

УДК 001.891.572

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В СРЕДЕ MATHCAD КАК УЧЕБНАЯ ЗАДАЧА

Н.Н. КУДРЯКОВ

*Институт ядерной энергетики
Солнечная, 41, Сосновый Бор, 188544, Россия*

Поступила в редакцию 6 февраля 2015

Математическое моделирование процессов и объектов является одной из профессиональных задач, которые должны решать специалисты в целом ряде технических областей. Это относится и к ядерным энергетическим технологиям. Обучение построению и исследованию математических моделей рассматривается как одна из задач высшей школы [1,2]. Закономерен вопрос о методах подготовки; т.е. об учебных задачах, в ходе которых происходит приобретение умений, носящих предварительный характер. Такой учебной задачей можно считать построение динамических моделей систем управления в среде Mathcad.

Недостатки Mathcad очевидны: это невозможность построения программ, работающих в «бесконечном», в т.ч. в реальном, времени, т.е. невозможность построения программных изделий, функционально аналогичных моделирующим и тренажерным комплексам. Ограничены возможности Mathcad в оформлении типовых вычислительных процедур.

Вместе с тем Mathcad можно считать почти идеальным средством по формированию первоначальных навыков в построении математических моделей и общей культуры математического моделирования. Обучение построению математических моделей следует считать самостоятельной педагогической задачей. Построение математической модели должно рассматриваться как познавательная и творческая деятельность, в ходе которой происходит выделение объекта моделирования и его содержательный анализ, принятие физических допущений, составление расчетной схемы, подготовка данных; запись уравнений сохранения и замыкающих соотношений; преобразование уравнений в численную схему, программная реализация вычислительной процедуры, оформление результатов.

Умение оформлять модель в виде изделия и документа, которым могут пользоваться другие, должно рассматриваться как профессионально значимое. Умение составлять руководство пользователя, руководство программиста и т.п., следует формировать осознанно; объектом, разработка которого требует создания документации, может стать оформленная в виде программного изделия расчетная модель. Все элементы и этапы разработки математической модели могут быть реализованы и отработаны в учебном процессе с использованием Mathcad.

В Mathcad можно построить модель системы управления, реализующую задачу Коши и воспроизводящую переходный процесс в течение конечного промежутка времени. В этом отношении Mathcad предоставляет те же возможности, что и язык высокого уровня, если он используется для отладки и эксплуатации программ в т.н. пакетном режиме. С точки зрения формирования общей культуры математического моделирования и с точки зрения методики Mathcad даже предпочтительнее, чем классические языки высокого уровня. В ряде российских вузов и НИИ ведется разработка учебных задач и методического обеспечения по моделированию кинетики и динамики ядерного реактора (ЯР) в Mathcad различных версий [3]. В Институте ядерной энергетики – филиале Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в г. Сосновый Бор с участием автора в Mathcad-15 построена в учебном процессе подборка математических моделей динамики ядерной паропроизводящей установки типа ВВЭР. Имеется подборка файлов и заданий к их построению, воспроизводящих

в виде задач отдельные физические эффекты и направленные на первоначальное ознакомление с Mathcad. К таким задачам относятся:

- построение точечных моделей нейтронной кинетики с одной и с шестью группами запаздывающих нейтронов и их сравнение; исследование зависимости периода реактора от реактивности, сравнение динамики при вводе положительной и отрицательной реактивности;
- принцип управления элементарным реактором;
- общий подход к описанию реактивности в задачах динамики и управления;
- действие органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ);
- описание динамики концентрации борной кислоты и ее воздействия на реактивность;
- кинетика реактора в подкритическом состоянии с внешним источником нейтронов;
- описание температурного режима ядерного топлива;
- описание температурного режима теплоносителя в обогреваемых и необогреваемых объемах;
- кинетика и динамика реактора с учетом обратных связей по температуре топлива и теплоносителя, управление реактором с действующими обратными связями;
- динамика ксенонового и самариевого процессов, получение стационарного отравления, эффект нестационарного отравления как положительной обратной связи, управление реактором в условиях нестационарного отравления.

На рис. 1 приведен результат учебной задачи, отображающей изменение долей источников запаздывающих нейтронов при переходном процессе, вызванном внесением положительной реактивности (+0.003). Доли групп с большими временами (1-я и 2-я) уменьшились, а доли групп с малыми временами жизни (особенно 3-я и 4-я) увеличились. Новый спектр источников запаздывающих нейтронов сформировался примерно через 30 с после начала процесса. Увеличение доли короткоживущих источников объясняет, почему переходные процессы в реальности происходят быстрее, чем это может показать одногрупповая модель.

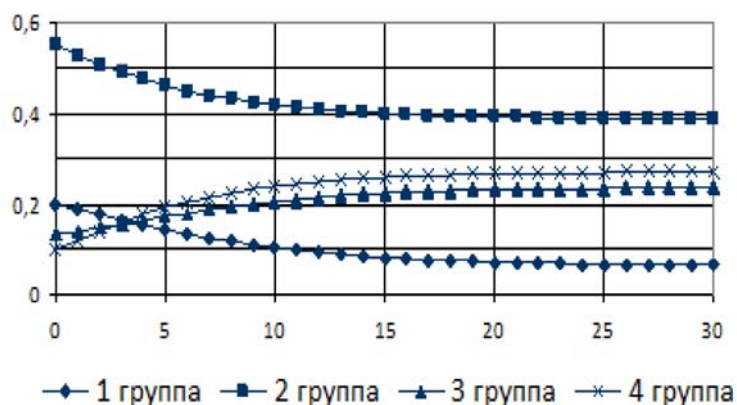


Рис. 1. Изменение спектра источников запаздывающих нейтронов в процессе с положительной реактивностью

На основании вычислительных процедур и данных, реализующих перечисленные выше задачи, формируется комплексная модель динамики реактора. На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования регулирования мощности ВВЭР в полупиковом режиме в диапазонах $0,05 \div 0,95$ и $0,7 \div 0,95$ высоты активной зоны.

В момент $\tau = 0$ начинается уменьшение заданного значения мощности по линейному закону с тем, чтобы достичь значения 50 % в течение 2 ч. Принято, что регулирующая группа ОР СУЗ работает в диапазоне $0,05 \div 0,95$ высоты активной зоны. По достижении верхнего предела подается чистая вода, нижнего – борный раствор. Начальное положение ОР СУЗ – 0,9 высоты активной зоны.

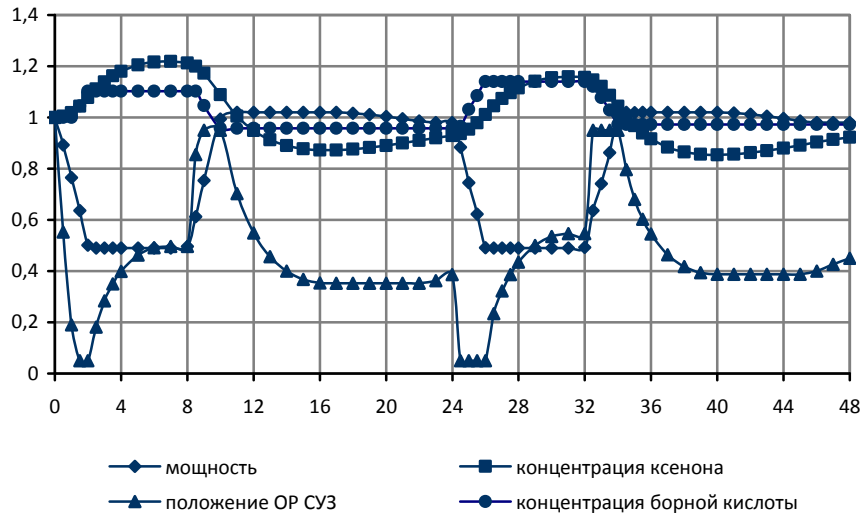


Рис. 2. Динамика параметров реактора в полупиковом режиме регулирования мощности при ходе ОР СУЗ в диапазоне 0,05÷0,95 высоты активной зоны

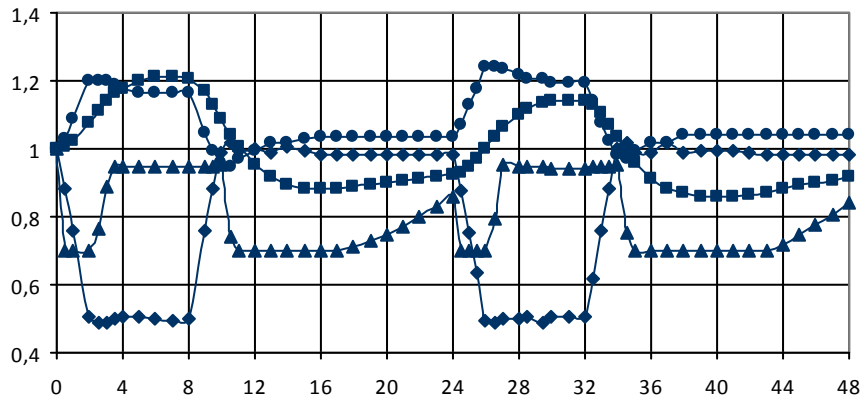


Рис. 3. Динамика параметров реактора в полупиковом режиме регулирования мощности при ходе ОР СУЗ в диапазоне 0,7÷0,95 высоты активной зоны

С началом снижения мощности начинается рост концентрации ксенона. В течение примерно получаса регулирующая группа достигает нижнего предела, начинается подача бора. В момент $\tau = 2$ ч. мощность достигает значения 50 %. Удержание мощности происходит за счет извлечения группы и преодоления тем самым нестационарного отравления. Что извлечение ОР СУЗ обусловлено именно необходимостью удержания мощности с компенсацией потери реактивности, говорит вид кривой извлечения ОР СУЗ: она подобна кривой накопления ксенона. В момент достижения максимума нестационарного отравления (между 6 и 8 ч) движение ОР СУЗ прекращается. В момент времени $\tau = 8$ формируется команда на увеличение заданного значения мощности, ОР СУЗ извлекается. По достижении группой ОР СУЗ своей верхней границы начинается вывод бора, группа останавливается.

Началу набора мощности соответствует изменение характера кривой ксенона: меняет знак не только первая, но и вторая производная – на распад накладывается усиление выгорания. Начинается разотравление, высвобождается реактивность, мощность удерживается на верхней границе зоны нечувствительности автоматического регулятора мощности (АРМ) работой ОР СУЗ вниз, причем кривая ОР СУЗ подобна кривой убывания ксенона. При достижении ксеноном минимума ход ОР СУЗ прекращается ($\tau \approx 16$). Начинается накопление ксенона, и в момент $\tau \approx 17$ начинается падение мощности. Мощность падает с верхней границы зоны нечувствительности АРМ и до нижней, и пока она остается в пределах этой зоны, управляющие команды не формируются. Вскоре после $\tau = 22$ значение мощности становится меньше нижней

границы зоны нечувствительности, формируется команда на отработку ОР СУЗ вверх, и падение мощности прекращается. Однако в момент $\tau = 24$ формируется команда на новый цикл суточного регулирования мощности. Движение ОР СУЗ вверх прекращается и начинается отработка вниз.

Далее повторяются логика и динамика, имевшие место в начале цикла. Некоторая разница обусловлена тем, что в момент $\tau = 0$ концентрация ксенона была равновесной, а в момент $\tau = 24$ происходит незавершившийся ксеноновый процесс. Также и ОР СУЗ начинает движение из другого положения. Однако качественно наблюдается повторение цикла.

На рис. 3 отображается тот же режим, но нижняя граница диапазона хода ОР СУЗ составляет 70 % высоты активной зоны. Видно, что качество регулирования мощности ухудшается – имеют место колебания мощности как на нижнем, так и на верхнем плато, а диапазон изменения концентрации борной кислоты существенно увеличивается [4, 5].

На рассмотренном примере видно, что средствами Mathcad возможно получить численную модель ЯР, позволяющую воспроизводить принципиально значимые эффекты управления и применимую в качестве учебного средства в целом ряде специальных учебных дисциплин. Умение построить такую модель следует считать безусловным достоинством студента или аспиранта, своего рода компетенцией. Построение и анализ подобных моделей может стать предметом или элементом курсового и дипломного проектирования.

Динамическая модель парогенератора насыщенного пара барабанного типа построена на основе уравнений нестационарного теплового и материального баланса и уравнения постоянства геометрического объема, а также замыкающих соотношений, описывающих свойства воды и водяного пара (плотностей, энтальпий) и их производные в виде полиномов Лагранжа. Входными параметрами модели парогенератора (ПГ) являются величины расходов пара и питательной воды; мощности, передаваемой через теплообменную поверхность, энтальпии питательной воды. Функциональная связь между реактором и парогенератором описывается через величину температуры на выходе из реактора – она же температура на входе в ПГ и через уравнение теплового баланса теплообменной трубки, решаемое относительно температуры на выходе из ПГ – она же температура на входе в реактор.

С использованием модели ПГ может быть решен ряд учебных задач из круга классической теории автоматического регулирования, в частности, воспроизведение динамики стопорно-регулирующего клапана турбины и регулятора питательной воды, влияние на вид переходного процесса структуры и параметров настройки регуляторов; приведение модели ПГ к линеаризованному виду и сравнение исходной – нелинейной – и линеаризованной моделей.

Описание в одном файле моделей ЯР и ПГ дает модель ядерной установки, воспроизводящей ряд динамических режимов и эффектов управления, и могущей служить средством выполнения вычислительного эксперимента по анализу и синтезу алгоритмов и структур управления, то есть – средством подготовки специалиста в области управления технологическими процессами по построению и использованию математических моделей.

Как показывает собственный педагогический опыт автора, работа над такими моделями стимулирует студентов к разработке более сложных программных изделий на языках высокого уровня, в т.ч. интерактивных систем реального времени.

Выводы

Полноценное включение в учебный процесс задач моделирования ядерных реакторов в среде Mathcad – как в виде специальной дисциплины, так и в качестве элемента дисциплин существующих (АСУ ТП АЭС и т.п.) требует решений в организации и методике учебного процесса. Наряду с разработкой учебно-методического обеспечения необходимо обратить внимание на объемы, содержание и методику преподавания общих курсов информатики и вычислительной математики и их обновление в ряде вузов.

Список литературы

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки (специальности) 141401 «Ядерные реакторы и материалы». Приложение к Приказу Министерства образования и науки РФ № 2051 от 24.12.2010.
2. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки (специальности) 141403 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация, инжиниринг». Приложение к Приказу Министерства образования и науки РФ № 2053 от 24.12.2010.
3. *Кряквин Л.В.* Сборник программ для расчета кинетики и динамики ядерного реактора. ВНИИАЭС . <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/kryakvin/index.asp>
4. *Кудряков Н.Н.* // Экология и атомная энергетика. Научно-технический сборник. 2006. №1. С.65–67.
5. *Кудряков Н.Н.* // Сб. науч. трудов 12-й Междунар. науч.-практ. конф. «Формирование профессиональной культуры специалистов XXI века в техническом университете». СПб, 2012. С. 81–89.