

Черкесов Г.Н.

О КРИТЕРИЯХ ВЫБОРА КОМПЛЕКТОВ ЗИП

В статье обсуждаются концептуальные вопросы создания запасов для восстановления работоспособности технических систем, в том числе вопросы выбора комплектов ЗИП и критериев их оптимизации, соотношения двух способов устранения отказов – путем ремонта и путем замены отказавшего элемента на запасную часть. Указываются недостатки используемой в промышленности приближенной методики расчета надежности систем с учетом ЗИП.

Ключевые слова: надежность, восстанавливаемая система, запасная часть, комплект ЗИП, показатель достаточности, стратегия пополнения.

Введение

В последнее время усилилось внимание специалистов в области надежности к проблеме ЗИП. Это можно объяснить следующими причинами:

Возрастающая роль ЗИП как одного из главных ресурсов обеспечения надежности современных систем, особенно высокотехнологичных систем (hi-tech);

Недостаточное развитие методов теории надежности восстанавливаемых систем, которые учитывали бы особенности этого хорошо известного в инженерной практике ресурса;

Понимание несовершенства методик расчета надежности изделий при наличии ЗИП, которые используются в промышленности и поддерживаются авторитетом действующих нормативных документов уровня ГОСТ и РД;

Обостренное внимание к проблеме надежности в целом, в связи с участвовавшими случаями серьезных происшествий в ряде ответственных систем из-за отказов техники.

К этому можно добавить совершенно естественные в современных условиях проявления конкуренции программных средств, предлагаемых промышленности для поддержки расчетов и оценки комплектов ЗИП. Об этом свидетельствует, в частности, публикация статьи [1].

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 рынках и пр.).

В данной статье обсуждаются актуальные вопросы проектирования комплектов ЗИП и дается сравнительный анализ различных методик расчета ЗИП и надежности изделий, использующих ЗИП.

1. Актуальные вопросы проектирования комплектов ЗИП

В настоящее время наиболее актуальными можно признать следующие вопросы:

1.1. Какова главная цель создания комплекта или системы ЗИП: обеспечение требований к надежности или улучшение показателей технического обслуживания? В зависимости от ответа на этот вопрос проводится выбор типа показателя, который подлежит нормированию. Если целью является улучшение показателей технического обслуживания, то нормировать надо показатель достаточности комплекта ЗИП. Если же целью является улучшение надежности, то нормировать надо показатель надежности на основе требований, заданных в техническом задании на изделие.

1.2. Если признать, что целью создания комплекта ЗИП является улучшение надежности, то можно ли в этом случае проектировать комплект ЗИП по показателю достаточности? Если да, то возникает следующий вопрос.

1.3. Как найти нормативное значение показателя достаточности, по которому будет формироваться комплект ЗИП, при наличии внешних требований (в техническом задании) к показателю надежности?

1.4. Если формирование комплекта ЗИП и его оптимизация проводится по показателю достаточности, то можно ли судить о качестве этого ресурса по значению ПД? Например, если коэффициент готовности комплекта ЗИП равен 0,95, то это много или мало? А если он равен 0,2, значит ли это, что комплект не достаточен и в этом смысле мал (недостаточно велик)?

1.5. Всегда ли комплект ЗИП как ресурс обеспечения надежности и замена отказавшего элемента на работоспособную запасную часть как процедура восстановления работоспособности изделия могут обеспечить повышение надежности нерезервированных систем? Например, можно ли использовать комплект ЗИП, если нерезервированное изделие работает в режиме непрерывного длительного применения (НПДП) и для него нормируется показатель безотказности?

1.6. Если при ответах на вопросы 1 – 3 согласиться с тем, что целью создания комплекта ЗИП является повышение надежности, но для формирования комплекта ЗИП следует использовать показатель достаточности (ПД), и если при этом как-то удастся найти нормативное значение ПД, соответствующее нормативному значению показателя надежности (ПН), то возникает следующий вопрос. Можно ли проводить оптимизацию комплекта ЗИП по критерию минимума суммарных затрат при выполнении требований к ПД (прямая задача оптимизации) или оптимизацию по критерию максимума ПД при ограничениях на суммарные затраты (обратная задача)? Если да, то есть ли уверенность в том, что комплект, оптимальный по критерию ПД, будет оптимальным и при использовании ограничений на ПН (по критерию ПН)? А если нет, то возникает следующий вопрос.

1.7. Если признать нецелесообразной оптимизацию с использованием ПД, то зачем тогда надо нормировать ПД и вообще его вычислять?

1.8. В настоящее время вопрос оценки и оптимизации комплекта ЗИП переведен в практическую плоскость. Имеется, по крайней мере, три программных комплекса (ПК), которые реализуют аналитические методы оценки и оптимизации комплектов ЗИП: РОКЗЭРСИЗ [2], АСОНИКА-К-ЗИП [3], ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП [4]. Кроме того, имеется еще один ПК АСОНИКА-К-РЭС, который использует для расчета комплекта ЗИП метод статистического моделирования [1]. Они развиваются в обстановке здоровой конкуренции. В работе [1] приводится критика одного из ПК в пользу другого ПК – критика вполне полезная и направленная на поиск наилучших областей применения предлагаемых промышленных средств. Но в связи с этим возникает вопрос: «Какие методы и средства программной поддержки следует рекомендовать промышленности для практического применения с учетом всего комплекса сформулированных вопросов?»

Читатель не найдет в статье готового ответа на поставленные вопросы, но будет открыта дискуссия и изложена позиция автора по всем упомянутым аспектам проблемы.

2. Главная цель создания комплекта или системы ЗИП

По поводу цели создания комплекта ЗИП в нормативных документах используют формулировки, допускающие неоднозначное толкование. В ГОСТ В 15.705-86 утверждается, что целью разработки, производства и использования комплектов ЗИП является постоянное поддержание при эксплуатации работоспособности изделия проведением технического (регламентированного) обслуживания, плановых и внеплановых ремонтов. В ГОСТ РВ 27.3.03-2005 указывается, что одиночные и (или) групповые комплекты запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИП) или двухуровневые системы ЗИП предусматриваются для обеспечения надежности (ремонтпригодности) изделий. В руководящем документе РД В 319.01.19-98 указано, что настоящий документ распространяется на восстанавливаемые и обслуживаемые в условиях эксплуатации: аппаратуру, приборы, устройства, оборудование и другие изделия, требования к надежности которых, в том числе требования по достаточности и объему комплектов ЗИП заданы в нормативных документах.

Отсюда следует, что 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. А руководящий документ допускает, что в составе требований к надежности задаются требования к показателям достаточности и объему комплектов ЗИП.

Если выделять в этом многообразии главную цель, то все-таки есть основания считать, что главной целью в нормативных документах объявляется обеспечение надежности. Это вполне соответствует и логике проектирования, и задачам эксплуатации.

3. Критерии достаточности комплекта ЗИП

При выборе комплекта ЗИП следует указать критериальную функцию. В настоящее время есть, по существу, только два предложения: в качестве критерия использовать либо показатели достаточности (коэффициент готовности запаса (комплекта ЗИП) или среднее время задержки в удовлетворении заявки), либо показатели надежности (безотказности, готовности).

Если использовать показатели достаточности, то возникает два вопроса. Поскольку тип схемы внутреннего резервирования в изделии не влияет на показатели достаточности, а важна лишь суммарная интенсивность заявок на запасные элементы, то единственным и универсальным ПД становится коэффициент готовности запаса (комплекта ЗИП). Поэтому для выбора или оптимизации комплекта ЗИП необходимо знать нормативное значение ПД. Оно подлежит вычислению с использованием нормативного значения заданного показателя надежности. И первый вопрос состоит в том, как это сделать. Приведенную в [2, с.16] формулу связи

$$K_{\varepsilon, \text{ЗИП}}^{mp} = K_{\varepsilon}^{mp} / K_{\infty} \quad (1)$$

можно использовать только при выполнении двух условий: нормируется коэффициент готовности изделия, и в изделии нет резервирования. При нормировании другого показателя надежности (например, средней наработки до отказа, вероятности безотказной работы) или при наличии вну-

тренного резервирования в изделии формулу (1) использовать нельзя. А задача нахождения связи нормативных значений ПД и ПН по сложности сравнима с задачей прямого расчета надежности изделия при конечном запасе в комплекте ЗИП.

Конечно, можно нормировать ПД, не связывая это значение с нормативным значением ПН, но тогда возникает второй вопрос: как при известном комплекте ЗИП оценить фактическое значение ПН. Формула [2, с.16]:

$$K_z = K_{z, \text{ЗИП}} K_{z\infty} \quad (2)$$

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:

$$\bar{T}_e = \bar{T}_{e\infty} + \Delta t_{\text{ЗИП}-O}. \quad (3)$$

Этот методический прием дает приближенное значение показателя надежности с неисследованной погрешностью. Без оценки и контроля погрешности выбор комплекта ЗИП может оказаться неверным.

В различных методиках расчета $K_{z, \text{ЗИП}}$ тоже возникают разногласия. Так, в работе [8] высказывается предложение о том, чтобы исключить ситуации, когда в составе комплекта ЗИП есть позиции с нулевыми начальными запасами, и придерживаться принципа полноты ЗИП. Это предложение не выдерживает критики. Во-первых, в составе изделия могут быть дорогостоящие модули и приборы. Включение их в состав комплекта ЗИП принудительно, без обоснования по принятому критерию, приведет к значительному росту затрат на начальные запасы. Во-вторых, это предложение не учитывает возможного резервирования в изделии. И хотя выбор комплекта ЗИП проводится по показателю достаточности, назначением комплекта все-таки является обеспечение требований к надежности. Но тогда вполне можно представить приемлемым и вырожденный случай, когда комплект ЗИП вообще нулевой, то есть не содержит ни одной запасной части. При периодическом пополнении поступающие из неиссякаемого источника пополнения (НИП) запасные части будут использоваться только для восстановления базовой структуры. И при этой процедуре будут выполнены требования к надежности.

Итак, получается весьма парадоксальная ситуация. За исключением достаточно простых и не часто встречающихся на практике случаев, показатели достаточности и показатели надежности связаны соотношениями, которые мы не в состоянии установить. Тем не менее, признавая главной целью обеспечение надежности, мы выбираем комплекты ЗИП по показателям достаточности.

Но и это еще не все. Нормируя показатели достаточности, не зная связи ПД и ПН, мы упускаем из виду важную степень свободы, а именно вид и глубину структурного или функционального резервирования. В результате, стремясь обеспечить некоторый уровень ПД, мы вообще ничего не можем сказать о значении ПН. Он может быть низким при высоком значении ПД и высоким при низком значении ПД. При коэффициенте готовности запаса 0,95 вероятность безотказной работы может быть равной 0,1, даже 0,001 или еще меньше. Напротив, при коэффициенте готовности запаса 0,3 вероятность безотказной работы может быть равной 0,95 или еще больше. Но если это так (а далее будут приведены примеры того, что такое возможно) и заранее нельзя предсказать, будет ли хорошо или плохо, то возникает естественный вопрос, какова роль показателей достаточности,

нужны ли они вообще. А если они нужны, то для каких целей. Ясно, что их расчет во многих случаях не приближает нас к решению задачи обеспечения надежности. А выбор комплекта ЗИП по ПД не гарантирует выполнение требований к надежности.

4. Критерии оптимизации комплектов ЗИП

При оптимизации комплекта ЗИП возникает та же дилемма, что и при выборе комплекта ЗИП: проводить ее по критерию надежности или по критерию достаточности. Поскольку пересчет требований к надежности в требования к достаточности практически невозможен, за исключением случая, указанного в разделе 3, то оптимизация по критерию достаточности может быть проведена только в случае, если нормирование ПД проводится независимо от требований к надежности. Предлагаемые для применения в промышленности сертифицированные программные комплексы [1,2] проводят оптимизацию по критерию достаточности. Оптимизация должна проводиться по критерию минимума затрат на создание комплекта ЗИП. Идею отказа от учета стоимости запасных частей [8] при оптимизации нельзя рассматривать всерьез. От замены показателя надежности на показатель достаточности следует ожидать последствий, аналогичных тем, что были отмечены при формировании комплекта ЗИП. Количественно эти последствия можно установить путем сравнительного анализа результатов оптимизации на практических примерах.

Рассмотрим в качестве примера фрагмент одного из реальных проектов, выполненных автором по заказу промышленности, рассмотренного детально в книге [4]. 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-ти типов. Средняя наработка системы до отказа без учета структурного резервирования равна 89550 час. Требования к надежности сформулированы так: вероятность безотказной работы системы в течение 1 года (8760 час) должна быть не менее 0,95 (вариант 1) или не менее 0,9 (вариант 2). Оптимизацию следует проводить по критерию минимума суммарных затрат на создание комплекта ЗИП-О при периодическом пополнении запасов с периодом пополнения $T = 1$ год. При оптимизации по показателям достаточности следует обеспечить значение коэффициента готовности комплекта ЗИП не менее 0,95 (вариант 1) или не менее 0,9 (вариант 2).

Без комплекта ЗИП вероятность безотказной работы в течение года с учетом структурного резервирования равна 0,151. Коэффициент готовности комплекта ЗИП при нулевых запасах равен 0,23. Результаты оптимизации приведены в таблице 1.

Таблица 1

№	Критерий	Норматив	L	Стоимость тыс.руб.	Относительная стоимость, %	$P(t)$	$K_{\text{ЗИП}}$
1	$K_{\text{ЗИП}} \geq K_0$	0,95	19	839	47,4	0,9512	0,953
2	$K_{\text{ЗИП}} \geq K_0$	0,90	15	655	34,7	0,825	0,910
3	$P(t) \geq P_0$	0,95	12	411	21,8	0,9524	0,67
4	$P(t) \geq P_0$	0,90	10	368	19,5	0,902	0,613

Сравнивая результаты оптимизации по двум критериям, можно увидеть, что при расчете комплекта ЗИП по критерию ПД получается завышенный уровень запасов по сравнению с уровнем, требуемым для обеспечения надежности. В варианте 1 (норматив 0,95) стоимость комплекта ЗИП возросла от 411 тыс. руб. до 839 тыс. руб., то есть более чем вдвое. При этом вероятность безотказной работы не только не увеличилась, но немного уменьшилась: от 0,9524 до 0,9512.

В варианте 2 (норматив 0,90) стоимость комплекта ЗИП возросла от 368 тыс. руб. до 655 тыс. руб., то есть в 1,78 раза. При этом вероятность безотказной работы не только не увеличилась, но заметно уменьшилась: от 0,902 до 0,825.

Вариант 1 в табл. 1 – единственный вариант комплектации ЗИП, обеспечивающий значения $K_{\text{ЗИП}}$ и $P(t)$ на уровне не менее 0,95. При этом комплект ЗИП-О, выбранный по критерию ПД, получается самым дорогим. В варианте 3 из табл. 1 требования к надежности также выполняются, но при этом комплект ЗИП-О более чем вдвое дешевле, чем в варианте 1, а коэффициент готовности ЗИП на уровне 0,67. Вряд ли можно оправдать столь высокую цену за более высокий уровень ПД, если требования к надежности выполнены и при более экономичном комплекте.

При нормативном уровне 0,90 результаты еще более выразительны. Добиваясь требуемого значения $K_{\text{ЗИП}}$, мы не можем обеспечить уровень $P(t)$ не менее 0,9, хотя при вдвое меньшем по стоимости комплекте удастся достичь уровня $P(t) \geq 0,9$. При этом $K_{\text{ЗИП}}$ равен всего лишь 0,613. Результат получается парадоксальным: при вдвое больших затратах не удается выполнить требования к надежности, хотя с выполнением требований к ПД все в порядке.

5. Использование комплекта ЗИП в не резервированной системе

Сравнивая ремонт и замену отказавшего модуля на запасную часть из комплекта ЗИП, правомерно задать вопрос о возможностях и эквивалентности этих способов восстановления работоспособности. Ясно, что возможность ремонта не позволяет увеличить вероятность безотказной работы, но позволяет увеличить коэффициент готовности изделия. Если время замены отказавшего модуля при наличии запасной части сравнимо со временем восстановления путем ремонта, то оба способа восстановления эквивалентны. Если в соответствии с назначением изделия и свойствами процессов функционирования, в которых участвует изделие, допускается некоторый перерыв в работе для восстановления путем ремонта или замены, то можно говорить о наличии резерва времени. Тогда согласно [5] вероятность безотказной работы однородной подсистемы с элементами i -го типа следует рассчитывать по формуле:

$$P_i(t, t_{\text{doni}}, \infty) = \exp(-k_i \lambda_i \max(0, t - t_{\text{doni}})(1 - F_{\text{ei}}(t_{\text{doni}}))), \quad (4)$$

где t_{doni} – допустимое время перерыва, $F_{\text{ei}}(t_{\text{doni}})$ – вероятность восстановления до истечения времени t_{doni} . Это может быть восстановлением путем ремонта или путем замены.

Если же время ремонта в среднем много больше времени замены, то ремонт и замена модуля на ЗЧ не эквивалентны. Например, если

$$t_{\text{зам}} \ll t_{\text{дон}} \ll \bar{T}_{\infty}, \quad (5)$$

то согласно (4) вероятность безотказной работы будет близка к единице при восстановлении путем замены и близка к нулю при восстановлении путем ремонта. Выполнение условия (5) требует тщательной проверки. И если резерв времени действительно имеется, то возникает схема просеивания потока отказов типа Реньи, при которой расчет надежности проводится при эквивалентной интенсивности отказов $\Lambda_3 = k\lambda(1 - F_{\text{ei}}(t_{\text{doni}}))$.

Если резерва времени нет, то комплект ЗИП не улучшает показатели безотказности. И тогда для соответствующих составных частей изделия требуется структурное резервирование, позволяющее использовать запасные части для улучшения безотказности.

Вопрос о значении резерва времени – это не только вопрос о его измерении. Это может быть и задачей проектирования [5]. Чтобы определить значение t_{don} , надо моделировать поведение процесса функционирования в условиях временной потери работоспособности прибора, в котором находится отказавший элемент. В некоторых случаях могут потребоваться даже новые проектные решения, например, временное изменение режима функционирования, чтобы замедлить неблагоприятные процессы и увеличить t_{don} до значения, достаточного для выполнения условия (5). В системах различного назначения можно создавать специальные условия, которые приведут к появлению резерва времени, используемого для замены отказавшего модуля запасной частью. Это значит, что и в нерезервированной системе допустимо использование ЗИП для улучшения показателей безотказности.

6. Сравнение методов и методик расчета показателей достаточности и надежности

Методика, изложенная в нормативных документах [2, 6], предназначена для оценки и расчета комплектов ЗИП на основе показателей достаточности. Методика реализована в двух программных комплексах РОКЗЭРСИЗ и АСОНИКА-КЗИП. В качестве альтернативы методике [2,6] можно рассматривать аналитический метод прямого учета состава комплекта ЗИП в моделях надежности и соответствующую методику, изложенную в [4], и метод статистического моделирования Монте-Карло. На базе этих методов и методик созданы программные комплексы АСОНИКА-К-РЭС и ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП. Представляет практический интерес провести сравнительный анализ различных предложений с целью оценить их фактические возможности, достоинства, недостатки и установить области их целесообразного применения.

Поскольку весьма распространено мнение об универсальности методики [2,6], следует подробнее рассмотреть ее реальные возможности в рамках определенной классификации изделий. В качестве признаков классификации можно использовать:

- Тип структуры;
- Режим применения и нормируемый показатель надежности;
- Количество выполняемых функций;
- Стратегию пополнения запасов в комплекте ЗИП.

По типу структуры можно различать:

- Не резервированные (последовательные) системы;
- Системы с последовательным соединением однородных резервированных подсистем;
- Системы с последовательным соединением однородных частично резервированных подсистем;
- Системы с последовательным соединением неоднородных резервированных подсистем;
- Структурно-сложные системы.

Для систем класса 1 и 3 методика [2,6] позволяет найти коэффициент готовности изделия с помощью формулы (2), но не дает рекомендаций по определению показателей безотказности. Причем в классе 3 проблема использования ЗИП и расчета надежности возникает потому,

что в однородной подсистеме часть элементов не резервирована. Для систем класса 2 можно находить и показатели готовности, и показатели безотказности с помощью формулы (3). По существу, это единственный класс систем, для которого методика [2,6] и теория надежности восстанавливаемых систем могут предложить известные расчетные формулы для показателей безотказности и готовности. Для остальных классов предлагается только общая идея, основанная на использовании коррекции среднего времени восстановления с помощью формулы (3). Поскольку задача нахождения показателей надежности в условиях неограниченного ЗИП по сложности сравнима с задачей оценки надежности при прямом включении ЗИП в модель надежности, использование приближенной методики [2,6] при наличии точной методики вряд ли целесообразно.

По третьему признаку (количество выполняемых функций) методика [2,6] также имеет ограничения. Она рассматривает только однофункциональные системы, в которых потребителями запасов являются те составные части (СЧ), которые входят в модель надежности. В многофункциональных системах показатели надежности рассчитываются для отдельных функционально самостоятельных операций (ФСО). В этом случае запасы потребляются не только теми СЧ, которые участвуют в выполнении данной ФСО, но и другими СЧ. Методика [2,6] не рассматривает в качестве объекта анализа многофункциональные системы.

При учете стратегий пополнения в модели надежности требуется определить, во-первых, момент формирования заявки на пополнение запасов, а во-вторых, объем запасов, которые должны быть поставлены по заявке. В методике [2,6] при стратегии периодического пополнения с экстренными поставками (ПЭД) рассматривается вариант составления заявки по факту отказа комплекта ЗИП. Но есть и другие варианты. Например, составление заявки по факту отказа резервированной подсистемы, по определенному уровню деградации резервированной подсистемы и др. По объему заявки рассматривается только вариант полного восстановления начальных запасов того типа, при исчерпании которых возникла заявка. Однако есть множество других вариантов формирования состава заявки. Например, доставка только одной запасной части при стратегии ПЭД, пополнение начальных запасов нескольких типов или всех типов при стратегиях ПЭД и пополнения по уровню. Не предусмотрена в методике и коррекция заявки после ее формирования, но до момента доставки.

Вне сферы действия методики находится и такой инструмент как реконфигурация системы, в процессе которой работоспособные элементы отказавших составных частей могут использоваться в качестве запасных частей.

Таким образом, сравнение методики [2,6] с альтернативными методиками возможно только в пределах ныне существующей и достаточно узкой сферы ее применения.

Что касается метода статистического моделирования, то его достоинства и недостатки хорошо известны и в полной мере проявляются при оценке надежности систем с ограниченным комплектом ЗИП. К достоинствам можно отнести универсальность метода и слабую зависимость трудоемкости расчетов от типа структуры изделия, стратегии пополнения запасов, структуры системы ЗИП. К недостаткам метода следует отнести возрастание погрешности и трудоемкости расчетов при оценке малых вероятностей, сложность процедуры оптимизации комплекта ЗИП.

Количественное сравнение различных методик и программных комплексов удобно провести на общем примере. В данном случае для сравнительного анализа выбрано радиоэлектронное изделие «Памир-1», рассмотренное в примере 1 Приложения А нормативного документа [2].

7. Сравнительный количественный анализ методов и методик на примере радиоэлектронного изделия типа «Памир-1» [5]

Общая характеристика изделия.

Пример расчета комплекта ЗИП по критерию достаточности взят из нормативного документа [2]. Изделие «Памир-1» содержит 1422 элемента (ЭРИ и СЧ) 30 наименований. В структурно-надежностной схеме изделие представлено как последовательное соединение 30 однородных подсистем, разбитых на 4 группы по типу стратегии пополнения запасов. Для 6 подсистем используется непрерывное пополнение со средним временем доставки 1 неделя = 150 час. Для 12 подсистем используется непрерывное пополнение со средним временем доставки 2 недели = 300 час. Для 7 подсистем – периодическое пополнение с периодом пополнения 1 год = 8000 час. Для 5 подсистем – периодическое пополнение с периодом 8000 час и средним временем экстренной доставки 3 суток = 65 час. Суммарный поток отказов равен 0,02772, средняя наработка до отказа равна 36,1 час. Требования к надежности не сформулированы. Внутренняя структура изделия неизвестна и нет сведений о наличии в нем структурного или функционального резервирования. Однако приводятся требования к достаточности комплекта ЗИП-О: коэффициент готовности комплекта ЗИП $K_{\text{ЗИП-О}} \geq 0,95$ при решении прямой задачи оптимизации по критерию достаточности.

В таблицах 2 и 3 приведены результаты расчетов коэффициента готовности комплекта ЗИП-О и вероятности безотказной работы. Состав комплекта ЗИП-О при суммарном количестве запасных частей $L=245$ взят из работы [2]. Расчеты вероятности безотказной работы изделия и состава комплекта ЗИП-О проведены с помощью ПК «ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП» [4] или заимствованы из [1]. Параметр m выражает суммарное количество резервных элементов в однородных подсистемах, в которых используется скользящее резервирование. При $m=0$ резервирование отсутствует. При $m=25$ модули 19, 20, 22 и 23 имеют по два резервных элемента и еще 17 имеют по одному резервному элементу. При $m=26$ в группе 19 (реле РЭС-49) имеется три резервных элемента.

Таблица 2. Прямая (пз) и обратная (оз) задачи

№	РОКЗЭРСИЗ, пз			АСОНИКА-КЗИП, пз				АСОНИКА-КЗИП, оз		
	L	P(t)		L	P(t)			L	P(t)	
		m=0	m=26		m=0	m=25	m=26		m=0	m=26
1	1	0,99814	0,999996	1	0,99814	0,999996	0,999996	2	1,000000	1,000000
2	1	0,91813	0,998422	2	0,99651	0,999978	0,999978	2	0,999976	0,999978
3	1	0,64895	0,976906	2	0,96008	0,999224	0,999224	2	0,999699	0,999224
4	1	0,98375	0,985370	1	0,98375	0,983751	0,983751	2	0,999998	0,983751
5	1	0,72095	0,991816	2	0,97364	0,999766	0,999766	2	0,999806	0,999766
6	1	0,95646	0,999728	1	0,95646	0,956460	0,956460	2	0,999991	0,956460
7	0	0,82531	0,998973	1	0,99869	0,999996	0,999996	1	0,998688	0,999996
8	1	0,98002	0,999708	1	0,98002	0,999708	0,999708	2	0,999992	0,999997
9	1	0,99301	0,999945	1	0,99301	0,999945	0,999945	1	0,993005	0,999945
10	1	0,99796	0,999992	1	0,99796	0,999992	0,999992	1	0,997958	0,999992
11	1	0,99869	0,999997	1	0,99869	0,999997	0,999997	1	0,998688	0,999997
12	1	0,99483	0,999970	1	0,99483	0,999970	0,999970	1	0,994834	0,999970

13	1	0,99707	0,999992	1	0,99707	0,999992	0,999992	1	0,997071	0,999992
14	1	0,95667	0,999016	1	0,95667	0,999016	0,999016	2	0,999974	0,999986
15	1	0,94409	0,998533	2	0,99729	0,999976	0,999976	2	0,999961	0,999976
16	1	0,99349	0,999962	1	0,99349	0,999962	0,999962	1	0,993487	0,999962
17	1	0,90834	0,996690	2	0,99412	0,999928	0,999928	2	0,999913	0,999928
18	1	0,99483	0,999980	1	0,99483	0,999980	0,999980	1	0,994834	0,999980
19	112	0,52510	0,999990	40	4,0E-15	0,964811	0,999343	58	1,40E-08	0,999875
20	14	0,52812	0,999778	9	0,09177	0,999526	0,999526	19	0,528121	0,999993
21	2	0,45060	0,991640	4	0,83501	0,998682	0,998682	6	0,450605	0,999701
22	25	0,48016	0,999499	14	0,00792	0,998140	0,998140	31	0,480164	0,999972
23	25	0,48016	0,999499	14	0,00792	0,998140	0,998140	31	0,480164	0,999972
24	18	0,99281	0,992813	21	0,99930	0,999300	0,999300	23	0,999880	0,999300
25	3	0,99997	0,999968	3	0,99997	0,999968	0,999968	4	0,999999	0,999968
26	13	0,99684	0,996843	16	0,99985	0,999855	0,999855	17	0,999953	0,999855
27	4	0,99977	0,999771	5	0,99998	0,999980	0,999980	6	0,999998	0,999980
28	6	0,99976	0,999764	7	0,99997	0,999966	0,999966	8	0,999996	0,999966
29	3	0,99993	0,999935	4	1,00000	0,999997	0,999997	4	0,999997	0,999997
30	3	0,99995	0,999953	4	1,00000	0,999998	0,999998	4	0,999998	0,999998
	245	0,00740	0,926783	164	1,5E-20	0,899650	0,931849	239	7,53E-10	0,93835

Здесь «пз» – прямая задача, «оз» – обратная задача

Таблица 3

№	Задача	Программа	L	Стоимость, тыс.руб.	m	$K_{гзип}$	$P(t)$
1	прямая	РОКЗЭРСИЗ	245	3395,65	0	0,95719	0,0074
2	обратная	АСОНИКА-К-ЗИП	239	3391,1	0	0,98504	7,53E-10
3	прямая	АСОНИКА-К-ЗИП	164	1942,15	0	0,95312	1,51E-20
4	прямая	РОКЗЭРСИЗ	245	3395,65	26	0,95719	0,9268
5	обратная	АСОНИКА-К-ЗИП	239	3391,1	26	0,98504	0,9384
6	прямая	АСОНИКА-К-ЗИП	164	1942,15	25	0,95312	0,8997
7	прямая	АСОНИКА-К-ЗИП	164	1942,15	26	0,95312	0,9319

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

1. Не вызывает сомнения утверждение, сделанное в работе [1], о том, что при решении прямой задачи оптимизации по критерию достаточности комплект из 164 запасных частей следует предпочесть комплекту из 245 запасных частей, так как оба обеспечивают требуемый коэффициент готовности комплекта, но один существенно меньше и экономичней другого.

2. Аналогичный вывод можно сделать и по результатам решения обратной задачи, согласно которому два примерно одинаковых по стоимости комплекта ЗИП-О обеспечивают различные значения коэффициента готовности ЗИП-О: в одном случае 0,957, а в другом – 0,985. Ясно, что предпочтение следует отдать комплекту с более высоким ПД.

3. Однако хорошие в одном и плохие в другом случае результаты анализа обесцениваются и теряют всякий смысл, если вернуться к задаче обеспечения надежности. Если предположить, что в изделии отсутствует структурное резервирование, то все варианты комплекта ЗИП-О неприемлемы, так как в одном случае вероятность безотказной работы в течение года равна 0,0074, а в другом вообще практически нулю: $1,51E-20$. Даже самый не экономичный вариант комплекта недостаточен, так как не обеспечивает требуемой надежности.

4. Если предположить, что в изделии есть структурная избыточность, то сравнение приобретает смысл. Приведенные в таблице варианты со структурной избыточностью отличаются количеством резервных элементов. Расчеты по формулам из [4] проведены для структурных схем, в которых для ряда подсистем используется нагруженное резервирование дробной кратности. Для подсистем с номерами (согласно нумерации в [2]) 1-3, 5, 7-18, 21 введен один резервный элемент, для подсистем с номерами 20, 22 и 23 – два резервных элемента. В подсистеме с номером 19 для вариантов 4, 5 и 7 из таблицы 2 введено три резервных элемента, а для варианта 6 – два элемента. Из таблицы 2 видно, что при такой кратности резервирования вероятность безотказной работы в течение года увеличивается от значения, близкого к нулю до значений 0,9 – 0,94. Причем такой существенный рост ВБР достигается при общем количестве резервных элементов в 6 – 9 раз меньше, чем число запасных частей.

5. С увеличением кратности структурного резервирования требования к надежности достигаются при более низких значениях ПД (как и в примере, приведенном здесь в разделе 5). Если выбирать комплект ЗИП-О по критерию надежности, то по факту могут стать приемлемыми значения $K_{\text{ЗИП}}$, равные 0,9, и 0,5, и 0,1 и еще более низкие значения. Это значит, что при проектировании изделий, в том числе и изделия Памир-1, показатели достаточности не интересны. Они могут представлять интерес только при проектировании систем технического обслуживания. Рациональное распределение общих ресурсов между двумя видами: структурным резервированием и комплектом ЗИП возможно с помощью дополнительных критериев (ограничений по объему, габаритам, энергопотреблению и пр.). Следовательно, проектирование комплекта ЗИП и выбор схем резервирования должны проводиться совместно в пределах общей задачи обеспечения надежности.

9. Сравнение аналитических методов и методов статистического моделирования

Аналитические методы либо имеют методическую погрешность [7], либо требуют весьма больших усилий для получения расчетных формул или вычислительных процедур. Однако с их помощью можно оценивать значения вероятностей, близкие к нулю и единице, проводить оптимизацию комплектов ЗИП, устанавливать в процессе анализа некоторые общие закономерности. Методы статистического моделирования (МСМ) обладают высокой универсальностью, достаточно экономичны при ручной подготовке исходных данных для оценки показателей надежности и достаточности изделий комплектов ЗИП. Однако они требуют больших и иногда неприемлемых затрат времени для оценки малых вероятностей и дают при этом значительную и неконтролируемую погрешность оценки. Примером трудностей применения МСМ могут быть данные из таблицы 2. С помощью МСМ не удастся оценить вероятность безотказной работы изделия при отсутствии структурного резервирования, так как оценивается величина $1,5E-20$. Вызывает определенные трудности и решение задач оптимизации. Программа АСОНИКА-К-РЭС в настоящее время не приспособлена к решению задач оптимизации, Программа ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП может решать задачи оптимизации с помощью МСМ. Однако ее возможности при использовании МСМ еще не достаточно исследованы. Тем не менее, представляет интерес оценить точность и трудоемкость

МСМ на некоторых конкретных примерах, чтобы сравнить аналитические методы и методы статистического моделирования.

Вернемся к примеру, заимствованному из [4] и рассмотренному в разделе 4 для СУ ТС БАЭС. Результаты оптимизации комплекта ЗИП-О с помощью аналитических методов и метода СМ приведены в таблицах 4–6. При нормативном значении $P^0=0,95$ и выборке объема $N=1000$ в 10 прогонах полученный с помощью МСМ оптимальный комплект совпал с комплектом, полученным с помощью аналитических методов, в 50% прогонов. А при $P^0=0,99$ и выборке объема $N=1000$ в 10 прогонах полученный с помощью МСМ оптимальный комплект ни разу не совпал с комплектом, полученным с помощью аналитических методов. В таблице 4 приведены результаты двух из прогонов для $P^0=0,95$. При 12 запасных частях оценка вероятности безотказной работы $P(t) = 0,9559$ оказалась больше требуемого значения и больше фактического значения, полученного аналитическим методом. При 13 запасных частях вероятность $P(t) = 0,9631$. Относительная стоимость комплекта ЗИП возросла на 0,29%. При том же нормативном значении и объеме выборки $N=10000$ оптимизация с помощью МСМ уверенно дает комплект, совпадающий с результатом оптимизации с помощью аналитических методов.

Если $P^0=0,99$, то при объеме выборки $N=10000$, и даже при $N=10^6$ метод статистического моделирования дает неустойчивый результат (табл. 5 и 6). Только при $N=10^7$ он дает результат, совпадающий с результатом аналитической оптимизации (табл. 6). Фактические значения $P(t)$, полученные двумя методами, близки друг к другу (различия в пятом знаке после запятой).

Таблица 4. $N=1000$, $P^0=0,95$, ВБР (МСМ) = 0,9559

№	Модуль	k	$k\lambda T \cdot 10^6$, 1/ч	L , АМ	$K_{\text{ЗИП}}$, АМ	ВБР, АМ	L , МСМ	L , МСМ
1	Р III	2	0,3590	1	0,98199	0,993835	1	1
2	Mon	4	1,4016	1	0,82942	0,9961981	1	1
3	CPU-434	2	0,0727	0	0,96451	0,9950821	0	0
4	TBL	2	0,1752	1	0,99531	0,9991964	1	1
5	XBP-010	3	0,0045	0	0,99777	0,9970172	0	0
6	DDO	1	0,0365	1	0,99978	0,9986981	1	1
7	CHS	2	0,0235	0	0,98835	0,9994616	0	0
8	CPS-114	1	0,0159	1	0,99996	0,9997513	1	1
9	CPS-124	4	0,0634	0	0,96895	0,9999991	0	0
10	CRP	2	0,0280	0	0,98611	0,9992359	0	0
11	CRA	1	0,0142	1	0,99997	0,9998005	1	1
12	NOE	2	0,0293	0	0,98551	0,9991686	0	0
13	TSX	1	0,0394	1	0,99975	0,9984869	1	1
14	UPS	5	0,6570	3	0,99899	0,9907869	3	3
15	RPS-60	4	0,1577	0	0,92515	0,988538	1	0
16	RS2	2	0,0282	1	0,99987	0,9992193	1	1
17	NRP	2	0,0477	1	0,99963	0,9978011	1	1
18	RXN	1	0,0004	0	0,99978	0,9991244	0	0
19	Всего	41	3,1541	12	0,67020	0,95241	13	12
20	Стоимость %			21,77			22,06	21,77

Таблица 5. N=10000, P0=0,99

№	Модуль	k	kλT *106, 1/ч	L, AM	KrЗИП, AM	ВБР, AM	L, МСМ	L, МСМ	L, МСМ
1	P III	2	0,3590	2	0,9984419	0,9994609	2	2	2
2	Mon	4	1,4016	2	0,9484916	0,9991841	2	2	2
3	CPU-434	2	0,0727	0	0,9645113	0,9950821	0	1	0
4	TBL	2	0,1752	2	0,9997982	0,9999653	1	1	1
5	XBP-010	3	0,0045	1	0,9999967	0,9999934	1	1	1
6	DDO	1	0,0365	2	0,9999980	0,9999842	1	1	2
7	CHS	2	0,0235	0	0,9883529	0,9994616	0	0	0
8	CPS-114	1	0,0159	1	0,9999584	0,9997513	1	1	1
9	CPS-124	4	0,0634	0	0,9689487	0,9999991	0	0	0
10	CRP	2	0,0280	0	0,9861141	0,9992359	0	0	0
11	CRA	1	0,0142	1	0,9999667	0,9998005	1	1	1
12	NOE	2	0,0293	0	0,9855124	0,9991686	0	0	0
13	TSX	1	0,0394	2	0,9999975	0,9999802	2	1	2
14	UPS	5	0,6570	5	0,9999902	0,9998724	4	4	4
15	RPS-60	4	0,1577	2	0,9998513	0,9999882	2	1	1
16	RS2	2	0,0282	1	0,9998692	0,9992193	1	1	1
17	NRP	2	0,0477	2	0,9999956	0,9999652	2	2	2
18	RXN	1	0,0004	1	1,0000000	0,9999998	1	0	1
19	Всего	41	3,1541	24	0,84960	0,990147	21	19	21
20	Стоимость %			36,74			33,85	40,98	34,37
21	ВБР, AM			0,9901			0,987	0,989	0,988

AM – аналитический метод

Таблица 6. P0=0,99

№	Модуль	L, N=105	L, N=105	L, N=105	L, N=106	L, N=107	ВБР, МСМ, N=107
1	P III	2	2	2	2	2	0,999482
2	Mon	2	2	2	2	2	0,999190
3	CPU-434	1	0	0	0	0	0,995075
4	TBL	1	2	2	2	2	0,999977
5	XBP-010	1	1	1	1	1	0,999993
6	DDO	2	2	2	2	2	0,999984
7	CHS	0	0	0	0	0	0,999459
8	CPS-114	1	1	1	1	1	0,999752
9	CPS-124	0	0	0	0	0	1,000000

10	CRP	0	0	0	0	0	0,999233
11	CRA	1	1	1	1	1	0,999802
12	NOE	0	0	0	0	0	0,999167
13	TSX	1	2	2	2	2	0,999979
14	UPS	4	5	5	5	5	0,999871
15	RPS-60	1	1	2	2	2	0,999987
16	RS2	1	1	1	1	1	0,999214
17	NRP	2	2	2	2	2	0,999964
18	RXN	0	1	1	1	1	1,000000
19	Всего	20	23	24	24	24	0,990163
20	Стоимость %	41,79	36,45	36,74	36,74	36,74	
21	ББР, АМ	0,9905	0,9899	0,9901	0,9901	0,99015	

Из сводной таблицы 7 следует, что при недостаточном объеме выборки результаты расчетов в различных прогонах ведут себя неустойчиво. Оптимальные комплекты не совпадают для различных прогонов и отличаются от комплекта, полученного аналитическими методами. При этом возможны отклонения в любую сторону: большей и меньшей стоимости. Оценки вероятности безотказной работы отличаются от расчетных с помощью аналитических методов. В большинстве случаев оценка получается завышенной и фактическое значение ББР оказывается иногда меньше нормативного значения. Результаты устойчивы при весьма больших объемах выборки. В данном примере это достигается при $N=10000$ для $P^0=0,95$, а при $N=1000000$ для $P^0=0,99$.

Таблица 7. Сводная таблица статистической оптимизации комплекта ЗИП

Метод	N	P^0	L	$P(t), \text{АМ}$	$P(t), \text{МСМ}$	C	Доля
АМ	-	0,95	12	0,952412		411,24	21,77
МСМ	1000	0,95	13	0,963161	0,954943	416,71	22,06
МСМ	1000	0,95	12	0,952412	0,955884	411,24	21,77
МСМ	1000	0,95	13	0,963161	0,961660	416,71	22,06
МСМ	10000	0,95	12	0,952412	0,952637	411,24	21,77
МСМ	10000	0,99	21	0,987069	0,990035	639,412	33,85
МСМ	10000	0,99	19	0,989248	0,991136	774,138	40,98
МСМ	10000	0,99	21	0,988050	0,990238	649,276	34,37
МСМ	100000	0,99	23	0,989857	0,990236	688,548	36,45
МСМ	100000	0,99	20	0,990522	0,991097	789,475	41,79
МСМ	100000	0,99	24	0,990147	0,990254	694,021	36,74
МСМ	1000000	0,99	24	0,990147	0,990268	694,021	36,74
МСМ	1000000	0,99	24	0,990147	0,990219	694,021	36,74

Для изделия Памир-1 сравнить методы можно только при оценке ПД, так как требования к надежности и схемы структурного резервирования неизвестны. При $N = 10^6$ оценки для наименее надежного элемента РЭС-49, полученные с помощью программы «ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП», приведены в табл. 8.

Таблица 8. РЭС-49

Задача оптимизации	L	$K_{\text{зип}}, \text{МСМ}, N=10^6$	$K_{\text{зип}}, \text{АМ}$
Прямая	40	0,9782	0,98175
Обратная	58	0,9847	0,98950
Прямая	112	0,9920	0,99541

Метод статистического моделирования дает устойчиво заниженные значения ПД

10. Заключение

1. Анализ результатов применения методик формирования и оптимизации комплектов ЗИП по показателям достаточности приводит к неутешительным выводам. В ряде случаев рекомендуемый состав комплекта ЗИП, имеющего высокие показатели достаточности, не может обеспечить приемлемый уровень надежности изделия. Даже в примере, приведенном в Руководящем документе и рассматриваемом в качестве некоторого эталона, рассчитанный комплект ЗИП обеспечивает вероятность безотказной работы всего 0,0074. Попытка улучшения состава комплекта ЗИП-О в [1] приводит к существенному уменьшению комплекта ЗИП-О без снижения коэффициента готовности ЗИП, но при этом вероятность безотказной работы падает до уровня 10^{-20} . Возникает вопрос, зачем надо уменьшать запасы и добиваться высоких значений показателя достаточности, если надежность изделия от такой акции падает практически до нуля. Причина абсурдности этой ситуации заключается в ошибочной концепции назначения запасов в комплекте ЗИП.

2. Выбор комплекта ЗИП должен проводиться по критерию достижения требуемого значения показателя надежности. Показатели достаточности запасов не представляют особого интереса и могут рассчитываться разве лишь для сведения. Используемые в настоящее время в промышленности методики выбора комплектов ЗИП, основанные на показателях достаточности, должны быть заменены методиками, основанными на показателях надежности. Это позволит устранить очевидное противоречие между назначением комплектов ЗИП и критерием выбора их состава.

3. Оптимизация комплектов ЗИП также должна проводиться по показателю надежности. Использование в качестве критерия оптимизации одного из показателей достаточности может давать решения, уступающие оптимальному по критерию надежности как по стоимости запасов, так и по достигаемому значению показателя надежности (при более дорогом комплекте более низкая надежность).

4. Действующие в настоящее время нормативные документы, предписывающие проводить выбор и оптимизацию комплектов ЗИП по показателям достаточности, должны быть переработаны в направлении изменения критериев выбора или дополнены новыми разделами, отражающими выбор и оптимизацию комплектов ЗИП по критерию надежности.

5. Метод статистического моделирования следует признать вполне конкурентоспособным при сравнении с аналитическими методами, так как он обладает большой степенью универсальности. Вместе с тем, он не достаточно исследован в части оценки и контроля точности получаемых статистических значений показателей надежности и достаточности. Поэтому при решении прямой задачи метод следует применять с крайней осторожностью. При недостаточных объемах выборки возможны существенные отклонения оценок показателей от их истинных значений. Для оптимизации комплектов ЗИП метод еще менее приспособлен, так как выбор следующей запасной части на очередном шаге оптимизации приходится проводить по значениям вероятностей, очень близким к единице. Для правильного выбора требуется высокая точность оценки вероятностей, а, следовательно, большие объемы выборки.

Литература

1. **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.
2. РД В 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП.
3. **Жаднов В.В.** Автоматизация проектирования запасов компонентов в комплектах ЗИП. М.: Компоненты и технологии, 2010, №5, с.173–176.
4. **Черкесов Г.Н.** Оценка надежности систем с учетом ЗИП. – СПб: изд-во БХВ–Петербург, 2012. – 480 с.
5. **Черкесов Г.Н.** Надежность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.
6. ГОСТ РВ 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП.
7. **Черкесов Г.Н.** О проблеме расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии запасных элементов. Часть 1. М.: Надежность, №3, 2010. – С.29–39.
8. **Петров Г.А., Резиновский А.Я.** Предложения по корректуре методики оптимизации запасов в комплектах ЗИП // Надежность, – 2010. – №2. – С.30–43.