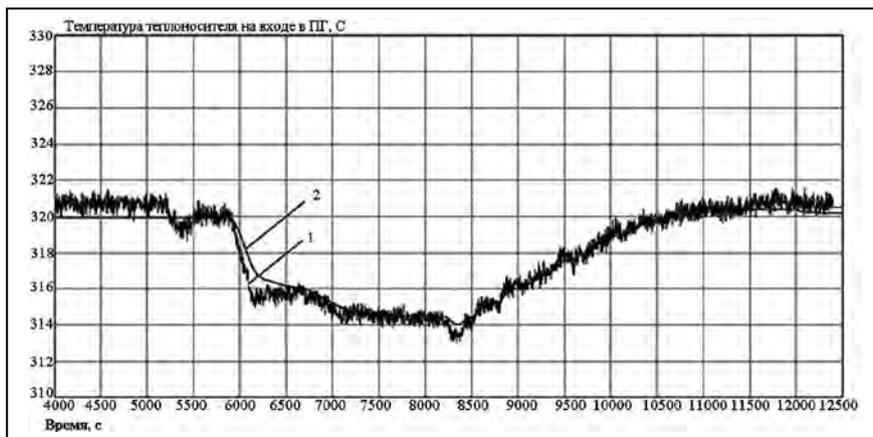


Рис. 4. Температура теплоносителя на входе в ПГ (1 - тренд, 2 - модель)

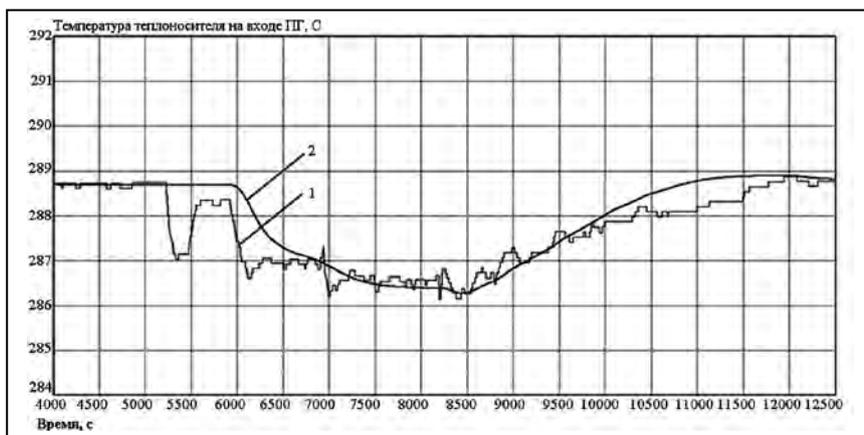


Рис. 5. Температура теплоносителя на выходе из ПГ (1 - тренд, 2 - модель)

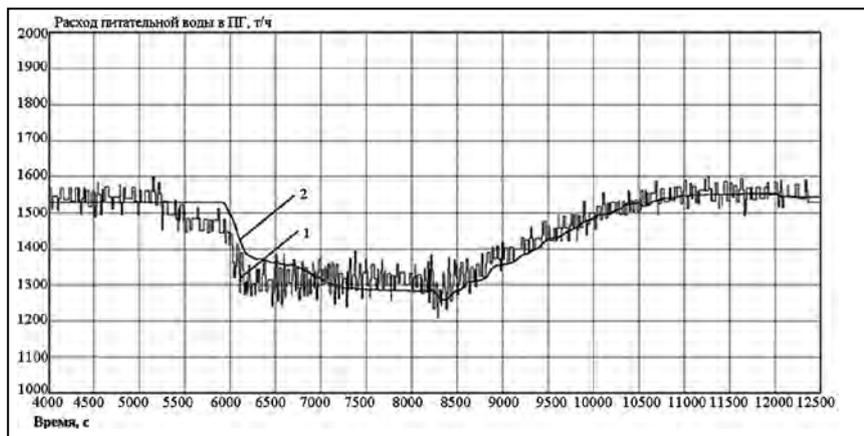


Рис. 6. Расход питательной воды в ПГ (1 - тренд, 2 - модель)

Шаг интегрирования определяется автоматически и меняется в процессе расчета. При этом настройками определено: начальное значение шага, его минимальное и максимальное значение в процессе расчета определяются автоматически. По результатам оценки функционирования модели получены следующие замечания: минимальное значение шага зафиксировано в момент пуска модели (10–7 с), так как в этот момент происходят большие скачки значений параметров; в течение нескольких секунд после запуска модели значение шага увеличивается; максимальные значения шага наблюдаются в устано-

вившихся режимах работы модели. При этом имеется возможность моделирования в ускоренном масштабе времени.

Опробованы также методы решения ode23, ode23s, ode23tb, которые могут обеспечить более высокую скорость вычислений, но при этом точность результатов будет снижена. Одношаговые явные методы Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка (ode45) не обеспечивают решения системы дифференциальных уравнений построенного полимодельного комплекса.

Оценка адекватности математической и имитационной моделей

Методика оценки адекватности математической и имитационной моделей включает два этапа [3, 8, 10].

На первом этапе производилось сравнение проектных (реальных эксплуатационных) значений параметров на заданном режиме и значений тех же параметров, полученных с помощью имитационной модели. Здесь рассмотрен номинальный режим, для которого все параметры имитационной модели соответствуют проектным значениям (табл. 1). Отклонение значений параметров, полученных с помощью имитационной модели от значений, приведенных в табл. 1, $\leq 1\%$.

На втором этапе оценки адекватности модели был произведен сравнительный анализ графиков процессов, полученных с помощью имитационной модели, и реальных трендов, снятых с архива действующего энергоблока АЭС при одном и том же возмущающем воздействии (рис. 1).

В рассмотренном примере в качестве реального объекта выбран энергоблок № 3 Калининской АЭС. Для проведения анализа выбран процесс снижения тепловой мощности реакторной установки, а затем ее подъем до номинального значения.

Критерием адекватности модели служит мера оценки значений СКО модельных переходных процессов и реальных трендов, а также общий характер их изменения.

Возмущающим воздействием является тренд изменения положения регулирующей группы стержней (рис. 2). На рис. 3–7 представлены результаты сопоставления по основным параметрам.

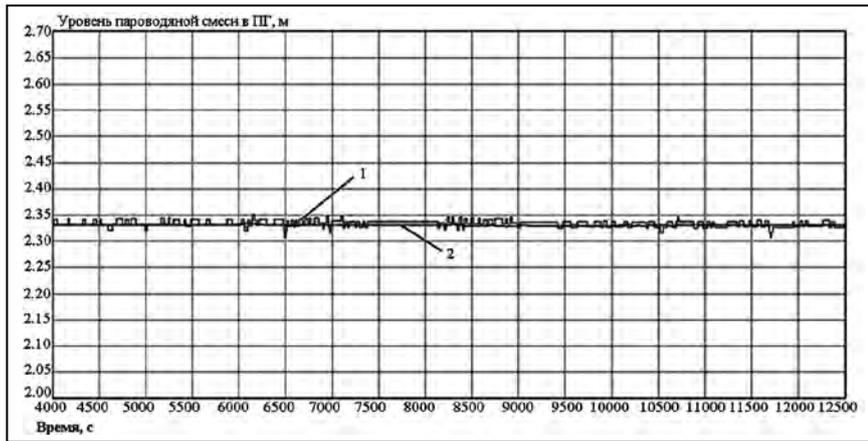


Рис. 7. Уровень пароводяной смеси в ПГ (1 - тренд, 2 - модель)

Таблица 2. СКО для основных параметров

	, %
	6,38
	0,76
	0,32
	6,59
	0,21

Анализируя полученный результат сопоставления нетрудно заметить, что в промежуток времени 5000...7000 с некоторые параметры имеют значительное отклонение. Это связано с тем, что в модели не учтена первопричина возникновения переходного процесса — несанкционированное падение регулирующего стержня в активную зону реактора. Возмущающим воздействием для модели является изменение положения только регулирующей группы стержней.

Оценка меры адекватности разработанной математической и имитационной моделей определена по среднему квадратичному отклонению (СКО) параметров, полученных посредством имитационной модели, от реальных параметров, полученных из архива АСУТП реального объекта.

Значения СКО (в процентах от номинального значения) для основных параметров представлены в табл. 2. В результате определено, что СКО по основным параметрам модели, выраженное в процентах от номинального значения, $\leq 7\%$. Это говорит о достаточно высокой точности работы разработанной имитационной модели первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000.

Выводы

1. Разработана многопараметрическая математическая модель первого контура энергоблока АЭС в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния и технология ее реализации в виде открытого полимодельного комплекса.

Тверской Юрий Семенович — д-р техн наук, проф., **Лаврентичев Дмитрий Владимирович** — аспирант кафедры систем управления ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».

Контактный телефон (4932) 26-97-58.

E-mail: kafsu@su.ispu.ru

2. Разработана методика и определена оценка меры адекватности модели. Показано, что СКО по основным параметрам математической модели, реализованной в универсальной системе имитационного моделирования, в динамическом режиме работы оборудования лежит в пределах 1% (тепловая мощность реакторной установки в пределах 7%).

3. Результаты разработки математической и имитационной модели первого контура энергоблока АЭС могут быть использованы для создания полной математической модели энергоблока АЭС и решения задач функционального проектирования АСУТП, в том числе синтеза новых структур локальных систем автоматического управления.

Список литературы

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Иллюстрация основных положений. М.: ФГУП «ЦНИИатоминформ», 2001. 64 с.
2. *Баклушин Р. П.* Эксплуатационные режимы АЭС. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 532 с.
3. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн./ Под общей ред. Ю.С. Тверского; Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. Кн. 3. Моделирование// ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2013. Кн. 1. 260 с. Кн. 2. 436 с. Кн. 3. 176 с.
4. *Демченко В.А.* Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса «Астропринт», 2001 г. 308 с.
5. *Тверской Ю.С., Голубев А.В., Никоноров А.Н.* Полигон АСУТП электростанций — эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления // Теплоэнергетика. 2011. №10. С.70-75.
6. *Жукавин А.П., Лебедев А.О.* Использование математических моделей энергоблока для тестирования алгоритмов систем управления АЭС «Куданкулам» // Теплоэнергетика. 2011. №5. С. 37-40.
7. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В.* Теория моделей в процессах управления. Информационный и термодинамический аспекты М.: Наука. 1978. 223 с.
8. *Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Концептуальные и методические основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Труды СПИИРАН. Вып. 2, т. 1.СПб.: СПИИРАН, 2004. С.10-35.
9. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.
10. *Тверской Ю.С.* Локальные системы управления. ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново. 2011. 128 с.