

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА РБМК-1000

А.Л. Ляшенко (Санкт-Петербург)

В настоящее время на российском рынке программного обеспечения (ПО) имеется некоторое количество программных пакетов, предназначенных для моделирования объектов и систем с распределенными параметрами, которые описываются дифференциальными уравнениями с частными производными. Например, динамическая лаборатория моделирования (Dynamic Modeling Laboratory) – сокращенно – Dymola, FEMLAB, ANSYS, FreeFem++, GetFem++ и другие. Подобные пакеты могут служить важной инструментальной базой при автоматизации промышленного производства, поскольку большинство промышленных объектов являются объектами с распределенными параметрами.

Предлагаемые пакеты можно разделить на пакеты коммерческие и некоммерческие, универсальные и специализированные.

Известно значительное число универсальных программных пакетов для моделирования объектов и систем с распределенными параметрами, описываемых уравнениями с частными производными. Большинство из них являются коммерческими пакетами, но есть пакеты, предоставляемые бесплатно, то есть некоммерческие.

Одна из серьезных трудностей, с которой сталкивается пользователь подобных пакетов, состоит в том, что эти инструменты очень сложно использовать в составе систем, разрабатываемых самим пользователем. Можно построить модель исследуемого объекта, исследовать ее с помощью того или иного инструмента, но затем, если понадобится вставить эту модель в свою конкретную систему, например в систему управления, активно использующую модель объекта управления, начинают возникать сложности. Это и лицензионные сложности, связанные с возможностью вставлять вместе с моделью в свою систему и инструментальный пакет, а также и технические сложности, так как коммерческие пакеты обычно являются закрытыми структурами с закрытыми текстами программ и не приспособлены к работе внутри другой системы.

Рассмотрим процесс разработки собственного ПО для моделирования систем с распределенными параметрами. В качестве объекта был выбран реактор АЭС РБМК-1000. Была разработана математическая модель тепловых полей активной зоны реактора, для расчета которых необходимо применение вычислительной техники и ПО. Решить поставленную задачу с помощью предлагаемого на рынке ПО не удалось. В связи с этим возникла необходимость разработки собственного программного продукта, которому предъявляются следующие требования:

- иметь понятный и доступный интерфейс;
- быть достаточно простым в использовании, не требовать специальных аппаратных средств (может использоваться на обычном ПК);
- быть открытым для пользователя (свободно распространяться и модифицироваться);
- иметь готовые библиотеки и шаблоны;
- иметь возможность подключать и обрабатывать новые структурные блоки;
- иметь возможность интеграции с системами САПР;
- взаимодействовать с другими универсальными программами.

Рассматриваемый реактор представляет собой цилиндрическую кладку, состоящую из вертикальных графитовых колонн, в отверстиях которых расположены технологические и специальные каналы.

Активная зона РБМК представляет собой графитовую кладку цилиндрической формы, набранную из вертикальных графитовых колонн. Внутри графитовых колонн

имеются отверстия, через которые проходят технологические каналы. В технологические каналы устанавливаются тепловыделяющие сборки (ТВС), состоящие из двух пучков твэлов. Графитовая кладка вместе с топливными каналами образует активную зону (рис.1).

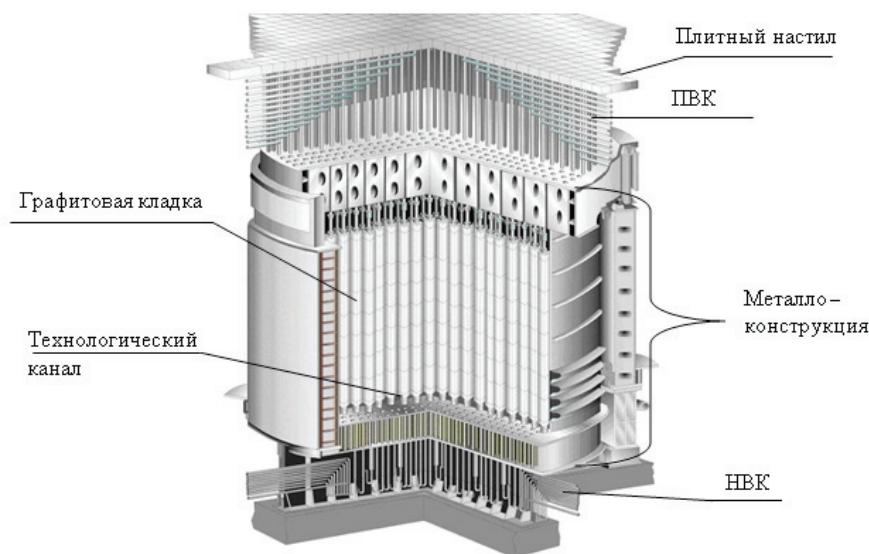


Рис. 1. Активная зона реактора

Математическая модель тепловых процессов была составлена с помощью дифференциальных уравнений теплопроводности. Условия баланса массы, энергии и количества движения для однофазного течения в трубках технологического канала можно записать в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Данная математическая модель получилась достаточно сложной и включает 385 дифференциальных уравнений с частными производными [1].

Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. Для компьютерного моделирования было специально разработано программное обеспечение.

Программа имеет поле ввода исходных значений (рис. 2). При вводе значений программа проверяет их достоверность. В случае некорректного ввода значения программа предупреждает пользователя – выводится окно сообщений, где предлагает два варианта действий: ввести другие данные или прекратить работу, так как результаты моделирования будут заведомо ложными. Задав необходимые исходные значения, пользователь в качестве результата получает графическое изображение искомой температуры в контрольной точке. В программе предусмотрены дополнительные возможности:

- контроль даты и текущего времени;
- сохранение истории работы с программой;
- просмотр информации о работе с программой;
- печать полученных результатов.

Возможно ввести мощности рассматриваемых технологических каналов, задать положение ЗРК, выбрать датчик, с которого будут сниматься показания температуры и задать время процесса. При запуске расчета на форме выводится информация о начальных параметрах в выбранном технологическом канале, а именно, температура теплоносителя на входе в канал и расход теплоносителя в канале.

Моделирование тепловых полей в активной зоне реактора
09.09.2017 10:51:34

Мощности в ТК зоне расчета

1935050	1895520	1941860	1937740	1912860	1876850	1893380	1921860	1861720	1876500	1915270	1862280	1912400
1942150	1911950	1835200	1939890	1918750	1892240	1911760	1867450	1895220	1912200	1844930	1805000	1900200
1918660	1832500	1942720	1825500	1933720	1876850	1848700	1915410	1942240	1922440	1863200	1889250	1807050
1892350	1893820	1853860	1918690	1822640	1917520	1920050	1921000	1805960	1900850	1897500	1921150	1874180

Начальные условия

Количество ТК, шт: 39
 Номер датчика: 6
 Положение ЗРК, м: 0,004
 Номер ТК: 20
 Время процесса, сек: 2

Q тепл, мЗ/ч: 34
 T тепл, С: 273
 G вод, мЗ/ч: 36
 U вод, м/с: 5
 T твс, С: 850

Распределение температуры теплоносителя по высоте

0	273
1	273.239257812
2	273.477874755
3	273.715820312
4	273.953125
5	274.189759300
6	274.425750732
7	274.661102294
8	274.895812988
9	275.129882812
10	275.363311767
11	275.596130371
12	275.828308105
13	276.059875488
14	276.290893554

Кнопки: Расчет, Температура в датчике, Графики переходных процессов, Анализ объекта управления, Расчет параметров регулятора по желаемой передаточной функции, Расчет параметров регулятора по степени колебательности, Моделирование замкнутой системы управления

Рис. 2. Форма ввода исходных данных

В разработанном ПО предусмотрена возможность расчета настроек распределенных регуляторов [2], реализующих различные алгоритмы управления. Процедура вывода передаточной функции распределенного регулятора по желаемой передаточной функции объекта управления и методика расчета его настроек представлены в [3]. На рис. 3 показана форма, позволяющая ввести необходимые данные для расчета настроек регулятора.

Расчет регулятора
09.09.2017 14:33:51

Окно ввода данных

Параметры заданного ОРП

Номер ПВМ: 1, L_x : 1,75, L_z : 0,75

K : 1,0257, T : 0,7125, τ : 0,1002

E_o : 0,7594, T_o : 0,5227, τ_o : 0,1002, n_o : 56,3897, G_o : 5,9840

Параметры желаемого ОРП

$E_{жс}$: 0,7407, $T_{жс}$: 0,3711, $\tau_{жс}$: 0,1, $n_{жс}$: 56,3897, $G_{жс}$: 5,9840

Значения параметров регулятора

K_p : 1,36596, T_I : 0,5689, T_D : 0,00992, n : 56,3897, G : 5,9840

Кнопки: Расчет ОПК, Расчет параметров объекта, Расчет параметров регулятора, Частотные характеристики регулятора, Новый расчет

Рис. 3. Расчет параметров регулятора

Полученные в процессе моделирования результаты могут быть отображены графическими средствами ПО (рис.4) или сохранены в файлах.

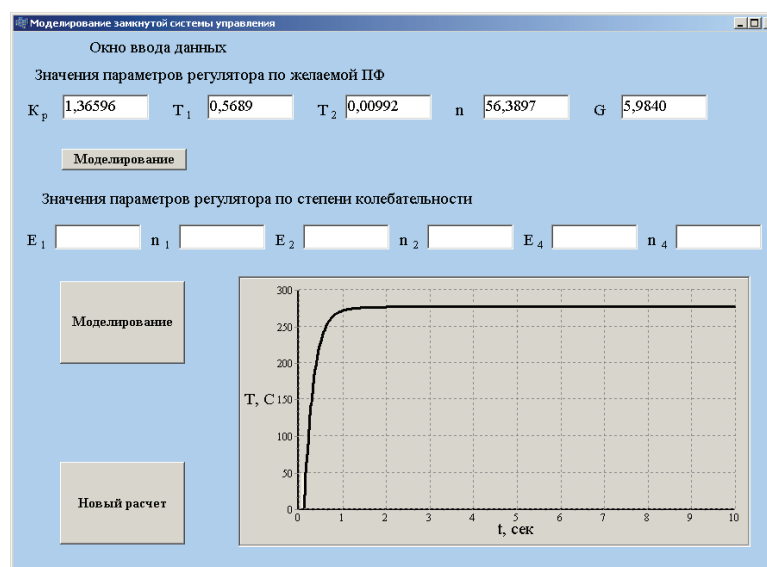


Рис. 4. Результаты моделирования при регуляторе, синтезированном по желаемой передаточной функции объекта

Результаты моделирования были проверены с помощью информационно-вычислительной системы «СКАЛА», обеспечивающей контроль работы реактора. Значения, полученные путем моделирования, совпали с показаниями датчиков, которые установлены в графитовой кладке на реакторе. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели.

Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод, что предложенное ПО достаточно точно моделирует тепловые процессы, протекающие в выделенном участке реактора, и оно может быть расширено с целью моделирования и мониторинга тепловых процессов в реакторе.

Разработанная методика моделирования позволит диагностировать физическое состояние энергоблока, выявить возможные нарушения в его функционировании и прогнозировать возможные варианты работы при различных, в том числе и нештатных, ситуациях.

Литературы

1. **Ляшенко А.Л., Морева С.Л.** Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора // «Научное обозрение». 2012, № 2. С. 182–189.
2. **Першин И.М.** Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск, 2002. 212 с.
3. **Ляшенко А.Л., Грудяева Е.К.** Синтез распределенного высокоточного регулятора по показателю колебательности для систем с распределенными параметрами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013, № 1. С. 13–53.