
Управление надёжностью системы измерения расхода теплоносителя ШАДР-32М в реакторе РБМК-1500

**Юозас Аугутис,
Робертас Алзбутас,
Вайдас Матузас**

*Литовский энергетический институт,
Лаборатория безопасности ядерных установок,
Бреслауёс 3,
3035, Каунас*

В данной работе рассматриваются оценка старения и управление надёжностью системы измерения расхода теплоносителя в реакторе РБМК-1500 Игналинской АЭС. Проведен статистический анализ данных измерения технических характеристик расходомеров ШАДР-32М, создана математическая модель старения расходомеров и оценки надёжности, разработана стратегия замены ШАДР-ов, позволяющая поддерживать необходимый уровень надёжности всей системы измерения расхода теплоносителя в реакторе.

Ключевые слова: реактор РБМК-1500, ШАДР, расходомер теплоносителя, система измерения расхода, управление надёжностью, отбраковка

1. ВВЕДЕНИЕ

Расходомеры шариковые ШАДР-32М предназначены для измерения расхода воды, не содержащей механических и газовых примесей в технологических каналах атомных реакторов РБМК-1000 и РБМК-1500. В аварийную систему защиты реактора включены 240 из 1661 расходомеров теплоносителя [1].

Принцип действия расходомера ШАДР-32М основан на круговом движении металлического шара в завихренном потоке. Измеряемый поток при обтекании неподвижной направляющей приобретает вихревое движение, при котором в кольцеобразной камере, замкнутой со стороны входа, за счет сил вязкостного трения образуется обратное вихревое движение. В полном объеме камеры устанавливается устойчивое вращение жидкости. Шар приводится во вращение объемом жидкости, вращающимся в камере. Частота вращения шара пропорциональна скорости измеряемого потока, т. е. объёмному расходу. Угловая скорость вращения шара с помощью магнитоиндукционного преобразователя превращается в электрический импульс, частота которого пропорциональна объёмному расходу [2].

Надёжность системы измерения расхода теплоносителя важна не только для безопасности реактора, но и по экономическим соображениям. При отказе расходомера прекращается работа данного канала до планово-предупредительного ремонта, а при отказе более чем 10 расходомеров в одном квадранте реактора осуществляется остановка реактора.

Заводом-изготовителем был установлен ресурс расходомеров в объеме 32000 часов. В настоящее время на Игналинской АЭС (ИАЭС) принято техническое решение проводить замену ШАДР-ов не по ресурсу, а по их фактическому состоянию, которое определяется по ежегодным диагностическим измерениям. Это позволяет в некоторых случаях значительно продлить срок эксплуатации расходомеров.

Каждый год, непосредственно перед планово-предупредительным ремонтом, производятся диагностические измерения каждого расходомера. Диагностика проводится по двум параметрам: измеряется не менее 10 амплитуд A и периодов T вращения шара расходомера. Для определения критериев отбраковки ШАДР-ов используются соотношения минимальной и максимальной величины

амплитуд A и периодов T . ШАДР является непригодным для дальнейшей эксплуатации, если соответствующие соотношения не достигают определенных величин [3]:

$$K_A = \frac{A_{\min}}{A_{\max}} < 0,6, K_T = \frac{T_{\min}}{T_{\max}} < 0,8. \quad (1)$$

Такая методика замены ШАДР-ов имеет два недостатка. При замене отбракованных расходомеров не оценивается надёжность всей системы на межремонтный период, а также невозможен прогноз количества заменяемых ШАДР-ов и объёма работ на следующий период.

В данной работе разработана методика управления надёжностью всей системы измерения расхода теплоносителя. Главной целью методики является поддержание равномерного уровня надёжности и состояния всей системы за счет стратегии отбора ШАДР-ов для замены. Методика основана на прогнозировании количества заменяемых ШАДР-ов для каждого межремонтного периода. Для оценки состояния всей системы измерения теплоносителя используются два вероятностных критерия: вероятность отказа хоть одного ШАДР-а в реакторе и вероятность отбраковки оставшихся после замены ШАДР-ов.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ РАСХОДОМЕРОВ

В настоящем разделе проанализированы данные диагностических измерений K_A и K_T , проведен их корреляционный и статистический анализ, создана математическая модель надёжности расходомеров. Статистический анализ был выполнен для ежегодных измерений, полученных в период с 1989 по 2001 г., для 3936 расходомеров. Были исследованы также отказы расходомеров в данный период.

На основе статистического анализа данных был исследован вопрос о связи характеристик K_A и K_T со старением ШАДР-ов. Значения измерений были разбиты на отдельные группы по наработке ШАДР-ов. В ходе анализа был замечен линейный характер изменения средних значений K_A и K_T . Такое изменение можно объяснить влиянием старения. При длительной эксплуатации расходомера его механическая часть подвергается износу, и значения главных характеристик прибора ухудшаются. Для оценки значений K_A и K_T были определены функции тренда. Методом наименьших квад-

ратов, минимизируя выражение $\sum_i (K(t) - y_i)^2 \rightarrow \min$ были вычислены значения коэффициентов линейных функций трендов:

$$K_A(t) = -0,0138 t + 0,823; \quad (2)$$

$$K_T(t) = -0,0031 t + 0,8762. \quad (3)$$

Влияние старения подтверждается и коэффициентами корреляции, отражающими зависимость значений K_A и K_T от наработки расходомеров. В 1989–2001 гг. значения коэффициентов корреляции составили $-0,92$ и $-0,57$ соответственно.

Линейное изменение параметров K_A и K_T установлено выше, но, имея диагностические данные измерений для каждого ШАДР-а, можно создать более детальную математическую модель изменения этих параметров и получить прогнозы поведения ШАДР-ов. Для решения этой задачи были приняты следующие условия:

- Критерием отбраковки расходомера теплоносителя является достижение минимальной границы $0,6$ и $0,8$ хотя бы для одного параметра K_A и K_T соответственно.
- Значения коэффициентов амплитуды K_A и периода K_T являются случайными величинами.

Чтобы оценить изменение параметров ШАДР-ов, была составлена линейная модель прогнозирования. Для определения параметров модели все технологические каналы были разделены на 5 групп по энерговыработке. Большинство расходомеров расположены в каналах со средней и большой энерговыработкой.

Для каждой группы оценивались средние значения параметров функции тренда:

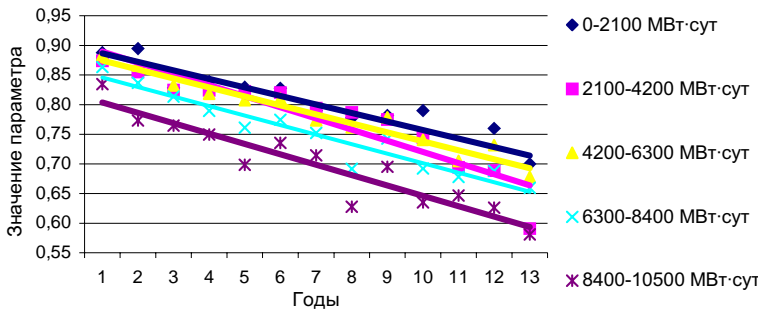
$$\mu_g(t) = k_g t + m_g, \quad (4)$$

где g – группа каналов по энерговыработке ($g = 1, 2, \dots, 5$).

На рис. 1 показаны тренды для параметров K_A в каждой из пяти групп.

Как видно из графика, коэффициенты изменения тренда отличаются немного, однако в этих группах есть различие между высотой трендов.

Далее, для каждого i -ого расходомера, по всем измерениям устанавливается стандартное отклонение от тренда расходомеров Δ_i с наработкой t лет, и дальнейшее поведение средней величины параметра определяется так:


 Рис. 1. Тренды изменения средних значений K_A

$$\mu_{g,i}(t) = k_g t + m_g + \Delta_i(t), \quad (5)$$

$$\text{где } \Delta_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^t (\mu_g(j) - y_i(j))}{t}. \quad (6)$$

g – группа каналов по энерговыработке,
 i – номер расходомера,
 $y_i(j)$ – измерение i -ого расходомера в j -ом году.

Таким образом, тренд каждого расходомера параллельный общему тренду его группы, но повышен или понижен на величину Δ_g . Схема данной модели показана на рис. 2.

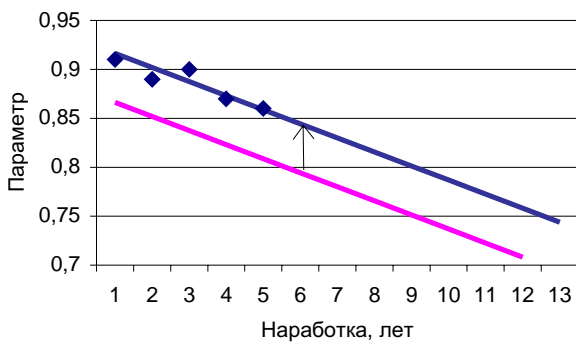


Рис. 2. Определение тренда для отдельного расходомера

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРЕДНЕГО КОЛИЧЕСТВА ОТБАКОВАННЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Далее представлена математическая модель, позволяющая оценить вероятность того, что расходомер теплоносителя данного канала в конце следующего периода не удовлетворит критерию отбраковки. Для прогнозирования среднего количества отбракованных расходомеров был применен метод Монте-Карло.

На основе информации о значениях параметров K_A и K_T в момент времени t можно

прогнозировать средние значения параметров в момент $t + 1$ с использованием линейного выражения изменения значений средних величин:

$$\mu_{g,i}(t+1) = m_g + \Delta_i(t), \quad (7)$$

$$\mu_{g,i}(t+1) = k_g(t+1) + m_g + \Delta_i(t).$$

Используя дисперсию и средние значения величин K_A и K_T , с помощью критерия χ^2 было установлено, что поведение значений K_A и K_T наилучшим образом описывается бета распределением $X \sim \text{Be}(\alpha, \beta)$ [4].

Параметры α и β были оценены методом моментов, сравнивая начальные моменты величины X с эмпирическими их значениями [5]:

$$\begin{aligned} \mu_{g,i}(t+1) &= \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \sigma^2_{g,i}(t+1) = \\ &= \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из этого следует:

$$\beta = \frac{\mu(1-\mu)^2}{\sigma^2} - 1 + \mu, \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\mu\beta}{1-\mu}. \quad (10)$$

Для каждого расходомера M раз генерируются пары величин $X^T_i \sim \text{Be}(\alpha^T_i, \beta^T_i)$ и $X^A_i \sim \text{Be}(\alpha^A_i, \beta^A_i)$, где $i = 1, \dots, 1661$, имитирующие изменение параметров K_A и K_T . Для каждой генерации проверяется удовлетворение критериев отбраковки для величин K_A и K_T и определяется количество непригодных ШАДР-ов, которое обозначим n_i . Среднее значение

$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{k}$ является оценкой числа отбракованных ШАДР-ов в период $t + 1$. Используя уравнение

$$P(\bar{x} - \varepsilon < x < \bar{x} + \varepsilon) = \beta = 0,95, \quad (11)$$

можно найти доверительные интервалы для среднего числа отбракованных ШАДР-ов с уровнем доверия 0,95.

Результаты вычислений для $M = 100$ представлены в таблице.

Таблица. Прогноз бракованных расходомеров в первом блоке реактора до 2004 г.

Год	Прогноз	Доверительный интервал 95%
2002	301	[274–328]
2003	265	[231–300]
2004	282	[246–318]

Оценки вероятностей отбраковки 100 худших расходомеров в реакторе первого блока Игналинской АЭС в 2002 г. показаны на рис. 3.

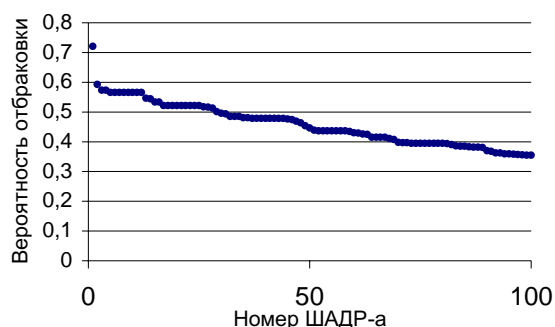


Рис. 3. Оценки вероятностей отбраковки расходомеров ШАДР в реакторе первого блока Игналинской АЭС в 2002 г.

Следует отметить, что вероятности отбраковки достаточно высоки.

4. СТРАТЕГИЯ ЗАМЕНЫ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Управление надежностью системы контроля расхода теплоносителя легче всего проводить через стратегию замены расходомеров. При исследовании уровня надёжности системы ШАДР-ов на Игналинской АЭС легко отметить, что он был неравномерным. Кроме того, в течение нескольких последних лет на-

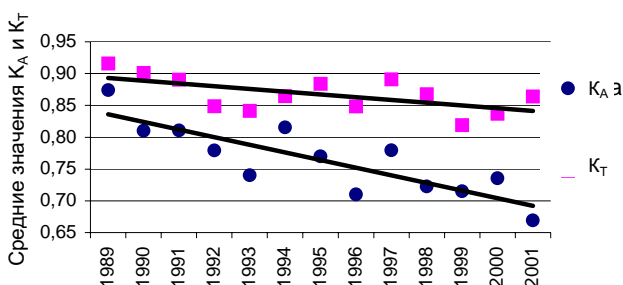


Рис. 4. Изменение средних значений K_A и K_T всех расходомеров

блюдается падение средних значений K_A и K_T всех расходомеров (рис. 4).

На рис. 4 видно, что имеет место постоянное падение средних значений K_A и K_T всех расходомеров, т. е. можно сделать вывод, что в среднем менялось недостаточное количество расходомеров для поддержки необходимого уровня всей системы. Суть разработанной стратегии замены ШАДР-ов заключается в том, что в начале каждого межремонтного периода реактора определяется количество ШАДР-ов, необходимое для поддержки постоянного требуемого уровня надёжности всей системы измерения расхода теплоносителя.

Одной из главных характеристик надёжности расходомеров является вероятность их отказа. Интенсивность отказов ШАДР-ов составляет $4,2E-04$ отказов в час. Для оценки вероятности отказа ШАДР-а в течение следующего года эксплуатации блока необходимо учесть имеющиеся результаты диагностики данного ШАДР-а. Статистически была оценена зависимость между величинами параметров расходомеров K_A и K_T и вероятностями отказов (рис. 5).

Имея функциональные зависимости между величинами параметров расходомеров K_A и K_T и вероятностями их отказов, можно оценивать вероятности отказов расходомеров в следующем году. Максимальные значения оценок вероятностей отказов ШАДР-ов в 2002 г. для реактора первого блока составили от 0,05 до 0,18.

Интегральной характеристикой надёжности всей системы контроля расхода теплоносителя является оценка вероятности отказа хотя бы одного расходомера в период между планово-предупредительными ремонтами. Вероятности отказа хотя бы одного ШАДР-а в каждом году довольно велики и составляют от 0,344 до 0,838. Это можно объяснить тем, что меняя

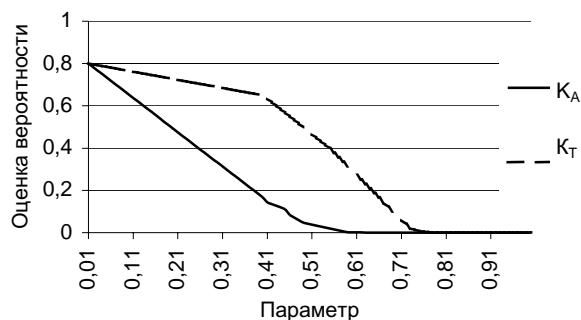


Рис. 5. Зависимость между величинами параметров расходомеров K_A и K_T и вероятностями отказов

ШАДР-ы по существующей методике оставляется некоторое количество расходомеров, имеющих очень большую наработку, а также ШАДР-ы, у которых значения параметров несколько хуже допустимых норм.

В качестве примера значения критериев отбраковки ШАДР-ов и отказа ШАДР-ов были выбраны вероятности 0,5 и 0,2 соответственно. Эти значения соответствуют многолетним средним показателям надёжности системы измерения расхода теплоносителя в реакторе первого блока Игналинской АЭС.

По созданной методике и предложенным критериям было определено, какое количество ШАДР-ов было необходимо менять в реакторе с 1990 по 2001 г. На рис. 6 показано сравнение количества ШАДР-ов, замененных по методике Игналинской АЭС и по методике, разработанной в данной работе.

Несмотря на то, что общее число ШАДР-ов, замененных по методике Игналинской АЭС, и общее число ШАДР-ов по прогнозу мало отличаются (разница до 2001 г. составила всего 92 расходомера), меняя их по прогнозам, надёжность системы измерения расходов будет значительно более равномерной.

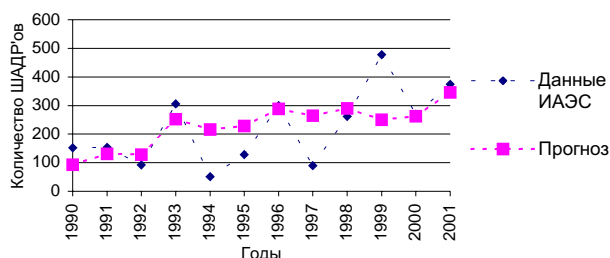


Рис. 6. Сравнение числа замененных расходомеров по методике Игналинской АЭС и по прогнозам отбраковки

5. ВЫВОДЫ

1. Проведённый статистический анализ старения ШАДР-ов показал, что существует линейная зависимость между значениями коэффициентов K_A , K_T и наработкой расходомеров. Надёжность системы измерения расхода теплоносителя за последние 10 лет имеет тенденцию ухудшения.

2. Разработаны методика управления надёжностью системы измерения расхода теплоносителя и стратегия замены ШАДР-ов, основанная на вероятностных критериях, кото-

рые позволяют поддерживать требуемый уровень надёжности этой системы.

Поступило
18.10.2002

Литература

1. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500, A Source Book Extended and Updated Version. Kaunas, 1998.
2. Расходомер шариковый ШТОРМ-8А-55 и ШТОРМ-32М-55. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1982.
3. Лысиков Б. В., Прозоров В. К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
4. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надёжности. Москва: Наука, 1965.
5. Прохоров Ю. В., Розанов Ю. А. Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. Москва: Наука, 1987.

Juozas Augutis, Robertas Alzbutas, Vaidas Matuzas

RBMK-1500 REAKTORIAUS ŠILUMNEŠIO SRAUTO MATUOKLIŲ ŠADR -32M SISTEMOS PATIKIMUMO VALDYMAS

S a n t r a u k a

Ignalinos AE RBMK tipo reaktoriaus aušinimo sistemoje naudojami šilumnešio srauto matuokliai ŠADR-32M. ŠADR gamintojų nustatytas eksploatacijos išteklis sudaro 32000 val. Laikantis gamintojų nurodymų, ŠADR matuokliai turi būti keičiami pasibaigus jų eksploatacijos ištekliai. Siekiant prailginti ŠADR eksploatacijos laiką vadovaujamosi ne gamintojo nurodytu ištekliai, o faktine ŠADR būkle. Įtraukus ŠADR netinkamumo eksploatuoti kriterijus kasmet atliekami jų diagnostiniai matavimai ir keičiami kriterijų netenkinantys matuokliai.

Darbe išanalizuota gedimų bei diagnostinių matavimų statistika ir patikrinti ŠADR netinkamumo eksploatuoti įvertinimui naudojami kriterijai. Pasiūlyti nauji ŠADR keitimo kriterijai bei įvertintas jų efektyvumas. Sudaryta ŠADR keitimų strategija, įgalinanti numatyti keičiamų matuoklių skaičių ir užtikrinti reikalaujamą šilumnešio srauto matuoklių sistemos RBMK-1500 reaktoriuose patikimumo lygį.

Raktažodžiai: RBMK-1500 tipo reaktorius, ŠADR, šilumnešio srauto matuoklis, matavimo sistema, patikimumo valdymas, brokavimas

Juozas Augutis, Robertas Alzbutas, Vaidas Matuzas

RELIABILITY MANAGEMENT OF COOLANT FLOW INDICATOR SHADR 32-M SYSTEM IN RBMK-1500 REACTOR

S u m m a r y

In the cooling system of the RBMK-1500 reactor at the Ignalina Nuclear Power Plant, coolant flow indicators

SHADR-32M are used. The manufacturer has established a 32000 h resource of coolant flow indicators. Under instructions of the manufacturer, the indicators should be replaced upon termination of their resource. To prolong the service time of indicators, they are replaced not according to the resource indicated of the manufacturer but depending on their actual state, which is estimated by annual diagnostic measurements.

In this paper, all data on failures and diagnostic measures as well as on the used criteria of rejection are

analyzed, as well as new criteria of rejection are offered, and their efficiency is estimated. The strategy of SHADR-32M replacement allows to plan the amount of replaceable indicators, and to maintain the required level of safety of the coolant flow indicator system in the RBMK-1500 reactor.

Key words: RBMK-1500 reactor, SHADR, heat flow meter, measurement system, reliability management, replacement