

DOI: 10.5862/JCSTCS/7

УДК 004.942

В.В. Чуркин

ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКТА ЗИП С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

V.V. Churkin

ESTIMATION AND OPTIMIZATION OF SPARE PARTS KIT USING THE METHOD OF STATISTICAL MODELING

Рассмотрена актуальная задача оценки и оптимизации запасов в комплекте ЗИП с учетом прямого включения комплекта ЗИП в модель надежности системы методом статистического моделирования.

КОМПЛЕКТ ЗИП; МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ; ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКТА ЗИП; ОЦЕНКА КОМПЛЕКТА ЗИП.

The article considers a topical problem of the evaluation and optimization of stocks in the set of spare parts taking into account the direct connection of the set to the model of spare parts kit using the method of statistical modeling. The Monte Carlo method has not been used to design optimal sets of spare parts due to the lack of sufficient literature. It is not still well defined how to apply the Monte Carlo method in this area. The given article provides issues how to apply the Monte Carlo method to solve the given problem.

SET OF SPARE PARTS; A METHOD OF STATISTICAL MODELING; SPARE PARTS KIT OPTIMIZATION; SPARE PARTS KIT EVALUATION.

На сегодняшний день актуальна задача оценки надежности изделий электронной техники, использующих комплект запасного имущества и принадлежностей (ЗИП). Это связано в первую очередь с пониманием несовершенства методик расчета надежности изделий при наличии ЗИП, которые используются в промышленности и поддерживаются авторитетом действующих нормативных документов уровня ГОСТ и РД [1, 2].

Согласно руководящим документам комплект ЗИП создается, с одной стороны,

для обеспечения надежности, поддержания работоспособности (безотказности, готовности), выполнения требований к надежности. С другой стороны, он нужен для обеспечения ремонтпригодности, проведения технического обслуживания в интересах поддержания работоспособности. При этом количественный состав комплекта ЗИП должен рассчитываться с учетом требований по надежности [3].

На вопрос о том, каким образом сформировать комплект ЗИП, есть ответ в нормативных документах: предлагается раз-

делить задачу обеспечения надежности изделия с ЗИП на две подзадачи:

- найти связь между показателем надежности (ПН) изделия и показателем достаточности (ПД) комплекта ЗИП, далее, из требования к ПН изделия, предъявленного в техническом задании (ТЗ), вывести нормируемый ПД комплекта ЗИП;

- провести оптимизацию комплекта ЗИП по ПД по критерию минимума суммарных затрат.

Для того чтобы связать ПН изделия и ПД ЗИП в руководящих документах [2, 3] предлагаются следующие формулы:

$$K_r = K_{r, \text{ЗИП}} K_{r_{\infty}}, \quad (1)$$

где K_r – коэффициент готовности изделия; $K_{r, \text{ЗИП}}$ – коэффициент готовности ЗИП; $K_{r_{\infty}}$ – K_r при неограниченном ЗИП.

Формула (1) верна только для расчета показателя готовности изделия при отсутствии внутреннего резервирования. Для других случаев используется модель надежности восстанавливаемого изделия при неограниченном ЗИП, в которой проводится коррекция среднего времени восстановления по формуле:

$$\bar{T}_v = \bar{T}_{v\infty} + \Delta t_{\text{ЗИП}}, \quad (2)$$

где \bar{T}_v – среднее время восстановления; $\bar{T}_{v\infty}$ – \bar{T}_v при неограниченном ЗИП; $\Delta t_{\text{ЗИП}}$ – среднее время задержки в удовлетворении заявок на ЗЧ.

Для задания требуемого уровня $K_{r, \text{ЗИП}}$ (если он не задан в ТЗ) можно воспользоваться следующим соотношением:

$$K_{r, \text{ЗИП}}^{\text{тр}} = K_r^{\text{тр}} / K_{r_{\infty}}. \quad (3)$$

Формулу (3) можно использовать только при выполнении двух условий: нормируется коэффициент готовности изделия и в изделии нет резервирования. В случае наличия резервирования предлагается использовать следующую формулу:

$$\Delta t_{\text{ЗИП}}^{\text{тр}} = \bar{T}_v^{\text{тр}} - \bar{T}_{v\infty}. \quad (4)$$

Формула для связи ПД выглядит следующим образом:

$$\Delta t_{\text{ЗИП}} = -\ln(K_{r, \text{ЗИП}}) / \lambda_c, \quad (5)$$

где λ_c – суммарная интенсивность отказов изделия.

Подход, взятый в руководящих документах [1, 2], при котором сначала рассчитывается ПД ЗИП, а потом с помощью него происходит корректировка ПН изделия, имеет ряд достоинств:

позволяет разделить одну сложную задачу на две более простых;

позволяет использовать все результаты современной теории надежности восстанавливаемых систем при неограниченном восстановлении;

облегчает формирование решений по применению внутреннего структурного резервирования на основе требований к показателям надежности типа $K_{r_{\infty}}$.

Вместе с тем он имеет и существенные недостатки. Главный из них состоит в том, что такой методический прием дает приближенное значение ПН с неисследованной погрешностью. Причем никак не гарантируется знак погрешности, т. е. оценка показателя надежности может быть как сверху, так и снизу от точного значения. В некоторых случаях ошибка становится неприемлемо большой.

Очевидно, что недостатки методик расчета и оценки комплектов ЗИП приводят к ошибкам двух типов: либо к необоснованной избыточности комплектов ЗИП, либо к невыполнению требований к надежности. И первое, и второе, в конечном счете, оборачивается прямыми экономическими потерями, иногда весьма значительными, а в ряде случаев и другими не менее ощутимыми потерями (престижа, утратой позиций на внутреннем и международном рынке и пр.).

Одновременно в сложившейся практике разработки технических систем попытка использования приближенной методики привела к тому, что в ТЗ на разработку задаются требования к надежности изделия (чаще всего средняя наработка до отказа – T_0 или вероятность безотказной работы – $P(t)$) и требование к ПД комплекта ЗИП. Это происходит потому, что для обычно нормируемого ПН изделия – показателя безотказности T_0 невозможно вывести требование для ПД комплекта ЗИП. Допустим, проектируемое изделие представляет собой последовательную нерезервирован-

ную с точки зрения надежности систему и дано требование к T_0 , требуется вывести ограничение для ПД ЗИП. Тогда воспользуемся формулами (3) и (4), с учетом того, что $K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_b}$. Положим, восстановление происходит мгновенно, тогда $K_{г\infty} = 1$ и $T_{в\infty} = 0$. Получим:

$$K_r^{тр} = \frac{T_0}{T_0 + \Delta t_{ЗИП}} = \frac{T_0}{T_0 - \ln(K_r^{тр}) / \lambda_c} = \frac{1}{1 - \ln K_r^{тр}}, \quad (6)$$

где $\lambda_c = \frac{1}{T_0}$.

Так как (6) не имеет решения, следовательно, невозможно вывести требование к ПД ЗИП, имея лишь требование к T_0 изделия. Аналогичные выводы справедливы и в случае если нормируется ВБР изделия.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что тезис, приведенный в [3], о том что количество ЗЧ в комплекте ЗИП должно рассчитываться с учетом предъявленных требований по надежности изделия выполняется только в том случае, если задан K_r – комплексный показатель безотказности и ремонтпригодности или показатель ремонтпригодности – T_b , что иллюстрирует рис. 1.

Поскольку основными нормируемыми в ТЗ показателями надежности изделия явля-

ются показатели безотказности T_0 или $P(t)$, то в этом случае для задания требований к ЗИП дополнительно нормируется T_b либо ПД ЗИП. Поэтому на простой с виду вопрос о том, для чего же создается комплект ЗИП, непросто ответить: то ли для улучшения показателей безотказности изделия (но в этом случае неясна связь между показателем безотказности и ПД, с помощью которого формируется ЗИП), то ли для улучшения показателей технического обслуживания.

Все перечисленные выше недостатки обусловили потребность в разработке нового раздела теории надежности, который исключал бы ошибки, содержащиеся в приближенной методике, широко применяемой в настоящее время в промышленности [4]. Идея разработки нового подхода к учету влияния ЗИП состоит в прямом включении комплекта ЗИП в модель надежности «изделие – комплект ЗИП» [4, 5]. В этом случае комплект ЗИП рассматривается как ресурс, предназначенный для повышения надежности системы «изделие – комплект ЗИП».

В модели надежности учитываются особенности стратегии пополнения запасов, ее параметры, структура обслуживаемой системы и структура системы ЗИП, условия хранения запасов, многофункциональность изделия, возможности реконфигурации структуры, неодинаковые условия

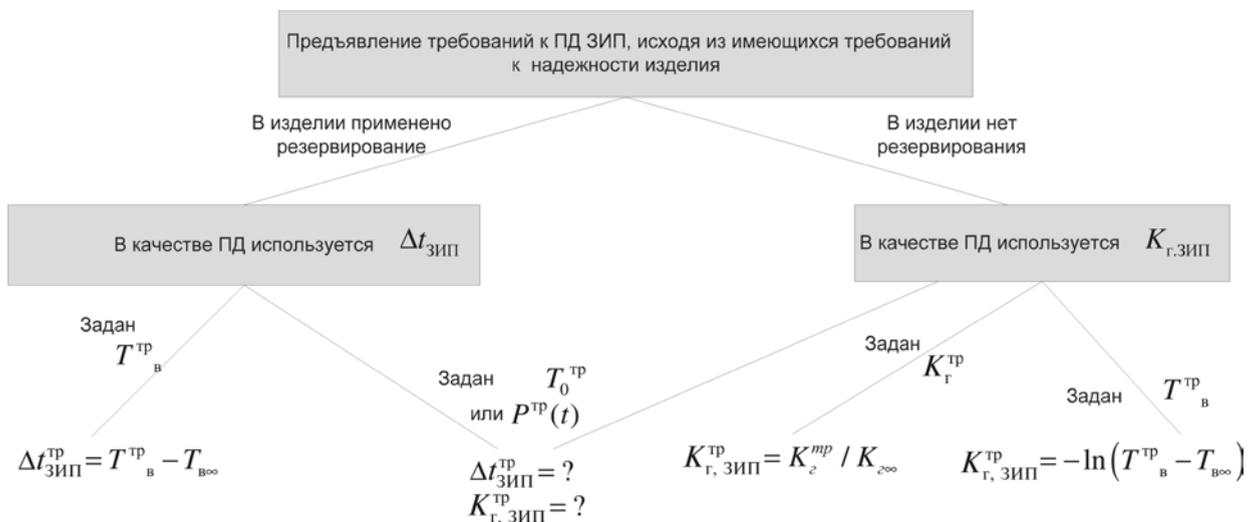


Рис. 1. Механизм предъявления требований к комплекту ЗИП

доступности запасов для различных подсистем, приоритетность доступа к запасам со стороны подсистем и функционально самостоятельных операций; возможности маневрирования ресурсами, в частности, возможности реконфигурации (перевода части работоспособных, но не участвующих в функционировании элементов деградированной структуры в состав комплекта ЗИП) и пр.

При прямом включении ЗИП в модель надежности отпадает необходимость в вычислении показателей достаточности: для задания требований к ЗИП достаточно лишь одного показателя безотказности T_0 или $P(t)$. Показатели достаточности могут рассчитываться только для сведения и для планирования работы системы технического обслуживания.

На рис. 2 схематично изображены два подхода к решению задачи обеспечения надежности изделия с учетом ЗИП: наверху – точная модель надежности «изделие – комплект ЗИП»; внизу – приближенная модель надежности, согласно действующим нормативным документам.

Очевидно, что точная модель «изделие – комплект ЗИП» не обладает универсальностью, присущей приближенной модели. Это происходит из-за многообразия исходных структур резервирования изделия. Количество различных применяющихся на практике структур резервирования достаточно велико, поэтому ядром нового раздела является некоторый набор типовых, наиболее часто используемых моделей структур для различных стратегий пополнения запасов [6].

Для поиска вероятностных характеристик моделей структур ядра могут использоваться как аналитические методы (метод декомпозиции, логико-вероятностный метод, метод Марковских графов аппарата системы дифференциальных уравнений Колмогорова), так и метод статистического моделирования (МСМ). Сложность применения аналитических методов для нахождения требуемых характеристик зависит от принятой стратегии пополнения ЗИП, от типа внутренней структуры изделия и в некоторых случаях может быть неприемле-

мой. Альтернативный способ нахождения численных значений показателей надежности – метод статистического моделирования.

Для расчета надежности можно выделить несколько широко используемых программных пакетов: отечественные «РОКЗЭРСИЗ», «АСОНИКА-К», «Арбитр»; зарубежные Relex, Windchill. Зарубежные программные пакеты не предназначены для оценки и оптимизации комплектов ЗИП, вообще на Западе количество запасных частей в комплекте определяется «на глазок» [7]. В ППП «РОКЗЭРСИЗ», разработанной 22 ЦНИИ МО РФ, реализована программная поддержка прямой и обратной задач оптимизации комплекта ЗИП по критерию достаточности в соответствии с [1, 2]. В ПК «Арбитр» не предусмотрено решение задач, связанных с использованием комплекта ЗИП. В ПК «Асоника-К-ЗИП» реализована возможность оценки и оптимизации комплекта ЗИП в соответствии с [1, 2]. С помощью ПК «Асоника-К-РЭС» нами [8] была произведена оценка надежности системы «изделие – комплект ЗИП» с помощью МСМ. По полученным результатам МСМ признан как наиболее перспективный метод расчета систем вида «изделие – система ЗИП» [8].

Что касается применения метода статистического моделирования (МСМ), то в современной теории надежности он находит применение при оценке надежности структурно-сложных восстанавливаемых систем, где получение решения аналитическими методами затруднено. К достоинствам метода можно отнести универсальность и слабую зависимость трудоемкости расчетов от типа структуры изделия. К недостаткам метода следует отнести возрастание погрешности и трудоемкости расчетов при оценке малых вероятностей.

Для проектирования оптимальных комплектов ЗИП МСМ до последнего времени не использовался в связи с тем, что, как указывалось выше, история публикаций по актуальной проблеме оценки надежности систем с учетом ЗИП насчитывает немногим более 10 лет. Применение МСМ в этой области еще недостаточно проработано,

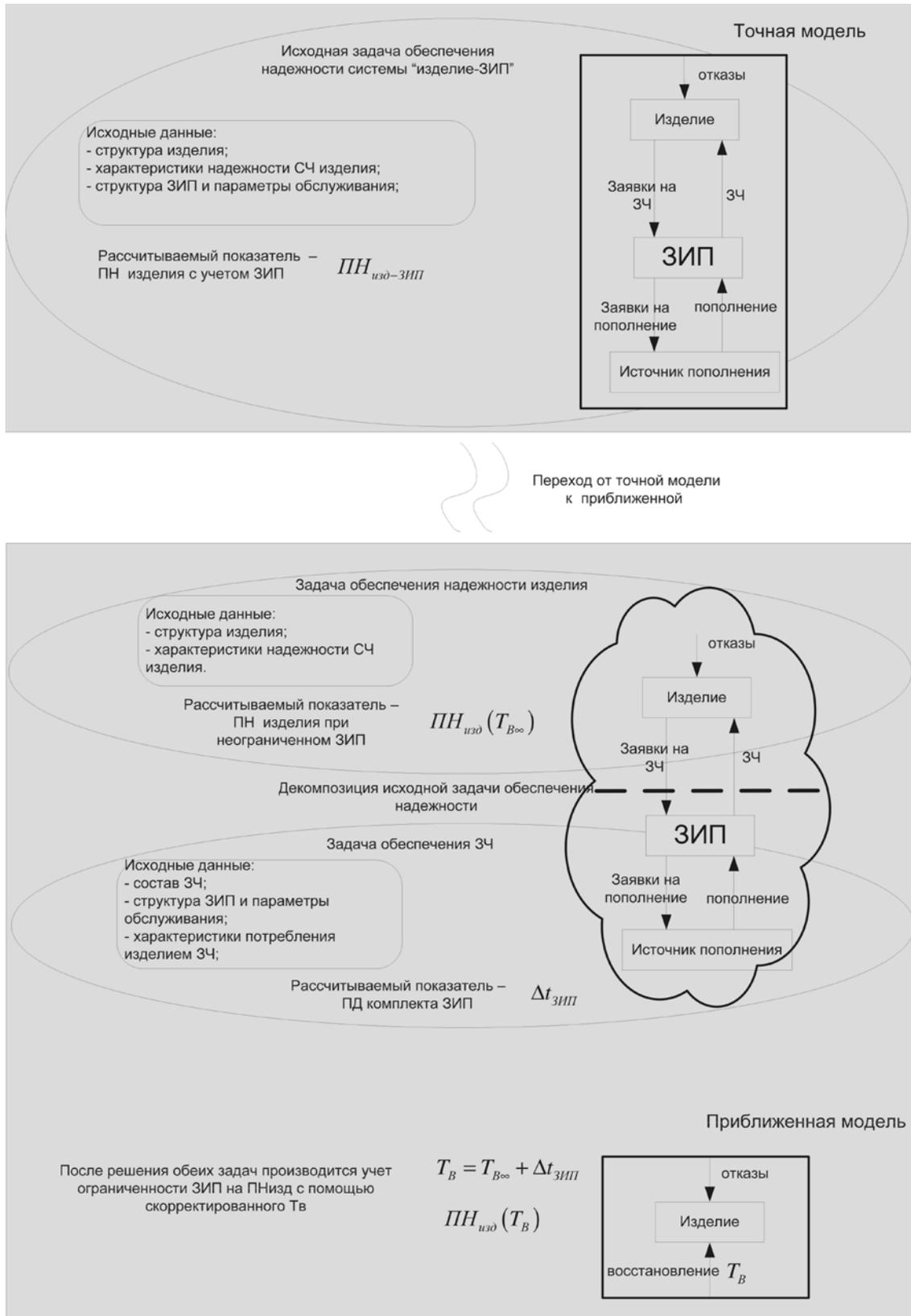


Рис. 2. Подходы к формированию комплекта ЗИП

а известные публикации на эту тему, например [8], ограничивались лишь нахождением оценки показателя ВБР на простом примере и сравнением с аналитическим решением. Между тем возникают вопросы при использовании МСМ для решения задачи оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности:

- Имеет ли место в данном случае «проклятие размерности»: как влияет на сложность вычислений МСМ количество СЧ в изделии?

- И если да, то имеет ли смысл проводить редукцию исходной структурно-сложной схемы изделия аналитическими методами?

- Как определяется необходимая точность моделирования?

Для того чтобы ответить на эти вопросы далее на конкретном примере рассматривается актуальная задача оценки и оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности с помощью МСМ. В качестве примера для расчета ЗИП взята система управления технологическими средствами блока АЭС [6]. Аналитическое решение данной задачи с помощью программы «Интеллект-ЗИП» (описание возможностей программы при-

ведено в [6, 9]), в которой заложена точная математическая модель «изделие – комплект ЗИП», приведено в [5, 6]. По сравнению с работой [5], в которой проведен сравнительный анализ результатов, полученных с применением аналитического метода и МСМ на том же примере, область исследований автором была расширена.

Пример расчета и оптимизации комплекта ЗИП с помощью МСМ

Описание системы. Система управления технологическими средствами блока АЭС (СУ ТС БАЭС) представляет собой сложный комплекс программно-технических средств (ПТС), предназначенный для надежного и безопасного автоматизированного управления технологическими средствами БАЭС в нормальных и аварийных режимах. Одна ветвь этой 7-уровневой иерархической системы содержит 41 элемент 18 типов. Средняя наработка системы до отказа без учета структурного резервирования равна 89 550 ч.

По условиям проектирования дается оценка надежности одной ветви иерархической системы (ветвью считается часть системы управления, соединяющая один ис-

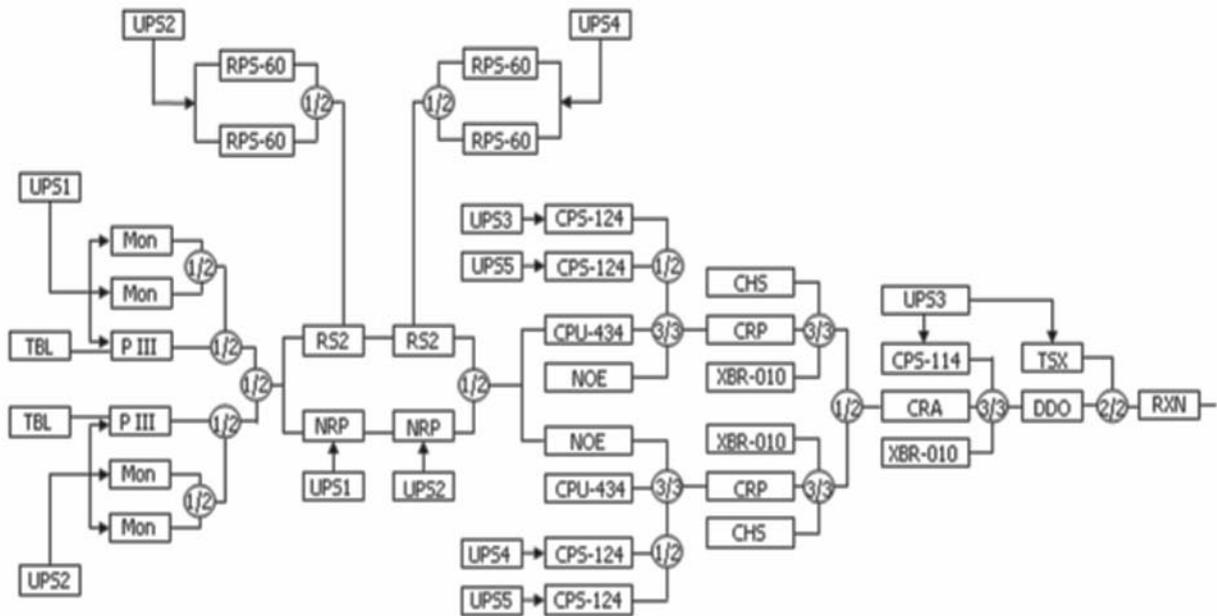


Рис. 3. Структурно-функциональная схема расчета надежности

Таблица 1

Перечень составных частей СУ ТС БАЭС

	Наименование	Обозначение на схеме	Количество	Изготовитель ГОСТ, ТУ	$\lambda \cdot 10^6$, 1/ч	Цена, тыс. руб.
1	ПЭВМ на базе ПИИ	ПИИ	2	Marvel (Intel)	20,49	68,88
2	Монитор 18,1" TFT-LCD	Мон	4	ICOS (AAEON)	40,00	74,892
3	Процессор 140 CPU 434	CPU-434	2	Schneider Electric	4,15	145,003
4	Трекбол TBL 50F1	TBL	2	Prosoft (Advantech)	10,00	9,270
5	Уст. панель 140ХВР-01000	ХВР-010	3	Schneider Electric	0,17	8,688
6	Модуль дискретного вывода 140DDO353	DDO	1	Schneider Electric	4,17	15,337
7	Модуль Hot Standby 140CHS210	CHS	2	Schneider Electric	1,34	224,189
8	Модуль питания 140CPS 114	CPS-114	1	Schneider Electric	1,81	20,968
9	Модуль питания 140CPS 124	CPS-124	4	Schneider Electric	1,81	23,319
10	Модуль сети RIO гол. 140CRP932	CRP	2	Schneider Electric	1,60	34,756
11	Модуль сети RIO узл. 140CRA932	CRA	1	Schneider Electric	1,62	33,351
12	Модуль сети Ethernet 140NOE 77100	NOE	2	Schneider Electric	1,67	35,413
13	Источник питания TSX-SUP 1011	TSX	1	Merlin Gerin	4,50	4,204
14	Источник бесперебойного питания PULSAR Extreme 1500 C Rack	UPS	5	Merlin Gerin	15,00	30,002
15	Источник питания RPS-60	RPS-60	4	Prosoft (Hirschmann)	4,50	5,473
16	Комм. Ethernet RS2-FX/FX	RS2	2	Prosoft (Hirschmann)	1,61	64,368
17	Оптический повторитель MB+ 490 NRP253	NRP	2	Schneider Electric	2,72	29,962
18	Реле RXN-41G12BO	RXN	1	Telemecanique	0,05	0,600

полнительный модуль с верхним уровнем иерархической системы). Рассматриваемая ветвь управления является однофункциональной системой, все ее элементы используются для выполнения единственной функционально самостоятельной операции (ФСО). Структурно-функциональная схема расчета надежности этой ветви приведена на рис. 3.

Постановка задачи. С помощью введе-

ния комплекта ЗИП-О необходимо обеспечить значение вероятности безотказной работы (ВБР) системы:

не ниже 0,95 – вариант 1;

не ниже 0,99 – вариант 2.

Оптимизацию следует проводить по критерию минимума стоимости комплекта ЗИП-О (прямая задача оптимизации) при периодическом пополнении запасов. Период пополнения запасов в комплекте ЗИП

$T = 1$ год = 8760 ч. Расчетное время функционирования системы равно $t = 2$ года = 17520 ч.

Требуется получить решение (оптимальный комплект ЗИП, удовлетворяющий предъявленным требованиям) с помощью метода статистического моделирования (МСМ), сравнить полученные результаты при разном количестве испытаний методом Монте-Карло с точным аналитическим решением.

Исходные данные:

количество различных по типу СЧ системы $m = 18$;

интенсивность отказов i -го элемента λ_i , $i = 1..m$ (см. табл. 1);

стоимость i -го элемента c_i , $i = 1..m$ (см. табл. 1);

количество СЧ элементов i -го типа n_i , $i = 1..m$ (см. табл. 1);

период пополнения ЗИП для всех элементов $T = 1$ год = 8760 ч;

расчетное время функционирования, за которое рассчитывается ВБР, $t = 17520$ ч.

Решение. Получение оценки ВБР системы при выбранном составе комплекта ЗИП $P(t, L_1, L_2, \dots, L_m)$ МСМ предполагает следующие шаги:

1. Моделирование $\sum_{i=1}^m n_i = 41$ наработки до отказа элементов изделия.

2. Моделирование $\sum_{i=1}^m L_i$ наработок до отказа запасных элементов изделия;

3. Анализирование: произошел отказ системы или нет по логической функции работоспособности системы (ЛФРС), накопление статистики.

4. Для получения требуемой точности ВБР шаги 1-3 повторяются.

Проблема состоит в том, что этим алгоритмом можно воспользоваться для оценки надежности ограниченного набора вариантов различных комплектов ЗИП. Если допустить, что по каждой СЧ будет не менее пяти ЗЧ в комплекте ЗИП, то количество различных вариантов комплектации ЗИП будет равно $6^{18} \approx 10^{14}$.

Фактически каждый новый вектор L в приведенном выше алгоритме требует своей оценки ВБР. А для скольких значений век-

тора L нужно рассчитать ВБР? Если только для выполнения алгоритма оптимизации, то количество шагов в алгоритме оптимизации равно количеству ЗЧ в оптимальном комплекте: на каждом шаге рассчитывается 18 значений ВБР по приведенному выше алгоритму.

Есть и другой способ нахождения оценки ВБР системы: сначала применить аналитические методы для упрощения структурно-сложной схемы на ряд более простых типовых структур, а затем с помощью МСМ получить оценки ВБР этих типовых структур, которые с помощью преобразования дадут искомую ВБР системы. Этот способ выигрывает в трудоемкости проводимых расчетов: для того чтобы получить оценку ВБР всех возможных вариантов комплектации ЗИП необходимо рассчитать ВБР типовых структур, количество которых 6×18 . Далее рассматривается решение задачи с помощью второго способа.

Нахождение логической функции работоспособности системы (ЛФРС) и аналитического выражения для ВБР системы. Используя принцип декомпозиции (см. [10]) при анализе надежности схемы на рис. 3, осуществляем переход от сложной структуры на ряд более простых. Полученная структурно-надежностная схема приведена на рис. 4.

На рисунке прямоугольниками выделены различные по типу СЧ – всего 18 различных по типу СЧ прямоугольников. ЛФРС принимает вид:

$$f(X) = \bigcap_{i=1..4} x_i (x_5 x_6 \cup x_7) \bigcap_{i=8..18} x_i, \quad (7)$$

где $X = (x_1, \dots, x_{18})$ – вектор логических переменных, соответствующих пронумерованным на рисунке СЧ.

В каждом выделенном прямоугольнике – одна из типовых структур резервирования (нерезервированная структура, дублированная и т. д.). На рис. 4 каждая типовая структура предполагает использование запасов одного типа. Модели для типовых структур резервирования реализованы в программе «Интеллект-ЗИП», расчет может производиться аналитическим и методом Монте-Карло.

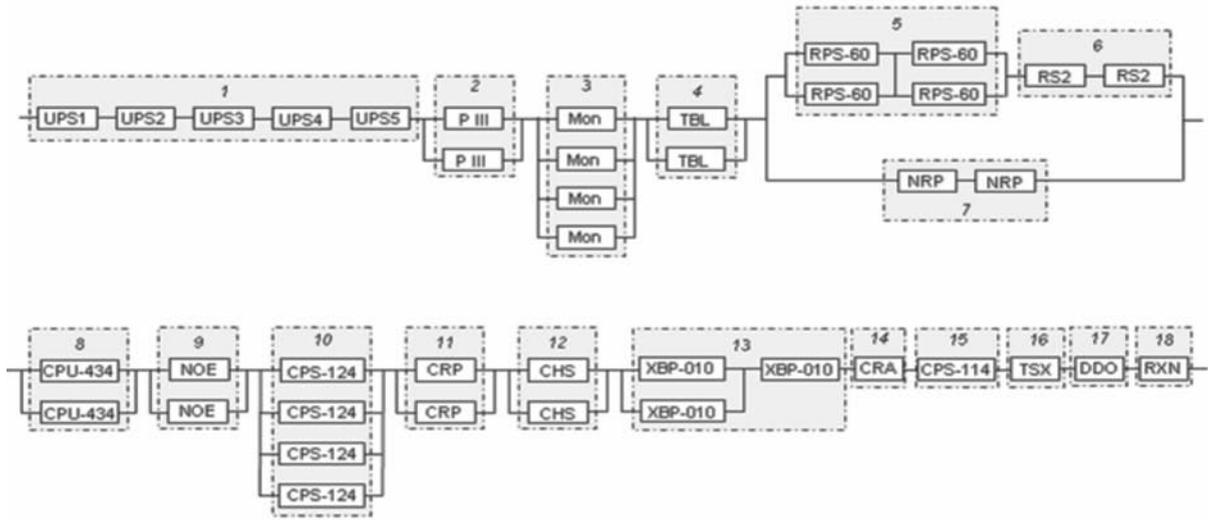


Рис. 4. Структурно-надежностная схема системы

Для упрощения дальнейших вычислений возьмем оценку снизу для ВБР – вместо (1) ЛФРС примет следующий вид:

$$f(X) = \bigcap_{i=1..18} x_i, \quad (8)$$

что соответствует последовательному соединению 18 различных по типу СЧ структур в схеме надежности.

Соответственно, ВБР системы, рассчитанная на один период пополнения комплекта ЗИП:

$$P(T, L_1, L_2, \dots, L_m) = \prod_{i=1}^{18} p_i^2(T, L_i), \quad (9)$$

где $L_i, i = 1..m$ – количество ЗЧ i -го типа в ЗИП; $p_i(T, L_i)$ – ВБР i -го блока будет рассчитана далее МСМ.

Поскольку $t = 2T$, то $p_i(t, L_i) = p_i^2(T, L_i)$, а ВБР системы за расчетное время функционирования

$$\begin{aligned} P(t, L_1, L_2, \dots, L_m) &= \\ &= P^2(T, L_1, L_2, \dots, L_m) = \prod_{i=1}^{18} p_i^2(T, L_i). \end{aligned} \quad (10)$$

Далее, для определения количественного значения ВБР типовых структур резервирования $p_i(T, L_i)$ можно применить МСМ.

Поскольку для поиска оптимального количества ЗЧ в комплекте ЗИП будет рассчитываться ВБР системы для различных вариантов L_1, L_2, \dots, L_m , то необходимо рас-

считать $p_i(T, L_i)$, где L_i принимает значения от нуля до $L_{\max} = 5$ (как правило, количество ЗЧ в комплекте ЗИП не превышает количество СЧ в системе, максимальное количество СЧ в системе – $\max_{(n_1, \dots, n_m)} = n_{i4} = 5$).

Алгоритм статистического моделирования для $p_i(T)$. Алгоритм нахождения ВБР $p_i(T)$ следующий:

- Составление ЛФРС соответствующей структуры резервирования.
- Расчет ВБР за время T по следующему алгоритму:

Цикл от 1 до N , где N – количество испытаний МСМ.

Генерирование n_i СВ времени отказа для каждого модуля в структуре с экспоненциальным законом распределения $t_l = -\ln(\alpha) / \lambda_i, l = 1..n_i, \alpha$ – СВ с равномерным распределением в интервале $[0, 1]$.

Цикл от 0 до L_{\max} .
Вычисление l , такого что $t_l = \min(t_1, \dots, t_{n_i})$.

Генерирование СВ времени отказа модуля, введенного на замену $t_l = t_l - \ln(\alpha) / \lambda_i$.

Конец цикла от 1 до N .

Если ЛФРС структуры равна 0 (вычисляется подстановкой в качестве булевых переменных в ЛФРС – $x_i = \begin{cases} 0, t_l \leq T \\ 1, t_l > T \end{cases}$), то увеличение счетчика количества отказов d .

$$p_i(T) = 1 - d/N.$$

Конец алгоритма.

Алгоритм оптимизации. Алгоритм для оптимизации по критерию минимума стоимости комплекта ЗИП (прямая задача оптимизации) разработан автором и опубликован в [6]. Алгоритм аналогичен алгоритму оптимизации ЗИП по показателю достаточности, приведенному в нормативных документах [1, 2], и отличается только типом целевой функции (в [1, 2] – это ПД, в [6] – это ПН).

Необходимо обеспечить минимум критериальной (целевой) функции

$$C_{\Sigma \text{ЗИП}}^0 = \sum_{i=1}^m c_i L_i^0 = \min_{(L_1, \dots, L_m)} \sum_{i=1}^m c_i L_i$$

при ограничении $P \geq P^0$, где m – количество различных по типу ЗЧ; (c_1, \dots, c_m) – вектор стоимости запасных частей; (L_1, \dots, L_m) – вектор количества ЗЧ в комплекте ЗИП-О; P^0 – нормативное значение ВБР.

Это целочисленная задача математического программирования с сепарабельным целевым функционалом и одним сепарабельным ограничением [11]. При ее решении используется метод наискорейшего по координатного спуска, реализуемый в виде

Таблица 2

Результаты оптимизации комплекта ЗИП по уровню ВБР 0,95 с помощью МСМ (в серии из трех прогонов по $N = 10^3$ испытаний каждый)

	Наименование модуля	Оптимальный аналитический комплект	Оптимальный комплект МСМ 1	Оптимальный комплект МСМ 2	Оптимальный комплект МСМ 3
1	Р III	1	1	1	1
2	Mon	1	1	1	1
3	CPU-434	0	0	0	0
4	TBL	1	0	1	1
5	XBP-010	0	0	0	0
6	DDO	1	1	1	1
7	CHS	0	0	0	0
8	CPS-114	1	1	1	1
9	CPS-124	0	0	0	0
10	CRP	0	0	0	0
11	CRA	1	1	1	1
12	NOE	0	0	0	0
13	TSX	1	1	1	1
14	UPS	3	3	3	3
15	RPS-60	0	1	1	0
16	RS2	1	1	1	1
17	NRP	1	1	1	1
18	RXN	0	0	0	0
Стоимость комплекта по отношению к стоимости системы, %		21,77	21,57	22,06	21,77
Количество ЗЧ		12	12	13	12
ВБР аналитич.		0,952	0,939	0,963	0,952
ВБР _{МСМ}			0,950	0,955	0,956

«пошаговой» оптимизации, при которой на каждом следующем шаге расчета добавляется только одна ЗЧ и только в тот запас, увеличение которого на этом шаге дает наибольший прирост показателя в расчете на единицу затрат.

Алгоритм оптимизации приведен ниже.

1. Входные данные:

вектор стоимости ЗЧ (c_1, \dots, c_m);

рассчитанные МСМ (см. выше алгоритм статистического моделирования) $p_i(t)$;

функция ВБР системы (см. выше нахождение логической функции) $P(t, L_1, L_2, \dots,$

$$L_m) = \prod_{i=1}^{18} p_i(t, L_1, L_2, \dots, L_m);$$

P^0 – граничное значение ВБР.

2. Расчет базового комплекта $P(t, L_1, \dots, L_m)$ (при $L_i = 0$, где $i = 1..m$).

3. Цикл по i от 1 до m

$$R_i = (P(t, L_1, \dots, L_i+1, \dots, L_m) - (P(t, L_1, \dots, L_m)))/c_i.$$

4. Нахождение $L_j = \max_{j=1..m} R_j$.

5. $L_j = L_j + 1$.

6. Если $P(t, L_1, \dots, L_m) < P^0$, то переход к 3.

7. На выходе алгоритма – оптимальный комплект (L_1, \dots, L_m), удовлетворяющий предъявленным по надежности требованиям.

Результаты. В табл. 2 приведены результаты работы МСМ вариант 1 по уровню ВБР 0,95.

В столбике «Оптимальный аналитический комплект» – комплект ЗИП, рассчитанный аналитическим методом (вероятности $p_i(T)$ в этом случае рассчитывались по аналитическим формулам ядра, формулы приведены в [6]). Строка таблицы «ВБР аналитич.» – значение ВБР системы для данного комплекта, рассчитанное аналитическим методом.

Согласно данным табл. 2, при выбранном количестве испытаний МСМ ($N = 10^3$) оптимальное аналитическое решение получено в одном прогоне из трех произведенных. При увеличении количества испытаний МСМ до $N = 10^4$ сходимость к аналитическому результату 100 %: в серии из 10 прогонов оптимальный аналитический комплект был получен 10 раз.

В табл. 3 приведены результаты работы

алгоритма оптимизации по уровню 0,99 – вариант 2. В этот раз 100 % сходимость к аналитическому решению была получена для $N = 10^6$. При меньшем количестве испытаний МСМ получилось, что фактическое значение ВБР меньше значения, рассчитанного МСМ. Такой знак ошибки при моделировании обусловлен работой алгоритма оптимизации, в котором на каждом шаге оптимизации добавляется та ЗЧ, значение критерия (рассчитанного МСМ и обладающего статистической погрешностью) которой больше остальных.

Очевидно, что количество испытаний МСМ, минимально необходимое для получения устойчивого оптимального комплекта по уровню ВБР 0,95 уже недостаточно для уровня 0,99. Поэтому ниже определяется необходимое количество испытаний для получения оценки с требуемой точностью.

Точность рассчитываемого МСМ показателя. Необходимо определить точность ВБР, полученных МСМ. Поскольку требуется оптимизировать комплект ЗИП по уровню ВБР_{системы} = 0,99, то возьмем ошибку определения ВБР МСМ, равную 10^{-3} . Поскольку в данном примере имеет место последовательная схема соединения всех элементов, то ошибка для ВБР 18 различных по типу составных частей определяется из условий:

$$\begin{cases} \sqrt[18]{0,99} + \varepsilon = \sqrt[18]{0,991} \\ \sqrt[18]{0,99} - \varepsilon = \sqrt[18]{0,989} \end{cases}$$

$$\text{Отсюда } \varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Данный подход можно обобщить: ошибка ε определяется исходя из нормативного значения ВБР системы и с учетом логической функции работоспособности.

Ошибка для ВБР в соответствии с теоремой Муавра–Лапласа оценивается по следующей формуле:

$$\varepsilon \leq u_\alpha \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}},$$

где u_α – квантиль нормального распределения по уровню α ; P – ВБР, рассчитанная методом Монте-Карло; N – количество испытаний по схеме Бернулли.

Далее, для получения ВБР с необходимой точностью возьмем $u_\alpha = 3$ ($\alpha = 0,001$: правило

Таблица 3

Результаты оптимизации комплекта ЗИП по уровню ВБР 0,99 с помощью МСМ при различном количестве испытаний N

	Наименование модуля	Оптимальный аналитический комплект	Оптимальный комплект							
			МСМ 1 $N=10^4$	МСМ 2 $N=10^4$	МСМ 3 $N=10^4$	МСМ 4 $N=10^5$	МСМ 5 $N=10^5$	МСМ 6 $N=10^5$	МСМ 7 $N=10^6$	МСМ 8 $N=10^6$
1	P III	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	Mon	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	CPU-434	0	1	0	0	1	0	1	0	0
4	TBL	2	1	1	2	1	2	1	2	2
5	XBP-010	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	DDO	2	1	2	2	2	2	2	2	2
7	CHS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	CPS-114	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	CPS-124	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	CRP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	CRA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	NOE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	TSX	2	1	2	2	1	2	1	2	2
14	UPS	5	4	4	5	4	5	4	5	5
15	RPS-60	2	1	1	1	1	1	1	2	2
16	RS2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	NRP	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	RXN	1	0	1	1	0	1	0	1	1
Стоимость комплекта по отношению к стоимости системы, %		36,74	40,98	34,37	36,45	41,79	36,74	36,74	36,74	36,74
Количество ЗЧ		24	19	21	23	20	24	24	24	24
ВБР аналитич.		0,990	0,989	0,988	0,989	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
ВБР _{МСМ}		0,990	0,991	0,990	0,990	0,991	0,990	0,990	0,990	0,990

«трех сигм») и определим число N .

Решая неравенство относительно N , получим необходимое количество испытаний МСМ для выбранной точности: $N \geq u_{\alpha}^2 \frac{P(1-P)}{\varepsilon^2} = 2 \cdot 10^6$, что подтверждается ранее полученными практическими результатами.

Необходимое количество испытаний МСМ для получения решения с требуемой точностью не является препятствием к его применению. Этот вывод можно распространить и на большую часть проектируемых систем, поскольку структура изделия, количество СЧ в примере и нормативное значение ПН является типовым.

Используемые в настоящее время в промышленности методики расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии ЗИП являются приближенными, имеющими знакопеременную погрешность, значение которой не известно как по знаку, так и по абсолютной величине. Идея разработки нового подхода к учету влияния ЗИП состоит в прямом включении комплекта ЗИП в модель надежности «изделие – комплект ЗИП» [4, 5]. Отсюда возникает совершенно новая в теории надежности задача оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности. Для ее решения в статье рассматривался метод статистического моделирования как наиболее

перспективный метод расчета систем вида «изделие – система ЗИП», по мнению авторов [8].

Использование МСМ предпочтительней после применения аналитических методов к рассматриваемой модели «изделие – система ЗИП», направленных на ее упрощение, что и было продемонстрировано на примере. Необходимое количество испытаний МСМ для получения решения с требуемой точностью не является препятствием к его применению.

Для решения поставленной задачи в разработанную ранее программу «Интеллект-ЗИП», в которой реализованы алгоритмы оценки и оптимизации комплекта ЗИП по показателям надежности или показателям достаточности, был добавлен модуль расчета ПН типовых структур резервирования методом Монте-Карло. В связи с введением нового метода расчета ПН в программу, библиотека типовых структур резервирования может быть расширена.

Дальнейшее применение метода статистического моделирования для решения задачи оптимизации комплекта ЗИП по критерию надежности видится в следующем:

для расширения существующей библиотеки типовых структур, что упрощает использование логико-вероятностных методов;

для верификации аналитических моделей типовых структур резервирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП // РД В 319.01.19-98.
2. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. Запасные части, инструменты и принадлежности. Основные положения // ГОСТ РВ 27.3.03–2005. М.: Стандартинформ, 2005. 37 с.
3. Запасные части, инструменты и принадлежности. Основные положения // ГОСТ В.15 705–86. М.: Госстандарт, 1986. 44 с.
4. Черкесов Г.Н. О проблеме расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии запасных элементов. Ч. 1. // Надежность. 2010. № 3. С. 29–39.
5. Черкесов Г.Н. О критериях выбора комплектов ЗИП, Надежность. 2013. № 2 (45). С. 3–18.
6. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.
7. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий // Библиотека инженера по надежности. М.: Радио и связь, 1981. 176 с.
8. Жаднов В.В., Авдеев Д.К., Тихменев А.Н. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП // Надежность. 2011. № 3. С. 53–60.
9. Чуркин В.В., Черкесов Г.Н. О программе расчета показателя надежности системы с прямым включением комплекта ЗИП в модель надежности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 3(80). С. 212–216.

10. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. 478 с.

11. Головин И.Н., Чуварыгин Б.В., Шура-

Бура А.Э. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем // Библиотека инженера по надежности. М.: Радио и связь, 1984. 175 с.

REFERENCES

1. RD V 319.01.19-98. *Metodiki otsenki i rascheta zapasov v komplektakh ZIP [Methods of estimating and calculating reserves in sets of spare parts]*. (rus)

2. GOST RV 27.3.03–2005. *Nadezhnost voyennoy tekhniki. Otsenka i raschet zapasov v komplektakh ZIP. Zapasnyye chasti, instrumenty i prinadlezhnosti. Osnovnyye polozheniya [The reliability of military equipment. Evaluation and calculation of reserves in the maintenance kit. Spare parts, tools and accessories. The main provisions]*. Moscow: Standartinform Publ., 2005, 37 p. (rus)

3. GOST V.15 705–86. *Zapasnyye chasti, instrumenty i prinadlezhnosti. Osnovnyye polozheniya [Spare parts, tools and accessories. fundamentals]*. Moscow: Gosstandart Publ., 1986, 44 p. (rus)

4. Cherkesov G.N. O probleme rascheta nadezhnosti vosstanavlivayemykh sistem pri nalichii zapasnykh elementov [On the problem of calculating the reliability of restorable systems in the presence of spare elements], Chast 1. *Nadezhnost [Reliability]*, 2010, No. 3, Pp. 29–39. (rus)

5. Cherkesov G.N. O kriteriyakh vybora komplektov ZIP [On the criteria for selecting sets of spare parts]. *Nadezhnost [Reliability]*, 2013, No. 2 (45), Pp. 3–18. (rus)

6. Cherkesov G.N. *Otsenka nadezhnosti sistem s uchetom ZIP [Evaluation of reliability of systems with the sets of spare parts]*. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2012, 480 p. (rus)

7. Dzirkal E.V. Nadezhnost slozhnykh system [Reliability of complex systems]. *Biblioteka inzhenera*

po nadezhnosti [Library engineer reliability]. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1981, 176 p. (rus)

8. Zhadnov V.V., Avdeyev D.K., Tikhmenev A.N. Problemy rascheta pokazatelya dostatochnosti i optimizatsii zapasov v sistemakh ZIP [Problems adequacy calculation and optimization of inventory systems sets of spare parts]. *Nadezhnost [Reliability]*, 2011, No. 3, Pp. 53–60. (rus)

9. Churkin V.V., Cherkesov G.N. Programma rascheta pokazatelya nadezhnosti sistema s pryamym vklyucheniyem komplekta ZIP v model nadezhnosti [About the calculation of the index system reliability with direct inclusion in the spare parts kit model of reliability], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 3 (80), Pp. 212–216. (rus)

10. Cherkesov G.N. *Nadezhnost apparatno-programmnykh kompleksov [The reliability of software and hardware]*. St. Petersburg: Piter Publ., 2005, 478 p. (rus)

11. Golovin I.N., Chuvarygin B.V., Shura-Bura A.E. Raschet i optimizatsiya komplektov zapasnykh elementov radioelektronnykh system [Calculation and optimization of a set of spare components electronic systems]. *Biblioteka inzhenera po nadezhnosti [Library engineer reliability]*. Moscow: Radio i Svyaz Publ., 1984, 175 p. (rus)

ЧУРКИН Виталий Владимирович – старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: ch07@yandex.ru

CHURKIN Vitaly V. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: ch07@yandex.ru