

УДК 621.039.56

Е.А. Кокол, аспирант, Одес. нац. политехн. ун-т,
jenia1991@i.ua

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ВВЭР-1000 ЗА СЧЕТ ЦЕЛЕВОГО ВЫБОРА ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

У даній роботі представлена ідея оптимального вибору програми управління ядерним реактором, першим кроком якої є вибір цільової функції, яка об'єднує критерії безпеки ядерного палива.

Ключові слова: програма регулювання; цільова функція; глибина вигорання палива; руйнування паливної оболонки.

В данной работе представлена идея оптимального выбора программы управления ядерным реактором, первым шагом которой является решение целевой функции, ограниченной критериями безопасности ядерного топлива.

Ключевые слова: программа регулирования; целевая функция; глубина выгорания топлива; разрушение топливной оболочки.

This paper presents the idea of the optimal choice of program management of the nuclear reactor, the first step of which is the solution of the objective function that is limited by the safety criteria of nuclear fuel.

Keywords: control program; the objective function; fuel burn-up; the destruction of the fuel cladding.

Исходя из основной задачи регулирования паросиловой установки, которая заключается в поддержании равенства между количеством производимой и потребляемой энергии, вытекает использование различных программ регулирования:

— с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура, которая обеспечивает стабильные температурные условия для его оборудования;

— с постоянным давлением пара во втором контуре, которая также благоприятна для его оборудования;

— компромиссно-комбинированная, предусматривающая эксплуатацию энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 в маневренном режиме [1].

Мера эффективности использования ядерного топлива определяется следующим выражением

$$E_{ff} = f(\omega, B), \quad (1)$$

где ω — параметр поврежденности оболочки топлива;

B — глубина выгорания топлива.

Эффективность использования ядерного топлива на АЭС с реакторами на тепловых нейтронах характеризуется величиной среднегодовой энерговыработки на 1 т (или 1 кг) загруженного и отработавшего в реакторе топлива — средней глубиной его выгорания, которая зависит от фактической средней энергонапряженности топлива, при которой работает реактор, календарного времени и среднего коэффициента нагрузки. Также значение глубины выгорания зависит от типа реактора, начального обогащения, истории облучения.

Из-за неравномерности нейтронного потока и несовершенства регулирования в активных зонах ядерных реакторов имеет место значительная неравномерность энерговыделения по высоте и диаметру активной зоны, по отдельным ТВС и ТВЭЛам, поэтому локальные значения глубины выгорания топлива отличаются между собой, а максимальные — определяются учетом неравномерности энерговыделения по активной зоне в целом [2].

$$B = \int_0^t Q \cdot d\tau, \quad (2)$$

где Q — энерговыделение в твэле.

В публикации [3] приведена модель энергетического варианта ползучести топлива (ЭВПТ) изменения свойств твэла. Если не анализировать аварийные режимы, приводящие к пластической деформации оболочки за счет снижения предела текучести при аварийном повышении температуры, для оценки времени целостности оболочки при многократных циклических изменениях мощности РУ с $\nu \ll 1$ Гц достаточно вычислить работу (удельную энергию рассеяния A), накопленную в процессе ползучести к моменту разрушения оболочки и затраченную на разрушение.

ЭВПТ-критерий разгерметизации оболочки записан в виде:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; \quad A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau, \quad (3)$$

где $\omega(\tau)$ — поврежденность оболочки;

$A(\tau), A_0$ — удельная энергия рассеяния в момент времени τ и при разрушении оболочки (Дж/м), соответственно;

$\sigma_e(\tau), \dot{p}_e(\tau)$ — эквивалентное напряжение (Па) и скорость эквивалентной деформации ползучести (c^{-1}), соответственно.

Также причинами разгерметизации топлива являются фреттинг-износ, мусор в теплоносителе, незначительное влияние оказывают механическое взаимодействие между топливом и оболочкой, коррозионное растрескивание под напряжением на ранних стадиях облучения топлива, коррозия при больших глубинах выгорания.

Примем, что оптимальность управления будет оцениваться следующими критериями: глубиной выгорания B , степенью разрушения оболочки топлива A и глубиной манёвра мощности N . Данная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации. Для синтеза целевой функции оптимизации предлагается использовать метод целевого программирования.

В этом случае целевая функция запишется как:

$$J = \sqrt{\kappa_1 \bar{B}^2 + \kappa_2 \bar{A}^2 + \kappa_3 \bar{N}^2}, \quad (4)$$

где B, A, N — критерии оптимальности;

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ — весовые коэффициенты, $\sum \kappa_i = 1$.

Моделируя работу реактора по различным программам регулирования и на различных уровнях мощности, можно будет оценить эффективность работающих реакторов с точки зрения выбранной целевой функции, учитывающей такие критерии, как глубина выгорания топлива и разрушение оболочки, и на основе анализа создать рекомендации по улучшению работы реактора. Также можно будет узнать, какое влияние определенная программа регулирования оказывает на граничные условия целевой функции, а именно вышеперечисленные критерии. Таким образом, сформируется массив данных – факторов, влияющих на целевую функцию, рассмотрим и изучив которые, будет составлен алгоритм оптимального выбора программы управления ядерным реактором.

Литература

1. Цисельская Т.А. Анализ устойчивости активной зоны ВВЭР-1000 при различных программах регулирования энергоблока / Т.А. Цисельская, С.Н. Пельх, А.А. Назаренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. — 2011. — Вып. 2 (36). — С. 109 — 114.
2. Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review / Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development. — 2012. — Second Edition. — ISBN 978-92-64-99178-1.
3. Управление ресурсом оболочек твэлов в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 / С.Н. Пельх, М.В. Максимов, Р.Л. Гонтарь, Т.А. Цисельская // Щорічна наук. конф. ІЯД, 25-28 січня 2011 р. — С. 54 — 55.