

ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПЛАНОВЫХ ПРОВЕРОК СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АС МЕТОДАМИ ВАБ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АС

А.М. Альтшуллер, В.В. Гурин, Г.А. Ершов, О.Г. Чабан, С.В. Онуфриенко, С.О. Пинежский, Ф.В. Николаев
АО ИК «АСЭ», г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация

В докладе излагается основное содержание методики обоснования периодичности проверок систем безопасности (СБ) атомной станции (АЭС), при работе энергоблоков АЭС в режиме выдачи электроэнергии во внешнюю сеть. Рассматриваются методические подходы, которые должны быть разработаны и использованы в процессе проектирования АЭС, в процессе разработки эксплуатационной документации, чтобы обеспечить выполнение тех требований по способности СБ к выполнению функций безопасности, которые могут быть достигнуты при эксплуатации АЭС.

Рассмотрены цели и задачи периодических проверок СБ, особенности оборудования, входящего в состав СБ, классификация элементов систем безопасности в зависимости от режима контроля и восстановления. Описаны математические модели надежности элементов с различными типами отказов элементов, реализованные в ПС БАРС и в ПС Risk Spectrum. Приведены рекомендации по выбору периодичности проверок СБ с использованием программного средства БАРС.

Приведены примеры выполнения расчетов в обоснование периодичности проверок систем безопасности с учетом и без учета отказов общего вида; с учетом и без учета ошибок персонала; с учетом наличия «пусковых» отказов; для «типовой» системы безопасности.

Описаны критерии определения оптимальной периодичности проверок СБ и порядок определения оптимальной периодичности проверок.

1 Введение.

Как известно, системы безопасности АЭС имеют ярко выраженную специфику, к основным чертам которой следует отнести [1, 2, 5]:

1. Сложность режимов использования.
2. Разнотипность элементов, входящих в их состав.
3. Использование сложных стратегий периодического контроля и ремонта каналов.

Рассматриваемые системы могут находиться в одном из двух режимов использования - в режиме ожидания или в режиме выполнения функции.

Первый режим, как правило, более длителен, оборудование бездействует, физические причины отказов достаточно специфичны - не связаны, например, с механическим износом, интенсивности отказов сравнительно невелики.

Во время ожидания все или часть элементов могут проверяться либо с помощью штатных систем контроля технического состояния, либо путем приведения в действие. При выявлении отказавших элементов все они или часть их могут восстанавливаться (ремонтиться).

На втором режиме действуют все физические причины отказов, их интенсивности, как правило, более высоки. Контролю подлежат, прямо или косвенно, все элементы, восстанавливаться же может, обычно, меньшая, чем на первом режиме, часть элементов.

При обосновании необходимости периодического контроля технического состояния оборудования СБ исходят из того, что оно находится на периоде нормальной эксплуатации, т.е. после окончания периода приработки и до начала периода старения. На этом периоде отказы оборудованию вызываются, как правило, некоторыми случайными внешними воздействиями разной физической природы. При данном условии для расчета вероятности

безотказной работы (ВБР) или вероятности отказа элемента обосновано применение экспоненциального распределения.

При экспоненциальном законе надежности вероятность отказа элемента в режиме ожидания определяется по следующей формуле:

$$Q_{ож.} = 1 - e^{-\lambda_{ож} \cdot t} \quad (1.1)$$

Из (1) следует, что чем длительнее период ожидания, тем выше вероятность отказа элемента. В целях снижения расчетного значения вероятности отказа период ожидания разбивают на несколько интервалов. В конце каждого интервала проводится контроль работоспособности. При отсутствии отказа ожидание продолжается, при этом в начале очередного интервала вероятность отказа равна нулю, а далее возрастает в соответствии с (1.1).

Зависимость вероятности отказа от длительности ожидания и от нахождения элемента на каком-то из интервалов может быть представлена в виде, отображенном на рисунке 1.1.

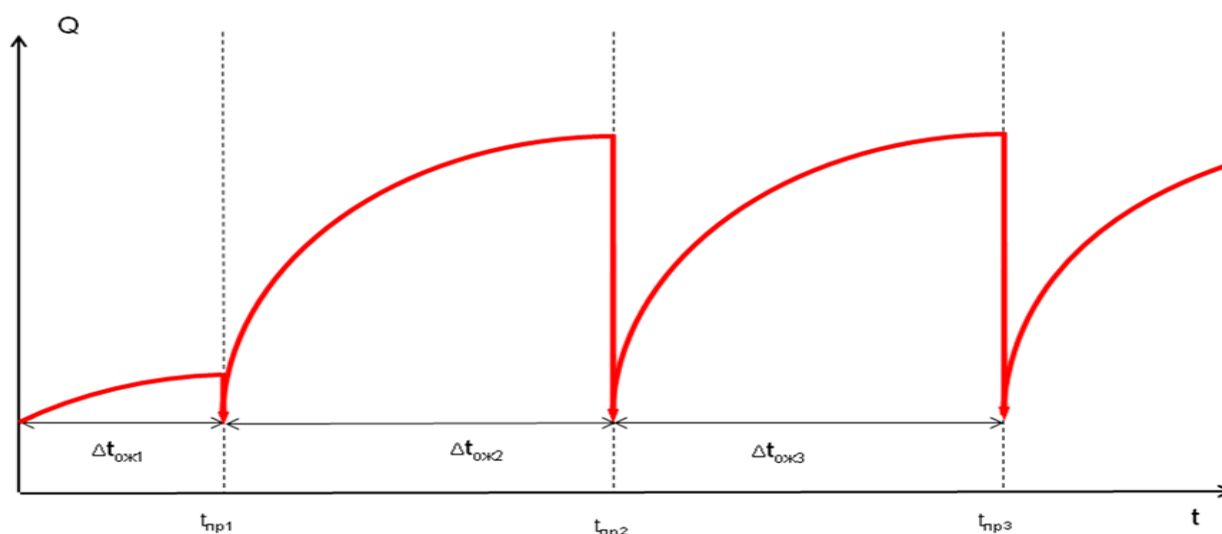


Рисунок 1.1 – Зависимость вероятности отказа элемента от длительности периода ожидания

Контроль состояния элементов СБ, находящихся в режиме ожидания, осуществляется путем приведения их в действие, поканально, через строго определенные промежутки времени.

При этом возможно использование следующих стратегий проверок [1 - 6]:

- проверки одновременно всех каналов СБ (без сдвига времени между проверками разных каналов);
- поочередные проверки каналов со сдвигом времени между проверками разных каналов.

Вторая стратегия проверок имеет также две разновидности:

- стратегия без внеочередных проверок каналов при обнаружении отказа в одном из них при плановой проверке;
- стратегия с внеочередными проверками одного или всех каналов при обнаружении отказа в одном из них при плановой проверке.

Основная цель периодических проверок СБ заключается в обнаружении отказавших элементов и их восстановлении, т.е. в поддержании заданного уровня надежности этих систем.

В то же время, каждая проверка связана с повышенной вероятностью отказов оборудования, т.к., например, режимы пуска и останова дизель-генераторов являются нерасчетными, связаны с дополнительными нагрузками, что может приводить к появлению пусковых отказов. Повышается вероятность отказа оборудования из-за ошибок персонала и т.п.

В работе [10] приведены результаты оценок влияния этих факторов на выбор периодичности проверок, изложен один из возможных вариантов методики такого обоснования и результаты работ. Показано, в частности, что учет пусковых отказов существенно влияет на рекомендации по периодичности проверок.

В связи с вышесказанным выбор периодичности проверок должен производиться с учетом всех факторов, влияющих на надежность СБ.

При учете параметров стратегий необходимо учитывать такие факторы, как, см. рис. 1.2:

- вид применяемой на энергоблоке стратегии проверок;
- длительность интервалов времени между плановыми остановами энергоблока на ППР и перегрузку топлива;
- длительность интервала времени между очередными проверками систем безопасности;
- длительность периода контроля;
- максимально возможную продолжительность периода восстановления
- количество каналов систем безопасности

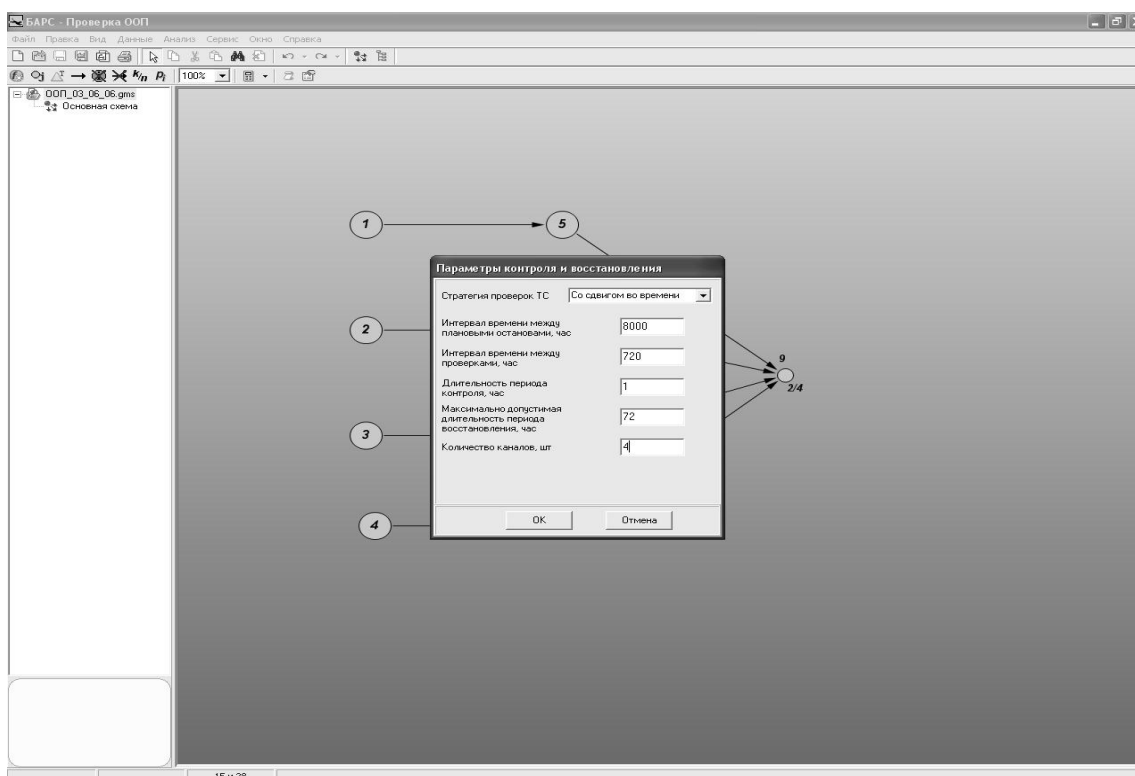


Рисунок 1.2 – Задание параметров контроля и восстановления

2 Классификация элементов систем безопасности в зависимости от режима контроля и восстановления

В зависимости от режима контроля и восстановления отказы элементов систем безопасности АЭС можно разделить на [1 - 5]:

- скрытые, возникающие у элементов, не контролируемых в режиме ожидания - п;

- скрытые, возникающие у элементов, периодически контролируемых в режиме ожидания, обнаруживаемые во время контроля, устраняемые при работе установки на мощности - p_1 ;
- скрытые, возникающие у элементов, периодически контролируемых в режиме ожидания, обнаруживаемые во время контроля, не устраняемые при работе установки на мощности - p_2 ;
- явные, возникающие у элементов, непрерывно контролируемых в режиме ожидания, оперативно выявляемые, устраняемые при работе установки на мощности - k_1 ;
- явные, возникающие у элементов, непрерывно контролируемых в режиме ожидания, оперативно выявляемые, не устраняемые при работе установки на мощности - k_2 ;
- явные, возникающие при работе элементов по прямому назначению, устраняемые при работе установки на мощности - r_1 ;
- явные, возникающие при работе элементов по прямому назначению, не устраняемые при работе установки на мощности - r_2 .

Для расчета показателей надежности элементов с данными типами отказов, в предположении, что законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления оборудования - экспоненциальные, необходимы исходные данные, приведенные в таблице 2.1.

Очевидно, что программные средства, используемые для обоснования периодичности проверок систем безопасности АЭС, должны использовать эти исходные данные и учитывать реальную физическую картину проведения проверок, ТО и Р.

Таблица 2.1 - Типы отказов элементов и их параметры

№№ п/п	Тип отказа	Интенсивность отказов в режиме ожидания, $\lambda_{ож}$ 1/час	Интенсивнос ть отказов в режиме работы, $\lambda_{раб}$ 1/час	Вероятность отсутствия пускового отказа (отказа на требование), $P_{по}$	Среднее время восстановления, $t_{восст}^{cp}$, час	Требуемое время выполнения функции	Период между опробованиями, час	Допустимое время восстановления, $t_{восст}^{дон}$, час
1	n	$\lambda_{ож_n}(\tau)$		$P_{но_n}$	-	T	-	-
2	p1	$\lambda_{ож_{p1}}(\tau)$	$\lambda_{раб_{p1}}(\tau)$	$P_{но_{p1}}$	$\Delta t_{восст_{p1}}^{cp}$	-	Δt_{p1}	$\Delta t_{восст_{p1}}^{дон}$
3	p2	$\lambda_{ож_{p2}}(\tau)$	$\lambda_{раб_{p2}}(\tau)$	$P_{но_{p2}}$	-	-	Δt_{p2}	-
4	k1	$\lambda_{ож_{k1}}(\tau)$	$\lambda_{раб_{k1}}(\tau)$	$P_{но_{k1}}$	$\Delta t_{восст_{k1}}^{cp}$	-	Δt_{k1}	$\Delta t_{восст_{k1}}^{дон}$
5	k2	$\lambda_{ож_{k2}}(\tau)$	$\lambda_{раб_{k2}}(\tau)$	$P_{но_{k2}}$	-	-	Δt_{k2}	-
6	r1	$\lambda_{r1}(\tau)$		-	$\Delta t_{восст_{r1}}^{cp}$	t_r	-	$\Delta t_{восст_{r1}}^{дон}$
7	r2	$\lambda_{r2}(\tau)$		-	-	t_r	-	-

3 Математические модели надежности элементов с различными типами отказов

3.1. Математические модели надежности элементов, реализованные в ПС БАРС

Исходя из предположения, что законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления оборудования – экспоненциальные, для расчета вероятности работоспособного состояния элементов СБ могут быть использованы следующие формулы [1, 3, 5, 6]:

3.1.1 Неконтролируемые элементы типа п:

$$m_n = e^{-\lambda_{ож} \cdot T} \cdot P_{по}, \quad (3.1)$$

где:

$\lambda_{ож}$ - интенсивность отказов в режиме ожидания, 1/час

T - продолжительность работы блока на мощности, час;

$P_{по}$ - вероятность отсутствия “пускового” отказа.

3.1.2 Периодически контролируемые восстанавливаемые элементы типа р1:

Это наиболее сложный случай. Здесь расчетные выражения выбираются в зависимости от того, на каком участке эксплуатации находится канал СБ – ожидания, проверки, восстановления и т.д. Зависимости изменения вероятности работоспособного состояния на каждом из участков приведены на рисунке 3.1.

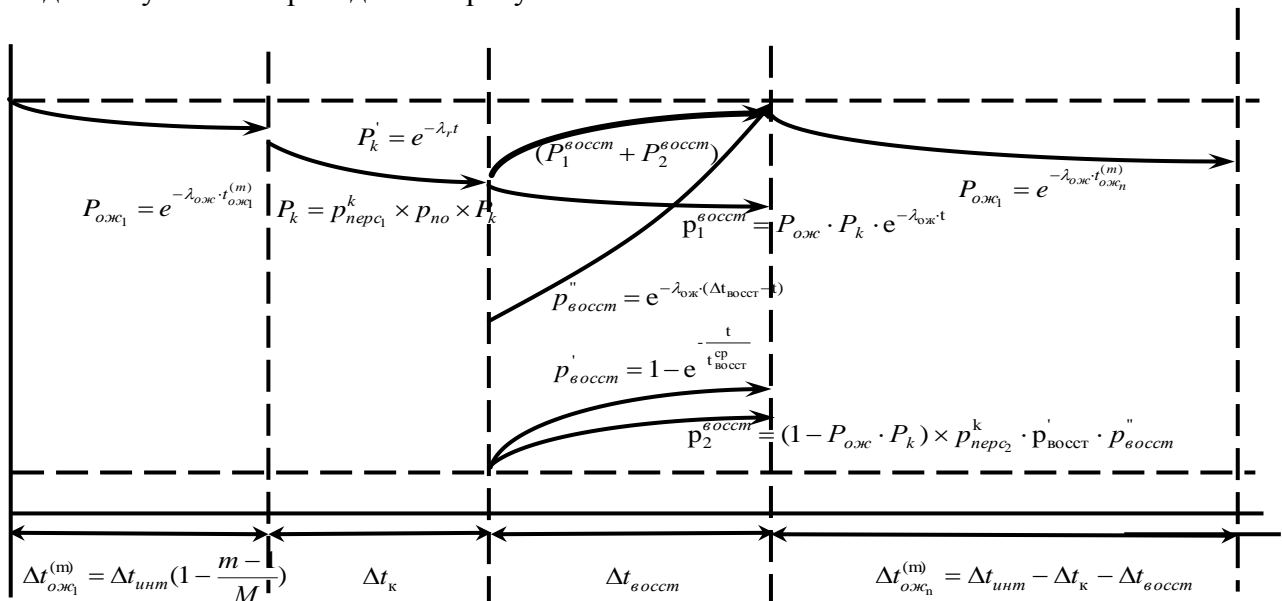


Рисунок 3.1 – График изменения параметров надежности элементов типа р1

На рисунке 3.1 использованы следующие обозначения [3, 4]:

$P_{ож_1}$ - вероятность работоспособного состояния элемента типа р1 на участке ожидания первого контроля, рассчитываемая по выражению:

$$P_{ож_1} = e^{-\lambda_{ож} \cdot t}, \quad 0 < t < \Delta t_{ож_1}^{(m)}, \quad (3.2)$$

где:

$\lambda_{ож}$ - интенсивность отказов элемента типа р1 в режиме ожидания, 1/час;

t - время, час;

$\Delta t_{ож_1}^{(m)}$ - время ожидания первой проверки, час (см. ниже (3.12)).

$P_{ож_n}$ - вероятность работоспособного состояния элемента типа р1 на участке ожидания промежуточного контроля, рассчитываемая по выражению:

$$P_{ож_n} = e^{-\lambda_{ож} \cdot t}, \quad 0 < t < \Delta t_{ож_n}^{(m)} \quad (3.3)$$

где:

$\Delta t_{ож_n}^{(m)}$ - время ожидания n-ной промежуточной проверки, час (см. ниже (3.15)).

$P_{ож_{посл}}$ - вероятность работоспособного состояния элемента типа р1 на участке ожидания вывода системы из действия после последней проверки (контроля), рассчитываемая по выражению:

$$P_{ож_{посл}} = e^{-\lambda_{ож} \cdot t}, \quad 0 < t < \Delta t_{ож_{посл}}^{(m)} \quad (3.4)$$

где:

$\Delta t_{ож_{посл}}^{(m)}$ - время ожидания вывода системы из действия после последней проверки (см. ниже (3.13)).

P_k - вероятность работоспособного состояния проверяемого элемента, находящегося при этом в состоянии, позволяющем использовать его по прямому назначению, к моменту окончания проверки, рассчитываемая по формуле:

$$P_k = P_{перс}^k \times P_{но} \times P_k', \quad 0 < t < \Delta t_k \quad (3.5)$$

где:

$P_{перс}^k$ - вероятность успешного выполнения действий персоналом по переводу элемента в режим контроля;

$P_{но}$ - вероятность отсутствия пускового отказа;

P_k' - вероятность безотказной работы на протяжении периода проверки, определяемая по выражению:

$$P_k' = e^{-\lambda_r \cdot t}, \quad 0 < t < \Delta t_k, \quad (3.6)$$

где:

λ_r - интенсивность отказов элемента типа р1 в режиме работы, 1/час.

Если элемент типа р1 во время проверки приводится в состояние, не позволяющее использовать его по прямому назначению, то на всем протяжении участка контроля элемент считается «неработоспособным»:

$$P_k = P_k'' = 0 \quad (3.7)$$

$P_1^{восст}$ - вероятность сохранения работоспособности элемента, который на момент окончания проверки был работоспособен, в любой момент допустимого (по регламенту) времени восстановления, рассчитываемая по формуле:

$$P_1^{восст} = P_{ож} \cdot P_k \cdot e^{-\lambda_{ож} \cdot t}, \quad 0 < t < \Delta t_{восст}, \quad (3.8)$$

где:

$\Delta t_{восст}$ - определенное регламентом допустимое время работы энергоблока на мощности при наличии отказавшего элемента, час.

$p_2^{восст}$ - вероятность того, что к моменту окончания периода восстановления отказавший ранее элемент будет восстановлен и после этого окажется в работоспособном состоянии, рассчитываемая по выражению:

$$p_2^{восст} = (1 - P_{ож} \cdot P_k) \times p_{перс_2}^k \cdot p'_{восст} \cdot p''_{восст} \quad (3.9)$$

где:

$p_{перс_2}^k$ - вероятность успешного обнаружения скрытого отказа во время проверки персоналом;

$p'_{восст}$ - вероятность восстановления в заданный срок элемента, отказ которого был обнаружен во время проверки. Вероятность этого события равна:

$$p'_{восст} = 1 - e^{-\frac{t}{t_{восст}^{cp}}}, \quad 0 < t < \Delta t_{восст}, \quad (3.10)$$

где:

$t_{восст}^{cp}$ - среднее время восстановления элемента, час.

Примечание: Если $t_{восст}^{cp} > \Delta t_{восст}$, то $p'_{восст} = 0$.

$p''_{восст}$ - вероятность отсутствия повторного отказа элемента, отказ которого был обнаружен и устранен за время $\gamma < \Delta t_{восст}$. Вероятность этого события определяется по формуле:

$$p''_{восст} = e^{-\lambda_{ож} \cdot (\Delta t_{восст} - t)}, \quad 0 < t < \Delta t_{восст} \quad (3.11)$$

Длительность ожидания первой проверки m -го канала, определяется по выражению:

$$\Delta t_{ож_1}^{(m)} = \Delta t_{инт} \left(1 - \frac{m-1}{M}\right), \quad (3.12)$$

где:

m - номер канала;

M - количество каналов.

$\Delta t_{ожс_{посл}}$ - длительность участка ожидания вывода блока из действия после последней проверки (окончания Δt), определяемая по выражению:

$$\Delta t_{ожс_{посл}} = T - \Delta t_{ож_1}^{(m)} - \Delta t_{инт} \times n^{(m)}, \quad (3.13)$$

где:

T - продолжительность непрерывной работы блока на мощности

$n^{(m)}$ - число проверок m -го канала. Оно равно целой части результата, получаемого по выражению:

$$n^{(m)} = \frac{T - \Delta t_{ож_1}^{(m)}}{\Delta t_{инт}} \quad (3.14)$$

$\Delta t_{ож_п}^{(m)}$ - продолжительность участка ожидания промежуточной проверки одинакова для всех каналов и определяется по формуле:

$$\Delta t_{ож_п}^{(m)} = \Delta t_{инт} - \Delta t_k - \Delta t_{восст}, \quad (3.15)$$

где:

Δt_k - продолжительность режима контроля, обычно она составляет 1 час;

$\Delta t_{восст}$ - допустимая продолжительность режима восстановления, например, 72 часа.

3.1.3 Периодически контролируемые невосстанавливаемые элементы типа p_2 :

Этот случай является частным случаем рассмотренного выше. Расчетные выражения те же, за исключением того, что вероятность нахождения элемента в работоспособном состоянии на участке восстановления определяется по более простому выражению:

$$P_{уч.восст.} = e^{-\lambda_{ож} \cdot t}, \quad 0 < t < \Delta t_{восст} \quad (3.16)$$

где:

$\Delta t_{восст}$ - определенное регламентом допустимое время работы энергоблока на мощности при наличии отказавшего элемента.

3.1.4 Непрерывно контролируемые восстанавливаемые элементы типа k_1 .

В данном случае реализовано два варианта расчета:

3.1.4.1 Расчет стационарного коэффициента готовности по формуле

$$K_G = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.17)$$

Или по формуле:

$$K_G = \frac{1}{\frac{t_{восст}^{cp}}{1} + \frac{1}{\frac{t_{раб}^{cp}}{1} + \frac{1}{t_{восст}^{cp}}}} \quad (3.18)$$

3.1.4.2 Расчет коэффициента готовности с учетом наличия ограничений на время восстановления, по истечении которого блок должен быть остановлен:

$$P_{K_1} = \frac{1}{\lambda_{ож} + \frac{1}{\Delta t'_{восст}}}, \quad (3.19)$$

где:

$\Delta t'_{восст}$ - приведенное время восстановления элемента, учитывающее, что период восстановления не должен превышать некоторого допустимого значения $\Delta t_{восст}^{don}$. При экспоненциальных законах времени наработки до отказа и времени восстановления этот параметр может быть определен по формуле:

$$\Delta t'_{восст} = \Delta t_{восст}^{cp} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\Delta t_{восст}^{cp}}} \cdot (1 + \frac{t}{\Delta t_{восст}^{cp}})), \quad 0 < t < \Delta t_{восст}^{don} \quad (3.20)$$

К использованию формул (3.17) – (3.18) следует относиться крайне внимательно, т.к. при их использовании предполагается, что персонал имеет неограниченно большое время на проведение операций по ремонту, что, применительно к оборудованию энергоблоков АЭС, выполняется далеко не всегда. Если ограничение на время восстановления имеется, то использование формул (3.17) – (3.18) дает неконсервативный результат, и необходимо использовать выражение (3.19).

3.1.5 Непрерывно контролируемые невосстанавливаемые элементы типа k_2 :

$$P_{K_2} = 1 - \frac{\Delta t_{восст}}{T} \cdot (1 - e^{-\lambda_{ож} \cdot t}), \quad 0 < t < T \quad (3.21)$$

3.1.6 Находящиеся в работе, постоянно контролируемые, восстанавливаемые элементы типа r_1 :

$$P_{r_1} = \frac{1}{\lambda_r + \frac{1}{\Delta t'_{восст}}}, \quad (3.22)$$

3.1.7 Находящиеся в работе, постоянно контролируемые, невосстанавливаемые элементы типа r_2 :

$$P_{r_2} = e^{-\lambda_r t_r} \quad (3.23)$$

Все вышеописанные модели надежности элементов реализованы в ПС БАРС.

3.2. Математические модели надежности элементов, реализованные в ПС Risk Spectrum

В ПС Risk Spectrum реализованы следующие модели элементов [7]:

3.2.1 Непрерывно контролируемый, восстанавливаемый элемент

В данном случае реализованы три возможных варианта:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] \quad (3.24)$$

$$Q(t) = q \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] \quad (3.25)$$

$$Q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.26)$$

По выражению (3.24) вычисляется обычный нестационарный коэффициент неготовности, а по выражению (3.26) – стационарный коэффициент неготовности.

Формула (3.25), за счет введения «необязательного» параметра q (вероятности отказа) позволяет учесть возможность наличия отказа в момент времени $t = 0$, например, пускового отказа. В ПК БАРС пусковой отказ нужно моделировать в явном виде – путем введения соответствующего функционального события.

К использованию формул (3.24) – (3.25) следует относиться крайне внимательно, т.к. при их применении предполагается, что персонал имеет неограниченно большое время на проведение операций по ремонту, что, применительно к оборудованию энергоблоков АЭС, выполняется далеко не всегда. Если ограничение на время восстановления имеется, то использование формул (3.24) – (3.25) дает неконсервативный результат.

3.2.2 Периодически контролируемый, восстанавливаемый элемент

Для данного вида элементов также имеется несколько вариантов моделей.

При использовании только «обязательных» параметров – интенсивности отказов (очевидно, в режиме ожидания) λ и длительности интервала времени между очередными проверками T_i вероятность отказа элемента в момент времени t определяется по выражению:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t - T_i)}, T_i = 0, T_i, 2T_i, \dots \quad (3.27)$$

где:

λ – интенсивность отказов, 1/час;

T_i – длительность интервала времени между очередными проверками, час.

В соответствии с этой формулой мы имеем классическую зубчатую кривую для вероятности отказа.

Если задан параметр T_F – продолжительность ожидания времени первой проверки, то расчетная формула остается прежней, смещаются по временной оси только моменты начала очередных проверок.

Точечная оценка вероятности отказа элемента на интервале между проверками (средней неготовности элемента) может быть рассчитана с помощью формулы вида:

$$Q(t) = \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^{T_i} Q(t) dt = 1 - \frac{1}{\lambda \cdot T_i} (1 - e^{-\lambda \cdot T_i}) \quad (3.28)$$

При использовании формулы (3.28) предполагается, что восстановление производится мгновенно, т.е. среднее время восстановления $T_R = 0$.

Если длительность восстановления не равна нулю, то вероятность отказа рассчитывается с учетом того, на каком временном интервале находится элемент. Нижеследующие формулы выведены при следующих допущениях:

- восстановление производится непосредственно после испытания, если при испытаниях был выявлен отказ компонента;
- продолжительность восстановления принято равной заданному времени T_R .

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad \text{при } t < T_F \quad (3.29)$$

$$Q(t) = Q(T_i) = 1 - e^{-\lambda \cdot T_i}, \quad \text{при } t = T_F + n T_i \quad (3.30)$$

$$Q(t) = Q(T_i) + (1 - Q(T_i)) \cdot (1 - e^{-\lambda(t-T_i)}), \quad \text{при } T_i < t < T_i + T_R \quad (3.31)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t-T_i)} \quad \text{при } T_i + T_R < t < 2T_i \quad (3.32)$$

Примечание:

В выражении (3.30) [7] очевидно допущена ошибка, обозначение n при T_i явно излишне. По физическому смыслу здесь, очевидно, имеется в виду промежуток времени между окончанием проверки и до начала следующей проверки. При этом проверка производится мгновенно, отказ при проверке не обнаруживается (отсутствует).

Формула точечной оценки средней неготовности элемента имеет следующий вид:

$$Q_{mean} = 1 - \frac{1}{\lambda \cdot T_i} (1 - e^{-\lambda \cdot T_i}) + (1 - e^{-\lambda \cdot T_i}) \cdot \frac{T_R}{T_i} \quad (3.33)$$

Для учета постоянного вклада в неготовности параметра q , величина которого не зависит от периодичности испытаний или интенсивности отказов, этот параметр q добавляется ко всем формулам для расчета неготовности:

$$Q(t) = 1 - (1 - q) \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad \text{при } t < T_F \quad (3.34)$$

$$Q(t) = Q(T_i) = 1 - (1 - q) e^{-\lambda \cdot T_i}, \quad \text{при } t = T_F + n T_i \quad (3.35)$$

$$Q(t) = Q(T_i) + (1 - Q(T_i)) \cdot (1 - (1 - q) e^{-\lambda(t - T_i)}), \quad \text{при } T_i < t < T_i + T_R \quad (3.36)$$

$$Q(t) = 1 - (1 - q) e^{-\lambda(t - T_i)} \quad \text{при } T_i + T_R < t < 2T_i \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} Q_{mean} &= q + (1 - q) \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda \cdot T_i} (1 - e^{-\lambda T_i})\right) + (q + (1 - q) (1 - e^{-\lambda T_i})) \cdot \frac{T_R}{T_i} = \\ &= 1 - \frac{1}{\lambda \cdot T_i} \cdot (1 - q) \cdot (1 - e^{-\lambda T_i}) + (1 - (1 - q) \cdot e^{-\lambda T_i}) \cdot \frac{T_R}{T_i} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Анализ выражений (3.27) – (3.38) показывает, что ПС Risk Spectrum при моделировании надежности элементов данного типа не позволяет учесть тот факт, что интенсивности отказов оборудования в режимах ожидания и в режимах работы, как правило, разные, при работе интенсивности отказов таких элементов, как, например, насосы, ДГУ, реле, находящиеся под напряжением, выше. Не учитываются также и ошибки персонала при подготовке элемента к проверке и собственно при проверке. Таким образом, использование ПС Risk Spectrum для обоснования периодичности проверок будет приводить к неконсервативным оценкам.

3.2.3 Элемент с независимой от времени вероятностью отказа

Надежность элементов данного типа характеризуется вероятностью отказа на требование. В качестве таких элементов рассматриваются арматура, изменяющая свое положение при поступлении требования (открывается / закрывается), электрические выключатели (срабатывание / несрабатывание), двигатели (отказ при запуске).

$$Q(t) = q \quad (3.39)$$

$$Q = q \quad (3.40)$$

3.2.4 Элемент с заданным временем работы (использования)

$$Q(t) = 1 - (1 - q) \cdot e^{-\lambda TM} \quad (= constant) \quad (3.41)$$

$$Q_{mean} = 1 - (1 - q) \cdot e^{-\lambda TM} \quad (= constant) \quad (3.42)$$

Использование выражений (3.41) и (3.42) приводит к завышению степени консерватизма, т.к. вероятность отказа вычисляется на момент окончания времени использования элемента. При этом степень консерватизма увеличивается при увеличении ТМ.

3.2.5 Неконтролируемый, невосстанавливаемый элемент

$$Q(t) = 1 - (1 - q) \cdot e^{-\lambda t} \quad (3.43)$$

Сравнение данных, приведенных в разделах 3.1 и 3.2 показывает, что ПС Risk Spectrum позволяет моделировать меньшее, чем ПС БАРС число типов элементов СБ.

Т.о. можно заключить, что при обосновании периодичности проверок СБ более целесообразно использовать ПС БАРС.

4. Пример вычисления оптимальной периодичности проверок для типовой системы безопасности

Для исследования влияния на периодичность проверок комбинаций элементов системы с различными типами отказов и переменными параметрами, характеризующими их надежность, была разработана модель типовой системы безопасности. Такая модель, в базовом виде, включает в себя все элементы, с различными типами отказов, согласно таблице 2.1. Система состоит из 4 каналов. Принципиальная схема одного канала этой

системы представлена на рисунке 4.1. На схеме показаны только те элементы, которые необходимы для целей данного примера, не показана, например, арматура, до и после теплообменника, другие элементы, которые имеются в реальных системах.

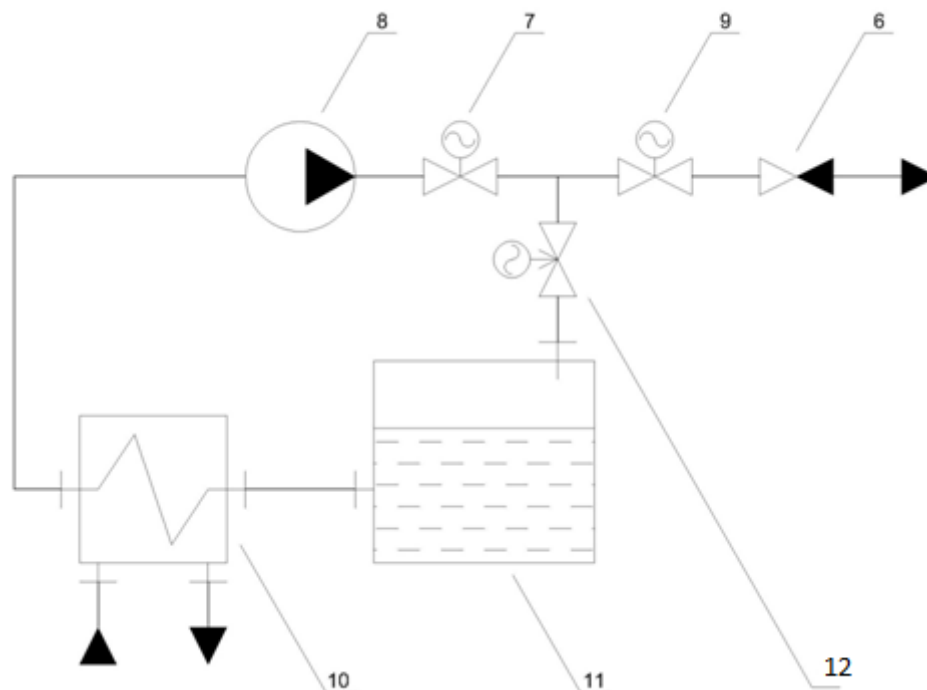


Рисунок 4.1 – Схема 1 канала типовой модели системы безопасности

- 6 – Обратный клапан, неконтролируемый, невосстанавливаемый элемент
- 7 – Арматура с электроприводом, периодически контролируемый, невосстанавливаемый элемент
- 8 – Насос, периодически контролируемый, восстанавливаемый элемент
- 9 – Арматура с электроприводом, непрерывно контролируемый, невосстанавливаемый элемент
- 10 – Теплообменник, непрерывно контролируемый, восстанавливаемый элемент
- 11 – Бак, находящийся в работе, невосстанавливаемый элемент
- 12 – Регулирующая арматура, находящийся в работе, восстанавливаемый элемент

На рисунке 4.2 приведена СФЦ этой системы безопасности.

Влияние периодичности проверок на надежность типовой системы безопасности исследовалось при параметрах надежности элементов (интенсивностях отказов), соответствующих базе данных [8], приведенных в таблице 4.1, параметрах проверок, приведенных в таблицах 4.2 – 4.4, и при значениях этих параметров, уменьшенных в два раза и на порядок (таблица 4.4).

Также в таблице 4.1. приведены сведения о вероятностях пусковых отказов, не зависящих от времени. Для таких элементов, как обратный клапан и арматура с электроприводом, данные вероятности определены по [11], а для насоса вероятность определена по данным [9], исходя из предположения, что для периодичности опробований 600-700 часов вероятность пускового отказа элемента составляет ~ 30% от вероятности возникновения скрытого отказа на запуск за период контроля СБ. Вероятности ошибок персонала принимались по данным приложения 5 [9]. Параметры моделей ООВ, приведенные в таблице 5.1, основаны на данных источника [12].

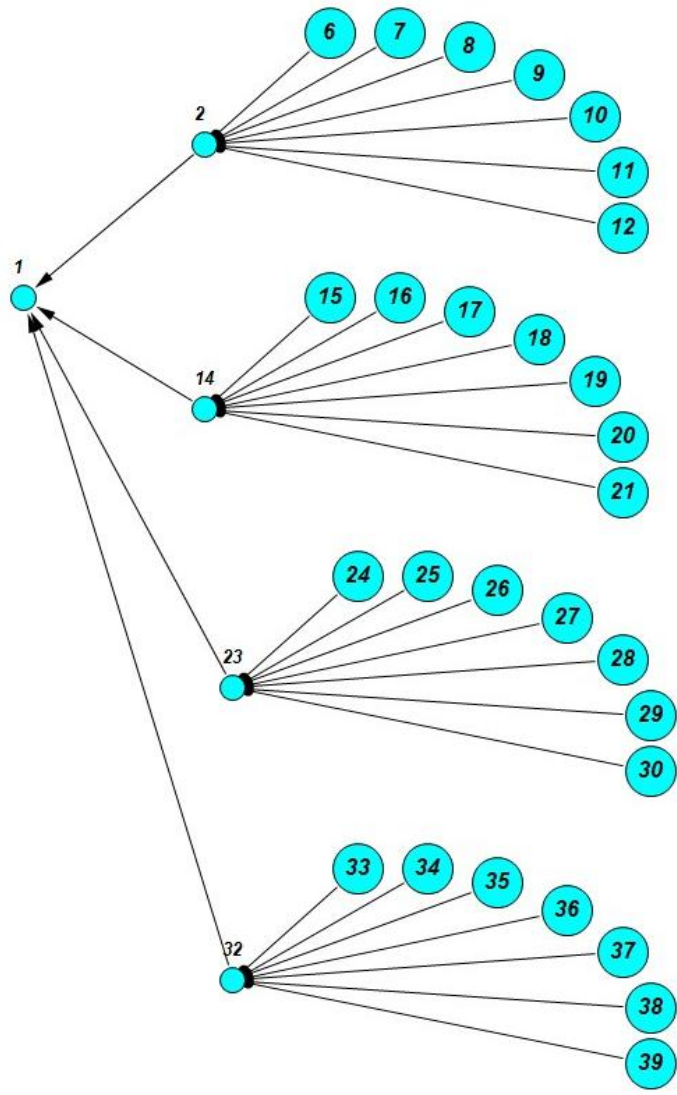


Рисунок 4.2 – СФЦ типовой системы безопасности

Таблица 4.1 – Параметры надежности элементов «типовой» системы безопасности

Элемент СФЦ	Обратный клапан, неконтр., невосст.	Арматура с электроприводом, период. контр., невосст.	Насос, период. контр., восст.	Арматура с электроприводом, непрерывно контр., невосст.	Теплообменник, непрер. контр., восст.	Бак, наход. в работе, невосст.	Регулирующая арматура, наход. в работе, восстанавливаемый
Тип отказа элемента	n	p2	p1	k2	k1	r2	r1
Интенсивность отказов в режиме ожидания, $\lambda_{ож}$, 1/час	2,0E-07	3,0E-06	3,61E-06	3,0E-06	9,0 E-7		1,6E-05
Интенсивность отказов в режиме работы, $\lambda_{раб}$, 1/час		2,92E-07	7,9E-05			2,7E-8	
Вероятность отсутствия пускового отказа (отказа на требование), $P_{по}$	4.60E-05	3.00E-04	4.85E-04				
Среднее время восстановления, $t_{восст}^{cp}$, час			24		24		6
Требуемое время выполнения функции, T, час	8000		1		8000	8000	1
Допустимое время восстановления, $t_{восст}^{дон}$, час			72		72		72
Параметры моделей ООВ (α -фактор)	$\alpha1$	9.72E-01	9.87E-01	9.92E-01	9.87E-01		9.5E-1
	$\alpha2$	2.15E-02	8.98E-03	4.07E-03	8.98E-03		2,13E-02
	$\alpha3$	2.68E-03	2.68E-03	2.49E-03	2.68E-03		1,01E-02
	$\alpha4$	3.91E-03	1.12E-03	1.30E-03	1.12E-03		1,86E-02

Результаты исследования приведены в таблицах 4.1-4.3. и на рисунках 4.3 - 4.5.

Таблица 4.2 – Результаты исследования зависимости вероятности отказа СБ на запуск от периодичности контроля с учетом и без учета возможных ошибок персонала, без учета ООП.

Интервал времени между плановыми остановами, час	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Интервал времени между проверками, час	200	300	600	700	1000	1400	2100	2800
Длительность периода контроля, час	1	1	1	1	1	1	1	1
Максимальная допустимая длительность периода восстановления, час.	72	72	72	72	72	72	72	72
Количество каналов, шт.	4	4	4	4	4	4	4	4
Неготовность СБ с учетом ошибок персонала	6.04E-6	3.07E-6	1.44E-6	1.27E-6	9.47E-7	9.14E-7	8.98E-7	9.54E-7
Неготовность СБ без учета ошибок персонала	9.10E-7	7.39E-7	6.44E-7	6.32E-7	5.94E-7	6.58E-7	7.39E-7	8.41E-7

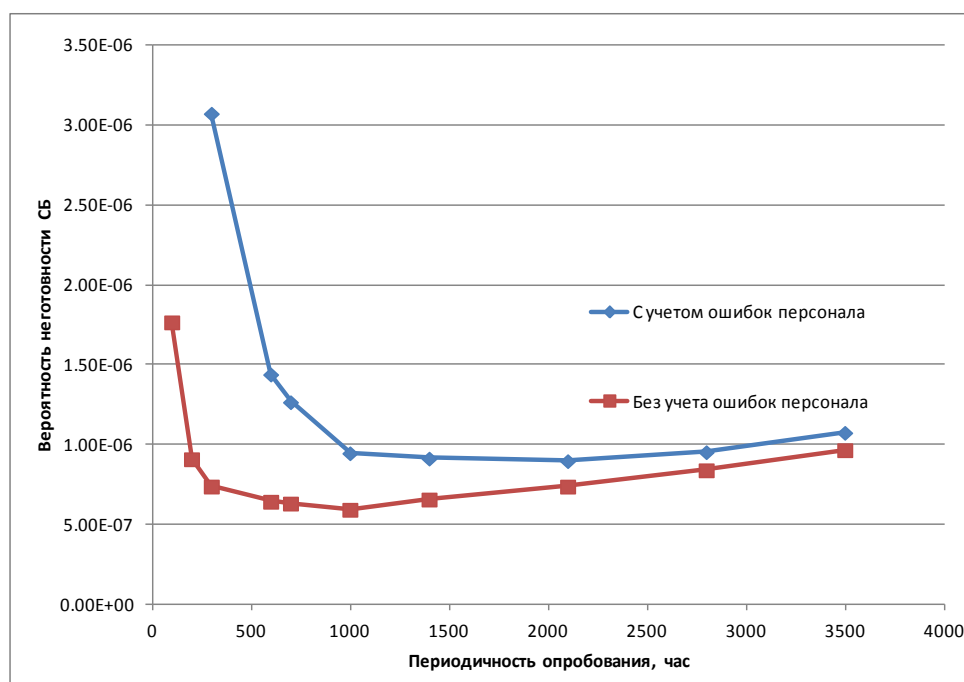


Рисунок 4.3 – Зависимость вероятности отказа СБ на запуск от периодичности контроля с учетом и без учета возможных ошибок персонала, без учета ООП.

Таблица 4.3 – Результаты исследования зависимости вероятности отказа СБ на запуск от периодичности контроля с учетом и без учета возможных ошибок персонала, с учетом ООП.

Интервал времени между плановыми остановами, час	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Интервал времени между проверками, час	200	300	600	700	1000	1400	2100	2800
Длительность периода контроля, час	1	1	1	1	1	1	1	1
Максимальная допустимая длительность периода восстановления, час	72	72	72	72	72	72	72	72
Неготовность СБ с учетом ошибок персонала	2.85E-4	2.37E-4	1.95E-4	1.89E-4	1.76E-4	1.75E-4	1.75E-4	1.79E-4

Неготовность СБ без учета ошибок персонала	1.73E-4	1.65E-4	1.60E-4	1.59E-4	1.57E-4	1.62E-04	1.67E-4	1.73E-4
--	---------	---------	---------	---------	---------	----------	---------	---------

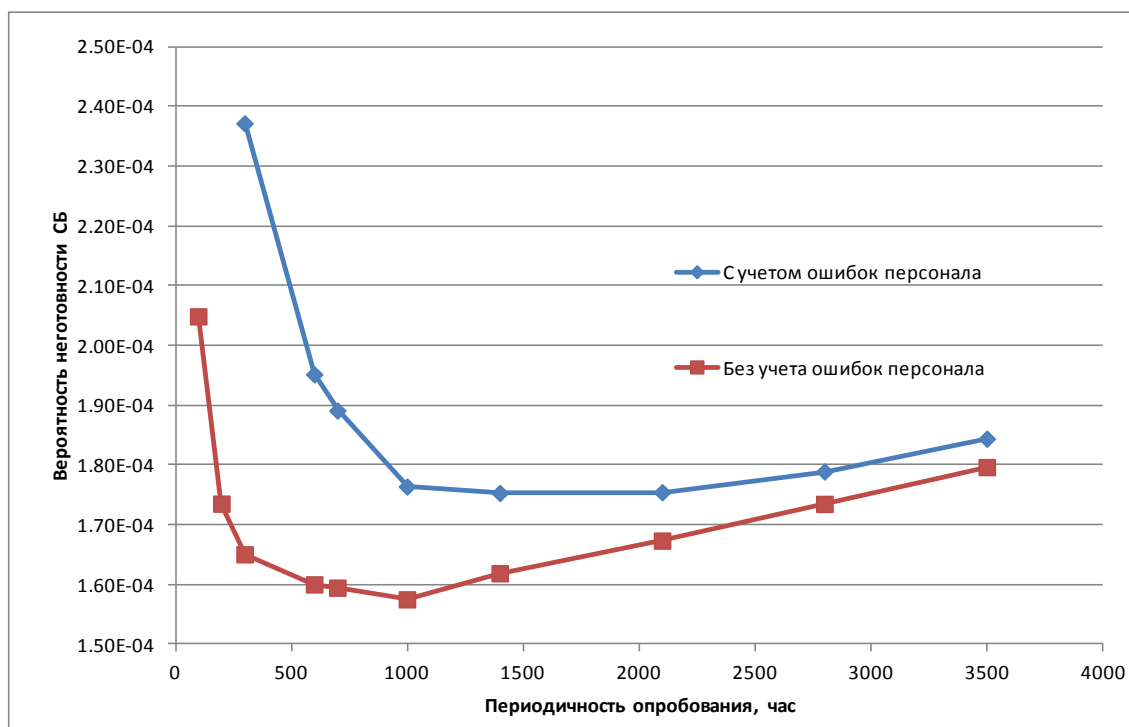


Рисунок 4.4 – Зависимость вероятности отказа СБ на запуск от периодичности контроля с учетом и без учета возможных ошибок персонала, с учетом ООП.

Таблица 4.4 – Результаты исследования зависимости вероятности отказа СБ на запуск от периодичности контроля с учетом возможных ошибок персонала, с учетом ООП при различных интенсивностях отказов.

Интервал времени между плановыми остановами, час	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Интервал времени между проверками, час	200	300	600	700	1000	1400	2100	2800
Длительность периода контроля, час	1	1	1	1	1	1	1	1
Максимальная допустимая длительность периода восстановления, час	72	72	72	72	72	72	72	72
Неготовность СБ при параметрах надежности, соответствующих данным [13]	2.85E-4	2.37E-4	1.95E-4	1.89E-4	1.76E-4	1.75E-4	1.75E-4	1.79E-4
Неготовность СБ при интенсивностях отказов, сниженных в 2 раза по сравнению с данными [13]	2.01E-4	1.56E-4	1.15E-04	1.09E-4	9.67E-5	9.30E-5	8.98E-5	8.98E-5
Неготовность СБ при интенсивностях отказов, сниженных на порядок по сравнению с данными [13]	1.38E-4	9.56E-5	5.49E-5	4.87E-5	3.67E-5	3.09E-5	2.54E-5	2.30E-5

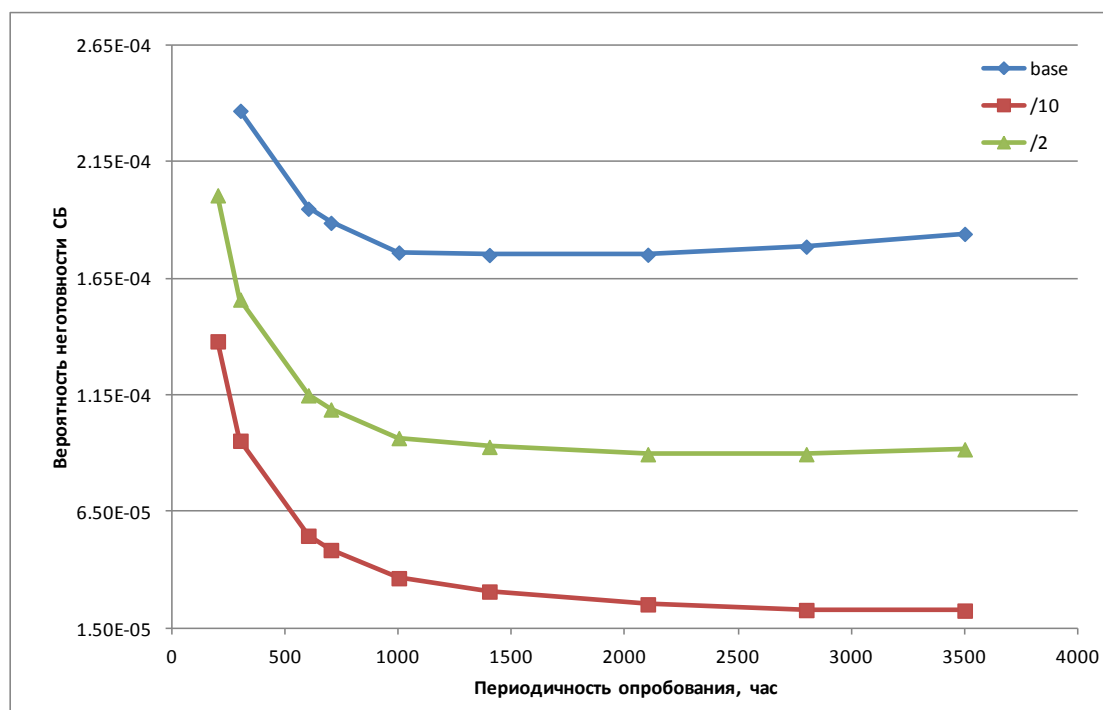


Рисунок 4.5 - Зависимость вероятности отказа СБ на запуск от периодичности контроля с учетом а возможных ошибок персонала, с учетом ООП при варьировании интенсивностей отказов

5 Критерии определения оптимальной периодичности проверок СБ

В зависимости от видов отказов элементов и параметров их надежности, надежность систем безопасности связана с периодичностью проверок следующим образом:

1. При значительном числе невосстанавливаемых и неконтролируемых элементов, а также элементов, постоянно находящихся в работе, зависимость надежности СБ от периодичности проверок отсутствует или слабо выражена.

2. Если все элементы системы высоконадежны или элементы не могут быть восстановлены при работе ЭБ на мощности, определяющими для надежности системы выступают отказы, вызванные самим фактом проведения проверки (в основном, из-за ошибок персонала). Вероятность отказа таких систем снижается по экспоненциальному закону, по мере увеличения периодичности проверок. Минимум зависимости слабо выражен и может превышать длительность интервала между плановыми остановами

3. Если система, в основном, образована контролируруемыми восстанавливаемыми элементами, имеющими сравнительно низкую надежность, то, по мере увеличения периодичности проверок, вероятность отказа сначала уменьшается (за счет снижения влияния отказов при проверках), а затем повышается (за счет влияния скрытых отказов оборудования, возникающих в режиме ожидания между проверками). Таким образом, зависимость вероятности отказа от периодичности проверок СБ имеет минимум.

Соответственно, выбор оптимальной периодичности проверок для первого варианта нецелесообразен, а для двух других возможен в соответствии со следующими критериями:

1. Для систем с выраженным минимумом зависимости вероятности отказа от периодичности проверок СБ, оптимальной длительностью периода проверок является длительность, соответствующая минимальной вероятности отказа.

2. Для систем с экспоненциальной зависимостью вероятности отказа от периодичности проверок СБ критерием оптимальной длительности периода проверок является длительность, при которой дальнейшее ее увеличение не приводит к более чем двукратному снижению вероятности отказа системы.

Выводы

1. Результаты расчетной оценки влияния периодичности плановых проверок систем безопасности на их надежность показывают, что принятая сейчас для АЭС с ВВЭР-1000 периодичность проверок – 1 раз в месяц не оптимальна. Более того, слишком частые проверки СБ повышают вероятность их отказа в период работы блока на мощности, вероятность неплановых остановов энергоблока также повышается, что, в свою очередь, влечет за собой снижение коэффициента готовности и КИУМ.

2. Для достигнутых в настоящее время показателей надежности оборудования АЭС с ВВЭР-1000 может быть принята периодичность проверок 1 раз в три месяца.

3. Для более тщательного обоснования периодичности проверок СБ необходимо произвести оценки влияния периодичности проверок для реальных систем энергоблока при данных по надежности оборудования, используемых при выполнении ВАБ.

4. По результатам расчетов должны быть внесены коррективы в регламенты безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000.

5. При очередных периодических пересмотрах безопасности должны быть пересмотрены, при необходимости, результаты ВАБ и ОООб.

Литература:

1. Швыряев Ю.В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1992.

2. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В., Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 352 с.

3. Ершов Г.А. Автоматизированное моделирование и расчет показателей качества функционирования корабельных АЭУ. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н. СПб.: ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского, 1997. - 396 с.

4. Калинин А.А. Обоснование требований к программным средствам автоматизированной оценки показателей надежности КСУ ТС и систем ЯЭУ кораблей ВМФ. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. СПб.: 1 ЦНИИ МО РФ, 2009. – 182 с.

5. Г.А. Ершов, Ю.Л. Ермакович, А.А. Калинин, А.И. Калинин, М.А. Козлов, М.А. Парфентьев. Обоснование периодичности проверок систем безопасности АЭС с по-мощью программного комплекса БАРС. Атомная энергия, том 109, вып. 2, август 2010. с. 67-71.

6. Отчет о верификации программного средства БАРС (Безопасность и Анализ Риска Систем), версия 1.0. НИР.0-0-22-ОТ-041. Изм. 0 11.2011. СПб.: ОАО «СПбАЭП», 2011 г. - 234 с.

7. RiskSpectrum Analysis Tools. Theory Manual. By Lloyds Register Consulting - Energy AB. Version 3.3.0.

8. Нововоронежская АЭС с энергоблоками №1 и №2. Вероятностный анализ безопасности (ВАБ). Консолидированная база данных для выполнения ВАБ. NW20.C.165.&.&&&&.01&&.022.HH.0001, 2007

9. РБ-100-15. Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций.

15. Erik Sparre. SKI Report 99:55. Risk Based Test Interval and Maintenance Optimisation – Application and Uses. October 1999.

16. T-book version 6, Reliability Data of Components in Nordic Nuclear Power Plants, 6th edition, TUD Office 2005.

17. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "CCF Parameter Estimations, 2007 Update, 2007.