

Жаднов В.В., Авдеев Д.К., Тихменев А.Н.

ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТАТОЧНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИИ ЗАПАСОВ В СИСТЕМАХ ЗИП

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при проектировании систем ЗИП традиционными методами. Показано, что при их использовании расчетная оценка показателей надежности резервированных восстанавливаемых изделий имеет существенную погрешность. Рассмотрены основные аспекты применения методов имитационного моделирования для расчетов показателей надежности резервированных восстанавливаемых изделий при ограниченном ЗИП.

Ключевые слова: надежность, резервирование, восстановление, запасное имущество и принадлежности, имитационное моделирование.

Методики оценки и оптимизации запасов в комплектах ЗИП, «узаконенные» в [1] и [2], давно нуждаются в корректировке, поэтому появление цикла статей в журнале «Надежность», посвященных этой проблеме, не могло не вызвать интерес, тем более, что авторами одной из них являются «законодатели» из 22 ЦНИИ МО РФ.

Несмотря на то, что название статьи [3] начинается со слова «Корректурa», т.е. можно было бы ожидать, что наконец-то будут предложены новые методы (или хотя бы модификация старых), в этом плане все осталось без изменений, а скорее даже наоборот. «Корректурa...» сводится к исключению из критерия «прямой» задачи оптимизации такого параметра, как стоимость (объем, масса, габариты), в то время как «обратную» задачу оптимизации предлагается из [1] и [2] просто исключить.

Главным аргументом такой «модификации» прямой задачи является то, что в результате расчета начальный уровень каких-либо запасов для некоторых составных частей (СЧ) окажется равным нулю (см. [2]). Но, во-первых, в этом нет ничего страшного, т.к. это лишь означает, что данные СЧ имеют низкий уровень отношения надежность/стоимость (т.е. за те же деньги можно получить большее приращение показателя достаточности, увеличив запас другой СЧ), а во-вторых, чтобы решить эту проблему, совсем не нужно менять критерий, достаточно поменять постановку задачи, т.е. ввести ограничения на начальный уровень запасов.

Это предложение также вошло в «Корректурa...», где предлагается ввести нижнее ограничение (N_{MINi}), равное 1, на начальный уровень запаса (n_i). Однако запасы в ЗИП формируются еще при расчете надежности (одним из способов снижения интенсивности отказов СЧ (λ_i) является созда-

ние для нее запаса). Но тогда и нижнее ограничение на n_i нужно будет задавать равным уже не 1, а тому значению, которое было принято при расчете λ_i .

Кроме того, при решении практических задач также часто бывает известно заранее и верхнее ограничение (N_{MAXi}) на n_i . Так что, если и «корректировать» методику, то тогда уж для двухсторонних ограничений на n_i вида:

$$N_{MINi} \leq n_i \leq N_{MAXi}$$

Решение такой задачи реализовано в системе расчета показателей достаточности систем ЗИП программного комплекса АСОНИКА-К (см. рис. 1).

Порядковый номер	Наименование составной части	Кол-во СЧ [шт.]	Средняя интенсивность замены СЧ 10^{-6} [1/ч.]	Затраты руб	Стратегия пополнения	Первый (основной) параметр [ч.]	Второй параметр [ч.]/[шт.]	Кол-во запаса части [шт.]
1	Материнская плата	1	0,57	3200	1 периодическое	8760	0	
2	Процессор	1	0,32	2100	1 периодическое	8760	0	
3	Жесткий диск	2	0,95	1200	1 периодическое	8760	0	
4	CD-ROM	1	0,65	500	1 периодическое	8760	0	
5	Оптическая мышка	1	0,50	200	1 периодическое	8760	0	
6	Клавиатура	1	0,20	350	1 периодическое	8760	0	
7	Монитор	1	0,35	2700	1 периодическое	8760	0	

Рис. 1. Система расчета показателей достаточности систем ЗИП: Ввод ограничений на n_i

Что касается второго предложения – исключения «обратной» задачи оптимизации, то оно не выдерживает никакой критики. В условиях рыночной экономики одним из главных критериев конкурентоспособности изделий является соотношение «цена/качество» (в данном случае – «цена/надежность»). Именно «обратная» задача оптимизации дает ответ, какой уровень показателей достаточности может быть достигнут за имеющиеся финансовые средства.

Ссылка на то, что показатели достаточности – характеристики назначения системы ЗИП, а стоимость – экономические, и при расчете первых вторые учитывать не нужно, говорит лишь о том, что авторы видимо забыли что, в конечном счете, качество продукции оценивается не единичными, а комплексными показателями. Если принять эту позицию (т.е. решать задачу оптимизации без учета затрат на ЗЧ), то в дальнейшем все равно придется оценивать значения комплексного критерия качества ($K_{Комп.}$) системы ЗИП. Даже если в него войдут всего лишь два единичных показателя – относительный показатель достаточности системы ЗИП ($П_{ЗИП}$) и относительная стоимость начального уровня запасов ($П_C$), то, например, в аддитивной форме:

$$K_{Комп.} = П_{ЗИП} + П_C.$$

А из этого следует, что если при расчетах $П_{ЗИП}$ стоимость не учитывалась, то значение $K_{Комп.}$ будет низким, и, следовательно, весь процесс проектирования системы ЗИП придется повторять до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое значение $K_{Комп.}$. Другими словами, исключение стоимости ЗЧ из «Методик...» приведет к тому, что те же самые задачи, которые сейчас решаются «автоматически», будут решаться «автоматизированно», путем проведения повторных расчетов [5].

Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемая «Корректур...» не привносит ничего нового, а наоборот, ухудшает то, что уже есть. Единственное, с чем можно согласиться – это необходимость создания новой версии ППП «РОКЗЕРСИЗ», и даже не потому, что она морально устарела (сделана в середине 90-х годов прошлого века под операционную систему *DOS*), а потому, что программная реализация методов оптимизации в ней дает настолько большие погрешности, что пользоваться ей может быть и можно, но вряд ли нужно.

В подтверждение этому в табл. 1. приведены результаты расчета изделия «Памир-1», приведенные в [2], и результаты расчета того же примера с помощью системы АСОНИКА-К-ЗИП.

Таблица 1. Результаты расчетов системы ЗИП изделия «Памир-1»

Программа	Требования к ПД	Результаты расчета		Экономия затрат	
		Показатель достаточности	Стоимость ЗИП, (руб.)	руб.	%
Прямая задача оптимизации комплекта ЗИП-О					
ППП «РОКЗЕРСИЗ»	$K_T \geq 0,95$	0,95719	3 395 650	1 458 000	43
Система АСОНИКА-К-ЗИП		0,951032786	1 937 650		
Прямая задача оптимизации комплекта ЗИП-Г					
ППП «РОКЗЕРСИЗ»	$\Delta t \leq 1,6$ [ч.]	1,597913 [ч.]	16 217 700	11 273 800	70
Система АСОНИКА-К-ЗИП		1,59242875822 [ч.]	4 943 900		

Как видно, простое применение системы АСОНИКА-К-ЗИП дает экономию затрат на начальный уровень запасов до 70%! Таким образом, если в новой разработке 22 ЦНИИ МО РФ программная реализация методов будет «заимствована» из ППП «РОКЗЕРСИЗ», то вряд ли такая программа будет востребована, даже если будет разработана для современных ЭВМ.

Содержание второй статьи [4] более актуально, т.к. в ней поднимается проблема расчета систем ЗИП для структурно-сложных (резервированных) изделий. С автором нельзя не согласиться в том, что методики, приведенные в [1] и [2], мало пригодны для решения таких задач, что он убедительно доказывает и предлагает перейти от раздельного проектирования изделия и системы ЗИП к совместному, т.е. рассматривать систему вида «Изделие-система ЗИП».

Другое дело, какие методы предлагается применять и к чему может привести полученная с их помощью «математически точная» оценка показателей надежности.

Покажем это на примерах, приведенных в статье [4]. Если первый пример особых возражений не вызывает (общее нагруженное резервирование изделия, содержащего k равнонадежных элементов), т.к. такое встречается на практике (хотя известно, что раздельное резервирование эффективней общего), то второй пример является более показательным.

Схема расчета надежности (СРН) изделия приведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема расчета надежности изделия

Для получения сопоставимых результатов примем условия примера 2:

- восстановление неограниченное;
- отказы составных частей обнаруживаются мгновенно;
- время ремонта (T_p) равно 0;
- вид системы ЗИП – ЗИП-О;
- стратегия пополнения – периодическое пополнение;
- начальный уровень запасов (L) равен 1.

Для определенности рассмотрим частный случай, когда $k = 3, r = 1$. Значения интенсивности отказов СЧ (λ) и периода пополнения системы ЗИП ($T_{\text{ЗИП}}$) найдем из соотношений $A = \lambda \cdot T_{\text{ЗИП}} \cdot k$ и $ra = \lambda \cdot T_{\text{ЗИП}} \cdot r$. При $ra = 0,1$ и $A = 0,3$, положив $T_{\text{ЗИП}} = 1000$ ч., получим $\lambda = 1,0 \cdot 10^{-4}$ ч⁻¹. Кроме того, т.к. в системе расчета надежности электронных средств с реконфигурируемой структурой (АСОНИКА-К-РЭС) реализован метод имитационного моделирования, примем срок службы изделия ($T_{\text{СС}}$) равным $1,0 \cdot 10^8$ ч. (это необходимо для задания длительности проведения имитационного эксперимента).

Для верификации формальной модели, а также для подтверждения достоверности расчетов проведем расчет той же СРН для $ra = 0,2$ и $A = 0,6$. Тогда соответствующая этому значению интенсивность отказов СЧ составит $2,0 \cdot 10^{-4}$ ч⁻¹.

На рис. 3. приведено окно системы расчета надежности электронных средств с реконфигурируемой структурой (АСОНИКА-К-РЭС) с текстом описания формальной модели на специализированном языке.

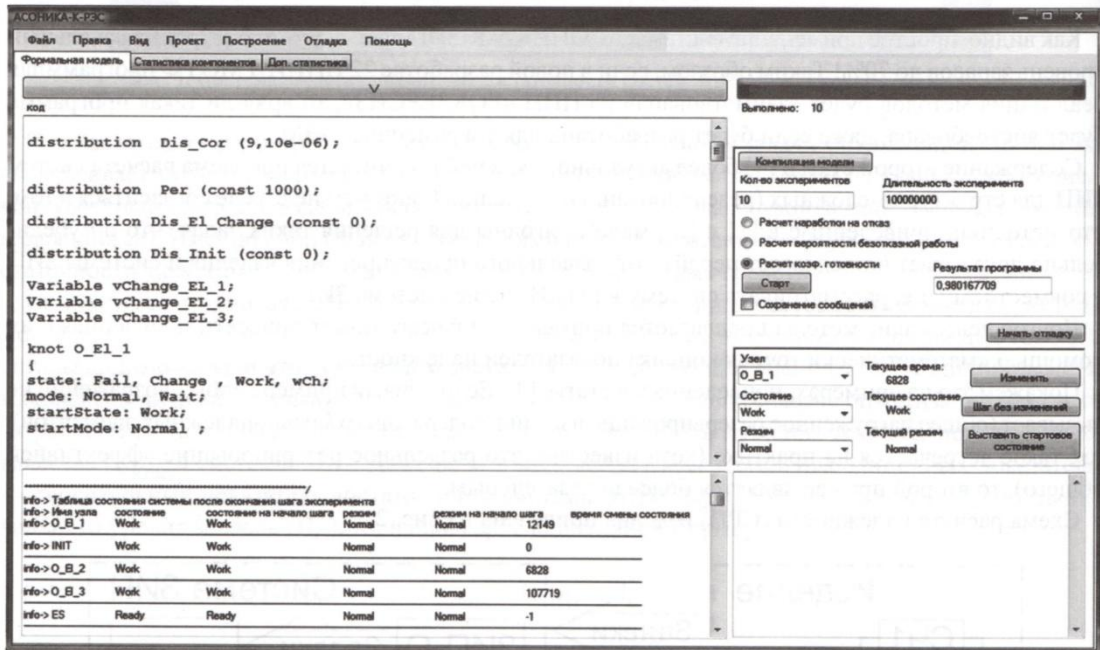


Рис. 3. Система расчета надежности электронных средств с реконфигурируемой структурой: текст формальной модели

Результаты расчета по «математически точной модели» приближенной модели, приведенные в [4], имитационного моделирования в системе АСОНИКА-К-РЭС и системы АСОНИКА-К-ЗИП сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов системы «Изделие-Система ЗИП»

№ п/п	Модель надежности системы	Параметры	$K_{г\text{ЗИП}}$	$k\lambda t_{\text{ЗИП}}$	$K_{г}$	$\Delta_{K_{г}},\%$
1	2	3	4	5	6	7
1	Математически точная модель	$ra = 0,1$ $A = 0,3$	0,98706	0,01302 ($t_{\text{ЗИП}} = 43,4$)	0,99526	0
		$ra = 0,2$ $A = 0,6$	0,95515	0,04589 ($t_{\text{ЗИП}} = 76,48$)	0,98213	0
2	Приближенная модель	$ra = 0,1$ $A = 0,3$	-	-	0,99564	8,02
		$ra = 0,2$ $A = 0,6$	-	-	0,98449	13,2
3	АСОНИКА-К-РЭС	$\lambda = 1,0 \cdot 10^{-4}$ $T_{\text{ПП}} = 1000$	0,98710	-	0,99524	?
		$\lambda = 2,0 \cdot 10^{-4}$ $T_{\text{ПП}} = 1000$	0,95528	-	0,98184	?
4	АСОНИКА-К-ЗИП	$\lambda_3 = 1,0 \cdot 10^{-4}$ $T_{\text{ПП}} = 1000$	0,98706	$\Delta t_{\text{ЗИП}} = 43,4$	-	-
		$\lambda_3 = 3,0 \cdot 10^{-4}$ $T_{\text{ПП}} = 1000$	0,95515	$\Delta t_{\text{ЗИП}} = 76,48$	-	-

Расчет $K_{г\text{ЗИП}}$ и $\Delta t_{\text{ЗИП}}$ ($t_{\text{ЗИП}}$) с помощью системы АСОНИКА-К-ЗИП был проведен для проверки результатов, приведенных в [4]. Как видно из табл. 2, результаты расчетов совпали. Поэтому для верификации формальной модели можно использовать результаты расчета $K_{г}$ по «математически точной модели». Как видно из табл. 2, результаты, полученные с помощью системы АСОНИКА-К-РЭС, также отличаются незначительно. Графа 7 в табл. 2 не заполнена, т.к. непонятно, как получено значение погрешности. Действительно, например, для первого случая:

$$\Delta_{K_{г}} = \frac{K_{г\text{пр}} - K_{г}}{K_{г}} \cdot 100 = \frac{0,99564 - 0,99526}{0,99526} \cdot 100 = 0,038\%. \quad (1)$$

Чтобы понять, откуда взялись 8,02%, рассчитаем погрешность для коэффициента неготовности ($1-K_{г}$):

$$\Delta_{(1-K_{г})} = \frac{0,00436 - 0,00474}{0,00474} \cdot 100 = -8,02\%$$

Как видно, в этом случае значение погрешности совпадает. Но тогда становится непонятно, зачем при сравнении моделей расчета коэффициента готовности использовать погрешность оценки коэффициента неготовности и на этой основе делать выводы о применимости или неприменимости «приближенных» моделей.

Другое дело, как может сказаться такая незначительная на первый взгляд погрешность на стоимости. Так, погрешность оценки $K_{г}$ системы ЗИП изделия «Памир-1» составляет:

$$\Delta_{K_{г}} = \frac{0,95719 - 0,95103278}{0,95103278} \cdot 100 = 0,65\%,$$

а стоят эти 0,65% – 1 458 000 руб. (см. табл. 1). Таким образом, очевидно, что даже незначительная погрешность в оценке показателей надежности восстанавливаемых изделий может привести к существенным финансовым потерям.

В свете этого вернемся к рассматриваемому примеру. «Математически точная модель» точно работает только при одинаковых значениях интенсивностей отказов СЧ. Но ведь резервирование

применяют именно тогда, когда интенсивности отказов СЧ разные. В этом случае, чтобы воспользоваться «точной моделью», в соответствии с рекомендациями [7] необходимо провести расчет для «наихудшего» случая, т.е. принять интенсивность отказов для всех СЧ одинаковую и равную:

$$\lambda = \max_{i=1, N} (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N) \quad (2)$$

Покажем, к чему это может привести. Как известно, оптимальной с точки зрения надежности является система, состоящая из равнонадежных элементов. Для определенности положим равными вероятности безотказной работы резервированной группы и СЧЗ (см. рис. 2) за период пополнения $T_{\text{ПП}}$. Тогда интенсивность отказов СЧЗ можно найти из уравнения:

$$e^{-\lambda_{\text{СЧЗ}} T_{\text{ПП}}} = 1 - (1 - e^{-\lambda T_{\text{ПП}}})^2,$$

разрешив его относительно $\lambda_{\text{СЧЗ}}$. При заданных λ и $T_{\text{ПП}}$ получим для первого случая $\lambda_{\text{СЧЗ}} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, а для второго – $3,34 \cdot 10^{-5}$. Результаты расчета K_{Γ} , выполненного с помощью системы АСОНИКА-К-РЭС, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчетов системы «Изделие-Система ЗИП»

№ п/п	Параметры	$K_{\Gamma_{\text{ЗИП}}}$	K_{Γ}	$\Delta_{K_{\Gamma}}, \%$
1	2	3	4	5
1	$\lambda_{\text{СЧ1}} = \lambda_{\text{СЧ2}} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ $\lambda_{\text{СЧЗ}} = 9,1 \cdot 10^{-6}$	0,993397383	0,99954204	-0,42
2	$\lambda_{\text{СЧ1}} = \lambda_{\text{СЧ2}} = 2,0 \cdot 10^{-4}$ $\lambda_{\text{СЧЗ}} = 3,34 \cdot 10^{-5}$	0,974696322	0,99670004	-1,46

В столбце 5 табл. 3 приведено значение погрешности, которое дает «математически точная модель» при допущении (2). Сравнивая порядок погрешности (1) и значения столбца 5 табл. 3 нетрудно сделать вывод о действительной точности «математически точной модели».

Среднее время восстановления ЭС

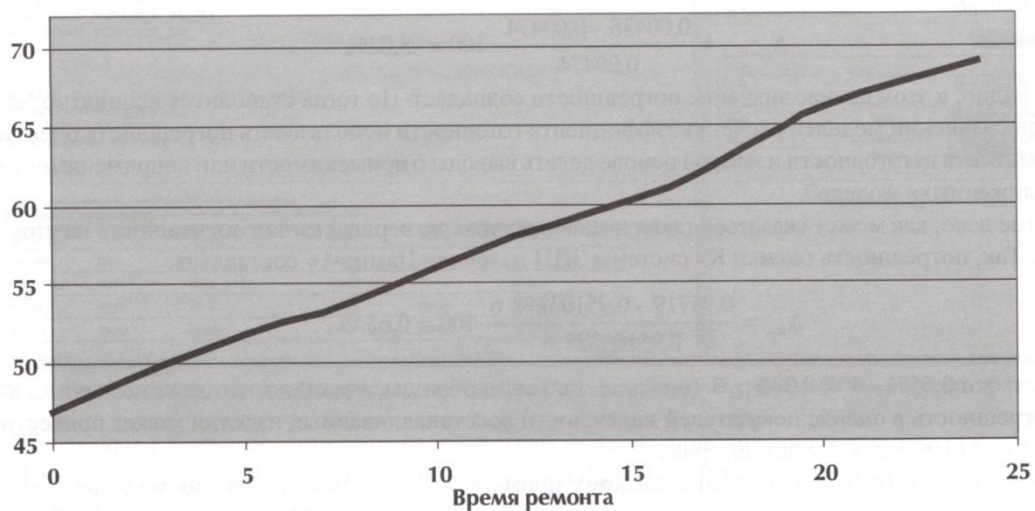


Рис. 4. Зависимость среднего времени восстановления от времени ремонта

И еще один аспект. При выводе «математически точной модели» принято допущение о том, что $T_p = 0$, т.к. «... допустимое время существенно больше среднего времени замены». Такое допущение сразу бросается в глаза, т.к. в «классических» формулах для расчета K_r [6] время ремонта всегда присутствует, а вот учет времени доставки ЗЧ из системы ЗИП вводится в расчеты далеко не всегда.

Для оценки влияния T_p с помощью системы АСОНИКА-К-РЭС были проведены расчеты среднего времени восстановления (T_B) и коэффициента готовности системы «Изделие-Система ЗИП» при изменении времени ремонта в диапазоне от 1 до 24 ч. Графики зависимостей T_B и K_r для случая равнонадежных СЧ ($\lambda_{сч} = 1,0 \cdot 10^{-4}$) приведены на рис. 4 и 5.

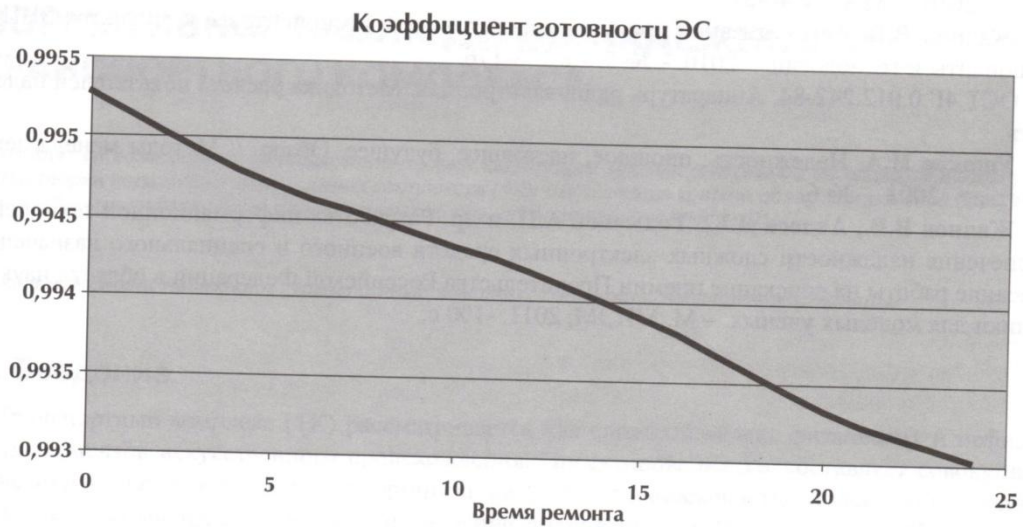


Рис. 5. Зависимость коэффициента готовности от времени ремонта

Для $T_p = 24$ ч. погрешность расчета K_r по «математически точной модели» составляет 0,22%. Таким образом, приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что принятые при выводе «математически точной модели» допущения не дают видимых преимуществ по точности расчетов при решении практических задач.

В заключение следует отметить, что нельзя не согласиться с авторами [3] и [4]: и методики ГОСТ нуждаются в «корректуре...», и методы расчета систем вида «Изделие-Система ЗИП» нуждаются в развитии. Другой вопрос, в каком направлении все это корректировать и развивать.

Естественно, все направления имеют право на существование, но на наш взгляд следует согласиться с тем, что «...статистическое моделирование (метод Монте-Карло), являющееся очень эффективным средством анализа различных сложных систем, остается пока искусством, овладение которым под силу только профессионалам в данной области. Возможно, создание простых и доступных специальных языков высокого уровня поможет более широкому внедрению методов статистического моделирования в инженерную практику» [7].

Попытка создания такого специализированного языка и была реализована в системе АСОНИКА-К-РЭС, а приведенные выше примеры демонстрируют его возможности и свидетельствуют о том, что из всех возможных направлений развития методов расчета систем вида «Изделие-Система ЗИП» именно методы имитационного моделирования является наиболее перспективными [8].

Литература

1. ГОСТ Р В 27.3.03-2005. Надёжность военной техники. Оценка и расчёт запасов в комплектах ЗИП.
2. РД В 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчёта запасов в комплектах ЗИП.
3. **Петров Г.А., Резиновский А.Я.** Предложения по корректуре методики оптимизации запасов в комплектах ЗИП // Надежность, – 2010. – № 2. – с.40-43.
4. **Черкесов Г.Н.** О проблеме расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии запасных элементов. (Часть 2. Сравнительный анализ точной и приближенной методик) // Надежность, – 2010. – № 4. – с.40-51.
5. **Жаднов В.В.** Автоматизация проектирования запасов компонентов в комплектах ЗИП. // Компоненты и технологии, – 2010. – № 5. – с.173-176.
6. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности.
7. **Ушаков И.А.** Надежность: прошлое, настоящее, будущее. Обзор. // Методы менеджмента качества, – 2001. – № 6.
8. **Жаднов В.В., Авдеев Д.К., Тихменев А.Н. и др.** Разработка информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных средств военного и специального назначения: Описание работы на соискание премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. – М.:МИЭМ, 2011. -100 с.

Zhadnov V.V., Avdeev D.K., Tihmenev A.N.

PROBLEMS OF CALCULATION OF INDICATORS OF SUFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF STOCKS IN SYSTEMS THE SPARE PARTS, TOOLS AND ACCESSORY

The basic problems arising at designing of systems the spare parts, tools and accessory by traditional methods are considered. It is shown that at their use the settlement estimation of indicators of reliability of redundant restored products has an essential error. The basic aspects of application of methods of imitating modeling for calculations of indicators of reliability of redundant restored products are considered at limited system the spare parts, tools and accessory.

Keywords: *reliability, reservation, restoration, spare property and accessories, imitating modelling.*