

Д. А. Лукинова, аспирантка,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
В. П. Северин, доктор технических наук, профессор,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Е. Н. Никулина, кандидат технических наук, доцент,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000 ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАНЕВРЕННОСТИ ЭНЕРГБЛОКА

Аннотация. Рассмотрены процессы изменения мощности ядерного реактора при регулировании мощности поглощающими стержнями и вводе борной кислоты в активную зону с использованием моделей нейтронных и тепловых процессов, а также моделей изменения концентрации ксенона и бора в активной зоне реактора.

Ключевые слова: ядерный реактор, регулирование, математические модели, реактивность, мощность реактора, тепловой баланс.

Введение. Большая часть энергоблоков атомных электростанций Украины оснащена реакторами ВВЭР-1000, которые теоретически обладают возможностью маневрирования мощностью энергоблоков в целях решения задачи энергосбережения. Из 13 эксплуатируемых в Украине реакторов ВВЭР-1000 11 реакторов соответствуют серии В-320. Для реакторов этой серии разработаны математические модели, используемые при синтезе оптимальных систем управления энергоблоками [1 – 3].

Анализ данных и постановка задачи. Моделирование динамических процессов в реакторе ВВЭР-1000 производится с использованием систем дифференциальных уравнений нейтронной кинетики с одной или несколькими (2 или 6) группами запаздывающих нейтронов, уравнений тепловых процессов в топливе, теплоносителе и оболочке [1, 2]. При моделировании необходимо учитывать изменение мощности, изменение температуры топлива, эффекты реактивности от перемещения управляющих стержней, а также эффекты от изменения концентрации ксенона.

Целью исследования являлось уточнение математических моделей ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320 с учетом различных эффектов реактивности для обеспечения маневренности энергоблока.

Для достижения намеченной цели необходимо решить задачи: на основе известных моделей нейтронных и тепловых процессов, а также процессов изменений концентраций ксенона и бора в активной зоне реактора, построить математические модели ядерного реактора ВВЭР-1000 в относительных переменных состояния с учетом ввода борной кислоты в активную зону реактора; получить процессы изменения мощности ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320 при вводе борной кислоты в активную зону реактора.

Решение поставленных задач. Реактивность реактора может быть представлена в виде суммы начального значения реактивности, значения изменения реактивности вследствие перемещения регулирующих стержней, значения приращения реактивности вследствие изменения тепловой мощности, значения изменения реактивности вследствие изменения концентрации борной кислоты.

Из уравнений теплового баланса для топлива, оболочки и теплоносителя получены статические зависимости тепловой мощности от значения температур в номинальном режиме. Средняя температура вычисляется по известным значениям температур в номинальном режиме на входе и выходе активной зоны реактора. Также в модели учитывается влияние изменения средних температур топлива и теплоносителя на реактивность реактора.

В исследовании процесса управления ядерным реактором ВВЭР-1000 используются модели в относительных переменных состояния: модель нейтронной кинетики с учетом базовых значений плотности нейтронов, базовых значений концентрации ядер-излучателей запаздывающих нейтронов и базового значения времени, а также модель относительной реактивности и модель тепловыделения [3].

Для реактора ВВЭР-1000 серии В-320 в исследовании процесса управления использована модель определения реактивности с учетом борного регулирования [1]. Изменения реактивности определяются приращениями переменных состояния реактора с учетом коэффициента реактивности борной кислоты.

Проведенные расчеты показали, что при введении борной кислоты в реактор концентрация бора монотонно возрастает от номинального значения, концентрация ксенона – сначала возрастает от номинального значения, а затем убывает до нулевого значения, концентрация йода монотонно убывает от номинального значения до нулевого значения. Переход реактора из номинального режима в режим нулевой мощности иллюстрирует процесс изменения нейтронной мощности реактора. При этом концентрации запаздывающих нейтронов монотонно убывают от номинальных значений до нулевых; переменные постепенного тепловыделения также монотонно убывают от номинальных до нулевых значений; температуры топлива, оболочки и теплоносителя реактора монотонно убывают от значений температур в номинальном режиме до температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора.

С использованием моделей для исследований переходных режимов ядерного реактора возможно оценить изменение его мощности в зависимости от влияния различных эффектов реактивности в нестационарных режимах.

Выводы. Объединение моделей нейтронной кинетики и тепловых процессов позволяет учесть совместное влияние температурных эффектов реактивности и эффекта реактивности от перемещения управляющих стержней. Более точное представление нестационарных процессов в реакторе возможно получить, дополнительно используя модели постепенного теплоотвода и модели, учитывающие изменение концентрации ксенона и бора.

Анализ изменения важнейших переменных состояния активной зоны реактора проводился с использованием моделей, которые описывают переходные процессы при вводе борной кислоты в реактор. Математические модели для реактора ВВЭР-1000 типа В-320 в относительных переменных состояния описывают нейтронную кинетику реактора с шестью группами запаздывающих нейтронов, постепенное тепловыделение, тепловые процессы в топливе, оболочках ТВЭЛов и теплоносителя, а также изменение концентрации ксенона при регулировании мощности поглощающими стержнями и изменением концентрации бора. Имитационное моделирование процессов, протекающих в реакторе ВВЭР-1000 при регулировании мощности реактора поглощающими стержнями и изменением концентрации бора в активной зоне, позволяет анализировать изменения переменных состояния активной зоны реактора в маневренном режиме эксплуатации.

Литература

1. Никулина Е. Н., Северин В. П., Лукинова Д. А. Моделирование переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом борного регулирования. Вісник НТУ «ХП». 2017. № 51 (1272). С. 8–13.
2. Северин В. П., Никулина Е. Н., Лукинова Д. А. Имитационное моделирование процессов в реакторе ВВЭР-1000 при регулировании мощности поглощающими стержнями. Вісник НТУ «ХП». 2017. № 55 (1276). С. 3–7.
3. Никулина Е. Н., Северин В. П., Лукинова Д. А. Математические модели для исследования переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 серии В-320. Ядерна та радіаційна безпека. 2018. Вип. 1 (77). С. 18–23.