

Оценка надежности насосов Белоярской АЭС по данным эксплуатации

И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Г. А. ШАШАРИН, Г. А. КИРЕЕВ, А. И. КЛЕМИН, Е. Ф. ПОЛЯКОВ,
М. М. СТРИГУЛИН, Е. А. ШИВЕРСКИЙ

УДК 621.311.2:621.039:621.68

Специфика работы АЭС затрудняет применение общепринятых методов оценки надежности отдельных элементов оборудования (например, насосов) по данным эксплуатации. Основная трудность заключается в следующем. Высокая эксплуатационная надежность большинства элементов оборудования АЭС обеспечивается за счет регулярных профилактических ремонтов. Благодаря этим мероприятиям сравнительно редко происходят отказы элементов оборудования. Под отказом мы понимаем такое нарушение работоспособности оборудования, когда требуется его немедленная остановка и проведение аварийного ремонта. Очевидно, если оценивать надежность некоторого элемента оборудования, ориентируясь только на статистику его отказов, то мы получим характеристики надежности элемента при конкретном режиме обслуживания (например, при заданной периодичности и характере профилактических ремонтов*). Если режим обслуживания изменится, то показатели надежности также будут меняться.

Поскольку отказы обычно происходят мало, то для более полной и точной оценки надежности оборудования недостаточно основываться только на статистике отказов, необходимо учитывать и статистику неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации оборудования. Неисправностью будем называть такой дефект, при котором в течение некоторого времени сохраняются основные рабочие параметры оборудования (при этом не требуется немедлен-

ной остановки) и который устраняется в процессе очередного текущего или ближайшего аварийного ремонта.

Неисправности обнаруживаются как во время ремонта, так и в процессе эксплуатации по сопутствующим признакам (например, усиление вибраций, изменение шума, увеличение температуры нагрева и т. д.), и, как правило, трудно точно установить момент возникновения неисправностей. Однако с достаточной достоверностью можно считать, что неисправности возникают в течение предшествующего очередному ремонту интервала времени эксплуатации Δt . Так как величина этого интервала обычно мала по сравнению со сроком службы оборудования, то можно без особого ущерба для точности оценки надежности принять, что моменты возникновения неисправностей равномерно распределены на интервале времени Δt .

Итак, при анализе эксплуатационной надежности оборудования АЭС, в частности насосов, целесообразно рассматривать три потока событий: поток отказов, поток неисправностей и суммарный поток. Очевидно, что первый из них позволяет судить о надежности насоса при конкретном режиме и характере обслуживания, принятом на АЭС в рассматриваемый период эксплуатации. В свою очередь, суммарный поток более консервативен, менее подвержен влиянию режимов обслуживания. Поскольку неисправности можно рассматривать как потенциальные источники отказов, то суммарный поток позволяет судить о нижней границе надежности оборудования. Параметры суммарного потока применяются при расчетах средней наработки оборудования на отказ или неисправность, при оценке необходимого количества запчастей и материалов, при выборе периодичности планово-предупредительных ремонтов и пр.

* Указанная периодичность часто устанавливается эмпирически. Для выбора оптимальной периодичности профилактического ремонта необходимо проведение технико-экономического анализа, при этом исходными данными следует считать показатели надежности оборудования, определению которых и посвящается настоящая статья.

Сбор статистической информации

В качестве объектов для исследования надежности были выбраны основные насосы первого и второго блоков БАЭС (табл. 1). Все насосы высокооборотные; питательные насосы

По первому блоку были собраны статистические данные о работе насосов за период с 1965 по 1970 г., а по второму блоку — с 1968 по 1970 г., т. е. практически за весь период работы блоков на мощности по 1970 г. включительно. В качестве источника информации использо-

Номинальные характеристики насосов БАЭС

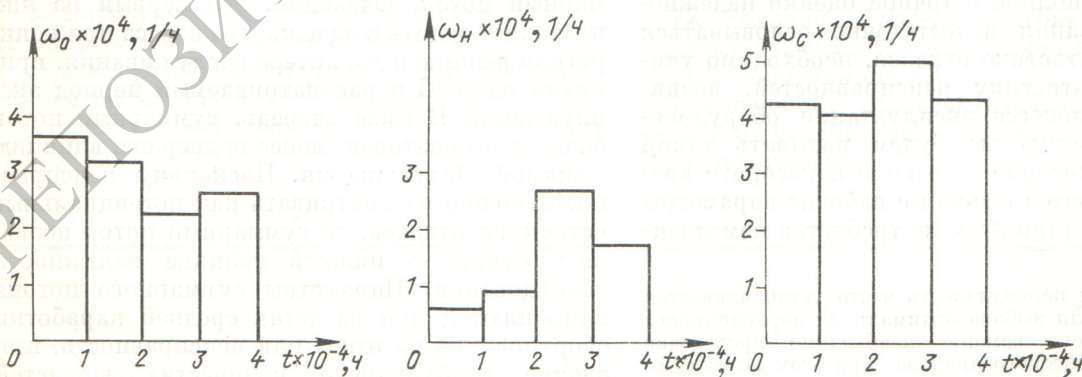
Таблица 1

Наименование насоса	Блок БАЭС	Тип насоса	Число насосов данного типа	Мощность привода, кВт	Напор, кг/см ²	Производительность, м ³ /ч	Скорость вращения, об/мин	Температура перекачиваемой среды, °С
Главный циркуляционный насос (ГЦН)	I	ЦЭН-133	3	520	10,0	650*	3000**	310
		ЦЭН-133/3	1					
Питательный электронасос (ПЭН)	II	ЦЭН-133/3	4	750	15,6	650*	3000**	310
		5Ц10	3	2000	158,0	270	2970	160
Насос охлаждения системы регулирования реактора (НОР)	I	ПЭ-500-180-2	4	4000	180,0	500	2985	160
		ЦЭНОР-133	2	55	6,0	100	3000	60
Насос охлаждения системы защиты (НОЗ)	II	ЦЭНОР-133/3	2	65	7,0	125	3000*	60
		ЦЭНОЗ-133	2	19,5	6,5	12	3000*	60
	II	ЦЭНОЗ-133/3	2	19,5	6,5	12	3000*	60

* Производительность выражена в т/ч.
** Синхронная скорость вращения.

типовые и весьма мощные, остальные насосы специальные, герметичного исполнения, в которых ротор электродвигателя вместе с ротором насоса вращается в перекачиваемой среде и отделен от статора электродвигателя тонкой герметичной нихромовой перегородкой. Подшипниковые пары этих насосов смазываются и охлаждаются предварительно охлажденной перекачиваемой водой. Вращающиеся детали подшипников выполнены из сплавов высокой твердости, а вкладыши — из специальных пластмасс.

вались оперативные и ремонтные журналы журналы дефектов, ведомости учета продолжительности работы основных насосов и другие документы. При этом фиксировались следующие данные: 1) наработки между двумя последовательными пусками и остановами оборудования с указанием причин останова (отказ, текущий или капитальный ремонт, перевод в резерв, плановый или аварийный останов блока); 2) характер отказа; 3) продолжительность и трудоемкость ремонта; 4) характер ремонтных



Р и с. 1. Гистограммы параметров потоков отказов ω₀, неисправностей ωн и суммарного потока ωс для ГЦН первого блока.

работ (аварийных и текущих) с указанием выявленных неисправностей и замененных деталей.

Обработка статистических данных

Определение закона распределения времени работы между отказами. Для применения существующих методов определения закона распределения времени безотказной работы необходимо иметь достаточный объем статистических данных. Такая статистика накоплена для ГЦН первого блока и ПЭН первого и второго блоков.

На рис. 1 приведены гистограммы изменения во времени параметров потоков (среднего числа событий в единицу времени [1]) отказов, неисправностей и суммарного потока для ГЦН первого блока. Из рисунка видно, что параметр потока отказов с течением времени уменьшается. Последнее можно объяснить модернизацией ГЦН первого блока, которая заключалась в изменении конструкции узла крепления нихромовой перегородки, служащей для герметизации полости ротора от статора и в реконструкции подшипникового узла с заменой материалов трущихся пар на более надежные.

В связи с этим весь рассматриваемый интервал эксплуатации ГЦН первого блока был разбит на два периода: до и после модернизации. Показатели надежности ГЦН первого блока рассчитывались для каждого периода отдельно.

Аналогичное разбиение на два периода было проделано и для ПЭН второго блока, где также отчетливо виден эффект их модернизации, в результате которой была изменена конструкция рабочего колеса с целью снижения действующих на него нагрузок, а также усовершенствованы сальниковые уплотнения и разгрузочная камера.

Для остальных насосов рассматривался весь период эксплуатации в целом.

На рис. 2 приведены гистограммы эмпирической плотности распределения вероятностей времени работы между отказами для первого и второго периодов работы ГЦН первого блока. Вид гистограмм позволяет предположить экспоненциальный закон распределения. Правильность такой гипотезы была проверена по критерию согласия χ^2 -пирсона. Согласованность экспериментального и теоретического (экспоненциального) законов распределения оказалась хорошей (вероятность $P = 1 - F(\chi^2) = 0,3$, а достаточно $P = 0,05$). Для ПЭН первого и второго блоков также подтвердилось экспоненциальное распределение времени работы между отказами на высоком уровне значимости ($P = 0,3$ и $P = 0,9$ соответственно).

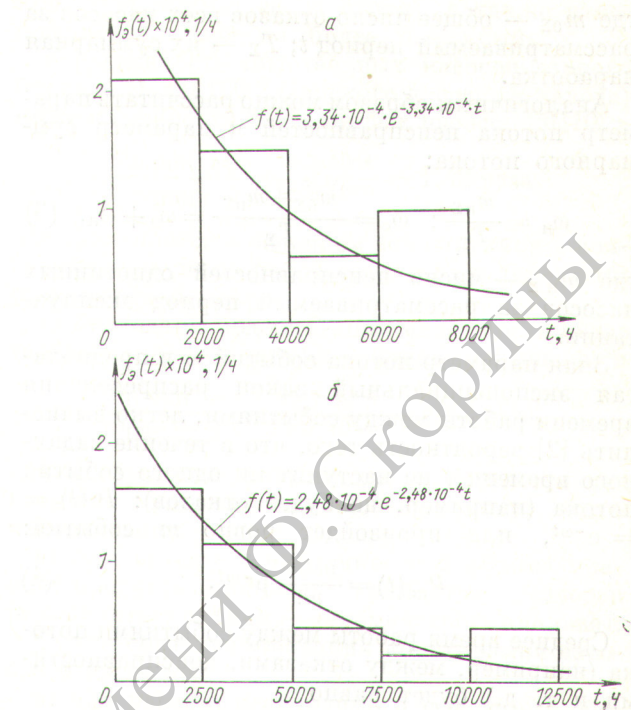


Рис. 2. Законы распределения времени работы между отказами для первого (а) и второго (б) периодов эксплуатации ГЦН первого блока.

енциальное распределение времени работы между отказами на высоком уровне значимости ($P = 0,3$ и $P = 0,9$ соответственно).

Определение количественных показателей надежности. Основным показателем надежности ремонтируемых изделий в соответствии с ГОСТ 13377—67 [1] является параметр потока отказов $\omega(t)$, который представляет собой среднее число отказов за единицу времени около момента t .

Параметр потока отказов определяется по формуле

$$\omega_0 t = \frac{\sum_{i=1}^N m_{0i}(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_{0i}(t)}{N \Delta t}, \quad (1)$$

где N — число насосов одинакового типа и назначения; $m_{0i}(t)$ — число отказов i -го насоса к моменту наработки t .

В случае экспоненциального закона распределения времени работы между отказами, т. е. когда на рассматриваемом интервале t $\omega_0(t) = \omega_0 = \text{const}$, формула (1) существенно упрощается:

$$\omega_0 = \frac{m_{0\Sigma}}{T_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где $m_{0\Sigma}$ — общее число отказов всех насосов за рассматриваемый период t ; T_{Σ} — их суммарная наработка.

Аналогичным образом можно рассчитать параметр потока неисправностей и параметр суммарного потока:

$$\omega_n = \frac{m_{n\Sigma}}{T_{\Sigma}}; \quad \omega_c = \frac{m_{0\Sigma} + m_{n\Sigma}}{T_{\Sigma}} = \omega_0 + \omega_n, \quad (3)$$

где $m_{n\Sigma}$ — число неисправностей однотипных насосов за рассматриваемый период эксплуатации.

Зная параметр потока событий ω и предполагая экспоненциальный закон распределения времени работы между событиями, легко вычислить [2] вероятность того, что в течение заданного времени t не наступит ни одного события потока (например, не будет отказов): $P(t) = e^{-\omega t}$, или произойдет ровно m событий:

$$P_m(t) = \frac{(\omega t)^m}{m!} e^{-\omega t}. \quad (4)$$

Среднее время работы между событиями потока (например, между отказами, неисправностями и т. д.) будет равно

$$I = \frac{1}{\omega}. \quad (5)$$

Точность определения параметров потоков ω_0 , ω_n , ω_c можно оценить, если найти для этих величин доверительные интервалы, т. е. такие интервалы, в которых с заданной доверитель-

ной вероятностью α находятся истинные значения $\omega_0^{ист}$, $\omega_n^{ист}$ и $\omega_c^{ист}$. В соответствии с работой [3] такие интервалы равны:

$$I_{\alpha, \omega} = \left(\omega_{ниж} = \frac{\omega}{r_1}; \quad \omega_{верх} = \frac{\omega}{r_2} \right), \quad (6)$$

где r_1, r_2 — коэффициенты, зависящие от объема исходных статистических данных, т. е. от числа m_{Σ} [см. выражения (2), (3)] и величины α .

Среднее время восстановления насоса после аварийного останова вычислялось по формуле

$$T_B = \frac{1}{m_{0\Sigma}} \sum_{i=1}^{m_{0\Sigma}} t_i, \quad (7)$$

где t_i — время устранения i -го отказа (продолжительность i -го аварийного ремонта). Зная среднюю наработку на отказ $T_0 = \frac{1}{\omega_0}$ и величину T_B , можно вычислить коэффициент готовности насоса, равный вероятности застать насос работоспособным в произвольный момент времени между плановыми ремонтами: $K_r = \frac{I_0}{I_0 + T_B}$.

Показатели надежности насосов, рассчитанные по приведенным формулам, даны в табл. 2.

Анализ причин отказов и неисправностей насосов. Анализ работы насосов показал, что наиболее слабыми элементами в их конструкции являются: у ГЦН — подшипниковые узлы, рубашки статоров, крепеж; у ПЭН — сальнико-

Таблица 2

Показатель	Первый блок					Второй блок				
	ГЦН первый период	ГЦН второй период	ПЭН	НОР	НОЗ	ГЦН	ПЭН первый период	ПЭН второй период	НОР	НОЗ
$\omega_0 \times 10^4, 1/ч$	3,3	2,48	6,8	0,82	0,58	0,44	15,7	9,7	2,74	1,56
$I_{0,95}^* \omega_0 \times 10^4, 1/ч$	2,1	1,50	4,96	0,36	0,16	0,15	10,9	5,8	1,29	0,28
$\omega_n \times 10^4, 1/ч$	4,6	3,88	9,3	1,6	1,49	1,0	21,2	15,4	5,17	4,9
$I_{0,95}^* \omega_n \times 10^4, 1/ч$	0,8	2,19	12,0	1,37	1,34	2,97	14,7	8,2	0,78	1,56
$\omega_c \times 10^4, 1/ч$	0,34	1,35	9,6	0,76	0,63	2,13	10,2	4,6	0,14	0,28
$I_{0,95}^* \omega_c \times 10^4, 1/ч$	1,55	3,38	14,8	2,34	2,53	4,0	20,0	13,6	2,44	4,9
$\omega_c \times 10^4, 1/ч$	4,1	4,6	18,8	2,19	1,92	3,41	30,4	17,2	3,52	3,12
$I_{0,95}^* \omega_c \times 10^4, 1/ч$	2,9	3,53	15,8	1,35	1,05	2,45	20,3	12,0	1,84	1,07
$T_0, ч$	3000	4040	1450	12 200	17 250	22 700	638	1060	3650	6401
$T_B, ч$	20	20	11	8,3	10	13,8	21	21	11,4	17,5
K_r	0,993	0,996	0,992	0,999	0,999	0,999	0,968	0,980	0,997	0,997
$S^{**},$ человеко-час	20	20	23	—	—	53	91	91	—	—

* Верхняя и нижняя цифры в этой строке означают соответственно нижнюю и верхнюю доверительные границы, в которых с вероятностью $\alpha = 0,95$ лежит истинное значение параметра ω .
 ** Трудозатраты на аварийный ремонт.

вые уплотнения, подшипниковые узлы, разъемы. Вследствие выхода из строя указанных элементов происходит более половины отказов этих насосов.

Выводы

1. Впервые проведен анализ и получены количественные характеристики эксплуатационной надежности основных насосов БАЭС. Используемая методика сбора и обработки статистических данных может быть применена для оценки надежности большинства элементов оборудования АЭС.

2. Показано, что предположение об экспоненциальном законе распределения наработок между соседними отказами ГЦН первого блока, ПЭН первого и второго блоков не противоречит статистическим данным. Есть основания предполагать, что экспоненциальный закон справедлив также для насосов других типов. Дальнейшее накопление и анализ статистической информации позволит подтвердить этот вывод.

3. Количественная оценка надежности оборудования позволяет объективно сравнивать надежность различных типов оборудования, а также оценивать эффект его модернизации. Это можно проиллюстрировать следующими примерами:

а) модернизация ГЦН первого блока (см. выше) повысила надежность этих насосов, в частности уменьшила параметр потока отказов в

$$\frac{\omega_{\text{ГЦН I, 1n}}}{\omega_{\text{ГЦН I, 2n}}} = \frac{3,3 \cdot 10^{-4}}{2,48 \cdot 10^{-4}} = 1,33 \text{ раза};$$

б) надежность ГЦН второго блока (ЦЭН—133/3) выше, чем надежность ГЦН первого блока (ЦЭН—133) в

$$\frac{\omega_{\text{ГЦН I, 2n}}}{\omega_{\text{ГЦН II}}} = \frac{2,48 \cdot 10^{-4}}{0,44 \cdot 10^{-4}} = 5,65 \text{ раза};$$

это объясняется в основном изменением конструктивной схемы статора электродвигателя таким образом, что нихромовая рубашка испытывает меньшие усилия (которые могут быть

причиной выхода ее из строя), а также заменой вентилятора на более надежный;

в) надежность питательных насосов второго блока (ПЭ-500-180-2 Сумского насосного завода) ниже надежности более старых насосов (5Ц10) в

$$\frac{\omega_{\text{ПЭН II, 2n}}}{\omega_{\text{ПЭН I}}} = \frac{9,7 \cdot 10^{-4}}{6,8 \cdot 10^{-4}} = 1,42 \text{ раза},$$

что объясняется в основном недостатками в конструкции первого рабочего колеса и дефектами при изготовлении;

г) благодаря модернизации надежность питательных насосов второго блока повышена в

$$\frac{\omega_{\text{ПЭН II, 1n}}}{\omega_{\text{ПЭН II, 2n}}} = \frac{15,7 \cdot 10^{-4}}{9,7 \cdot 10^{-4}} = 1,62 \text{ раза}.$$

4. Полученные результаты, в частности показатели надежности насосов, могут быть использованы:

а) при выборе периодичности и объема планово-предупредительных ремонтов насосов (в результате технико-экономического анализа);

б) для совершенствования конструкции насосов и их узлов;

в) для расчета необходимого резервного оборудования;

г) в совокупности с данными о надежности другого оборудования при оценке общей надежности БАЭС, а также при прогнозировании надежности вновь проектируемых АЭС.

В заключение хотелось бы отметить что сбор статистических данных о надежности оборудования АЭС следует вести непрерывно. Для этого, а также для обеспечения полноты и достоверности статистической информации необходимо ввести единую централизованную систему учета и сбора этих данных на объектах.

Поступила в Редакцию 12/VIII 1971 г.
В окончательной редакции 2/II 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 13377—67. Надежность в технике. Термины.
- А. И. К л е м и н, М. М. С т р и г у л и н. Некоторые вопросы надежности ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1968.
- Я. Б. Ш о р, Ф. И. К у з ь м и н. Таблицы для анализа и контроля надежности. М., «Сов. радио», 1968.