

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

Ю. А. Комаров

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Представлена общая методология, позволяющая спланировать сроки проведения ремонта оборудования АЭС с учетом его технического состояния и влияния на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС. Особое внимание в статье уделено формированию диаграммы ранжирования оборудования, обоснованию граничных значений диаграммы, оценке гамма-процентного запаса наработки до отказа для различных с точки зрения безопасности групп оборудования. Также представлена общая процедура проведения работ по РТС оборудования АЭС.

Ключевые слова: ремонт по техническому состоянию (РТС), безопасность, эффективность эксплуатации, наработка до отказа, оборудование АЭС.

Актуальность вопроса и постановка задачи исследования

Основу современной стратегии развития ядерной энергетики Украины составляет повышение безопасности, эффективности и объемов производства электроэнергии АЭС. Повышение эффективности производства АЭС Украины осуществляется в следующих основных направлениях:

- комплексная модернизация технологических систем и оборудования;
- повышение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ);
- технически и экономически обоснованное продление сроков эксплуатации действующих энергоблоков.

Наибольшие резервы по повышению КИУМ заложены в сокращении длительности планово-предупредительного ремонта (ППР) энергоблока.

В настоящее время все, что касается объемов и периодичности планового ремонта и технического обслуживания оборудования определяется требованиями заводов-изготовителей. При этом периодичность проведения ТОиР оборудования определяется его наработкой. Это приводит к тому, что плановые обслуживания и ремонты выполняются чаще, чем это необходимо, чаще, чем того требует техническое состояние оборудования, что в конечном итоге снижает КИУМ.

Альтернативой является планирование ремонта оборудования на основании его технического состояния. Концепция перехода на ремонт по техническому состоянию базируется на таком нормативном документе как СОУ-Н ЯЭК [1], где, в частности, сказано: "После уточнения фактических характеристик надежности систем и оборудования и при наличии необходимого диагностического обеспечения, допускается применять ТОиР по техническому состоянию" (п. 6.11 [1]).

Следует отметить, что концепция ремонта оборудования АЭС на основании его технического состояния широко используется в мировой практике [2, 3]. В Украине РТС, хоть и закреплен нормативными документами, не получил широкого внедрения.

Основная идея концепции РТС состоит в том, что оборудование необходимо ремонтировать тогда, когда его состояние близко к отказу. Другими словами, нет необходимости в проведении какой-либо профилактики, когда известно, что до отказа еще далеко. Однако чем состояние оборудование ближе к отказу, тем больше вероятность случайной реализации этого отказа. При этом эта реализация отказа может произойти ранее расчетного запланированного срока. Это, в частности, обуславливается как неопределенностью и погрешностью оценок наработки до отказа, так и случайной природой наработки до отказа. Поэтому оборудование необходимо выводить в плановый ремонт заранее. Степень упреждения должна зависеть от значимости оборудования. В качестве показателей значимости для оборудования

АЭС приемлемыми являются показатели, отражающие влияние анализируемого оборудования на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС. Чем значительнее оборудование влияет на безопасность и эффективность эксплуатации, тем с большим запасом по времени должен назначаться плановый ремонт этого оборудования. Если же оборудование имеет пренебрежимо низкое влияние, то ремонт может проводиться по факту отказа (п. 3.5.7 [3]).

Таким образом, для внедрения РТС в эксплуатационную практику необходимо иметь следующие методы, применимые к оборудованию АЭС:

- метод оценки влияния оборудования на безопасность;
- метод оценки влияния оборудования на эффективность эксплуатации;
- метод оценки наработки до отказа и гамма-процентной наработки до отказа, позволяющей в зависимости от установленного гамма-процентного запаса получать различные упреждения (гамма-процентная наработка до отказа – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах (п. 6.9 ГОСТ 27.0002 [11]);
- метод установления гамма-процентного запаса в зависимости от значимости оборудования.

Общие положения методологии

Метод применения концепции перехода на РТС направлен на изменение графиков и объемов работ по техническому обслуживанию и плановому ремонту оборудования на основе оценки прогнозных значений технического состояния (ТС) оборудования, влияния оборудования на безопасность энергоблока (ЭБ), влияния оборудования на эффективность эксплуатации ЭБ.

Для внедрения стратегии РТС необходимо выделить один или несколько определяющих критериев ТС. Обозначим данные критерии $\{K_1, K_2, \dots, K_n\}$. Каждый критерий может представлять какую-либо физико-химическую характеристику оборудования и иметь точечный или интервальный характер. Также следует иметь оценки ТС оборудования в течение максимально возможного времени для всех n критериев $\{K_1^0(t), K_2^0(t), \dots, K_n^0(t)\}$ и для каждого критерия предельно допустимые проектом значения $\{\bar{K}_1, \bar{K}_2, \dots, \bar{K}_n\}$.

Установление определяющих характеристик ТС проводится на основании опыта эксплуатации, экспертных оценок специалистов, эксплуатирующих оборудование, и перечня численных параметров, которые изменяются в процессе проведения плановых капитальных, средних, текущих ремонтов (КР, СР, ТР) оборудования.

Основным показателем планирования длительности до последующего ремонта служит гамма-процентная наработка до отказа. Значения гамма-процентного запаса должны быть различны в зависимости от влияния оборудования на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС.

Наработка до отказа оценивается на основании прогнозирования изменения определяющих характеристик ТС оборудования и с учетом имеющихся данных по отказам данного оборудования. Прогнозирование изменения определяющих характеристик ТС осуществляется на основании физико-статистических методов с использованием диффузионных распределений [4, 5].

В случае, если планирование проводится по средней наработке до отказа, ремонт оборудования (по факту достижения каким-либо определяющим параметром ТС предельно допустимого значения – по факту отказа) будет проводиться через интервал времени $T_{рем}$ от последней оценки технического состояния оборудования

$$T_{рем} = \min_i \{t_i^{пред} - t_0\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где $t_i^{пред}$ – момент достижения i -м определяющим параметром технического состояния своего предельно допустимого значения (определяется на основании прогнозных оценок траектории изменения определяющего параметра ТС); t_0 – момент проведения последней оценки технического состояния оборудования.

В общем случае планирование ремонта будет проводиться через интервал времени $T_{рем}$, оцениваемый по выражению

$$T_{рем} = \min_i \{t_{\gamma_i} - t_0\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где t_{γ} – гамма-процентная наработка до отказа по i -му определяющему параметру технического состояния.

Влияние оборудования на безопасность оценивается по величине изменения риска (при изменении вероятности отказа оборудования от 1 до 0), определяемого на основании моделей и результатов вероятностного анализа безопасности (ВАБ). В упрощенном варианте анализа влияние оборудования на безопасность оценивается на основании классификации оборудования по нормативному документу: Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (далее – ОПБ) [6].

Влияние оборудования на эффективность эксплуатации оценивается по среднему значению недовыработки электроэнергии на один внеплановый ремонт. Основой расчета является эксплуатационная статистика по длительностям внепланового ремонта оборудования и регламентная зависимость допустимого уровня мощности реакторной установки (РУ) от длительности неготовности оборудования. В упрощенном варианте анализа влияние оборудования на эффективность эксплуатации оценивается по коэффициенту запаса времени на проведение внепланового ремонта оборудования по отношению к регламентной длительности неготовности оборудования без снижения мощности РУ.

В зависимости от значимости оборудования устанавливается значение (γ) гамма-процентного запаса гамма-процентной наработки до отказа. Значимость оборудования определяется на основании специально разработанной диаграммы.

Диаграмма ранжирования

В основу построения диаграммы ранжирования положен принцип присвоения определенного уровня значимости в соответствии с влиянием оборудования на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС.

Выделены три уровня значимости: низкий, средний и высокий. Выделение именно трех уровней связано с часто используемой в риск-ориентированном анализе шкалой ранжирования значимости, уровней вероятности отказа, возникновения течи, прироста частоты повреждения активной зоны (ЧПАЗ) [7, 8]. Также выделение трех уровней соотносится с классами безопасности по ОПБ [6]: высокий уровень – классы 1 и 2; средний уровень – класс 3; низкий уровень – класс 4.

Особенностью диаграммы (в сравнении с другими диаграммами ранжирования, используемыми при применении риск-ориентированных подходах (РОП), например, в подходах Вестенгауза и Эпри [8]) является выделение в явном виде градации оборудования по влиянию на эффективность эксплуатации.

Диаграмма ранжирования оборудования включает три области (рис. 1):

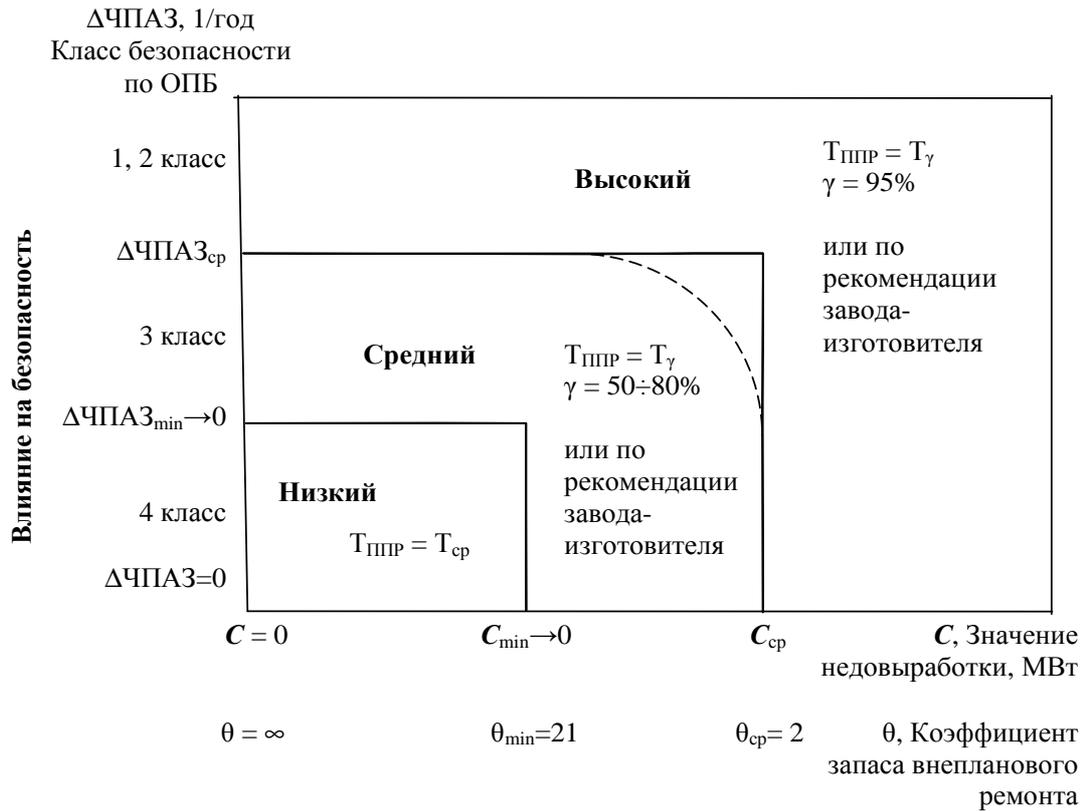
низкий уровень значимости соответствует низкому приращению Δ ЧПАЗ, 4-му классу безопасности, пренебрежимо малой недовыработке электроэнергии при выводе оборудования в ремонт, большому запасу времени на проведение ремонта;

средний уровень значимости соответствует значениям приращения Δ ЧПАЗ от минимального до среднего, 3-му классу безопасности, наличию недовыработки электроэнергии от минимальной до средней, меньшему коэффициенту запаса времени на проведение ремонта;

высокий уровень значимости соответствует приращению Δ ЧПАЗ выше среднего, 1-му и 2-му классам безопасности, значению недовыработки электроэнергии выше среднего, отсутствию запаса времени на проведение ремонта.

Каждой области соответствует свое значение запаса γ гамма-процентной наработки до отказа, по которой проводится планирование очередного ТОиР оборудования. Чем выше

уровень значимости оборудования, тем большим должен быть гамма-процентный запас.



Влияние на эффективность эксплуатации

Рис. 1. Диаграмма ранжирования (уровни значимости) оборудования по его влиянию на безопасность и эффективность эксплуатации ЭБ.

Ниже представлена методика оценки граничных значений ΔЧПАЗ, C, θ, соответствующих классам безопасности и значениям γ.

Следует отметить, что при приближении снизу обоих параметров ΔЧПАЗ и C к граничным значениям оборудование следует консервативно отнести к более высокому уровню. Решение о близости параметров к граничным значениям принимается на основании экспертной оценки. Область значений параметров, при которых производится дополнительная экспертная оценка, приближенно ограниченная пунктирной линией (см. рис. 1). Так, ориентировочные значения параметров, при которых необходим дополнительный экспертный анализ, составят

$$\begin{cases} \Delta\text{ЧПАЗ} > 0,5(\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{cp}} - \Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{min}}) + \Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{min}} \\ C > 0,5(C_{\text{cp}} - C_{\text{min}}) + C_{\text{min}} \end{cases} \quad (3)$$

Оценка граничных значений

Границы низкого уровня значимости выбираются таким образом, чтобы оборудование, отнесенное к этому уровню, можно было эксплуатировать до отказа, при этом ориентировочное планирование ремонта (с целью подготовки ремонтного комплекта и персонала) производить по средней наработке до отказа $T_{\text{ППР}} = T_{\text{cp}}$.

Этим условиям может удовлетворять оборудование 4-го класса безопасности с пренебрежимо малым влиянием на ЧПАЗ и недовыработку электроэнергии:

$$\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{min}} \rightarrow 0; \quad C_{\text{min}} \rightarrow 0. \quad (4)$$

Значение коэффициента запаса времени на проведение ремонта θ_{\max} может быть выбрано по аналогии со значением доверительной вероятности $q = 0,95$ для оборудования, влияющего на безопасность (п. В.2 ДСТУ 3004 [9]). То есть для оборудования, влияющего на безопасность, допускается иметь 5 %-ную неопределенность по оценке соответствующего показателя, или при наличии 95 %-го запаса показатель считается оцененным с достаточной степенью достоверности.

Показатель θ является по своей сути вероятностным, и 95 %-ный запас соответствует величине 20-кратного запаса.

В случае $t_{\text{дон}} = \bar{t}_{\text{рем}}$ запас времени на проведение ремонта отсутствует, в случае же приемлемого 20-кратного запаса времени на проведение ремонта (с 95 %-ным запасом) показатель θ составит

$$\theta_{\max} = \frac{t_{\text{дон}}}{\bar{t}_{\text{рем}}} + \theta_{\text{запас}95\%} = 1 + \frac{1}{1-0,95} = 21, \quad (5)$$

где $\bar{t}_{\text{рем}}$ – среднее время аварийного ремонта; $t_{\text{дон}}$ – допустимое время ремонта без снижения мощности РУ.

Другими словами, имея 20-кратный запас времени на проведение ремонта, можно пренебречь возможным случайным превышением допустимого времени ремонта как неопределенностью не более 5 %.

Граничные значения $\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{ср}}$ и $C_{\text{ср}}$ не могут иметь фиксированных значений, и связаны с конкретной моделью и результатами ВАБ (для $\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{ср}}$) и опытом проведения внеплановых ремонтов на энергоблоке определенной установленной мощности (для $C_{\text{ср}}$).

Для оценки $\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{ср}}$ необходимо провести оценку значимости по Бирнбауму (интервал изменения риска) как можно большего количества оборудования, отнесенного к классам безопасности 1 – 3.

Значимость по Бирнбауму:

$$\Delta\text{ЧПАЗ} = B = \text{ЧПАЗ}(P = 1) - \text{ЧПАЗ}(P = 0), \quad (6)$$

где $\text{ЧПАЗ}(P = 0)$, $\text{ЧПАЗ}(P = 1)$ – значение ЧПАЗ при условии, что анализируемый элемент (базовое событие) имеет вероятность отказа $P = 0$ и $P = 1$ соответственно.

Если оборудование представлено в ВАБ несколькими независимыми базовыми событиями (моделирующими единичные отказы) и отказами по общим причинам (ООП), то значимость по Бирнбауму составит

$$\Delta\text{ЧПАЗ} = B = \sum_{i=1}^{m_1} B_i^{BC} + \sum_{j=1}^{m_2} \frac{1}{n_j} B_j^{ООП}, \quad (7)$$

где B_i^{BC} – значимость по Бирнбауму по единичным базовым событиям, моделирующим анализируемое оборудование; $B_j^{ООП}$ – значимость по Бирнбауму для ООП группы оборудования, в которую входит анализируемое оборудование; m_1 , m_2 – количество единичных базовых событий и ООП, моделирующим анализируемое оборудование; n_j – количество элементов, входящих в j -ю группу ООП оборудования.

В результате такой оценки получаем два массива данных (рис. 2):

значения по Бирнбауму для оборудования 1-го и 2-го классов безопасности, относящегося к высокому уровню значимости

$$B_i^{e12}, i = 1, 2, \dots, N1; \quad (8)$$

значения по Бирнбауму для оборудования 3-го класса безопасности, относящегося к среднему уровню значимости

$$B_i^{cp3}, i = 1, 2, \dots, N2. \quad (9)$$

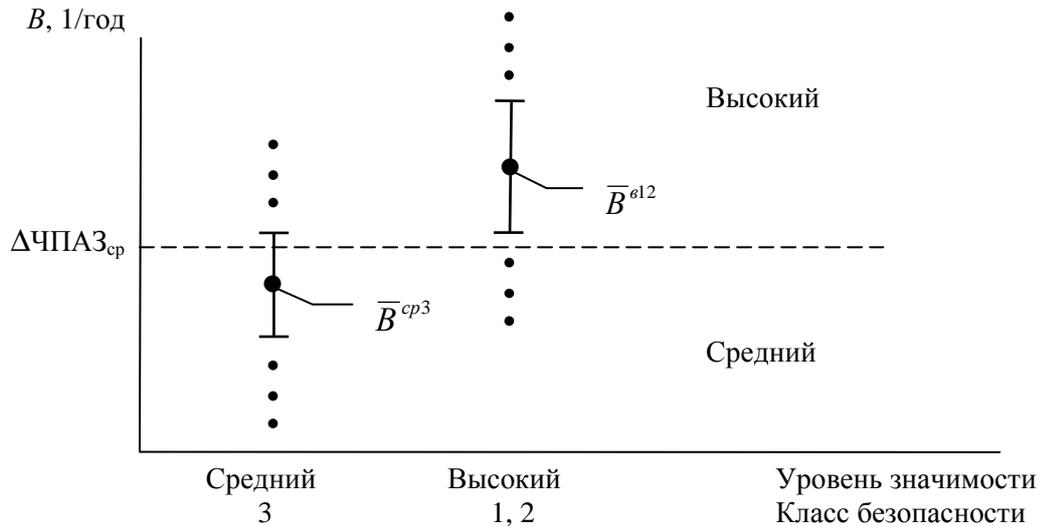


Рис. 2. Уровень значимости оборудования в зависимости от значимости по Бирнбауму и класса безопасности.

Проводят оценку средних значений по Бирнбауму, для каждого уровня значимости

$$\bar{B}^{e12} = \frac{1}{N1} \sum_{i=1}^{N1} B_i^{e12}; \quad \bar{B}^{cp3} = \frac{1}{N2} \sum_{i=1}^{N2} B_i^{cp3}. \quad (10)$$

Граничное значение $\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{ср}}$ составит

$$\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{ср}} = 0,5 (\bar{B}^{e12} + \bar{B}^{cp3}). \quad (11)$$

Оценка граничного значения по недовыработке электроэнергии $C_{\text{ср}}$ сводится к оценке средней недовыработки электроэнергии, возникшей по причине отказов оборудования анализируемого энергоблока и/или однотипных энергоблоков:

$$C_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i, \quad (12)$$

где C_i – недовыработка электроэнергии при проведении i -го внепланового ремонта любого оборудования анализируемого энергоблока; N – количество внеплановых ремонтов.

Оценка граничного значения коэффициента запаса времени на проведение ремонта $\theta_{\text{ср}}$ сводится к формализации утверждения, что при превышении граничного значения $\theta_{\text{ср}}$ почти половина ремонтов приводит к превышению допустимого времени ремонта (и, как следствие, к необходимости снижения мощности). В среднем половина ремонтов приводит к превышению допустимого времени ремонта, когда среднее время ремонта $\bar{t}_{\text{рем}}$ равно допустимому времени ремонта $t_{\text{дон}}$, тогда

$$\theta_{\text{ср}} = 1 + \frac{t_{\text{дон}}}{\bar{t}_{\text{рем}}} = 2. \quad (13)$$

Ранжирование оборудования по влиянию на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС

Отнесение того или иного оборудования к уровню значимости с точки зрения влияния на безопасность и эффективность эксплуатации АЭС проводится исходя из следующих условий следующим образом:

$$\text{Низкий} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta\text{ЧПАЗ} \leq \Delta\text{ЧПАЗ}_{\min} \\ \text{и/или класс 4} \end{array} \right. \cup \left\{ \begin{array}{l} C \leq C_{\min} \\ \text{и/или } \theta \geq 21 \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\text{Средний} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta\text{ЧПАЗ}_{\min} < \Delta\text{ЧПАЗ} < \Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{cp}} \\ \text{и/или класс 3} \end{array} \right. \cup \left\{ \begin{array}{l} C_{\min} < C < C_{\text{cp}} \\ \text{и/или } 1 < \theta < 21 \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\text{Высокий} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta\text{ЧПАЗ} \geq \Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{cp}} \\ \text{и/или класс 1 или 2} \end{array} \right. \cup \left\{ \begin{array}{l} C \geq C_{\text{cp}} \\ \text{и/или } \theta \leq 2 \end{array} \right. \quad (16)$$

Если элемент по такой классификации был отнесен к нескольким уровням значимости, то назначают более высокий.

Оценка гамма-процентного запаса наработки до отказа

Значение гамма-процентного запаса для оборудования с высоким уровнем значимости для безопасности устанавливают максимально консервативно (п. В.2 [8], п. 3.3.3.7 [10]): $\gamma = 95\%$.

Для оборудования низкого уровня значимости запас отсутствует – планирование ремонта проводится по средней наработке до отказа ($T_{\text{ИПР}} = T_{\text{cp}}$). В этом случае, фактически, оборудование работает до отказа. Такая возможность обосновывается принятым ранжированием оборудования (оборудование низкого уровня не оказывает влияние ни на безопасность, ни на эффективность эксплуатации) и международным опытом (п. 3.5.7 [3]).

Установление значения гамма-процентного запаса для оборудования среднего уровня значимости оценивается по степени влияния данного оборудования на безопасность на основании риск-ориентированного подхода.

Риск от эксплуатации оборудования в общем виде может быть представлен выражением

$$R = B \cdot P, \quad (17)$$

где B – степень тяжести последствий отказа в виде значимости по Бирнбауму; P – вероятность отказа оборудования.

Следует отметить, что именно значимость по Бирнбауму ($B = \text{ЧПАЗ}(P=1) - \text{ЧПАЗ}(P=0)$) отражает диапазон изменения риска при изменении вероятности отказа от 1 до 0. Использование любых других показателей типа коэффициента изменения риска, интервала повышения риска, значимости по Фусселю–Весели в уравнении (17) неправомерно.

Тогда риск от эксплуатации оборудования, у которого ремонт запланирован через промежуток времени T_{γ} , составит

$$R = \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) B. \quad (18)$$

Для оборудования различных уровней значимости риск от эксплуатации может быть различным, но при этом вероятность отказа P для оборудования высокого уровня значимости должна быть ниже, чем P для оборудования низкого и среднего уровня значимости.

Если нам известны значение $P = 1 - \gamma/100$ для оборудования высокого и низкого уровня значимости, а также значимость по Бирнбауму для оборудования среднего уровня значимости, то вероятность отказа (а значит, и соответствующее ей значение γ) можно оценить на основании линейного приближения.

В этом случае риск от эксплуатации оборудования среднего уровня значимости будет иметь вид

$$R_{\text{cp}} = R_{\text{в}} - \frac{R_{\text{в}} - R_{\text{н}}}{P_{\text{н}} - P_{\text{в}}} (P_{\text{cp}} - P_{\text{в}}). \quad (19)$$

Подставив равенство (17) в формулу (19) и решив уравнение относительно P_{cp} , получим

$$P_{cp} = \frac{P_6 P_n (B_6 - B_n)}{B_{cp} (P_n - P_6) + B_6 P_6 - B_n P_n}, \quad (20)$$

где B_6, B_{cp}, B_n – значимость по Бирнбауму для оборудования высокого, среднего и низкого уровня значимости соответственно; P_6, P_{cp}, P_n – вероятность отказа для оборудования высокого, среднего и низкого уровня значимости соответственно.

Следует отметить, что после проведения ранжирования оборудования возможно изменение состава оборудования, изначально отнесенного к среднему уровню значимости. Так, после установления $\Delta\text{ЧПАЗ}_{cp}$ все оборудование с $B_i > \Delta\text{ЧПАЗ}_{cp}$ и классом безопасности 1, 2 попадает в высокий уровень значимости (см. рис. 2).

В результате такого перераспределения получим два массива данных:

значения по Бирнбауму для оборудования, относящегося к высокому уровню значимости

$$B_i^6, i = 1, 2, \dots, N3; \quad (21)$$

значения по Бирнбауму для оборудования, относящегося к среднему уровню значимости

$$B_i^{cp}, i = 1, 2, \dots, N4. \quad (22)$$

Средние значения значимостей по Бирнбауму \bar{B}_6, \bar{B}_{cp} оценивают по формуле (10), подставляя массивы данных B_i^6, B_i^{cp} . Оценивают их среднеквадратические отклонения σ_6, σ_{cp} .

Для оборудования высокого уровня значимости значимость по Бирнбауму с учетом разброса данных составит $B_6 = \bar{B}_6 + \sigma_6$, вероятность отказа $P_6 = 0,05$ ($P_6 = 1 - \gamma/100$, $\gamma = 95$ %). Для оборудования низкого уровня значимости $B_n = 0$, вероятность отказа P_n может быть приравнена 0,5, поскольку для данного оборудования ремонт проводится по факту отказа и планируется по средней наработке до отказа $T_{III\text{P}} = T_{cp} = T_\gamma$ при $\gamma = 50$ %.

Последнее равенство справедливо для симметричных распределений (например, для нормального распределения). Для используемого при оценке наработки несимметричного DN-распределения значение γ , при котором $T_{cp} = T_\gamma$, будет зависеть от коэффициента вариации v (параметра формы) DN-распределения [5]. Чем меньше коэффициент вариации v , тем более симметричным становится DN-распределение. Для значений $v < 0,2$ $T_{cp} = T_{\gamma=50\%}$; для $v > 0,2$ $T_{cp} = T_\gamma$ при $\gamma < 50$ %. Так, например, при наиболее часто используемом значении $v = 0,75$ $T_{cp} = T_\gamma$ при $\gamma = 36,6$ %.

Таким образом, присваивание вероятности отказа $P_n = 0,5$ (для оборудования низкого уровня значимости) является консервативным, поскольку реальные значения P_n (при $T_{III\text{P}} = T_{cp}$ для DN-распределения) лежат в диапазоне $P_n \in [0,5; 0,72]$. Значение $P = 0,72$ соответствует максимально возможному коэффициенту вариации $v = 1,5$ для следующих видов разрушений: электролиз, миграция зарядов, электродиффузия (см. п. В.3 ДСТУ 3004 [9]).

Для оборудования среднего уровня значимости значимость по Бирнбауму составит

$$B_{cp} = \bar{B}_{cp} + \sigma_{cp}. \quad (23)$$

Подставив уравнение (23) и приведенные выше значения в выражение (20), окончательно получим

$$P_{cp} = \frac{0,025(\bar{B}_6 + \sigma_6)}{0,45(\bar{B}_{cp} + \sigma_{cp}) + 0,05(\bar{B}_6 + \sigma_6)}. \quad (24)$$

Гамма-процентный запас для оборудования среднего уровня значимости составит

$$\gamma_{cp} = (1 - P_{cp}) \cdot 100 \quad (25)$$

Процедура планирования ремонтов при введении РТС

Научно-методологическая часть процедуры планирования РТС состоит в следующем.

1. На основании опыта эксплуатации, результатов ВАБ, классификации оборудования по ОПБ, данных по недовыработкам электроэнергии определяют граничные значения $\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{ср}}$, $\Delta\text{ЧПАЗ}_{\text{min}}$, C_{min} , $C_{\text{ср}}$, $\gamma_{\text{ср}}$ диаграммы ранжирования элементов оборудования. Диаграмма является общей для всех элементов одного энергоблока.

2. Выделяется группа однотипного оборудования, для которого необходимо проанализировать введение стратегии РТС (однотипность оборудования подразумевает общность конструкции, общность условий эксплуатации, одинаковый уровень влияния на безопасность и эффективность эксплуатации энергоблока и одинаковый уровень соответствия ТС определяющим критериям).

3. Для выделенной группы оборудования по эксплуатационной статистике о проведении внеплановых ремонтов определяют длительности данных ремонтов.

4. На основании нормативно-технической документации (НТД) получают график зависимости недовыработки электроэнергии от длительности внепланового ремонта оборудования.

5. На основании моделей и результатов ВАБ соответствующего энергоблока получают оценки значимости по Бирнбауму для базовых элементов, моделирующих функционирование анализируемого оборудования.

6. Определяют численные значения степени влияния анализируемого оборудования на безопасность и эффективность эксплуатации $\{\Delta\text{ЧПАЗ}, C, \theta\}$.

7. Используя диаграмму ранжирования по $\{\Delta\text{ЧПАЗ}, C, \theta\}$ и классу безопасности оборудования по ОПБ, определяют уровень значимости оборудования и соответствующее значение гамма-процентного запаса γ гамма-процентной наработки до отказа (для оборудования низкого уровня значимости оценка проводится по средней наработке до отказа).

8. На основании опыта эксплуатации, экспертных оценок специалистов, эксплуатирующих оборудование, и перечня численных параметров, которые изменяются в процессе проведения плановых КР, СР, ТР оборудования, идентифицируют:

определяющие характеристики ТС оборудования;

текущие значения определяющих характеристик ТС оборудования.

9. Используя физико-статистические методы, определяют интервал времени достижения определяющими параметрами ТС их предельно-допустимых значений.

10. Определяют интервал времени до проведения ближайшего планового ремонта оборудования.

Планирование следующего планового ремонта оборудования проводится после подтверждения его работоспособного состояния и проведения оценки определяющих характеристик его технического состояния.

Этапы перехода к стратегии ремонтов по техническому состоянию

Поэтапный переход от плановых ремонтов к стратегии РТС должен осуществляться в следующем порядке:

проведение работ по подготовительному (аналитическому) этапу;

обоснование методов диагностики и разработка методик, их экспериментальная отработка применительно к измеряемым параметрам и характеристикам технического состояния оборудования;

организация мониторинга численных значений контролируемых параметров;

разработка рабочих программ и нормативной базы по этапам перехода от плановых ремонтов к стратегии РТС.

Указанные работы могут выполняться независимо друг от друга, а сроки и условия их проведения должны быть регламентированы соответствующими рабочими программами и/или НТД.

Во время подготовительного этапа перехода на РТС в соответствии с действующими НТД и решениями регулирующих органов должны быть решены следующие задачи:

- а) анализ существующего положения по ремонту на пилотных энергоблоках Украины;
- б) определение очередности перехода на стратегию РТС исходя из:

вида (типа, подвида) оборудования;

конструктивной разновидности оборудования;

требований к безопасности по ПН АЭ Г-7-008-84 [12], включая изучение отчетов по

ВАБ в части определения значимости оборудования с точки зрения безопасности;

определения значимости оборудования с точки зрения выработки электроэнергии;

требований по надежности оборудования и критичности возможных отказов.

Анализ существующего положения по ремонту включает проведение анализа:

НТД на ремонт, информации о ранее выполненных ремонтах, их частоты (по одинаковым видам, типам, конструктивным разновидностям, рабочим параметрам), последствиях ремонта, заключений о вводе в эксплуатацию отремонтированных изделий;

существующей практики (или ее отсутствие) планирования ремонтов по регламенту РТС на энергоблоке;

конструкторской и эксплуатационной документации;

выявленных отказов, дефектов, неисправностей насосов;

применяемых методов диагностики на АЭС Украины.

По результатам анализа должны быть решены следующие задачи:

1) составляются перечни по видам, типам, конструктивным разновидностям, рабочим параметрам оборудования;

2) для указанного оборудования проводится оценка распределения длительности внепланового ремонта и влияния оборудования на безопасность и эффективность эксплуатации, устанавливаются определяющие параметры ТС, проводится прогнозирование поведения значений определяющих параметров ТС и оценка интервала до ближайшего планового ремонта.

На основании определенных интервалов до ближайшего планового ремонта оборудования корректируется номенклатура работ в ППР энергоблока.

Концепция проведения работ на подготовительном этапе, а также порядок и последовательность постепенного перехода на стратегию РТС должны быть изложены в типовой (общие требования для каждого вида/типа оборудования) и рабочих (для каждого типа оборудования) программах.

Основываясь на опыте внедрения в эксплуатационную деятельность РТС в России (п. 3.16 РД ЭО [13]), целесообразно первоначально применить РТС к оборудованию АЭС Украины, отнесенному к 3-му и 4-му классам безопасности по ОПБ [6].

Внедрение перехода на стратегию РТС должно проходить в увязке с остальными действующими программами НАЭК «Энергоатом». Так, методика РТС может быть использована при назначении плановой периодичности ремонтов в рамках программы управления старением.

Поэтапное внедрение в эксплуатационную практику должно выполняться в соответствии с НП 306.2.106-2005 [14].

Выводы

1. Разработана методология проведения ремонта оборудования АЭС на основании его технического состояния.

2. Сформирована диаграмма ранжирования оборудования по его влиянию на безопасность и эффективность эксплуатации. На основании риск-ориентированного подхода и консервативных допущений обоснованы граничные значения трех уровней значимости оборудования – низкого, среднего и высокого.

3. В зависимости от уровня значимости оборудования установлены значения гамма-процентного запаса наработки до отказа. При этом показано, что для оборудования низкого

уровня значимости планирование возможно по средней наработке до отказа, для оборудования среднего уровня значимости значение γ пропорционально отношению значимости по Бирнбауму оборудования высокого и среднего уровня.

4. Представлены общая процедура планирования ремонтов при внедрении РТС и поэтапность внедрения. Внедрение процедуры РТС на начальном этапе целесообразно применительно к оборудованию 3-го и 4-го классов безопасности по ОПБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила організації технічного обслуговування і ремонту систем та обладнання атомних електростанцій*: СОУ-Н ЯЕК 1.010:2008. – Офіц. вид. – К.: ДП НАЕК «Енергоатом», Міністерство палива та енергетики України, 2008. – 116 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Правила).
2. *Advances in Safety Related Maintenance*: IAEA-TECDOC-1138. – Vienna: IAEA, 2000. – 224 p.
3. *Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants*: IAEA-TECDOC-1590. – Vienna: IAEA, 2007. – 94 p.
4. *ГОСТ 26291-84*. Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей. – [Ограничение срока действия отменено ИУС 11.12.94 г.]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 14 с.
5. *Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения*: ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97) – К.: Изд-во стандартов, 1997. – 46 с.
6. *Загальні положення безпеки атомних станцій*: НП 306.2.141-2008. – К.: Держатомрегулювання України, 2008. – 25 с.
7. *Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants*: IAEA-TECDOC-1200. – Vienna: IAEA, 2001. – 96 p.
8. *Анализ опыта внедрения методики RISI на АЭС США*: отчет по этапу 2 задачи № 7.1 к договору № NRA-01/05-00. – К.: ГП «ГНТЦ ЯРБ», 2001. – 51 с.
9. *Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным*: ДСТУ 3004-95. – К.: Изд-во стандартов, 1995. – 56 с.
10. *Типовые технические требования к методикам оценки технического состояния и остаточного ресурса элементов энергоблоков АС*: РД ЭО-0141-98. – [Дата введения 1999-08-19]. – М.: ГП Концерн «Росэнергоатом», 1999. – 10 с. – (Руководящий документ ГП Концерн «Росэнергоатом»).
11. *ГОСТ 27.002-89*. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 32 с.
12. *Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПН АЭ Г-7-008-84*. – Офиц. изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 141 с. – (Правила и нормы в атомной энергетике).
13. *Правила организации технического обслуживания и ремонта систем и оборудования атомных станций*: РД ЭО 0069-97 [Электронный ресурс]. – [Дата введения 1998-09-01]. – М.: ГП Концерн «Росэнергоатом», 1998. – 138 с. – (Руководящий документ ГП Концерн «Росэнергоатом»). – Режим доступа: <http://www.i-mash.ru/>.
14. *Требования к проведению модификаций ядерных установок и порядку оценки их безопасности*: НП 306.2.106-2005. – Офиц. изд. – К.: Госкомитет ядер. регулирования Украины, 2005. – 14 с. – (Нормы и правила по ядерной и радиационной безопасности).

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ РЕМОНТУ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ОБЛАДНАННЯ АЕС

Ю. О. Комаров

Наведено загальну методологію, що дає змогу спланувати строки проведення ремонту обладнання АЕС з урахуванням його технічного стану, впливу на безпеку та ефективність експлуатації АЕС. Особливу увагу в статті приділено формуванню діаграми ранжирування обладнання, обґрунтуванню граничних значень діаграми, оцінок гамма-процентного запасу напрацювання до відмови для різних, з точки зору впливу на безпеку, груп обладнання. Також наведено загальну процедуру проведення робіт із РТС обладнання АЕС.

Ключові слова: ремонт за технічним станом (РТС), безпека, ефективність експлуатації, напрацювання до відмови, обладнання АЕС.

**METHODOLOGY OF RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE REALIZATION
TO THE NPP EQUIPMENT****Iu. O. Komarov**

The Reliability Centered Maintenance (RCM) Realization to the NPP equipment is widely used in the international practice. Improving of RCM in Ukraine is retard because of the necessary methodological absence for such works. General methodology allowing to plan terms of realization of RCM NPP equipment in view of its technical condition and safety significant and operating efficiency of NPP equipment is submitted in article. The special attention is given to formation of the ranking diagram of the equipment, substantiation of boundary conditions of the diagram, estimation scale of a gamma-percentile operation reserve of time to failure for groups according to safety of the equipment. General procedure of realization of RCM works of the NPP equipment is submitted in article.

Keywords: reliability centered maintenance (RCM), safety, efficiency, failure time, NPP equipments.

Поступила в редакцію 04.11.09