

КОМПЛЕКСНЫЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МАНЕВРИРОВАНИЯ МОЩНОСТЬЮ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

С.М. Пельх, Т.В. Цисельська, В.Є. Баскаков. **Комплексний критерій ефективності алгоритма маневрування потужністю реактора ВВЕР-1000 у змінному режимі.** Розроблено комплексний критерій ефективності алгоритма маневрування потужністю реактора ВВЕР-1000 в змінному режимі, що враховує ступінь пошкодженості оболонки твєла, стабільність енерговиділення у активній зоні, коефіцієнт використання встановленої потужності реактора, надійність системи управління реактора.

С.Н. Пельх, Т.В. Цисельская, В.Е. Баскаков. **Комплексный критерий эффективности алгоритма маневрирования мощностью реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме.** Разработан комплексный критерий эффективности алгоритма маневрирования мощностью реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме, учитывающий степень поврежденности оболочки твэла, стабильность энерговыделения в активной зоне, коэффициент использования установленной мощности реактора, надежность системы управления реактора.

S.N. Pelykh, T.V. Tsiselskaya, V.E. Baskakov. **A complex power maneuvering algorithm efficiency criterion for a WWER-1000 reactor working in the mode of variable loadings.** A complex power maneuvering algorithm efficiency criterion for a WWER-1000 reactor working in the mode of variable loadings taking into account a nuclear reactor fuel element cladding damage level, active core power stability, utilization factor of maximum capacity, control system reliability, has been worked out.

При обосновании возможности эксплуатации ядерных энергоблоков с ВВЭР-1000 НАЭК “Энергоатом” в режиме переменных нагрузок одной из ключевых задач является оценка времени целостности оболочки твэла в заданных критериях при многократных циклических изменениях мощности реакторной установки (РУ). В методе анализа долговечности оболочки твэла ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения на основе энергетического варианта теории ползучести используются критерии прочности оболочки SC2 и SC4, что позволяет получать физически обоснованные зависимости долговечности оболочки от режимных параметров АКЗ и конструктивных характеристик ТВС [1].

Однако долговечность оболочки твэла не характеризует все аспекты безопасности, надежности и экономичности эксплуатации РУ. Поэтому анализировалась не только долговечность оболочки твэла в переменном режиме, но и стабильность поля энерговыделения в активной зоне (АКЗ) при маневрировании мощностью РУ [2...4].

Дальнейшим развитием такого подхода является разработка комплексного критерия эффективности алгоритма маневрирования мощностью ВВЭР-1000, учитывающего системные свойства РУ, состоящей из элементов, взаимосвязанных физически, динамически и функционально.

РУ сохраняет свою целостность, безопасность, эффективность и надежность до тех пор, пока сохраняется:

- целостность и безопасность ключевых элементов, ее образующих;
- неизменность структуры, т.е. стабильность важнейших динамических процессов, определяющих выполнение функций РУ;
- высокий уровень интегральных технико-экономических показателей эксплуатации в течение весьма длительного промежутка времени;
- высокий уровень надежности управления ею.

В рамках комплексного подхода к построению критерия оценки эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ можно выделить следующие уровни анализа ее как системы.

Элементарный. На уровне элементов системы в первую очередь целесообразно рассматривать степень целостности наиболее важного элемента РУ — оболочки твэла, служащей первым барьером

безопасности. Сохранение целостности оболочки в переменном режиме можно анализировать путем оценки величины параметра ω поврежденности материала оболочки твэла [2].

Структурный. На уровне структуры системы целесообразно рассматривать стабильность наиболее важных физических процессов, прежде всего, энерговыделения в АКЗ. Для этого используют величину аксиального офсета (АО), определяющего высотную неравномерность поля энерговыделения [3].

Интегральный экономический. Анализ технико-экономических показателей эксплуатации РУ, прежде всего коэффициента использования установленной мощности (КИУМ).

Интегральный уровень надежности системы управления. Анализ вероятности безотказной эксплуатации Рб/о всех систем управления, включая действия персонала, обеспечивающих маневрирование мощностью РУ.

Целесообразно ввести следующие приведенные параметры:

— приведенный параметр поврежденности оболочки

$$\omega^* = |\omega - 1|, \quad (1)$$

где ω — параметр поврежденности оболочки.

— приведенный аксиальный офсет

$$AO^* = 1 - |\Delta AO|, \quad (2)$$

где $|\Delta AO|$ — амплитуда изменения АО в ходе маневра.

— приведенный коэффициент использования установленной мощности

$$КИУМ^* = КИУМ \frac{10}{N_i + 10}, \quad (3)$$

где N_n — количество суток простоя РУ, приходящееся на каждые 10 суток эксплуатации ВВЭР-1000 на 100 % мощности;

КИУМ — коэффициент использования установленной мощности РУ без учета времени простоев;

— интегральная вероятность безотказной работы всех систем управления, обеспечивающих маневрирование мощностью РУ,

$$P_{\delta/o}^* = \prod_{i=1}^M P_{\delta/o, i}, \quad (4)$$

где $P_{\delta/o, i}$ — интегральная вероятность безотказной работы всех систем управления РУ, обеспечивающих маневрирование ее мощностью в ходе i -го оперативного действия (переключения);

M — необходимое число оперативных действий при маневрировании мощностью.

Приведенные параметры используются в качестве компонентов комплексного критерия $\{\omega^*; AO^*; КИУМ^*; P_{\delta/o}^*\}$ эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ, точка с координатами $(\omega^* = 1; AO^* = 1; КИУМ^* = 1; P_{\delta/o}^* = 1)$ соответствует предельному наилучшему переменному режиму эксплуатации, а с координатами $(\omega^* = 0; AO^* = 0; КИУМ^* = 0; P_{\delta/o}^* = 0)$ — предельному наихудшему.

Для действующих РУ с ВВЭР-1000 либо предусматриваются проектом, либо могут быть определены некоторые минимально допустимые, с точки зрения надежности, безопасности и эффективности эксплуатации РУ, значения приведенных параметров $(\omega_{\min}^*; AO_{\min}^*; КИУМ_{\min}^*; P_{\delta/o, \min}^*)$. Таким образом, допустимые значения компонентов комплексного критерия при эксплуатации РУ в переменном режиме заключены в следующих диапазонах:

$$\begin{cases} \omega_{\min}^* \leq \omega^* \leq 1; AO_{\min}^* \leq AO^* \leq 1; \\ КИУМ_{\min}^* \leq КИУМ^* \leq 1; P_{\delta/o, \min}^* \leq P_{\delta/o}^* \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Для наглядности область допустимых значений компонентов комплексного критерия при эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме удобно представить при максимальном значении $P_{\delta/o}^* = 1$. Компоненты комплексного критерия ограничены следующими минимально допустимыми значениями в точке В (см. рисунок):

$$\begin{cases} \omega_{\min}^* = 0,5 (\omega_{\max} = 0,5); \\ AO_{\min}^* = 0,95 (|\Delta AO| = 5 \text{ \%}); \\ \text{КИУМ}_{\min}^* = 0,75. \end{cases} \quad (6)$$

Величины $(\omega_{\min}^*; AO_{\min}^*; \text{КИУМ}_{\min}^*; P_{\text{б/о, min}}^*)$, определяющие положение точки B , должны задаваться из условия обеспечения взаимной независимости величин ω^* , AO^* , КИУМ^* и $P_{\text{б/о}}^*$ в пределах прямоугольного объема, задаваемого диагональю AB . Очевидно, что влияние величины ω^* на величины AO^* и КИУМ^* возможно только при малых ω^* . Аналогичным образом, влияние величины AO^* на ω^* и КИУМ^* возможно только при малых величинах AO^* .

Для i -го алгоритма маневрирования мощностью РУ точка $(\omega_i^*; AO_i^*; \text{КИУМ}_i^*; P_{\text{б/о, } i}^*)$ должна оставаться в пределах области, задаваемой диагональю AB , при этом при улучшении алгоритма эта точка стремится к точке A , а при ухудшении — к точке B (см. рисунок).

Можно сделать вывод, что мерой эффективности E i -го алгоритма является близость точки $(\omega_i^*; AO_i^*; \text{КИУМ}_i^*; P_{\text{б/о, } i}^*)$ к точке A , определяемая количественно следующим образом:

$$E_i = 1 - \frac{L_i}{L_{\max}}, \quad (7)$$

$$\text{где } L_i = \sqrt{(1 - \text{КИУМ}_i^*)^2 + (1 - \omega_i^*)^2 + (1 - AO_i^*)^2 + (1 - P_{\text{б/о, } i}^*)^2}; \quad (8)$$

$$L_{\max} = \sqrt{(1 - \text{КИУМ}_{\min}^*)^2 + (1 - \omega_{\min}^*)^2 + (1 - AO_{\min}^*)^2 + (1 - P_{\text{б/о, min}}^*)^2}. \quad (9)$$

Таким образом, критерий $\{\omega^*; AO^*; \text{КИУМ}^*; P_{\text{б/о}}^*\}$ позволяет численно оценивать эффективность того или иного алгоритма маневрирования, анализируя состояние РУ на четырех уровнях: элементарном, структурном, интегральных экономическом и уровне надежности системы управления, что дает возможность одновременно учитывать требования целостности ключевых элементов РУ, стабильности ключевых физических процессов, протекающих в РУ, экономичности и управляемости РУ.

С использованием предлагаемого комплексного критерия проведен модельный эксперимент по выбору наиболее эффективного алгоритма маневрирования мощностью РУ ВВЭР-1000/В-320. Рассматривались алгоритмы суточного маневра мощностью энергоблока с ВВЭР-1000, проходивший испытания на Хмельницкой АЭС 17...18 апреля 2006 г. — “Апробированный”, и “Альтернативный” алгоритм [4].

“Апробированный” алгоритм:

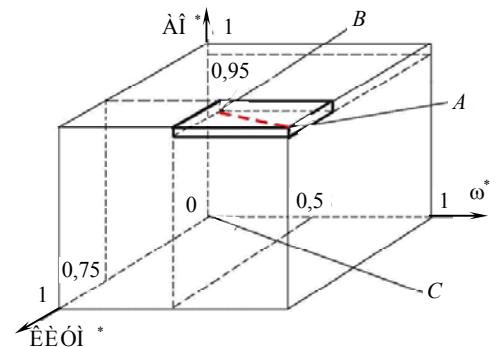
- снижение нейтронной мощности N реактора до 80 % номинальной за 1 ч;
- работа на мощности $N = 80 \text{ \%}$ в течение 7 ч;
- повышение N до номинальной $N_{\text{ном}}$ в течение 2 ч по программе регулирования (ПР) с постоянным давлением p_2 пара во втором контуре.

Для поддержания заданного уровня мощности РУ при разгрузке, в момент отравления реактора начинали вводить “чистый конденсат”. За три часа (с 23.00 до 2.00) подпитку “чистого конденсата” включали шесть раз [4]. Общее количество оперативных действий M_1 при маневрировании мощностью N по “Апробированному” алгоритму

$$M_1 = 140. \quad (10)$$

“Альтернативный” алгоритм:

- снижение мощности N до 90 % в течение 0,5 ч вводом раствора борной кислоты;



Допустимая область эксплуатации ВВЭР-1000 в пространстве компонентов комплексного критерия при $P_{\text{б/о}}^* = 1$.

Переменные режимы: A — предельный наилучший, при

$$(\omega^* = 1; AO^* = 1; \text{КИУМ}^* = 1);$$

B — предельный допустимый,

при $(\omega_{\min}^*; AO_{\min}^*; \text{КИУМ}_{\min}^*)$; C —

предельный наихудший, при

$$(\omega^* = 0; AO^* = 0; \text{КИУМ}^* = 0)$$

— дальнейшее снижение N до 80 % в течение 2,5 ч за счет отравления реактора;
 — работа на мощности $N=80$ % в течение 4 ч;
 — повышение мощности N до номинальной $N_{\text{ном}}$ в течение 2 ч, при этом в диапазоне мощности 100...80 % входная температура теплоносителя $T_1^{\text{вх}}$ постоянна, а давление пара во втором контуре p_2 изменяется в пределах 58...60 бар.

“Альтернативный” алгоритм, характеризуемый умеренным изменением средней температуры первого контура $T_1^{\text{ср}}$ и давления пара во втором контуре p_2 при $N=100...80$ % $N_{\text{ном}}$, тогда как при $N < 80$ % $N_{\text{ном}}$ используется ПР с постоянным p_2 , может быть назван “компромиссно-комбинированным”, поскольку объединяет положительные свойства известных “компромиссного” и “комбинированного” алгоритмов. “Альтернативный” алгоритм, в соответствии с которым при суточном маневре мощностью $N=100...80$ % $N_{\text{ном}}$ поддерживается $T_1^{\text{вх}} = \text{const}$ при $p_2 = 58...60$ бар, имеет преимущества ПР с $T_1^{\text{ср}} = \text{const}$. При этом, за счет поддержания p_2 в регламентных пределах этот алгоритм лишен недостатков, присущих ПР с $T_1^{\text{ср}} = \text{const}$ [5].

При маневрировании мощностью по “Альтернативному” алгоритму общее количество оперативных действий

$$M_2 = 40. \quad (11)$$

На разных АЭС величина вероятности $P_{6/o,i}$ может значительно отличаться. Благодаря внедренным организационно-техническим мероприятиям по контролю переключений, на Запорожской АЭС вероятность отказа системы управления РУ (с учетом вероятности ошибок персонала), обеспечивающей маневрирование мощностью, в ходе одного переключения составляет 0,001 [4]. Тогда

$$P_{6/o,i} = 0,999, \quad (12)$$

где $i = \overline{1, M_j}$;

j — номер алгоритма маневрирования.

На основании выражений (4), (7), (10)...(12) вероятности безотказной работы системы управления РУ, обеспечивающей маневрирование мощностью по “Апробированному” и “Альтернативному” алгоритмам, имеют значения, соответственно,

$$P_{6/o,1}^* \approx 0,869, \quad (13)$$

$$P_{6/o,2}^* \approx 0,961. \quad (14)$$

Пусть задано

$$\omega_{\text{min}}^* = 0,5; \text{AO}_{\text{min}}^* = 0,95; \text{КИУМ}_{\text{min}}^* = 0,75; P_{6/o,\text{min}}^* = 0,95. \quad (15)$$

Тогда, в соответствии с (9)

$$L_{\text{max}} = 0,563. \quad (16)$$

С использованием метода оценки долговечности оболочки [1...3], программы “Имитатор Реактора” [4], а также модели оценки эффективности алгоритма маневрирования на основе комплексного критерия, получены характеристики и сравнительная оценка рассматриваемых алгоритмов суточного маневра мощностью ВВЭР-1000 для линейного теплового потока $q_{l,\text{max}} = 248$ Вт/см и 298 Вт/см (тепловыделяющая сборка типа ТВС-А) (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная оценка эффективности “Апробированного” и “Альтернативного” алгоритмов суточного маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 на основе критерия $\{\omega^*; \text{AO}^*; \text{КИУМ}^*; P_{6/o}^*\}$

| $q_{l,\text{max}}$, Вт/см | Алгоритм | ω^* (после 1000 эф. сут) | КИУМ* | АО* | $P_{6/o}^*$ | L | E |
|----------------------------|------------------|---------------------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| 248 | “Апробированный” | 0,649 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | — | — |
| | “Альтернативный” | 0,643 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | 0,419 | 0,256 |
| 298 | “Апробированный” | 0,433 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | — | — |
| | “Альтернативный” | 0,424 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | — | — |

Приведенные величины КИУМ* рассчитывались по выражению (3) при $N_n = 2$.

Можно сделать вывод, что по результатам эксплуатации РУ ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут. “Альтернативный” алгоритм суточного маневра мощностью предпочтительнее “Апробированного” как при $q_{l,max} = 248$ Вт/см, так и при $q_{l,max} = 298$ Вт/см. При $q_{l,max} = 248$ Вт/см точка $(\omega_2^*; AO_2^*; КИУМ_2^*; P_{\omega,2}^*)$ находится в пределах области допустимых значений, задаваемой диагональю АВ (см. рисунок). При $q_{l,max} = 298$ Вт/см оба алгоритма характеризуются выходом точки $(\omega_i^*; AO_i^*; КИУМ_i^*; P_{\omega,i}^*)$ за пределы области допустимых значений компонентов комплексного критерия, задаваемой условиями (15) (см. таблицу 1).

Поскольку значение $q_{l,max} = 298$ Вт/см соответствует максимально нагруженным твэлам в АКЗ ВВЭР-1000, можно сделать вывод, что непрерывная эксплуатация ВВЭР-1000 в течение 1000 эф. сут. по обоим алгоритмам суточного маневрирования недопустима в рамках принятых ограничений (15). Предлагаемый критерий позволяет определить допустимую длительность T непрерывной эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме, исходя из требования нахождения точки $(\omega_i^*; AO_i^*; КИУМ_i^*; P_{\omega,i}^*)$ в пределах допустимой области для величины $q_{l,max} = 298$ Вт/см (табл. 2).

Таблица 2

Допустимая длительность непрерывной эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме

| Алгоритм | T , эф. сут. | ω^* | КИУМ* | АО* | P_{ω}^* | L | E |
|------------------|----------------|------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| “Апробированный” | 500 | 0,751 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | – | – |
| | 600 | 0,679 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | – | – |
| | 700 | 0,612 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | – | – |
| | 800 | 0,549 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | – | – |
| | 882 | 0,500 | 0,774 | 0,970 | 0,869 | – | – |
| “Альтернативный” | 500 | 0,744 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | 0,337 | 0,401 |
| | 600 | 0,672 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | 0,394 | 0,300 |
| | 700 | 0,604 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | 0,452 | 0,197 |
| | 800 | 0,541 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | 0,508 | 0,098 |
| | 870 | 0,500 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | 0,546 | 0,030 |
| | 882 | 0,493 | 0,785 | 0,997 | 0,961 | – | – |

Таким образом, по “Апробированному” и “Альтернативному” алгоритмам предельно допустимое количество циклов суточного нагружения РУ ВВЭР-1000, лимитируемое $\omega_{max} = 0,5$, $T_{доп,1} = 882$ и $T_{доп,2} = 870$, соответственно. Относительная разница $\Delta T_{доп} = (T_{доп,1} - T_{доп,2}) / T_{доп,1} \approx 1\%$ находится в пределах суммарной численной погрешности расчетной модели [6].

Однако, “Альтернативный” алгоритм имеет преимущество перед “Апробированным”, поскольку при сохранении долговечности оболочки примерно на том же уровне характеризуется более высокими показателями использования установленной мощности РУ, стабильности поля энерговыделения, надежности системы управления РУ в ходе маневрирования.

Литература

1. Pelykh, S. N. Model of cladding failure estimation under multiple cyclic reactor power changes / S. N. Pelykh, M.V. Maksimov, V.E. Baskakov // Proc. of the 2-nd International Conference NPAE —2008 “Current problems of nuclear physics and atomic energy”. — Kiev, 2008. — P. 638—641.
2. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M. V. Maksimov, S. N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov // Nuclear Eng. and Design. — 2009. —Vol. 239, № 12. — P. 3021—3026.
3. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реактором типа ВВЭР / М.В. Максимов, С.Н. Пельх, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Изв. вузов. Ядер. энергетика. — Обнинск, 2008. — Вып. 4. — С. 128—139.
4. Баскаков, В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы / В.Е. Баскаков, М.В. Максимов, О.В. Маслов // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2007. — Вып. 2 (28). — С. 56 — 59.
5. Иванов, В.А. Эксплуатация АЭС: Учеб. для вузов / В.А. Иванов. — СПб.: Энергоатомиздат, 1994. — 384 с.
6. Motoe Suzuki. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1). — Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. — 285 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 11 июля 2009 г.