

# К ВОПРОСУ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ С ОГРАНИЧЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ЗАПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**А. В. Антонов, А. В. Пляскин**

*Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



Статья посвящена расчету надежности систем с запасными элементами. Приведен обзор литературы по рассматриваемой проблеме. Разработан метод определения вероятности отказа системы со стратегией функционирования, описываемой нестационарным марковским процессом. Получено аналитическое выражение вероятности отказа для стационарного марковского процесса в случае одного запасного элемента. Предложен упрощенный метод решения задачи расчета надежности для рассматриваемой системы. Приведены результаты расчета ВБР для элементов СУЗ Билибинской АЭС.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации оборудования атомных электростанций необходимо обеспечить высокий уровень безопасности и надежности. Этому способствуют проведение плановых профилактических мероприятий, контроль исправности функционирования объектов, обеспечение достаточным составом запасных изделий и приборов (ЗИП) для оперативной замены вышедшего из строя оборудования.

В нынешних условиях, когда российская экономика переживает кризис, предприятия атомной отрасли не имеют средств для пополнения состава ЗИП. В свою очередь, нехватка ЗИП может привести к простоем оборудования и, следовательно, вызвать еще большие экономические потери. Таким образом, практика эксплуатации вновь остро ставит вопрос об обосновании требуемого количества запасных изделий, необходимых для обеспечения бесперебойного функционирования промышленных объектов.

Вопросы определения оптимального состава ЗИП, а также расчета надежности систем с учетом запасных элементов рассматривались в работах как отечественных, так и зарубежных авторов [1-7].

Так, задача определения количества запасных элементов, необходимых для бесперебойной работы системы в течение заданного периода времени с вероятностью не ниже требуемой при пуассоновском процессе распределения отказов и при условии мгновенной замены отказавшего элемента, рассмотрена в [1, с. 79]. Там же [1, с. 231-233] рассмотрена модель анализа надежности системы с  $n$  запасными элементами и с ремонтным органом. Предполагается, что восстановление отказавшего элемента происходит мгновенно.

В работе [2, с. 173 - 176] рассматривается метод расчета надежности системы,

---

© А. В. Антонов, А. В. Пляскин, 2000

имеющей запасные элементы, с известными интенсивностями отказов и восстановлений элементов. В основе модели расчетов используется марковский процесс типа «размножения и гибели». При построении модели учитывается, что система может оказаться в поглощающем состоянии. Там же [2, с. 336 - 346] решается задача оптимизации состава ЗИП в условиях, когда замена осуществляется блоками, блоки, в свою очередь, подлежат ремонту.

В работе И.А. Ушакова [3, с. 105-113] описана модель оптимального обеспечения блоками и элементами систем с иерархической структурой.

В [4, с. 162 - 171] описаны модели определения объема запасных элементов для обеспечения эксплуатации по заданному ресурсу, оптимизации количества запасных элементов с учетом стоимостных показателей, оценки количества запасных элементов при эксплуатации по состоянию.

В работе [5] рассмотрены вопросы вычисления показателей достаточности ЗИП и оптимизации его комплекта; рассмотрены разнообразные структуры системы ЗИП и стратегии пополнения запасов. Вводятся показатели достаточности, которые позволяют учитывать поправку, вносимую ограниченностью ЗИП в показатель надежности изделия. Для вычисления показателя достаточности использована стандартная схема «гибели и размножения». Получены стационарные значения вероятности соответствующих состояний.

В статье [6] осуществлена стандартизация методов расчета надежности. Отмечено, что существует всего один международный стандарт, описывающий методику проведения марковского анализа, который охватывает только наиболее простые виды резерва. Получены простые соотношения для показателей безотказности изделий с резервом различного вида.

Вопросам расчета оптимального комплекта запасных частей посвящена статья [7]. В ней основное внимание уделено устройствам типа сменных блоков современной ЭВМ, содержащих большое число элементов. На основании фундаментальных теорем теории вероятностей сформулированы условия, выполнение которых позволяет избежать систематических ошибок при расчетах ЗИП, возникающих из-за неадекватности экспоненциальной и реальной функций распределения наработок сменных блоков до отказа при наличии информации только о средних значениях интенсивностей отказов.

Таким образом, анализ литературы по методам расчета надежности объектов с учетом запасных элементов позволяет сделать вывод о том, что в имеющихся монографиях и статьях широко представлены различные, как правило, асимптотические модели. В большинстве рассматриваемых моделей делается предположение о мгновенной замене отказавшего элемента. Указанные допущения и предположения приводят к упрощению расчетных формул, но ведут к потере точности расчетов.

Объекты ядерной энергетики имеют особенность, отличающую их от других технических объектов и состоящую в том, что к их характеристикам надежности предъявляются высокие требования. Так, коэффициент неготовности (или вероятность невыполнения задачи) для каналов системы аварийной защиты должен быть не более чем  $10^{-7}$ . Высокие требования предъявляются также к точности расчетов.

Объекты систем ядерных энергетических установок относятся к классу высоконадежных объектов. Их отказы - события редкие. Нарботки элементов до отказа сравнимы по порядку величины с общим временем эксплуатации системы. Поэтому возникает задача разработки неасимптотических моделей. Высокие требования к точности результатов расчетов приводят к тому, что нельзя пренебречь временем восстановления.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется провести расчет характеристик надежности комплекта рабочий элемент - запасные элементы.

Стратегия функционирования элемента следующая. В начальный момент времени элемент находится в исправном состоянии. С интенсивностью  $\lambda(t)$  элемент отказывает. В случае отказа элемент заменяется на резервный. Интенсивность замены элемента  $\mu(t)$ . Неисправный элемент отправляется в ремонт. После ремонта элемент считается восстановившим работоспособность и переходит в резерв. Интенсивность ремонта  $v(t)$ . Если исправных элементов в резерве не осталось, наступает отказ. Описанная стратегия функционирования может быть представлена с помощью графа, приведенного на рис.1.

Состояние объекта на графе будем обозначать двумя символами  $(k,i)$ , где первый символ означает количество запасных элементов,  $k=0..n$ , второй символ - состояние основного элемента, находящегося под нагрузкой,  $i=1$  - элемент работоспособен,  $i=0$  - элемент неработоспособен.

Рассмотрим функционирование объекта с запасными элементами более подробно. В начале работы элемент находится с вероятностью 1 в состоянии  $(n,1)$  - в наличии имеется  $n$  запасных элементов, объект работоспособен. В случайный момент времени с интенсивностью отказа  $\lambda(t)$  элемент переходит в состояние  $(n,0)$  -  $n$  запасных элементов, объект в состоянии отказа, начинается замена элемента. С интенсивностью восстановления  $\mu(t)$  объект переходит в состояние  $(n-1,1)$  -  $n-1$  запасной элемент, объект работоспособен. Из этого состояния возможны переходы в состояние  $(n,1)$  с интенсивностью восстановления  $v(t)$  (ремонт окончен, в резерве опять  $n$  элементов) или в состояние  $(n-1,0)$  с интенсивностью  $\lambda(t)$  (ремонт не закончен до наступления следующего отказа) и т.д. Состояние  $(0,0)$  является поглощающим и обозначает отказ объекта и отсутствие запасных элементов.

Рассмотренная стратегия функционирования может быть описана нестационарным марковским процессом [13] и представлена в виде

$$\begin{aligned}
 & \frac{dP_{n,1}(t)}{dt} = -\lambda(t)P_{n,1}(t) + v(t)P_{n-1,1}(t), \\
 & \frac{dP_{n,0}(t)}{dt} = -\mu(t)P_{n,0}(t) + \lambda(t)P_{n,1}(t), \\
 & \text{-----} \\
 & \frac{dP_{i,1}(t)}{dt} = \mu(t)P_{i+1,0}(t) + v(t)P_{i-1,1}(t) - (\lambda(t) + v(t))P_{i,1}(t), \\
 & \frac{dP_{i,0}(t)}{dt} = \lambda(t)P_{i,1}(t) - \mu(t)P_{i,0}(t), \\
 & \text{-----} \\
 & \frac{dP_{0,1}(t)}{dt} = \mu(t)P_{1,0}(t) - (\lambda(t) + v(t))P_{0,1}(t), \\
 & \frac{dP_{0,0}(t)}{dt} = \lambda(t)P_{0,1}(t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $P_{ij}$  - вероятность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ .

Нестационарные интенсивности переходов  $\lambda(t)$ ,  $\mu(t)$ ,  $v(t)$  можно определить через плотность распределения соответствующей случайной величины. Например, интенсивность перехода из работоспособного состояния в состояние отказа  $\lambda(t)$  в терминах теории надежности представляет собой параметр потока отказов и определяется через плотность распределения наработки  $f_{\xi}(t)$  следующим образом:

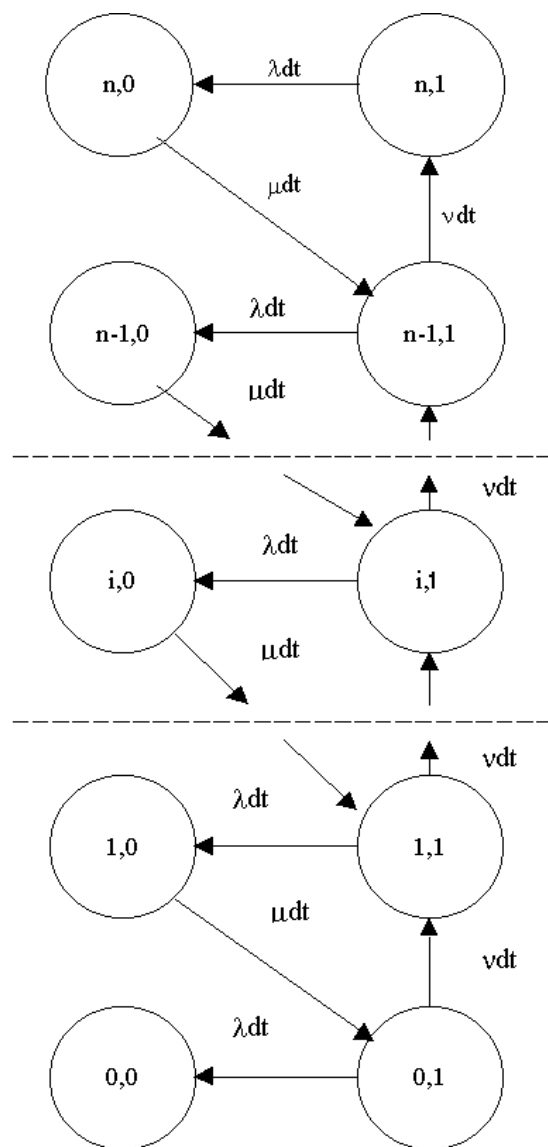


Рис. 1. Граф переходов. Один рабочий элемент,  $n$  запасных элементов

$$\lambda(t) = f_{\xi}(t) + \int_0^t \lambda(t-u) f_{\xi}(u) du.$$

Методы решения данного интегрального уравнения Вольтерра 2-го рода известны. Так, для ряда законов распределения случайной величины можно использовать методику преобразований Лапласа; в результате получим

$$\begin{aligned} \lambda(p) &= f(p) + \lambda(p)f(p), \\ \lambda(p) &= \frac{f(p)}{1-f(p)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Известно [1], что для экспоненциального закона

$$\lambda(p) = \frac{\lambda}{p},$$

$$\lambda(t) = \lambda.$$

Для других распределений получить оригинал по изображению в явном виде затруднительно, но, т.к.  $f(p) \leq 1$ , то уравнение (2) можно разложить в сходящийся ряд

$$\lambda(p) = \sum_{k=1}^{\infty} f^k(p)$$

и затем перейти от суммы изображений к сумме оригиналов. Например, для гамма-распределения получаем следующий результат:

$$\lambda(p) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta^{k\alpha}}{(p+\beta)^{k\alpha}},$$

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_{\Gamma(k\alpha, \beta)} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta^{k\alpha} t^{k\alpha-1}}{\Gamma(k\alpha)} e^{-\beta t} = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\beta t)^{k\alpha}}{\Gamma(k\alpha)}.$$

Аналогичные действия проводятся для интенсивностей  $\mu(t)$  и  $v(t)$ .

Система дифференциальных уравнений (1) не имеет аналитического решения. Однако разработаны численные методы решения систем такого типа. В нашем случае для решения системы уравнений (1) использовались модули программного комплекса MATHCAD.

В большинстве случаев систему (1) можно упростить, если считать параметры модели  $\lambda(t)$ ,  $\mu(t)$ ,  $v(t)$  постоянными величинами. Для электронных блоков и элементов после завершения периода приработки параметр потока отказов можно считать константой  $\lambda(t) = \lambda$ . Аналогичные допущения можно сделать и для величин  $\mu(t) = \mu$ ,  $v(t) = v$ . Тогда система (1) может быть записана в виде

$$\begin{aligned}
 dP_{n,1}(t)/dt &= -\lambda P_{n,1}(t) + \nu P_{n-1,1}(t), \\
 dP_{n,0}(t)/dt &= -\mu P_{n,0}(t) + \lambda P_{n,1}(t), \\
 &----- \\
 dP_{i,1}(t)/dt &= \mu P_{i+1,0}(t) + \nu P_{i-1,1}(t) - (\lambda + \nu) P_{i,1}(t), \\
 dP_{i,0}(t)/dt &= \lambda P_{i,1}(t) - \mu P_{i,0}(t), \\
 &----- \\
 dP_{0,1}(t)/dt &= \mu P_{1,0}(t) - (\lambda + \nu) P_{0,1}(t), \\
 dP_{0,0}(t)/dt &= \lambda P_{0,1}(t),
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$i = 1..n-1.$$

В общем случае при больших  $n$  решение системы вызывает значительные трудности. В частных случаях, задаваясь конкретным значением  $n$  - числа запасных элементов, решение системы можно получить аналитически. Покажем возможность аналитического решения для случая одного запасного элемента. Запишем систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 dP_{1,1}(t)/dt &= -\lambda P_{1,1}(t) + \nu P_{0,1}(t), \\
 dP_{1,0}(t)/dt &= -\mu P_{1,0}(t) + \lambda P_{1,1}(t), \\
 dP_{0,1}(t)/dt &= \mu P_{1,0}(t) - (\lambda + \nu) P_{0,1}(t), \\
 dP_{0,0}(t)/dt &= \lambda P_{0,1}(t).
 \end{aligned}$$

Преобразуем эту систему с помощью преобразований Лапласа

$$\begin{aligned}
 (p + \lambda)R(p)_{1,1} - \nu R(p)_{0,1} &= 1, \\
 (p + \mu)R(p)_{1,0} - \lambda R(p)_{1,1} &= 0, \\
 (p + \lambda + \nu)R(p)_{0,1} - \mu R(p)_{1,0} &= 0, \\
 pR(p)_{0,0} - \lambda R(p)_{0,1} &= 0,
 \end{aligned}$$

где  $R_{ij}(p)$  – изображение функции  $P_{ij}(t)$ . Решая данную систему относительно  $R_{ij}(p)$ , получим

$$\begin{aligned}
 R(p)_{1,1} &= \frac{(p + \mu)(p + \lambda + \nu)}{p^3 + (2\lambda + \nu + \mu)p^2 + (\nu\mu + \lambda^2 + \lambda\nu + 2\lambda\mu)p + \lambda^2\mu}, \\
 R(p)_{1,0} &= \frac{p + \lambda + \nu}{p^3 + (2\lambda + \nu + \mu)p^2 + (\nu\mu + \lambda^2 + \lambda\nu + 2\lambda\mu)p + \lambda^2\mu}, \\
 R(p)_{0,1} &= \frac{\lambda\mu}{p^3 + (2\lambda + \nu + \mu)p^2 + (\nu\mu + \lambda^2 + \lambda\nu + 2\lambda\mu)p + \lambda^2\mu}, \\
 R(p)_{0,0} &= \frac{\lambda^2\mu}{p(p^3 + (2\lambda + \nu + \mu)p^2 + (\nu\mu + \lambda^2 + \lambda\nu + 2\lambda\mu)p + \lambda^2\mu)}.
 \end{aligned}$$

Выразим знаменатель данных соотношений в виде произведения

$$p^3 + (2\lambda + \nu + \mu)p^2 + (\nu\mu + \lambda^2 + \lambda\nu + 2\lambda\mu)p + \lambda^2\mu = (p - a)(p - b)(p - c),$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  являются корнями уравнения

$$p^3 + (2\lambda + \nu + \mu)p^2 + (\nu\mu + \lambda^2 + \lambda\nu + 2\lambda\mu)p + \lambda^2\mu = 0.$$

Аналитическое выражение корней уравнения через  $\lambda$ ,  $\mu$  и  $\nu$  не приводится в силу его громоздкости.

После обратного преобразования Лапласа получим следующие значения:

$$P_{1,1} = \exp(at) \left( \frac{\mu(\lambda + \nu) + a\mu + a(\lambda + \nu) + a^2}{bc - ac - ab + a^2} \right) - \exp(bt) \left( \frac{\mu(\lambda + \nu) + (\lambda + \nu)b + \mu b + b^2}{-b^2 + ab + bc - ac} \right) + \\ + \exp(ct) \left( \frac{c^2 + (\lambda + \nu)c + \mu c + \mu(\lambda + \nu)}{-bc + ab + c^2 - ac} \right)$$

$$P_{1,0} = \exp(at) \left( \lambda \frac{-(\lambda + \nu) - a}{-bc + ab + ac - a^2} \right) + \exp(bt) \left( \lambda \frac{(\lambda + \nu) + b}{-bc - ab + ac + b^2} \right) + \\ + \exp(ct) \left( \lambda \frac{(\lambda + \nu) + c}{-ac - bc + ab + c^2} \right)$$

$$P_{0,1} = -\lambda\mu \frac{\exp(at)}{(-bc + ab + ac - a^2)} + \lambda\mu \frac{\exp(bt)}{(-bc - ab + ac + b^2)} + \lambda\mu \frac{\exp(ct)}{(-ac - bc + ab + c^2)},$$

$$P_{0,0} = -\lambda^2\mu \frac{\exp(at)}{a(-bc + ab + ac - a^2)} + \lambda^2\mu \frac{\exp(bt)}{b(-bc - ab + ac + b^2)} + \lambda^2\mu \frac{\exp(ct)}{c(-ac - bc + ab + c^2)} + \frac{\lambda^2\mu}{abc}.$$

Методика численного решения системы дифференциальных уравнений (3) при конкретных значениях количества запасных элементов реализована на ЭВМ в среде «MATHCAD».

*Для системы дифференциальных уравнений типа (3) стационарного режима не существует, так как при времени работы, стремящемся к бесконечности, вероятность попасть в поглощающее состояние стремится к единице.*

Однако систему (3) можно упростить, если записать условно-стационарное состояние. Для этого положим равными нулю все производные, стоящие в левых частях всех уравнений кроме последнего. В результате такого допущения мы сознательно увеличиваем ошибку итогового результата, но такой подход, с одной стороны, позволяет существенно упростить решение, с другой стороны, сохраняет зависимость вероятностей от времени.

В итоге получим систему

$$\begin{aligned} 0 &= -\lambda P_{n,1}(t) + \nu P_{n-1,1}(t), \\ 0 &= -\mu P_{n,0}(t) + \lambda P_{n,1}(t), \\ &----- \\ 0 &= \mu P_{i+1,0}(t) + \nu P_{i-1,1}(t) - (\lambda + \nu) P_{i,1}(t), \\ 0 &= \lambda P_{i,1}(t) - \mu P_{i,0}(t), \\ &----- \\ 0 &= \mu P_{1,0}(t) - (\lambda + \nu) P_{0,1}(t), \\ dP_{0,0}(t)/dt &= \lambda P_{0,1}(t), \end{aligned}$$

$$i = 1..n-1.$$

Произведем элементарные преобразования:

$$P_{1,0} = \frac{\lambda + v}{\mu} P_{0,1},$$

-----

$$P_{i,1} = \frac{\mu}{\lambda} P_{i,0},$$

$$P_{i+1,0} = \frac{\lambda + v}{\lambda} P_{i,1} - \frac{v}{\mu} P_{i-1,1},$$

-----

$$P_{n,1} = \frac{\mu}{\lambda} P_{n,0},$$

$$P_{n-1,1} = \frac{\lambda}{v} P_{n,0}.$$

Из последних соотношений видно, что каждая из вероятностей системы может быть выражена через вероятность  $P_{0,1}(t)$ .

Например,

$$P_{1,1}(t) = \frac{\mu}{\lambda} P_{1,0}(t) = \frac{\lambda + v}{\lambda} P_{0,1}(t),$$

$$P_{2,0}(t) = \frac{\lambda + v}{\mu} P_{1,1}(t) - \frac{v}{\mu} P_{0,1}(t) = \frac{(\lambda + v)^2}{\lambda \mu} P_{0,1}(t) - \frac{v}{\mu} P_{0,1}(t),$$

$$P_{2,1}(t) = \frac{\mu}{\lambda} P_{2,0}(t) = \frac{(\lambda + v)^2}{\lambda^2} P_{0,1}(t) - \frac{v}{\lambda} P_{0,1}(t)$$

и т.д.

Воспользовавшись условием нормировки можно записать

$$P_{0,0}(t) + P_{0,1}(t) + P_{1,1}(t) + P_{1,0}(t) + \dots + P_{n,1}(t) = 1. \quad (4)$$

Поскольку все слагаемые, кроме  $P_{0,0}$  выражаются через вероятность  $P_{0,1}$ , то выражение (3) можно переписать в виде

$$P_{0,0}(t) + dP_{0,1}(t) = 1 \text{ или } P_{0,0}(t) = 1 - dP_{0,1}(t),$$

где  $d$  - некоторая константа, отражающая взаимосвязь вероятности  $P_{0,1}$  с другими величинами.

Подставляя выражение для  $P_{0,0}$  в последнее уравнение системы (3), получим:

$$d \frac{dP_{0,1}(t)}{dt} = -\lambda P_{0,1}(t),$$

откуда

$$P_{0,1}(t) = \exp\left(-\frac{\lambda}{d} t\right)$$

Следовательно,

$$P_{0,0}(t) = 1 - d \cdot \exp\left(-\frac{\lambda}{d} t\right)$$

Константа  $d$  довольно просто вычисляется, если известно количество запасных элементов. Так для одного запасного элемента

$$d = \frac{\lambda\mu + \lambda^2 + \lambda v + \mu v}{\lambda\mu},$$

для двух запасных элементов

$$d = \frac{(v+\lambda)^2}{\lambda^2} - \frac{v}{\lambda} + \frac{(\lambda+v)^2}{\mu\lambda} - \frac{v}{\mu} + \frac{\lambda+v}{\lambda} + \frac{\lambda+v}{\mu} + 1,$$

для трех запасных элементов

$$d = 1 + \frac{\lambda+v}{\mu} + \frac{\lambda+v}{\lambda} + \frac{(\lambda+v)^2}{\mu\lambda} - \frac{v}{\mu} + \frac{(\lambda+v)^2}{\lambda^2} - \frac{v}{\lambda} + \frac{(\lambda+v)^3}{\lambda^2\mu} - \frac{(\lambda+v)v}{\lambda\mu} - \frac{(\lambda+v)v}{\mu^2} + \frac{(\lambda+v)^3}{\lambda^3} - \frac{(\lambda+v)v}{\lambda^2} - \frac{(\lambda+v)v}{\mu\lambda}.$$

Таким образом, получено простое решение задачи расчета надежности объекта с ограниченным количеством запасных элементов в случае возобновляемого ЗИПа с заданными распределениями наработки до отказа, времени восстановления и ремонта.

С целью проверки правильности аналитического решения данная задача реализована методом статистических испытаний. Количество реализаций задавалось равным 1000000, при этом точность имитационного моделирования составляет  $1 \cdot 10^{-3}$ . Расчеты проводились для разных значений интенсивности отказа элемента и при разном числе запасных элементов. Результаты расчетов, проведенных с использованием аналитической модели и методом статистических испытаний, представлены в табл. 1. Проведенные расчеты показали хорошее совпадение результатов.

На рис. 2-7 приведены графики зависимостей вероятности отказа  $P_{0,0}$  от значений интенсивностей отказа, ремонта и восстановления. Значения времени работы изменяются от 0 до 80000 ч.

Таблица 1

N п/п	Значение $\lambda$ , 1/ч	Количество запасных элементов	Значение вероятности отказа	
			Аналитический расчет	Метод статистических испытаний
1	2	3	4	5
1	0.001	1	0.543	0.54
2		2	0.008	0.008
3		3	$7.829 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
4	0.0015	1	0.825	0.82
5		2	0.026	0.025
6		3	$3.921 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$
7	0.002	1	0.954	0.95
8		2	0.059	0.058
9		3	0.001	0.001



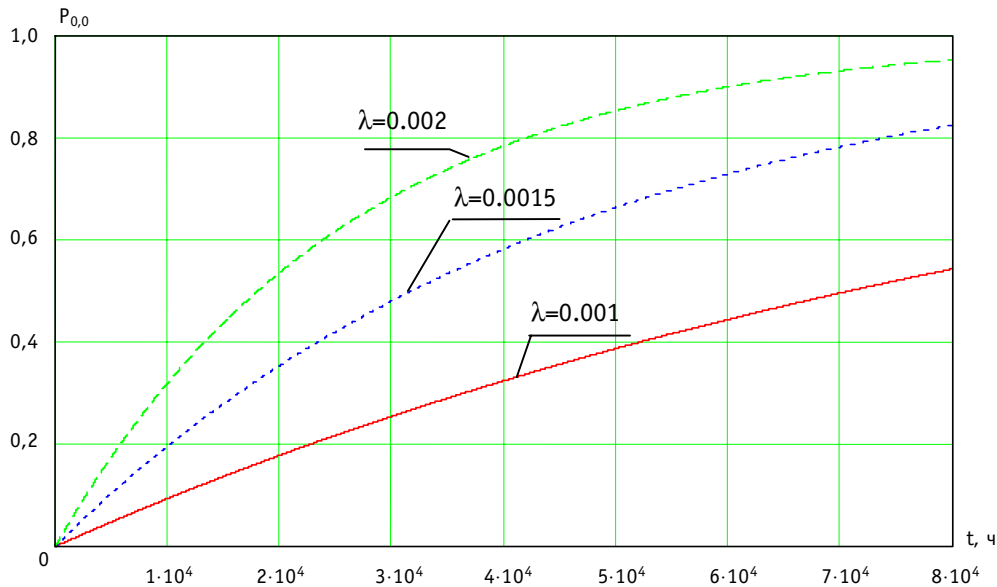


Рис. 2. График зависимости вероятности отказа системы от интенсивности отказа (один запасной элемент)

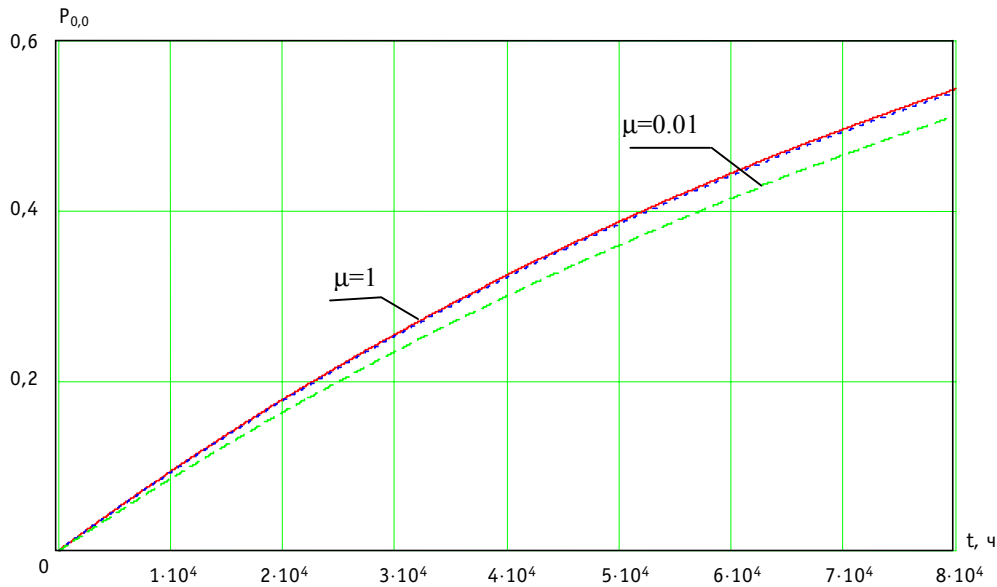


Рис. 3. График зависимости вероятности отказа системы от интенсивности замены (один запасной элемент)

Из графиков видно, что основной вклад в увеличение вероятности  $P_{0,0}$  вносит рост интенсивности отказов. Увеличение интенсивностей восстановления и ремонта, напротив, ведет к уменьшению вероятности отказа системы на заданном промежутке времени.

Проведем сравнение рассмотренного метода с широко известной схемой учета запасных элементов – схемой размножения и гибели. Важной особенностью, отличающей разработанный метод от схемы размножения и гибели, является учет моментов нахождения элементов в состоянии отказа в период их восстановления. Модель размножения и гибели предполагает мгновенное восстановление рабо-

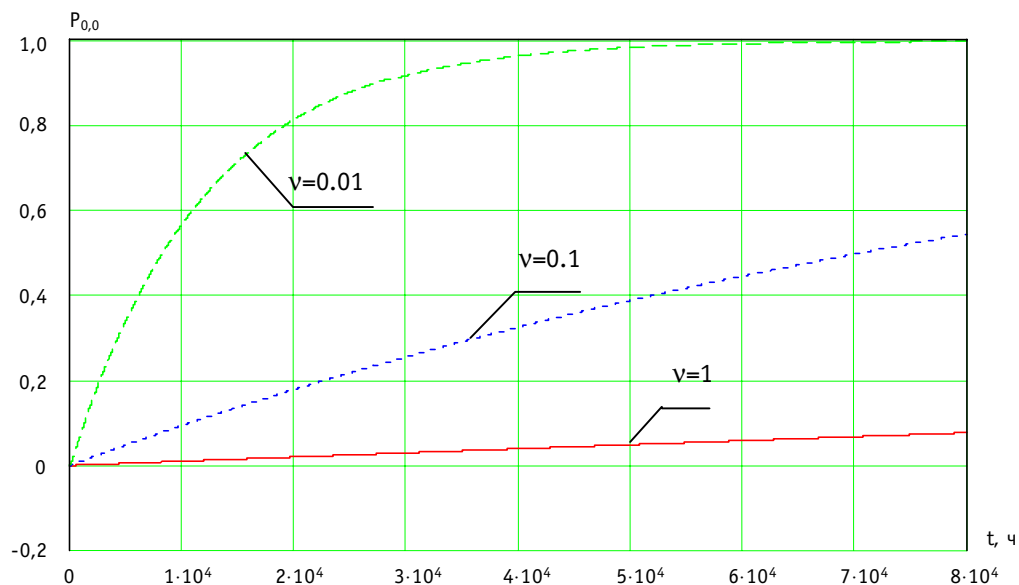


Рис. 4. График зависимости вероятности отказа системы от интенсивности восстановления (один запасной элемент)

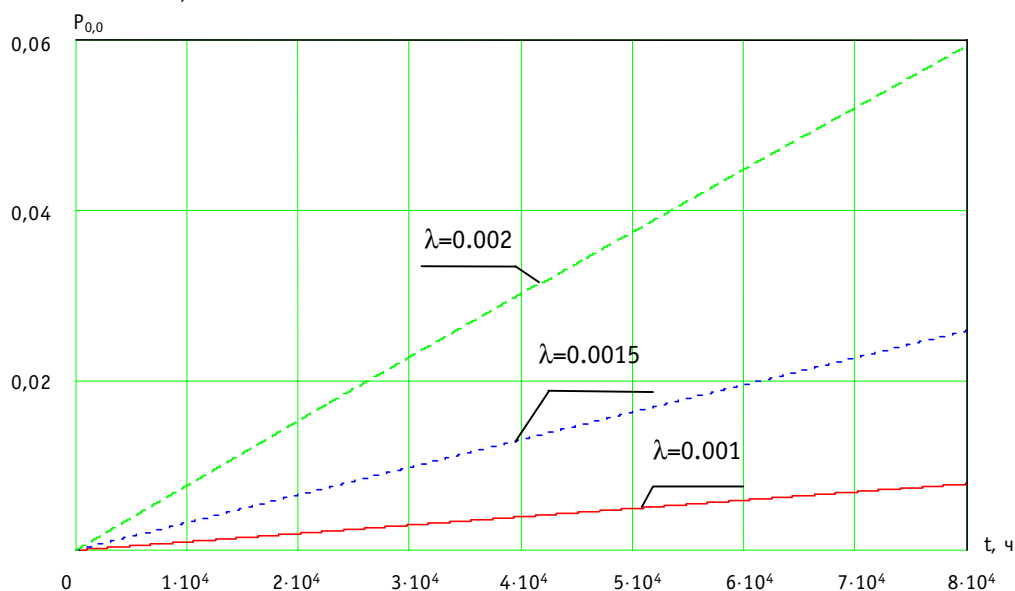


Рис. 5. График зависимости вероятности отказа системы от интенсивности отказа (два запасных элемента)

тоспособности элементов. С целью сравнения двух моделей в табл. 2 представлены результаты расчета вероятности отказа комплекта из-за нехватки запасных элементов.

Описанная методика была использована при расчете вероятности отказа элементов СУЗ Билибинской АЭС. В качестве примера приведем результаты, полученные как с учетом ЗИП, так и без учета использования запасных элементов. Для усилителя защиты по скорости точечная оценка вероятности отказа без учета ЗИП составила  $1.2778 \cdot 10^{-1}$ , с учетом ЗИП -  $2.634 \cdot 10^{-4}$ . Для усилителя автоматического регулирования точечная оценка вероятности отказа без учета ЗИП равна  $6.53 \cdot 10^{-2}$ ,

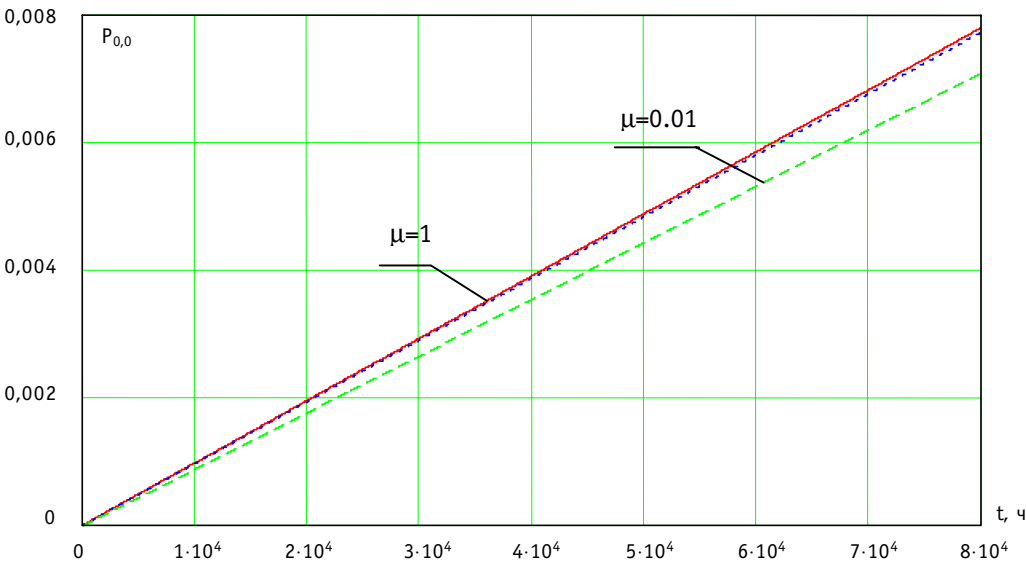


Рис. 6. График зависимости вероятности отказа системы от интенсивности замены: два запасных элемента

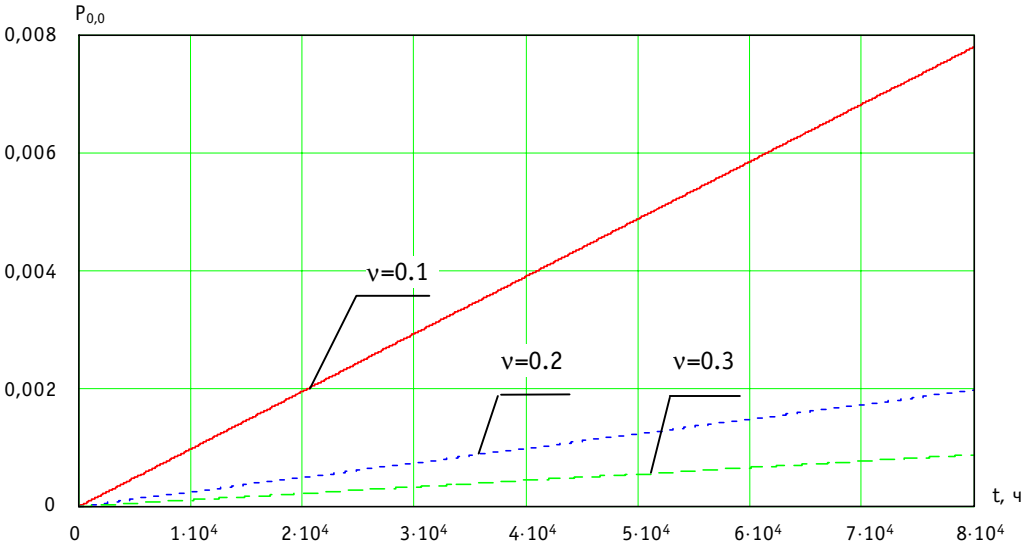


Рис. 7. График зависимости вероятности отказа системы от интенсивности восстановления: два запасных элемента

с учетом ЗИП -  $1.060E-04$ . При этом время замены неисправного элемента принималось равным 1 ч, а время ремонта - 10 ч. Эти данные соответствуют реальным эксплуатационным значениям. Учет использования резервных элементов позволяет получить результаты, более точно отражающие работу объектов в реальных условиях.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данная схема функционирования элемента максимально приближена к стратегии, имеющей место в практике функционирования систем, важных для безопасности атомных станций (АС).

Для рассмотренной стратегии проведены тестовые расчеты. Сравнение результатов расчетов, полученных с помощью аналитических моделей и метода статис-

Таблица 2

№ п/п	Интенсивность отказа, $\lambda$	Количество запасных элементов	$P_{0,0}$ (схема гибели и размножения)	$P_{0,0}$ (рассмотренный метод)
1	0.001	1	$5.435 \cdot 10^{-1}$	$5.432 \cdot 10^{-1}$
2	0.0015	1	$8.258 \cdot 10^{-1}$	$8.253 \cdot 10^{-1}$
3	0.002	1	$9.539 \cdot 10^{-1}$	$9.536 \cdot 10^{-1}$
4	0.001	2	$7.808 \cdot 10^{-3}$	$7.800 \cdot 10^{-3}$
5	0.0015	2	$2.585 \cdot 10^{-2}$	$2.581 \cdot 10^{-2}$
6	0.002	2	$5.960 \cdot 10^{-2}$	$5.948 \cdot 10^{-2}$
7	0.001	3	$7.837 \cdot 10^{-5}$	$7.829 \cdot 10^{-5}$
8	0.0015	3	$3.927 \cdot 10^{-4}$	$3.921 \cdot 10^{-4}$
9	0.002	3	$1.228 \cdot 10^{-3}$	$1.225 \cdot 10^{-3}$

тических испытаний, показало хорошее совпадение. Точность имитационного моделирования зависит от объема статистических испытаний.

Сравнение предложенной модели с широко известной моделью «размножения и гибели» показало, что предложенная стратегия является обобщением модели «размножения и гибели», она более объективно отражает процесс функционирования объектов, т.к. учитывает пребывание системы в неработоспособном состоянии во время замены отказавшего элемента. Это обстоятельство является очень важным, когда речь идет об объектах повышенного риска.

### Литература

1. Барлоу Р. Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. Пер. с англ. - М.: Наука, 1984.
2. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. /Под ред. Ю.Н. Руденко. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Ушаков И. А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. - М.: Радио и связь, 1991.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.8. Эксплуатация и ремонт /Под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича. - М.: Машиностроение, 1990.
5. Головин И. Н., Чуварыгин Б. В., Шура-Бура А. Э. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем. - М.: Радио и связь, 1984.
6. Демидович Н. О. Стандартизация расчетов надежности: расчет безотказности изделий с резервом // Надежность и контроль качества. - 1995. - №11.
7. Тхыонг Н. К. Метод расчета оптимального комплекта запасных частей // Надежность и контроль качества. - 1999. - №2.
8. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. - М.: Наука, 1991.

Поступила в редакцию 24.01.2000.

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.568.007.4

*Classification of the Factors Influencing the Activity of Operating Personnel of NPPs \A.N. Anokhin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 9 pages, 4 tables. – References, 3 titles.*

The paper describes a framework which can be followed when roots of NPP operator errors are evaluated. This framework includes particular classification of factors which influence upon NPP operating personnel performance. This classification incorporates 5 hierarchical levels and 82 factors grouped into 25 categories. To find the most important factors the expert study was carried out. 9 NPP operators participated in this study as experts. They were asked about three main problems in their shiftwork. As a result the following main factors were found: teamwork performance, emotional intensity, complexity of control tasks, and allocation of information in control room.

### УДК 621.039.58

*On a Qestion of Calculation of Reliability of athe System with Restricted Number of Spare Elements \A.V. Antonov, A.V. Plyaskin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 12 pages, 7 illustrations, 2 tables. – References, 8 titles.*

The paper is devoted to the problem of calculation of reliability of systems with spare elements. Literature review of this problem is given. The method of finding out the failure probability of the system with the strategy of operation described by the non-stationary Markovian process is developed. The analytical expression of the failure probability for the stationary Markovian process is obtained in case of one spare element. The simplified method of the reliability calculation for this system is offered. The results of calculation for the control and protection system components of the Bilibino NPP are given.

### УДК 681.3:002.513.5:621.039

*Electronic Bibliographic System on Erosion of Wear of Equipment of Nuclear and Thermal Power Installations \K.V. Dergachev, A.V. Lagerev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 3 illustrations, 2 tables*

The basic principles of design, structure and functional scheme of bibliographic system on erosion of wear of equipment of nuclear and thermal power installations are considered in this paper.

### УДК 681.3:621.039.007

*Information Support Complex of the VVR-c Operator. Experience of Creation of the First Version \I.N. Koziev, O.Yu. Kochnov, E.S. Stariznyi, Yu. V. Volkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 6 illustrations, 1 table. – References, 8 titles.*

The problem of raising of the reliability of VVR-c reactor functioning is considered. The possibility of improvement of exploitation of this reactor is shown by means of creation the "Complex of information support of the operator". The main principles of the system design are described. The results of the first stage of the solution of a problem represented.

### УДК 51-72:621.039.002

*Development of Optimization Model of a Nuclear Centre \P.E. Pereslavytzev, D. Sakhray; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 6 tables. – References, 7 titles.*

Mathematical model of a nuclear center (NC) is considered. The economical parameter is chosen to be a criterion for calculation of optimal NC structure. Information on nuclear reactors fueled with traditional fuel as well as reactor plutonium is used. Results obtained approve the proposed model applicability for calculation of the structure of energy production NCs.