УДК 621.039.516.2

О минимизации потери энерговыработки системы реакторов, работающих в переменном графике нагрузки

НАУМОВ В. И., ЗАГРЕБАЕВ А. М.

Необходимость работы АЭС в суточном переменном графике нагрузки [1] требует резервирования запаса реактивности для компенсации нестационарного отравления ксеноном. Величина этого запаса зависит от требуемой длительности работы реактора на пониженной мощности W, от степени снижения мощности реактора $\varepsilon = W/W_{н}$ (где $W_{н}$ — номинальная мощность реактора) и других характеристик. В точечной модели реактора запас реактивности, обеспечивающий работу установки на пониженной мощности $\varepsilon W_{н}$ в течение произвольного времени равен $\Delta\rho = x_{макс} - x_{р}$, где $x_{р}$ и $x_{макс}$ — равновесная и максимальная (после снижения мощности) концентрации ксенона, нормированные на $\nu_f\Sigma_f/\sigma_x$ (σ_x — сечение поглощения ксенона; Σ_f — макроскопическое сечение деления активной зоны; ν_f — среднее число вторичных нейтронов на акт деления).

Резервирование запаса реактивности на нестационарное отравление ксеноном приводит к потере энерговыработки реактора $\Delta Q = Q_{макс} - Q$, где $Q_{макс}$ и Q — энерговыработка реактора при работе в базисном и переменном суточном графике нагрузки соответственно. Потерю энерговыработки можно связать с резервируемым запасом реактивности линейным соотношением [2] $\Delta Q = \Delta\rho/a$, где a — темп выгорания в конце кампании*.

В состав АЭС могут входить несколько реакторов с различными характеристиками (номинальной электрической мощностью, темпом выгорания и т. п.). При ограниченном запасе реактивности, например, для реакторов с непрерывной перегрузкой или для реакторов с дискретной перегрузкой в конце кампании возникает задача оптимизации распределения запасов реактивности в системе реакторов АЭС в целях минимизации потери энерговыработки при выполнении заданного графика суточного снижения мощности станции **.

Задача формулируется следующим образом: найти распределение оперативных запасов реактивности, минимизирующее линейную форму

$$\sum_{i=1}^{N} \Delta Q_i = \sum_{i=1}^{N} \Delta\rho_i/a_i = S \qquad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{N} \delta_i\varepsilon_i(\Delta\rho_i) = \alpha;$$
$$0 \leqslant \Delta\rho_i \leqslant \Delta\rho_{i\,макс}, \qquad (2)$$

где N — число реакторов на АЭС; δ_i — доля электрической мощности i-го реактора; $\delta_i = W_{iн}/\sum_{i=1}^{N} W_{iн}$; ε_i — степень снижения мощности i-го реактора; α — заданная степень снижения мощности АЭС.

Заметим, что оптимизация возможна только при $0 < \alpha < 1$, так как при $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$ значения оперативных запасов реактивности определены $\Delta\rho_i = \Delta\rho_{i\,макс}$ и $\Delta\rho_i = 0$. Поэтому эффект от оптимизации сильнее всего скажется в средней части регулировочного диапазона.

На рис. 1 показана зависимость $\varepsilon(\Delta\rho)$ для различных значений номинальной плотности потоков нейтронов в предположении мгновенного снижения мощности реактора. При номинальной плотности потока нейтронов $\sim 10^{13}$ нейтр./(см$^2\cdot$с) зависимость $\varepsilon(\Delta\rho)$ нелинейна. Сформулированная задача оптимизации относится к классу задач нелинейного программирования и в общем случае решается численно.

Для получения качественных результатов апроксимируем зависимость $\varepsilon(\Delta\rho)$ полиномом второго порядка. Численные оценки показывают, что кривые на рис. 1 достаточно точно аппроксими-

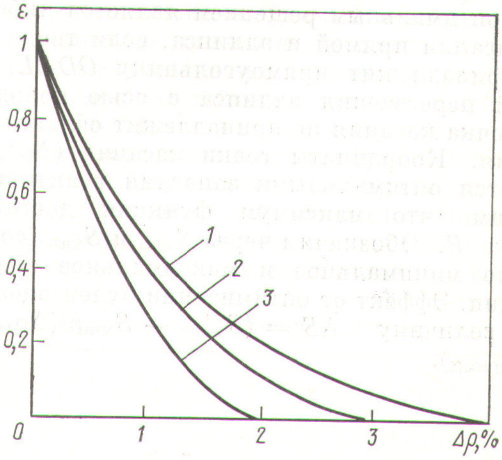

Рис. 1. Зависимость степени снижения мощности реактора от запаса реактивности для плотности потоков нейтронов: $\varphi = 5\cdot10^{13}$ (1); $4\cdot10^{13}$ (2); $3\cdot10^{13}$ нейтр./(см$^2\cdot$с) (3)

* Для реактора с непрерывной перегрузкой топлива под величиной a следует понимать коэффициент пропорциональности между запасом реактивности и соответствующей потерей энерговыработки.

** В работе [3] оптимизировались режимы изменения мощностей реакторов, работающих в системе, с точки зрения минимума поглощения в ксеноне.

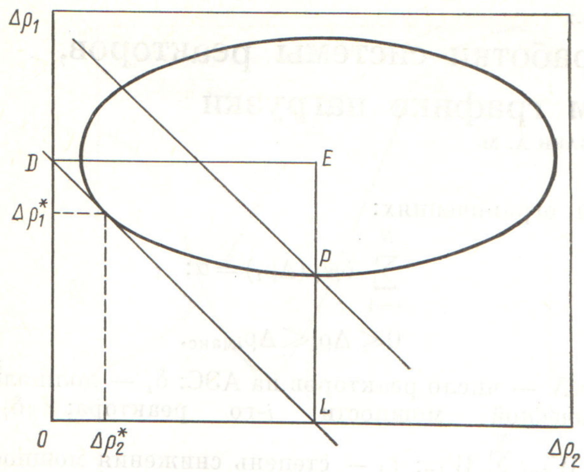

Рис. 2. Графическая интерпретация решения оптимизационной задачи для системы реакторов

руются зависимостью $\varepsilon = (1 - \Delta\rho/\Delta\rho_{макс})^2$, причем $\Delta\rho_{макс} = C\varphi$, где $C = \mathrm{const}$. Рассмотрим систему, состоящую из двух реакторов. В этом случае задача может быть решена аналитически [4] и имеет простую графическую интерпретацию (рис. 2). Область изменения переменных $\Delta\rho_1$ и $\Delta\rho_2$ представляет собой прямоугольник $ODEL$; минимизируемая функция $S = \Delta\rho_1/a_1 + \Delta\rho_2/a_2$ — прямую; приведенное к каноническому виду уравнение связи между переменными — эллипс:

$$\frac{(\Delta\rho_1-\Delta\rho_{1макс})^2}{\varphi_1^2/\delta_1}+\frac{(\Delta\rho_2-\Delta\rho_{2макс})^2}{\varphi_2^2/\delta_2}=\alpha C^2. \qquad (2а)$$

Как следует из рис. 2 (где для определенности изображен эллипс с отношением полуосей $\frac{\varphi_1^2}{\delta_1}\Big/\frac{\varphi_2^2}{\delta_2}>1$ и прямая с тангенсом угла наклона $a_1/a_2 = 1$), оптимальным решением является либо случай касания прямой и эллипса, если точка касания принадлежит прямоугольнику $ODEL$, либо случай пересечения эллипса с осью координат, если точка касания не принадлежит области определения. Координаты точки касания $(\Delta\rho_1^*, \Delta\rho_2^*)$ являются оптимальными запасами реактивности. Отметим, что максимум функции достигается в точке P. Обозначим через $S_{мин}$ и $S_{макс}$ соответственно минимальное и максимальное значение функции. Эффект от оптимизации будем оценивать как величину $\Delta S = (S_{макс} - S_{мин})/(\Delta\rho_{1макс} + \Delta\rho_{2макс})$.

Для выяснения физической стороны вопроса и получения оценок возможного эффекта от оптимизации, рассмотрим ряд конкретных ситуаций.

1. Реакторы отличаются только долей мощности $\varphi_1 = \varphi_2$, $a_1 = a_2$, $\delta_1/\delta_2 > 1$. Наибольший запас реактивности следует создавать в реакторе с бо́льшей долей мощности (см. рис. 2). Действительно, чем больше доля мощности реактора в системе, тем меньшим ее изменением можно обеспечить заданное снижение мощности системы в целом. При этом в реакторе с бо́льшей мощностью необходимо резервировать меньший запас реактивности (см. рис. 1), что приводит к уменьшению суммарной потери энерговыработки. Эффект от оптимизации при $\delta_1/\delta_2 = 2$ и $\alpha = 0{,}5$ составит $\sim 30\%$.

2. Реакторы отличаются только темпом выгорания $\varphi_1 = \varphi_2$, $\delta_1 = \delta_2$, $a_1/a_2 > 1$. В этом случае уравнение связи между переменными является уравнением окружности. Поскольку потеря энерговыработки обратно пропорциональна темпу выгорания, ясно, что наибольший запас реактивности следует резервировать в реакторе с бо́льшим темпом выгорания. Эффект от возможной оптимизации при $a_1/a_2 = 2$ и $\alpha = 0{,}5$ составит $\sim 40\%$.

3. Реакторы одинаковы по всем рассматриваемым параметрам $\varphi_1 = \varphi_2$, $\delta_1 = \delta_2$, $a_1 = a_2$. В этой ситуации запасы реактивности одинаковы. Эффект от оптимизации $\sim 20\%$. Для системы, состоящей из реакторов с различными параметрами φ, δ, a, оптимальным является неравномерное снижение мощности.

Таким образом, приведенные результаты указывают на возможность получения определенного эффекта в использовании топлива при системном подходе к анализу работы АЭС в переменном графике нагрузки. В заключение отметим, что аналогично решается обратная задача о максимальном снижении мощности АЭС при заданной потере энерговыработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров А. П., Доллежаль И. А.** «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 337.
2. **Владимиров В. Н.** Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1976.
3. **Герасимов А. С., Рудик А. П.** «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 2, с. 143.
4. **Хедли Дж.** Нелинейное и динамическое программирование. М., «Мир», 1967.

Поступила в Редакцию 25.09.78