

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАПАСОВ В ОДИНОЧНЫХ КОМПЛЕКТАХ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ, ИНСТРУМЕНТОВ И ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Фомин Михаил Сергеевич, магистр техники и технологии по направлению Информатика и вычислительная техника, окончил факультет автоматизированных систем Тверского государственного технического университета. Инженер-программист ОАО «НИИИТ». Имеет статьи в области прогнозирования и повышения надежности технических систем. [e-mail: nuclearmike@yandex.ru].

Аннотация

В настоящее время для оценки и расчета количественных характеристик запасов восстанавливаемых и невосстанавливаемых составных частей изделий в одиночных и групповых комплектах запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) используются аналитические методики, приведенные в действующих государственных стандартах Российской Федерации. Методики основаны на математическом аппарате теории массового обслуживания и, в частности, марковских цепях с конечным числом состояний и с непрерывным временем, возможности которого существенно ограничивают круг решаемых задач.

Актуальность решения задачи расчета запасов элементов в комплектах ЗИП с применением метода имитационного моделирования обусловлена тем, что допущения, принимаемые в существующих аналитических методах и разработанных на их основе общепринятых методиках расчета (прогнозирования) надежности изделий, приводят к возникновению значительных ошибок в вычислениях и к неадекватной зависимости ремонтпригодности изделий от запасов элементов в комплектах ЗИП.

В частности, в используемом в настоящее время методе расчета оптимальных запасов показатели достаточности ЗИП в целом определяются по суммарному потоку заявок на составные части изделия. При этом потоки отказов составных частей, как правило, описываются экспоненциальным законом распределения. Вместе с тем, не учитывается, что законы распределения потоков отказов некоторых образцов техники (механические, электромеханические узлы и блоки, вычислительные устройства, группы элементов с резервированием и др.) значительно отличаются от экспоненциального закона распределения. Объединение разнородных потоков отказов отдельных составных частей и элементов значительно искажает характеристики реального потока заявок на составные части изделия в целом. Кроме того, применение существующего метода затруднено для изделий, имеющих в своем составе резервируемые устройства.

С учетом сказанного выше целесообразно уточнить действующую методику расчета запасов элементов в комплектах эксплуатационных ЗИП в направлении

использования метода имитационного моделирования процессов функционирования изделий.

В рамках данной статьи рассматривается использование метода расчета оптимальных запасов элементов в одиночных комплектах ЗИП (ЗИП-О), основанного на применении имитационной модели функционирования изделия. Этот метод позволяет определить уровень запасов элементов в комплектах эксплуатационных ЗИП с учетом конкретных законов распределения отказов элементов, особенностей конструктивного построения и функционирования изделия.

Используемые в программных средствах оценки и расчета ЗИП имитационные модели, позволяющие учесть множество возможных технических состояний изделия и реализующие алгоритмы функционирования реальной системы ЗИП, могут быть существенно более достоверными, чем математические модели, применяемые в настоящее время.

Ключевые слова: комплект ЗИП, имитационное моделирование, показатель достаточности, оптимальный запас, стратегия пополнения.

Введение

Многие технические системы имеют такие условия функционирования, когда ремонтный орган (ремонтная база) находится в непосредственной близости от места эксплуатации системы и имеет технические и технологические возможности устранения практически любого отказа, возникающего при эксплуатации [1]. Однако существует большое количество сложных технических систем, работоспособность которых не может быть восстановлена путем ремонта отказавших элементов. Например, бортовые системы (на самолетах, судах) либо системы, включающие в себя высокотехнологичные элементы, ремонт которых не возможен или экономически не выгоден.

Альтернативой ремонту является использование комплектов ЗИП, когда восстановление работоспособности осуществляется за счет замены отказавшего элемента работоспособной запасной частью, что может выполнить эксплуатационный персонал [1].

Под запасом элементов в комплекте ЗИП понимается совокупность однотипных запасных элементов. Возможная нехватка запасных элементов увеличивает среднее время замены отказавшего элемента исправным запасным (среднее время ремонта изделия). Отказом запаса элементов данного типа называется такое состояние пары «изделие – система ЗИП», при котором изделие полностью или частично потеряло работоспособность из-за отказа элемента данного типа, а данный запас пуст [2]. Ограниченность объема ЗИП может весьма существенно сказаться на значении показателя надежности изделия, и ее нельзя не учитывать при расчетах надежности. Практика показывает, что затраты на систему ЗИП сравнимы с затратами на изделие, поэтому возникает задача расчета данной системы, обеспечивающей заданный уровень надежности изделия при минимальных затратах.

В настоящее время для оценки и расчета количественных характеристик запасов в комплектах ЗИП, придаваемых изделиям, используются методики, разработанные Резиновским А.Я., Шурой-Бурой А.Э. и др.

Для сокращения трудоемкости и обеспечения безошибочности расчетов при оценке существующих ЗИП и определении оптимальных запасов в проектируемых комплектах ЗИП вышеуказанными авторами методик был разработан пакет прикладных программ «Расчет оптимальных комплектов запасных элементов для ремонта сложных изделий» (ППП «РОКЗЭРСИЗ») [3].

Пакет разработан на основе математических моделей, в которых используется математический аппарат теории массового обслуживания и, в частности, марковские цепи с конечным числом состояний и с непрерывным временем, возможности которого существенно ограничивают круг решаемых задач. В частности, показатели достаточности ЗИП в целом определяются, как правило, по суммарному потоку заявок на составные части изделия. Вместе с тем, не учитывается тот факт, что законы распределения потоков отказов некоторых устройств образцов радиоэлектронной техники (механические, электромеханические узлы и блоки, вычислительные устройства, группы элементов с резервированием и др.) значительно отличаются от экспоненциального закона распределения. Объединение разнородных потоков отказов отдельных составных частей и элементов значительно искажает характеристики реального потока заявок на составные части изделия в целом. Кроме того, применение существующего метода затруднено для изделий, имеющих в своем составе резервируемые устройства.

Другая крайне важная проблема касается не только систем ЗИП, но и вообще сложных систем, натурные испытания которых требуют очень больших затрат труда, времени и средств. В этом случае недостатки изделий обнаруживаются в эксплуатации, когда их устранение либо невозможно, либо требует очень больших затрат. Для таких систем целесообразно использовать имитационное моделирование. Используемые в программных средствах оценки и расчета ЗИП имитационные модели, реализующие алгоритмы функционирования реальной системы ЗИП, могут быть существенно более достоверными, чем математические модели, применяемые в настоящее время. Таким образом, актуальна разработка и реализация в программных средствах новых методов, которые позволят решать большинство задач, возникающих в настоящее время при проектировании ЗИП.

Методика расчета оптимальных запасов в комплекте ЗИП-О

ЗИП-О – это комплект запасных конструктивных элементов, придаваемый непосредственно изделию с целью обеспечения его надежности при длительном использовании [2]. Типовая структура использования комплекта ЗИП-О приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Типовая структура использования комплекта ЗИП-О

Принято, что пополнение комплектов ЗИП-О осуществляется со складов (баз снабжения), которые должны являться неисчерпаемыми источниками пополнения (НИП), то есть удовлетворяющими все заявки на запасные части без задержки.

Под расчетом запаса одного типа понимают определение его начального уровня, удовлетворяющего предъявленным требованиям по показателю достаточности при заданной стратегии пополнения. Расчет запасов в комплекте ЗИП складывается из расчетов запасов каждого типа в отдельности и последующей оценки показателя достаточности и суммарных затрат на запчасти по комплекту ЗИП в целом. Задача оптимизации запасов в комплекте ЗИП заключается в расчете запасов, обеспечивающих заданный уровень показателя достаточности комплекта ЗИП при минимальных суммарных затратах на запасные части.

Известно, что любой расчет использует заранее выбранную модель, которая приближенно описывает реальную действительность. Критерием правильности расчета является эксперимент.

Для расчетов ЗИП в предлагаемой модели используется имитационное моделирование, которое при современном развитии вычислительной техники может во многих случаях заменить натурные эксперименты. При имитационном моделировании сохраняется логическая структура исследуемой системы, последовательность протекания во времени процессов ее функционирования, характер и состав информации о состояниях системы. С этой точки зрения имеет место некоторая аналогия между исследованием системы методом имитационного моделирования и исследованием методом натурального эксперимента. Имитационное моделирование позволяет получить такое же (а в ряде случаев и большее) количество информации, чем натуральный эксперимент. Например, натуральный эксперимент с системой ЗИП практически невозможен по причине больших материальных и временных затрат на получение необходимой информации о функционировании системы ЗИП.

Для расчета запасов в комплекте ЗИП-О необходимы следующие исходные данные:

1. Вид показателя достаточности и требуемое (заданное) его значение.
2. Тип затрат на запасные части и единица их измерения.
3. N – общее количество типов запасных частей в комплекте ЗИП (размер номенклатуры комплекта ЗИП).
4. Параметры запасов каждого типа, включающие в себя:
 - 4.1. Порядковый номер запаса в ЗИП.
 - 4.2. Шифр или наименование составной части.
 - 4.3. m_i – количество составных частей i -го типа в изделии, обслуживаемом комплектом ЗИП-О.
 - 4.4. λ_i – интенсивность замен составных частей i -го типа.
 - 4.5. c_i – затраты на одну запасную часть i -го типа (цена, объем, масса и т. п.).
 - 4.6. Тип и параметры заданной (принятой) стратегии пополнения запаса i -го типа в комплекте ЗИП-О.

Величина λ_p , вносимая в формуляр исходных данных, должна определяться как сумма интенсивности замен составных частей i -го типа из-за отказов их в различных режимах работы изделий, профилактических замен при техническом обслуживании, а также из-за отказов запасных частей при хранении их в комплекте ЗИП. При необходимости (недостаточной глубине диагностики) должна учитываться также определенная доля ошибочных изъятий составных частей из изделия в процессе поиска причины (места) неисправности.

Основными количественными характеристиками запасов в комплектах ЗИП являются суммарные затраты на запасные части и показатели достаточности запасов (коэффициент готовности запаса или среднее время задержки в удовлетворении заявки на запасную часть).

Показатель достаточности запаса – это количественная характеристика, определяющая влияние начального уровня запаса на уровень надежности обеспечиваемого изделия в заданных условиях и режимах его эксплуатации и при заданной стратегии пополнения запаса.

Показатели достаточности запасов в комплекте ЗИП-О:

1. Коэффициент готовности запаса (Kz_i) – это вероятность того, что в произвольный момент времени при принятой стратегии пополнения запаса данного типа отказ комплекта ЗИП по нему не произойдет.

2. Среднее время задержки в удовлетворении заявки на запасную часть одним запасом (Δt_i) – это значение отношения суммарного времени, которое заявки, поступившие в комплект ЗИП за некоторый период эксплуатации, прождут из-за нехватки запасных элементов, к общему числу заявок, поступивших в комплект ЗИП за тот же период.

Под стратегией пополнения запаса понимают совокупность правил, на основании которых пополняют (восстанавливают) запас в комплекте ЗИП. Каждая стратегия пополнения характеризуется одним или двумя числовыми параметрами. Каждый отдельный запас в комплекте ЗИП может пополняться, в общем случае, по своей отдельной стратегии, отличающейся от других как типом, так и значениями числовых параметров.

Основной исходной информацией для функционирования модели ЗИП являются моменты отказов составных частей изделия, которые генерируются датчиками случайных чисел (ДСЧ). Функционирование модели возможно при различных законах распределения случайного времени работы составной части до отказа, но из опыта известно, что для радиоэлектронной аппаратуры эта случайная величина распределена по экспоненциальному закону, поэтому в предлагаемой модели используется такое допущение. В силу особенности имитационной модели период повторяемости ДСЧ должен быть не менее 2^{32} чисел.

Отказы в изделии возникают случайно, то есть нельзя указать заранее время наступления отказа, поэтому для характеристик систем, зависящих от отказов ее элементов и требующих расчетных оценок, принимаются модели, основанные на теории вероятностей и математической статистике, а время работы элемента до отказа считается случайной величиной. Модель является имитационной, то есть имитирует работу реального изделия и ЗИП.

Целью же испытаний является набор «статистики» для оценки вероятностных характеристик, в частности коэффициента готовности ЗИП.

Для хранения моментов отказов составных частей i -го типа используется массив F , размерность которого зависит от количества составных частей данного типа в изделии (m_i). Формирование массива F производится путем выбора из ДСЧ с экспоненциальным законом распределения момента отказа j -й составной части i -го типа. Схема формирования массива моментов отказов F представлена на рисунке 2.

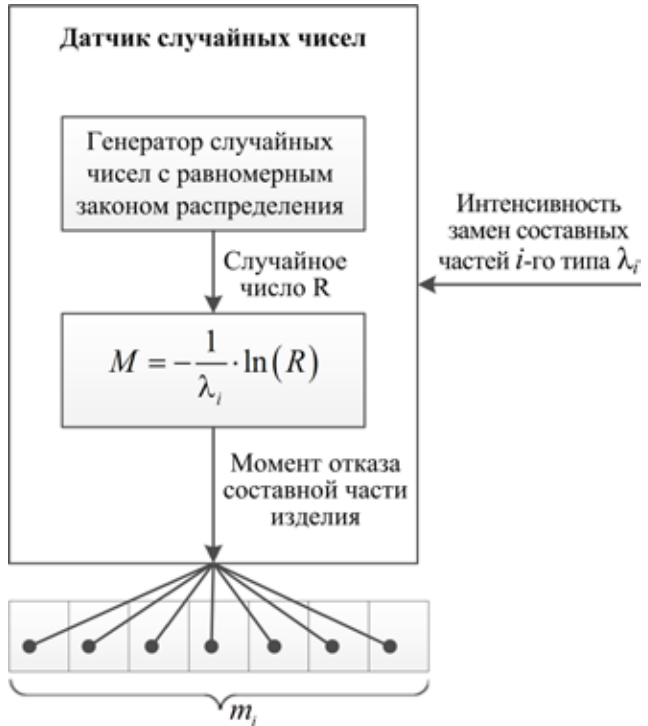


Рис. 2. Формирование массива моментов отказов составных частей i -го типа

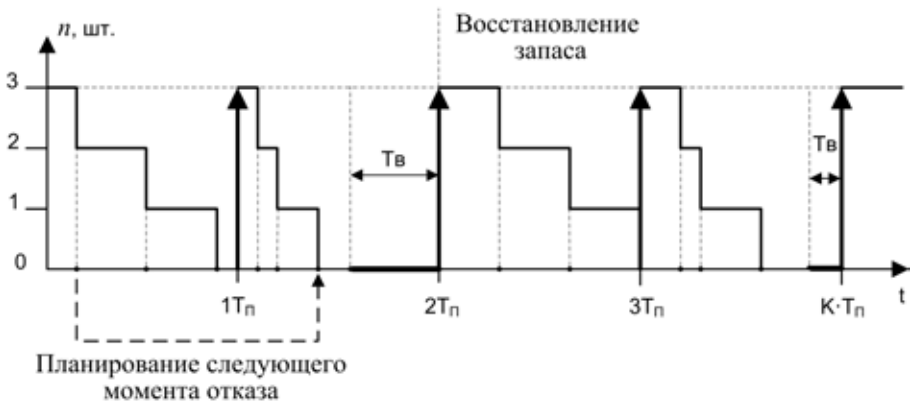


Рис. 3. Временная диаграмма периодического пополнения запаса

В дальнейшем созданный таким образом массив $F[m_i]$ используется в алгоритмах расчета показателя достаточности для запаса каждого типа и последующего определения показателя достаточности всего комплекта ЗИП.

Как показывает практика, наиболее часто запасы в комплекте ЗИП-О пополняются по одной из трех стратегий:

1. Периодическое пополнение.
2. Периодическое пополнение с экстренными доставками.
3. Непрерывное пополнение.

Каждая стратегия имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при разработке имитационных моделей. В данной статье предлагается рассмотреть модели периодического пополнения и периодического пополнения с экстренными доставками.

При периодическом пополнении запас элементов данного типа периодически через заранее заданные, фиксированные интервалы времени (периоды пополнения T_{II}) восстанавливается до начального уровня [2].

Временная диаграмма периодического пополнения запасов в комплекте ЗИП-О представлена на рисунке 3.

Временная ось t разделена на периоды пополнения запаса от $1T_{II}$ до $K \cdot T_{II}$, где K – максимальное количество периодов пополнения запаса за время эксплуатации изделия ($T_{эксп.}$). Обозначим номер текущего периода пополнения как $k = 1, K$. Тогда согласно определению стратегии периодического пополнения, если отказ комплекта ЗИП-О наступил через время $t < k \cdot T_{II}$, то изделие вынуждено простаивать в течение времени восстановления запаса (до начала момента планового пополнения).

На временной оси t точками отмечены моменты отказов составных частей изделия, а на оси n отображается уровень запаса i -го типа в комплекте ЗИП на момент времени t . Процедура моделирования заключается в следующем:

1. На момент начала моделирования текущий период пополнения $k = 1$, счетчик заявок на запасные части $CЗ = 0$, суммарное время восстановления изделия $T_в = 0$, а начальный уровень запаса в комплекте ЗИП равен $n_{нач.}$

2. На интервале времени $[(k-1) T_{II}, k \cdot T_{II}]$ в массиве F производится поиск ближайшего момента отказа составной части изделия и определяется ее индекс j . Если найденное значение попадает в указанный интервал, то переходим к пункту 3, если не попадает, то переходим к пункту 4.

3. Производится замена j -й отказавшей составной части изделия запасной частью из комплекта ЗИП-О. При этом факт замены отражается в модели планированием нового для этой составной части момента отказа с помощью ДСЧ. Счетчик заявок на запасные части увеличивается на единицу (формула 1), а текущий уровень запаса i -го типа в комплекте ЗИП-О определяется по формуле 2:

$$CЗ = CЗ + 1. \tag{1}$$

$$n = n + 1. \tag{2}$$

Если оказалось так, что после отказа j -й составной части уровень запаса данного типа в комплекте ЗИП-О пуст ($n = 0$), то произошел отказ комплекта ЗИП-О по запасным частям данного типа. Следовательно, изделие вынуждено простаивать, ожидая момента планового восстановления запаса. Суммарное время восстановления запаса определяется по формуле 3:

$$T_B = T_B + k \cdot T_{II} - F_j,$$

где F_j – момент отказа j -й составной части изделия. Далее переходим к пункту 4. Если отказа комплекта ЗИП-О не произошло, то переходим к пункту 2.

4. Увеличиваем номер текущего периода пополнения (формула 4) и пополняем запас i -го типа в комплекте ЗИП-О до первоначального (заданного) уровня по формуле 5.

$$k = k + 1. \quad (4)$$

$$n = n_{нач}. \quad (5)$$

Если номер текущего периода пополнения больше максимального количества периодов пополнения запаса ($k > K$), то переходим к пункту 5, если меньше, переходим к пункту 2.

5. Коэффициент готовности запаса i -го типа определяется по формуле 6, а среднее время задержки в удовлетворении заявки на запасную – часть по формуле 7.

$$K_{Gi} = 1 - \frac{T_B}{K \cdot T_{II}}. \quad (6)$$

$$\Delta t_i = \frac{T_B}{CЗ}. \quad (7)$$

Таким образом, на каждом временном интервале $[(k-1) \cdot T_{II}, k \cdot T_{II}]$ последовательно находятся моменты отказов составных частей изделия и проверяется наличие соответствующих запасных частей в комплекте ЗИП. В результате моделирования собираются все необходимые данные для расчета показателей достаточности запаса i -го типа в комплекте ЗИП.

Стратегию периодического пополнения, предусматривающую пополнение запаса только в конце периода ТП, следует применять для запасов невосстанавливаемых запасных частей с относительно малой интенсивностью спроса на них и небольшими затратами (стоимостью, весом) [2].

Естественно, люди, эксплуатирующие изделие, не заинтересованы в длительных простоях и попытаются использовать малейшую возможность пополнения ЗИП, не дожидаясь конца периода пополнения. Возникает противоречивая ситуация. ЗИП рассчитываются исходя из стратегии периодического пополнения, а эксплуатируются с применением стратегии периодического пополнения с экстренными доставками. При использовании этой стратегии помимо планового восстановления происходит еще и внеплановое восстановление запаса до начального уровня в том случае, когда изделие простаивает из-за отсутствия соответствующего запасного элемента, то есть при отказе данного запаса.

Стратегия характеризуется двумя числовыми параметрами: T_{Π} – периодом пополнения запаса элементов данного типа (предполагается, что плановое восстановление производится всегда за счет НИП) и $T_{ЭД}$ – средней продолжительностью экстренной доставки элементов данного типа из НИП.

Временная диаграмма периодического пополнения с экстренными доставками в комплекте ЗИП-О представлена на рисунке 4.

Процедура моделирования периодического пополнения с экстренными доставками в комплекте ЗИП аналогична процедуре моделирования периодического пополнения, за исключением некоторых характерных для данной стратегии особенностей. Ввиду того что появляется возможность организовать экстренную доставку запасных частей в случае отказа комплекта ЗИП, изделие не будет простаивать до конца периода планового пополнения. Следовательно, суммарное время восстановления будет рассчитываться по формуле 8:

$$T_B = T_B + T_{ЭД} \quad (8)$$

При моделировании может возникнуть такая ситуация, что время, затраченное на экстренную доставку, будет больше, чем оставшееся время до наступления периода планового пополнения. В таком случае суммарное время восстановления будет рассчитываться по формуле 3, а коэффициент готовности и среднее время задержки в удовлетворении заявки на запасную часть – по формулам 6 и 7 соответственно.

Известно, что ЗИП при числе типов элементов больше 1 могут обеспечивать заданное значение показателя достаточности при различном составе, поэтому существует возможность выбора ЗИП с минимальной стоимостью.

Корректировка запасов элементов в комплектах ЗИП осуществляется на основании метода, аналогичного методу покоординатного спуска в направлении

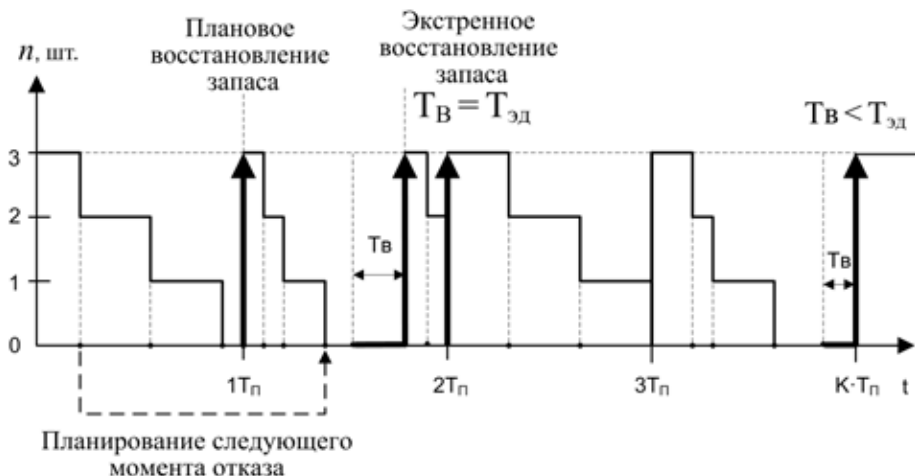


Рис. 4. Временная диаграмма периодического пополнения с экстренными доставками

наискорейшего убывания целевой функции, представляющей собой отношение прироста показателя достаточности ЗИП, который обеспечивается включением запасной части в состав ЗИП, к стоимости данной запасной части.

Значение прироста показателя достаточности запаса i -го типа в расчете на единицу затрат вычисляется по формуле 9:

$$GRAD_i = \frac{ПД_i(n_i + 1) - ПД_i(n_i)}{c_i}, \quad (9)$$

где $ПД_i(n_i)$ – показатель достаточности запаса, вычисленный при уровне запаса n ;

$ПД_i(n_i + 1)$ – показатель достаточности запаса, вычисленный при уровне запаса $n + 1$;

c_i – затраты на одну запасную часть i -го типа.

Кратко рассмотрим процедуру расчета оптимальных запасов в комплекте ЗИП-О:

1. Формируются исходные данные по каждой составной части изделия, а также задаются требуемые параметры расчета оптимальных запасов – вид показателя достаточности запасов и требуемое его значение: $ПД_{ТР}$.

2. Для запасов каждого типа ($i = 1, N$) рассчитываются значения $ПД_i(n_i)$, $ПД_i(n_i + 1)$ и $GRAD_i$ на основе предположения, что начальный уровень запаса данного типа в комплекте ЗИП равен нулю ($n_i = 0$).

3. Проверяется условие:

$$\sum_{i=0}^N ПД_i(n_i) \geq ПД_{ТР}. \quad (10)$$

Если условие 10 выполняется, то комплект ЗИП-О является оптимальным, а значит, переходим к пункту 6, если нет, переходим к пункту 4.

4. В массиве $GRAD$ производится поиск запаса с максимальным значением прироста показателя достаточности в расчете на единицу затрат. Индекс найденного запаса сохраняется в переменную max .

5. Для запаса с индексом max увеличивается уровень запаса на единицу и производится пересчет значений $ПД_{max}(n_{max})$, $ПД_{max}(n_{max} + 1)$ и $GRAD_{max}$:

$$n_{max} = n_{max} + 1, \quad (11)$$

$$GRAD_{max} = \frac{ПД_{max}(n_{max} + 1) - ПД_{max}(n_{max})}{c_{max}}. \quad (12)$$

Далее осуществляется переход к пункту 3.

6. Вычисляются суммарные затраты на запасные части и выводится номенклатура оптимального комплекта ЗИП-О (массив n_i).

При оптимизации используется алгоритм поиска максимума в массиве *GRAD*. Но массив *GRAD* может не содержать единственного максимального значения, поэтому следует убедиться, что применяемый алгоритм поиска максимального значения среди элементов *GRAD* корректно работает в этих условиях. Если за первый шаг цель оптимизации не достигнута, то есть не достигнуты оптимальные показатели ЗИП-О, процесс оптимизации должен продолжаться на втором шаге, который отличается от первого лишь тем, что в качестве исходного состава ЗИП-О выбирается тот, который получился в результате выполнения первого шага, и так далее, пока не будут достигнуты необходимые показатели достаточности ЗИП-О. Таким образом, алгоритм оптимизации выполняется последовательно по шагам.

Заключение

Заявленный в данной статье алгоритм расчета оптимальных запасов в комплектах ЗИП методом имитационного моделирования принципиально отличается от используемых в настоящее время методик расчета оптимальных запасов. При этом применение описанной методики позволило снизить суммарные затраты на проектируемые комплекты ЗИП в среднем на 3–5 %.

Для сокращения трудоемкости и автоматизации расчетов оптимальных запасов в проектируемых одиночных и групповых комплектах ЗИП автором данной статьи была разработана программа «Zip Calculator» [4, 5]. Приложение позволяет производить расчет оптимальных запасов, обеспечивающих заданный уровень показателя достаточности комплекта ЗИП при минимальных суммарных затратах на запасные части, а также расчет запасов, удовлетворяющих заданному ограничению по суммарным затратам на запасные части при максимально достижимом уровне показателя достаточности комплекта ЗИП. Расчет может производиться по одному из двух показателей достаточности запасов (коэффициенту готовности или среднему времени задержки в удовлетворении заявки на запасную часть комплектом ЗИП).

Программное обеспечение предназначено для автоматизации проектирования комплектов ЗИП для разрабатываемой (или модернизируемой) радиоэлектронной аппаратуры, приборов и устройств, а также для оценки уровня достаточности запасов в комплектах ЗИП, представленных на испытание опытных образцов аппаратуры.

Разработанный и реализованный в программном обеспечении алгоритм расчета повысил точность и обоснованность получаемых результатов, что обуславливает целесообразность его применения при решении расчета запасов элементов в комплектах эксплуатационных ЗИП. Кроме того, предлагаемая методика расчета обеспечивает системный подход к проектированию и технико-экономическому обоснованию сложных систем, поскольку позволяет в реальном масштабе времени связать особенности конструктивного построения изделия с показателями стоимости и достаточности ЗИП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП: учеб. пособие. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 480 с.
2. Головин И.Н., Чуварыгин Б.В., Шура-Бура А.Э. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем. – М. : Радио и связь, 1984. – 176 с.
3. Шура-Бура А.Э., Резиновский А.Я., Дзиркал Э.В. Пакет прикладных программ по расчету оптимальных комплектов запасных элементов для ремонта сложных изделий (ППП «РОКЗЭРСИЗ», Версия 4.96). Руководство по применению. М. : 1997. – 107 с.
4. Фомин М.С., Филиппов Р.Н. Программа ZIP Calculator для расчета и оптимизации в комплектах ЗИП // Сб. науч. тр. магистрантов и аспирантов ТвГТУ. – 2013. – № 3.
5. Фомин М.С., Филиппов Р.Н. Кроссплатформенный подход к разработке программного обеспечения для расчета оптимальных запасов в системах ЗИП // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. статей XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2013. – С. 74–76.