

**Международный Форум по обмену информацией "Анализ безопасности АЭС,
эксплуатирующих реакторы типа ВВЭР и РБМК"
11-15 октября 1999г., г.Обнинск, Россия**

**База Данных по надежности элементов для использования в
Вероятностном анализе безопасности энергоблока №5 ЗАЭС**

А.Н. Макарецв, А.Н. Царев
Запорожская атомная электростанция

Введение

Данная база разработана для выполнения ВАБ I уровня энергоблока №5 ЗАЭС. Работа выполнялась двумя организациями ОАЭТ "ЭнергоатомИнжинирингСервис" и ООО "Новатор-Киев". Финансирование выполнения ВАБ I уровня энергоблока №5 ЗАЭС осуществляется Департаментом энергетики США (US DOE) в рамках Международной программы ядерной безопасности (INSP).

Сбор специфических данных проведен для энергоблока №5 за период времени 1993-1997 годов.

Основные принципы группирования оборудования

Формирование групп оборудования проводилось на основании "Базы данных по системам", разработанной в рамках выполнения проекта и наличия статистических данных по отказам и наработкам оборудования.

Для каждого типа оборудования были определены основные критерии, по которым проводилось первоначальное определение групп. Затем были рассмотрены статистические данные по отказам и наработкам, сделаны определенные допущения.

Ниже приводятся основные принципы и допущения, сделанные при определении групп для каждого вида оборудования.

Тепломеханическое оборудование

1 Насосы

- конструкция (тип, расположение ротора, количество ступеней);
- режим работы;
- параметры работы (производительность, напор);
- режимы опробования и испытаний;
- наличие статистических данных.

При объединении насосов QF11D01,02 и QF21,31D01,02 сделано допущение, что разница конструкций насосов не влияет на механизм возникновения отказов.

2 Вентиляторы, кондиционеры

- конструкция;
- режим работы.

3 Баки

- состав рабочей среды;
- параметры рабочей среды;
- конструкция.

4 Фильтры и сетки

- конструкция;
- состав и параметры рабочей среды.

5 Теплообменники, охладители, конденсаторы

- состав рабочей среды;
- параметры рабочей среды;
- конструкция;

- режим работы.

6 Арматура

1) Электрифицированная арматура

- отношение к системам безопасности;
- периодичность опробования;
- параметры рабочей среды ($P < 22 \text{ кгс/см}^2$ или $P \geq 22 \text{ кгс/см}^2$);
- номенклатура отказов;
- достаточность статистики.

Сделано допущение, что при работе арматуры СНЭ периодичность опробования не влияет на механизм возникновения отказов.

2) Локализирующая арматура

- рабочая среда;
- параметры рабочей среды ($P < 22 \text{ кгс/см}^2$ или $P \geq 22 \text{ кгс/см}^2$).

3) Регулирующая арматура

- периодичность опробования;
- параметры рабочей среды ($P < 22 \text{ кгс/см}^2$ или $P \geq 22 \text{ кгс/см}^2$);
- месторасположение (в ГО или вне ГО).

4) Предохранительная арматура

- конструкция;
- состав и параметры рабочей среды.

5) Обратные клапана

В связи с нулевой статистикой по отказам сделано допущение, что механизм отказа не зависит от параметров среды и расположения клапана, поэтому объединение в группы проведено только, исходя из номенклатуры показателей надежности.

6) Ручная арматура

В связи с нулевой статистикой по отказам сделано допущение, что механизм отказа не зависит от параметров среды и расположения арматуры, поэтому объединение в группы проведено только, исходя из номенклатуры показателей надежности.

Электротехническое оборудование

Группы электротехнического оборудования составлялись на основании следующих принципов:

- одинаковая конструкция;
- номинальные параметры (номинальное напряжение, номинальный ток, номинальная мощность);
- режим работы.

Оборудование КИП

Группы оборудования по КИП составлялись на основании следующих принципов:

- одинаковая конструкция;
- наличие источника обобщенных данных.

Методы расчета показателей надежности

Выбор номенклатуры и расчет показателей надежности выполнялся для групп оборудования на основании собранных специфических данных по наработкам и отказам оборудования.

Номенклатура показателей надежности определялась, исходя из возможности восстановления оборудования и режимов работы. При этом для периодически опробуемого оборудования при выборе номенклатуры показателей надежности принимались следующие допущения:

- после опробования, характеристики оборудования соответствуют характеристикам нового;
- при возникновении отказов оборудования в период между опробованиями, время восстановления оборудования пренебрежимо мало по сравнению со временем между опробованиями.

1 Первый метод – расчет показателей надежности по специфическим данным:

1) для оборудования с отказами “невыполнение функции”, “отказ в работе”, “отказ на изменение положения”, “отказ на сохранение положения”, “ложная работа”, “засорение”, “течь”, “разрыв” рассчитывались значения интенсивности отказов и фактора ошибки по формулам:

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}} \quad (1)$$

нижняя граница доверительного интервала:

$$\lambda_H = \frac{\chi_{0,05}^2(2n)}{2T} \quad (2)$$

верхняя граница доверительного интервала:

$$\lambda_B = \frac{\chi_{0,95}^2(2n)}{2T} \quad (3)$$

фактор ошибки:

$$f_\lambda = \sqrt{\frac{\lambda_B}{\lambda_H}} \quad (4)$$

где: T_{cp} – средняя наработка до отказа;

T – суммарная наработка;

n – количество отказов.

2) для оборудования с отказами “отказ на запуск”, “отказ на открытие”, “отказ на включение”, “отказ на закрытие”, “отказ на отключение” рассчитывались значения вероятности отказа на требование и фактора ошибки по формулам:

вероятность отказа на требование:

$$P_{TP} = \frac{n_1}{m} \quad (5)$$

нижняя граница доверительного интервала:

$$P_H = \frac{n_1}{n_1 + (m - n_1 + 1) F_{0,95}[2m - 2n_1 + 2, 2m]} \quad (6)$$

верхняя граница доверительного интервала:

$$P_B = \frac{(n_1 + 1) F_{0,95}[2n_1 + 2, 2m - 2n_1]}{(m - n_1) + (n_1 + 1) F_{0,95}[2n_1 + 2, 2m - 2n_1]} \quad (7)$$

фактор ошибки:

$$f_P = \sqrt{\frac{P_B}{P_H}} \quad (8)$$

где: m – суммарное количество требований;

n_1 – количество отказов.

2 Второй метод – расчет показателей надежности с использованием обобщенных данных по наработкам и отказам оборудования.

В случаях, когда специфических данных о наработках и отказах оборудования недостаточно, использовались обобщенные данные. Расчеты проводились методом Байеса путем комбинирования специфических и обобщенных данных по формулам:

1) для апостериорного значения интенсивности отказов:

$$\lambda = \frac{2(N + n) + 1}{2(T + t)} \quad (9)$$

нижняя граница доверительного интервала:

$$\lambda_H = \frac{\chi_{0,05}^2 (2(N+n)+1)}{2(T+t)} \quad (10)$$

верхняя граница доверительного интервала:

$$\lambda_B = \frac{\chi_{0,95}^2 (2(N+n)+1)}{2(T+t)} \quad (11)$$

фактор ошибки:

$$f_\lambda = \sqrt{\frac{\lambda_B}{\lambda_H}} \quad (12)$$

где: n – количество отказов, определенное по специфическим данным;
 N – количество отказов, определенное по обобщенным данным;
 T – суммарная наработка, определенная по специфическим данным;
 t – суммарная наработка, определенная по обобщенным данным.

2) для апостериорного значения вероятности отказа на требование:

$$P_o = \frac{2(n_1 + N) + 1}{2(m + M) + 1} \quad (13)$$

нижняя граница доверительного интервала:

$$P_H = \frac{N_0}{N_0 + (2M_0 - 2N_0) F_{0,95}[2N_0; 2M_0 - 2N_0]} \quad (14)$$

верхняя граница доверительного интервала:

$$P_B = \frac{N_0 F_{0,95}[2N_0; 2M_0 - 2N_0]}{(2M_0 - 2N_0) + N_0 F_{0,95}[2N_0; 2M_0 - 2N_0]} \quad (15)$$

фактор ошибки:

$$f_P = \sqrt{\frac{P_B}{P_H}} \quad (16)$$

где: n_1 – количество отказов, определенное по специфическим данным;
 N – количество отказов, определенное по обобщенным данным;
 m – суммарное количество требований, определенное по специфическим данным;

M – суммарное количество отказов, определенное по обобщенным данным;

N_0 – суммарное количество отказов для всей выборки;

M_0 – суммарное количество требований для всей выборки.

3 Третий метод – расчет показателей надежности с использованием обобщенных данных по наработкам и рассчитанных значений показателей надежности.

Для оборудования, по которому нет специфических и обобщенных данных об отказах оборудования, но имеются данные по наработкам и рассчитанные значения показателей надежности (обобщенные данные), использовалась программа BAYESIAN.xls, разработанная Scientech. При этом было сделано допущение о том, что фактор ошибки $EF=10$, так как в большинстве использованных обобщенных данных имеются только средние значения показателя надежности и нет рассчитанных значений в 95% и 5% точках доверительного интервала.

4 Четвертый метод применялся для расчетов показателей надежности оборудования, для которого нет специфических данных по отказам оборудования, а также нет обобщенных данных. Данный метод основывается на использовании неинформативного распределения, формула которого для случая экспоненциального распределения имеет следующий вид:

$$\lambda = \frac{n + 0,5}{T}, \quad (17)$$

где n – количество отказов в течение наработки T .

Для биномиального распределения записывается как:

$$P = \frac{n + 0,5}{m + 1}, \quad (18)$$

где n – количество отказов;

m – количество требований на срабатывание.

Верхняя и нижняя границы доверительного интервала для интенсивности отказов рассчитывались по формулам (10) и (11); вероятности отказа на требование по формулам (14) и (15).

Значения фактора ошибки для интенсивности отказов и вероятности отказа на требование рассчитывались по формулам (12) и (16), соответственно.

Выбор типа распределения для расчета показателей надежности

Тип распределения для расчета показателей надежности выбирался, исходя из следующих соображений:

- 1) для оборудования, у которого наработка выражена в часах и имеются специфические данные по отказам и наработкам, было принято экспоненциальное распределение;
- 2) для оборудования, у которого наработка выражена в требованиях (дискретные значения) и имеются специфические данные по отказам и наработкам, было принято биномиальное распределение;
- 3) для оборудования, по которому недостаточно специфических данных по наработкам и отказам, выполнялась байесовская оценка. В этом случае, для оборудования, у которого наработка выражена в часах априорным было принято неинформативное распределение, апостериорным – гамма распределение. Для расчета показателей надежности оборудования, у которого наработка выражена в требованиях на срабатывание, априорным распределением было принято также неинформативное распределение, апостериорным - β -распределение.
- 4) для оборудования, по которому нет специфических и обобщенных данных по отказам оборудования, но имеются значения показателей надежности, взятые из обобщенных данных, применялось логарифмически нормальное распределение как априорное и дискретное распределение как апостериорное;
- 5) для оборудования, по которому отсутствуют специфические и обобщенные данные по отказам оборудования, применялось неинформативное распределение в качестве априорного. Апостериорными распределениями были приняты гамма-распределение и β -распределение в соответствии со случаями, описанными в подпункте 3 данного пункта.

Особенности ввода показателей надежности в расчетный код Saphire

При использовании результатов расчетов показателей надежности в программе SAPHIRE следует задавать следующие параметры:

1) показатель надежности - λ , [1/ч], тип распределения – экспоненциальный, параметром которого является λ , [1/ч].

2) показатель надежности - P , [тр.], тип распределения - β -распределение с параметрами a и b , которые рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a &= n \\ b &= m - n + 1 \end{aligned} \quad (19)$$

где: n – количество отказов на требование по специфическим данным,

m – количество требований на срабатывание по специфическим данным.

3) для оборудования с наработкой, выраженной в часах, показатель надежности - λ , [1/ч], тип распределения - гамма-распределение с параметрами a и b , которые рассчитываются по следующим формулам:

$$a = n + N$$

$$b = t + T$$
(20)

для оборудования с наработкой, выраженной в требованиях, показатель надежности - P, [тр.], тип распределения - β -распределение с параметрами a и b, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$a = n + N$$

$$b = (m - n) + (M - N) + 1$$
(21)

где: n – количество отказов на требование по специфическим данным,
m – количество требований на срабатывание по специфическим данным,
N – количество отказов на требование по обобщенным данным,
M – количество требований на срабатывание по обобщенным данным.

4) показатель надежности λ , [1/ч], тип распределения – логнормальное с параметром EF.

5) для оборудования с наработкой выраженной в часах: показатель надежности в λ , [1/ч], тип распределения - гамма-распределение с параметрами a и b, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$a = n + N + 0,5$$

$$b = t + T$$
(22)

для оборудования с наработкой выраженной в требованиях: показатель надежности P, [тр.], тип распределения - β -распределение с параметрами a и b, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$a = n + N + 0,5$$

$$b = m + M + 1$$
(23)

где: n – количество отказов на требование по специфическим данным,
m – количество требований на срабатывание по специфическим данным,
N – количество отказов на требование по обобщенным данным,
M – количество требований на срабатывание по обобщенным данным.

Значения показателей надежности и параметров распределений для использования в SAPHIRE

Наименование группы оборудования	Оперативное обозначение (маркировка)	Показатель надежности		Тип распределения	Параметр распределения для SAPHIRE	
		тип	значение		a	b (EF)
MDP1-S	TQ11,21,31D01, TQ12,22,32D01	P, тр.	1,96E-03	β -распределение	2	1019
MDP1-R		λ , 1/ч	4,98E-05	гамма-распределение	3	70342
MDP2-S	TQ13,23,33D01, TX10,20,30D01	P, тр.	1,71E-03	β -распределение	7	4386
MDP2-R		λ , 1/ч	2,04E-03	гамма-распределение	4	2208
MDP3-S	TQ14,24,34D01	P, тр.	1,65E-03	β -распределение	6	3923
MDP3-R		λ , 1/ч	5,68E-03	гамма-распределение	9	1673
MDP15-S	QF11,21,31D01,02	P, тр.	7,58E-03	β -распределение	3	394
MDP15-R		λ , 1/ч	8,23E-05	экспоненциальное-распределение	-	-
SRV1-O	TX50,60,70,80 S03,04	P, тр.	5,00E-03	β -распределение	1	200
SRV1-E		P, тр.	5,00E-03	β -распределение	1	200
SRV1-D		λ , 1/ч	1,74E-06	гамма-распределение	7	4311192
SDV1-C	TX50,60,70,80S05	P, тр.	2,95E-05	β -распределение	4	135593
PRV1-O	YP21,22,23S01	P, тр.	8,15E-03	β -распределение	1	183
PRV1-E		P, тр.	8,15E-03	β -распределение	1	184

В качестве источников обобщенных данных для расчетов по тепломеханическому оборудованию и КИПиА использовались [1÷7].

Определение неготовности каналов

Расчет неготовности оборудования из-за планового (непланового) ремонта, техобслуживания и испытаний выполнялся для каналов систем по формуле:

$$R = \frac{T_{\text{тo}}}{T} \quad (24)$$

ТТО – суммарное время технического обслуживания, ремонта и испытаний за время наблюдения Т.

Наименование канала системы	Суммарное время неработоспособности из-за ремонта, ТО, испытаний, ч	Суммарное время наблюдения	Расчетное значение неготовности
TQ11(21,31)	4,3	33899	1,27E-04
TQ12(22,32)	3,6	33899	1,06E-04
TQ13(23,33)	10,5	33899	3,10E-04
TQ14(24,34)	26,3	33899	7,76E-04
TX10(20,30)	3,2	33899	9,44E-05
GV01(GW01,GX01)	16,6	33899	4,90E-04
5GZ01(6GZ01)	7,2	33899	2,12E-04
VF10(20,30)	34,6	33899	1,02E-03
TB10D02(03,04)	38,8	6882,5	5,64E-03
TF31(32,33)	12,5	6882,5	1,82E-03
RM11(12,13)	9,5	6882,5	1,38E-03
RM41(42,43)	33,8	6882,5	4,91E-03

Ссылки

- 1) Оценка показателей надежности элементов систем безопасности реакторных установок В-320 блоков 1,2,3,4,5 Запорожской АЭС по опыту эксплуатации. 2.05-ОТ-065-96-ЗПР. ОКБ "Гидропресс".
- 2) Реконструкция АСУ ТП АЭС ЭБ №3 ЗАЭС. Проектная оценка надежности системы. ВЯИЦ. 421457.116 Б1 (210014.00003). Хартрон, 1996 г.
- 3) Анализ надежности управляющих систем безопасности, реализованных на средствах УКТС. Разработка технических решений и мероприятий по совершенствованию УКТС и оптимизации периодичности и норм технического обслуживания. Отчет по НИР. ВНИИАЭС, 1990 г.
- 4) Итоговый отчет о научно-исследовательской работе. Сбор и обработка эксплуатационных данных по исходным событиям аварий (ИСА) и надежности СБ энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 для использования при анализа событий предшественников аварий. Тема 6.1.15. плана НИОКР ГНТЦ ЯРБ на 1996 г.
- 5) Оценка показателей надежности оборудования систем важных для безопасности АЭС с реактором ВВЭР-440. Новатор-Киев. 1996 г.
- 6) Оценка показателей надежности оборудования систем безопасности АЭС с реактором ВВЭР-440. Показатели надежности оборудования систем безопасности 1-го и 2-го блоков Ровенской АЭС. Новатор-Киев. 1995 г.
- 7) IAEA TECDOC-478 "Component Reliability Data for use in PSA", Vienna, 1988.

