

УДК 004.942

М.С. Фомин

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ КОМПЛЕКТОВ ЗИП ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

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

### Аннотация

В рамках данной статьи обосновывается целесообразность уточнения действующей методики оценки и расчета оптимальных запасов в комплектах ЗИП в направлении использования метода имитационного моделирования. Используемые в настоящее время аналитические модели имеют ряд серьезных ограничений и допущений. Например, потоки отказов составных частей изделия описываются только экспоненциальным законом распределения. Такая идеализация приводит к серьезному искажению реального потока заявок на запасные элементы в целом и появлению ошибок в вычислениях. В качестве альтернативы существующим методикам в данной работе предложена дискретно-событийная модель системы обеспечения изделий запасными элементами, предназначенная для оценки запасов в комплектах ЗИП, а также образуемых из них систем ЗИП. Рассмотрена логика работы основных подсистем имитационной модели при использовании различных стратегий пополнения запасов, а также показан способ генерирования моментов отказов составных частей с различными законами распределения. Приведены результаты сравнительного анализа предлагаемой модели с аналитическими подходами. Разработанная имитационная модель реализована в программном обеспечении, предназначенном для автоматизации проектирования систем ЗИП, а также для оценки уровня достаточности запасов в уже спроектированных комплектах ЗИП.

Ключевые слова: комплект ЗИП, двухуровневая система ЗИП, дискретно-событийное моделирование, оптимальный запас, стратегия пополнения.

## SIMULATION MODEL OF SPTA EVALUATION FOR AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEMS

*Mikhail Sergeevich Fomin, Post-graduate Student of Tver State Technical University; graduated from Tver State Technical University; has master degree in 'Informatics and Computer Engineering'; a software engineer at 'NIIT', OJSC; an author of articles in the field of prediction and reliability increasing of engineering systems. e-mail: nuclearmike@yandex.ru.*

### Abstract

The article considers the expediency of improving existing techniques for evaluating and calculating the optimal stocks of SPTA kits in area of simulation method application. Currently used analytical models have some serious limitations and assumptions. For example, the failures flow of product parts are described only by an exponential distribution. This idealization leads to a serious distortion of the real flow of spare parts requests in general and to errors in calculations. As an alternative to existing methods this paper offers a simulation model intended for evaluation and calculation of stocks in SPTA kits and in two-level SPTA systems. The logic of the main subsystems simulation model is considered when using different replenishment strategies. The article also considers the method of generating product parts failure moments with different distribution laws. Results of the comparative analysis of suggested simulation model with analytical approaches are given. The developed simulation model is implemented in software. The software is intended for design automation of SPTA kits and for evaluation of already designed SPTA kits.

Key words: SPTA kit, two-level SPTA system, discrete-event simulation, optimal stock, replenishment strategy.

## ВВЕДЕНИЕ

Многие технические системы имеют такие условия функционирования, когда ремонтный орган (РО) находится в непосредственной близости от места эксплуатации системы и имеет технические и технологические возможности устранения практически любого отказа, возникающего при эксплуатации [1]. Но известно немало сложных технических систем, когда восстановление путем ремонта либо не представляется возможным (например, бортовые и высокотехнологичные системы, БИС), либо экономически невыгодно.

Использование комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) является альтернативным вариантом ремонта, когда восстановление работоспособности системы сводится к замене отказавшей составной части (СЧ) на соответствующий исправный запасной элемент (ЗЭ). Причем замену отказавших элементов вполне может осуществить эксплуатационный персонал.

В большинстве случаев затраты на комплект ЗИП сравнимы с затратами на изделие в целом. Следовательно, по экономическим соображениям не удастся создать такие большие начальные уровни запасов, которые бы гарантированно обеспечивали возможность замены отказавших элементов изделия. Возникает задача расчета оптимального по стоимости состава комплекта ЗИП, который обеспечит заданный уровень надежности изделия. Также немаловажной является задача оценки запасов в уже спроектированных комплектах ЗИП.

Согласно [2], оценку запасов в комплекте ЗИП проводят:

- при проверке выполнения требований в части полноты и достаточности приданных ЗИП на приемочных испытаниях опытных образцов изделий, а также при сертификации и (или) закупке серийных образцов оборудования;
- при решении вопроса о возможности использования (или необходимости перерасчета) спроектированных ранее и (или) закупаемых комплектов ЗИП в условиях эксплуатации, отличающихся от тех, для которых они проектировались, (например, при другой интенсивности эксплуатации оборудования, другой интенсивности замен СЧ, других стратегиях пополнения запасов).

Приведенные в [2] аналитические методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП основаны на математическом аппарате теории массового обслуживания и, в частности, марковских цепях с конечным числом состояний, возможности которого существенно ограничивают круг решаемых задач. Так, например оценка и расчет запасов в двухуровневой системе ЗИП возможны лишь в том случае, если все запасы в комплектах ЗИП первого уровня пополняются только по стратегии непрерывного пополнения, которая на практике применяется значительно реже, чем стратегии периодического пополнения и периодического пополнения с экстренными доставками. Показатели достаточности (ПД) ЗИП в целом определяются по суммарному потоку отказов СЧ изделий, который описывается только экспоненциальным законом распределения. Кроме того, применение существующих методик затруд-

нено для изделий, имеющих в своем составе резервируемые устройства [3].

В качестве альтернативы существующим аналитическим моделям оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП автором предлагается использовать метод имитационного моделирования, который при современном развитии вычислительной техники позволяет учитывать многие особенности конструктивного построения и функционирования систем вида «Изделие-ЗИП». При этом применение метода имитационного моделирования для решения задач, возникающих при проектировании комплектов ЗИП, признается перспективным направлением [4].

## 1 Типы комплектов ЗИП и стратегии пополнения запасов

Рассмотрим основные типы комплектов ЗИП, из которых состоит большинство используемых на практике систем ЗИП.

Одиночный комплект ЗИП (ЗИП-0) прилагается непосредственно изделию для обеспечения технического обслуживания (ремонта). Комплект ЗИП-0 обычно располагается вблизи места эксплуатации изделия с целью сокращения времени доставки ЗЭ к изделию.

Групповой комплект ЗИП (ЗИП-Г) обслуживает находящуюся в эксплуатации группу изделий (обычно состоящую не менее чем из трех изделий), а также может использоваться для пополнения комплектов ЗИП-0. Комплект ЗИП-Г размещается на базах хранения или на складах эксплуатирующих организаций, при этом время доставки ЗЭ к каждому изделию группы должно быть приемлемым. В [5] рассматриваются два условия целесообразности создания комплекта ЗИП-Г:

1. Допустимое время перерыва в работе изделия сравнительно велико, но должно быть существенно меньше интервала времени между соседними отказами;
2. Наличие в системе внутреннего структурного резервирования по всем типам модулей, которые находятся в комплекте ЗИП-Г.

Если необходимо эксплуатировать группу изделий, но данные условия для создания комплекта ЗИП-Г не выполняются, то целесообразно создание многоуровневых систем ЗИП. Пример структуры двухуровневой системы ЗИП приведен на рисунке 1.

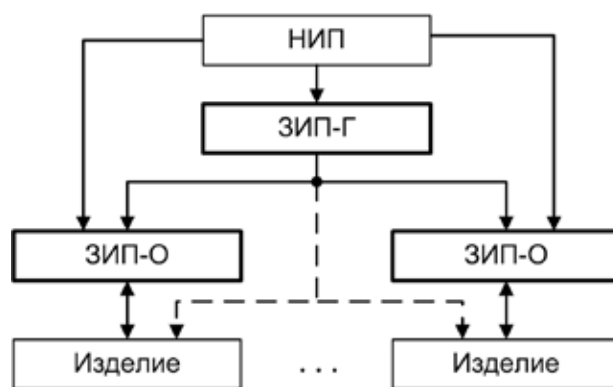


Рис. 1. Структура двухуровневой системы ЗИП

Каждому изделию группы непосредственно придается комплект ЗИП-О, который пополняется либо из неисчерпаемого источника пополнения (НИП), либо из ЗИП-Г. Пополнение комплекта ЗИП-Г осуществляется из НИП. Под НИП понимается такой источник пополнения, который удовлетворяет все заявки на ЗЭ без задержки [6]. В качестве НИП может выступать оптовая база снабжения или предприятие-изготовитель ЗЭ. Замена отказавших элементов изделия может производиться не только из непосредственно приданого комплекта ЗИП-О, но и из комплекта ЗИП-Г, если время доставки ЗЭ приемлемо.

Ремонтный комплект ЗИП (ЗИП-Р) используется для обеспечения работоспособности РО. Роль РО заключается в восстановлении отказавших элементов изделия путем проведения ремонтных работ, как правило, с привлечением специалистов организации-разработчика. Комплект ЗИП-Р размещается на базах хранения или непосредственно в РО. Ремонтный комплект ЗИП также может использоваться для пополнения комплектов ЗИП в многоуровневых системах ЗИП (например, для пополнения комплекта ЗИП-Г в двухуровневой системе ЗИП).

Совокупность правил, определяющих момент выдачи, длительность, источник и порядок реализации заявки на пополнение ЗЭ в комплектах ЗИП, называется стратегией пополнения запаса. В [2] рассматриваются следующие четыре типа стратегий пополнения запасов:

1. Периодическое пополнение ( $S_1$ );
2. Периодическое пополнение с экстренными доставками ( $S_2$ );
3. Непрерывное пополнение ( $S_3$ );
4. Пополнение по уровню неснижаемого запаса ( $S_4$ ).

Стратегия периодического пополнения предусматривает, что восстановление запаса до начального уровня производится только в конце периода планового пополнения  $T_{II}$ . Значение периода планового пополнения задается заранее и не изменяется в процессе эксплуатации.

Стратегия периодического пополнения с экстренными доставками предусматривает как плановое пополнение запаса в конце периода  $T_{II}$ , так и внеплановое (экстренное) пополнение запаса до заданного уровня за время  $T_{ЭД}$ . Данную стратегию целесообразно применять в том случае, если затраты на экстренную доставку запасов приемлемы по сравнению с затратами на плановое пополнение.

Характерной особенностью стратегии непрерывного пополнения является то, что сразу же после замены отказавшего элемента изделия на соответствующий ЗЭ из состава ЗИП формируется заявка на восстановление (ремонт) неисправного элемента. При этом под восстановлением неисправного элемента понимается либо его ремонт в РО, либо его замена на исправный элемент за счет НИП или комплекта ЗИП более высокого уровня. Восстановленный таким образом элемент возвращается в соответствующий комплект ЗИП. Параметром стратегии пополнения является  $T_p$  – среднее время доставки (ремонта) ЗЭ, которое отсчитывается от момента изъятия из комплекта ЗИП ЗЭ.

Стратегия пополнения по уровню неснижаемого запаса характеризуется двумя числовыми параметрами:  $T_D$  – средним временем доставки ЗЭ из источника пополнения и  $k$  – уровнем неснижаемого запаса. Если после удовлетворения очередной заявки на ЗЭ комплектом ЗИП в нем осталось  $k$  ЗЭ данного типа, то формируется заявка на пополнение запаса до заданного уровня, которая будет выполнена за время  $T_D$ .

Каждый тип ЗЭ в комплекте ЗИП может пополняться по любой из перечисленных стратегий. При этом для ЗЭ с одинаковой стратегией пополнения числовые параметры могут иметь различные значения.

## 2 ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗИП

Рассмотрим структуру и логику работы дискретно-событийной модели системы обеспечения изделий ЗЭ. Структура модели приведена на рисунке 2.

В приведенной выше структуре можно выделить три основных имитационных модели, взаимодействующих между собой при помощи обработки событий:

1. Модель «Группа изделий»;
2. Модель «Комплект ЗИП»;
3. Модель «Источник пополнения запасов».

Модельное время продвигается от события к событию, а для обеспечения хронологического порядка наступления событий используется механизм очередей с приоритетом. Приоритетом события является время его возникновения (события с меньшим временем возникновения будут располагаться ближе к началу очереди, т. е. будут обслужены раньше остальных). Все возможные типы со-

Таблица 1

Типы событий в имитационной модели

Тип события	Описание
$E_1$	отказ СЧ изделия (запрос на замену отказавшей СЧ)
$E_2$	восстановление (замена) отказавшей СЧ изделия
$E_3$	заявка на пополнение (восстановление) запасов
$E_4$	пополнение запасов в комплекте ЗИП
$E_5$	окончание моделирования

бытий приведены в таблице 1.

Рассмотрим более подробно логику работы каждой модели. Модель «Группа изделий» предназначена для генерации событий отказов СЧ изделий (исходящие события модели) и обработки событий замены отказавших элементов от комплектов ЗИП (входящие события модели). Моменты отказов СЧ изделия генерируются дат-

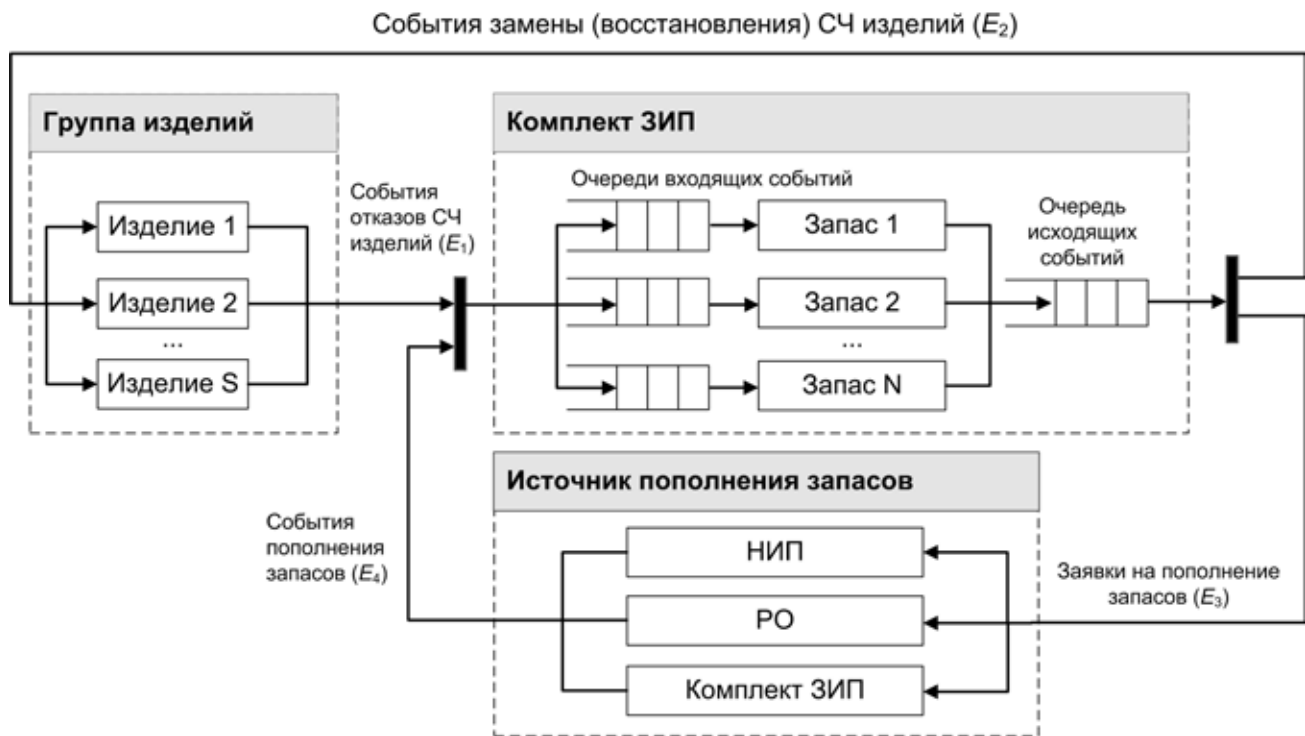


Рис. 2. Структура дискретно-событийной модели системы обеспечения изделий ЗЭ

чиками случайных чисел (ДСЧ) с различными законами распределения времени работы СЧ до отказа. При этом розыгрыш случайной величины производится в два этапа. На первом этапе генерируется случайная величина, которая распределена по равномерному закону, а на втором этапе происходит ее преобразование в случайную величину с заданным законом распределения вероятностей [7]. Например, для экспоненциального закона преобразование можно выполнить по методу обратной функции:

$$M = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(R), \quad (1)$$

где  $M$  – случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону;

$\lambda$  – интенсивность отказов СЧ;

$R$  – случайная величина, распределенная по равномерному закону.

Таким образом, для каждого изделия группы формируются события отказов СЧ, которые поступают в соответствующий комплект ЗИП. Если изделие не содержит резервированных групп элементов, то после каждого отказа оно будет простаивать до тех пор, пока комплект ЗИП не удовлетворит заявку на замену отказавшей СЧ. В модели данный факт отражается в невозможности генерировать события до тех пор, пока не будет получено событие восстановления (замены) СЧ. При этом факт замены СЧ отражается в модели введением для нее нового момента отказа с помощью ДСЧ. В случае применения в изделии резервирования события отказов могут генерироваться резервированными группами элементов.

Как уже отмечалось, для каждого запаса в комплекте

ЗИП может быть задана индивидуальная стратегия пополнения. С этой точки зрения модель «Комплект ЗИП» можно рассматривать как совокупность подмоделей запасов, реализующих специфичную для разных типов стратегий логику поведения. Каждая подмодель имеет свою очередь входящих событий, а модель «Комплект ЗИП» выполняет функции диспетчеризации событий между ними. Очередь исходящих событий является единой для всех подмоделей.

Рассмотрим логику работы имитационных моделей запасов для стратегий периодического пополнения с экстренными доставками и непрерывного пополнения. Идентификаторы используемых в имитационных моделях переменных и их описание приведены в таблице 2.

Временные диаграммы периодического пополнения с экстренными доставками и непрерывного пополнения приведены на рисунках 3 и 4.

Алгоритм работы имитационной модели запаса заключается в следующем:

1. Переменные инициализируются начальными значениями;
2. Для стратегии  $S_2$  формируем заявку на плановое пополнение запаса ( $E_3$ ), которая помещается в очередь исходящих событий;
3. Проверяем очередь входящих событий. Если очередь пуста, то ожидаем входящих событий. Иначе переходим к пункту 4;
4. Получаем ближайшее событие из очереди и смещаем модельное к моменту его возникновения ( $T_m = T_{Ei}$ );
5. Проверяем тип входящего события:
  - если тип события  $E_1$ , то переходим к пункту 6;

Идентификаторы переменных и их инициализирующие значения

Идентификатор	Описание	Инициализирующее значение
$n$	текущий уровень запаса в комплекте ЗИП	задается уровень запаса, указанный в ведомости ЗИП
$T_m$	модельное время	0
$T_{эксп.}$	время эксплуатации ЗИП	0
$T_v^{\Sigma}$	суммарное время восстановления запаса (время пребывания запаса в состоянии отказа)	0
$T_{ожс.}^{\Sigma}$	суммарное время, которое заявки на восстановление СЧ прождут из-за нехватки ЗЭ	0
$CЗ$	счетчик заявок на ЗЭ, которые поступили в комплект ЗИП за время $T_{эксп.}$	0
$T_{отк.}$	момент времени, когда запас перешел в состояние отказа	-1
$T_{Ei}$	время наступления события $i$ -го типа ( $i = \overline{1,5}$ )	-
$S_i$	тип стратегии пополнения, где $i = \overline{1,4}$	-

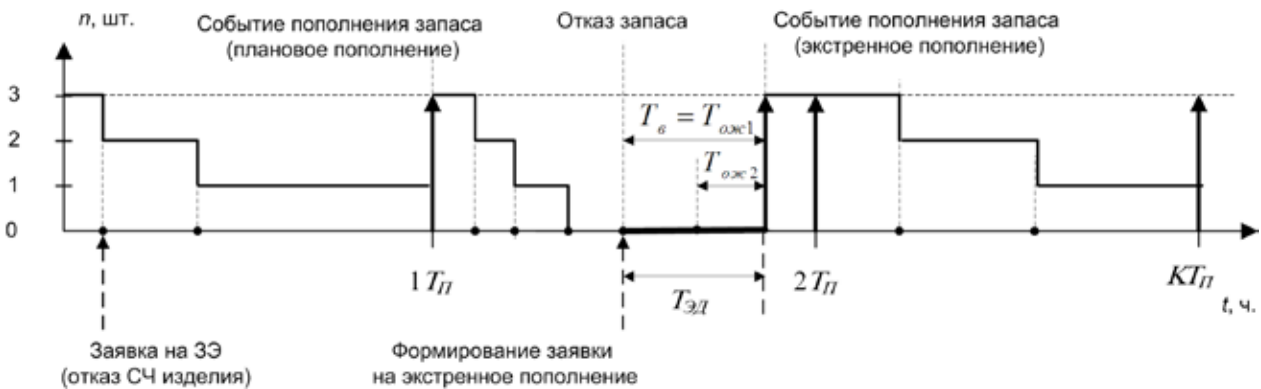


Рис. 3. Временная диаграмма периодического пополнения с экстренными доставками

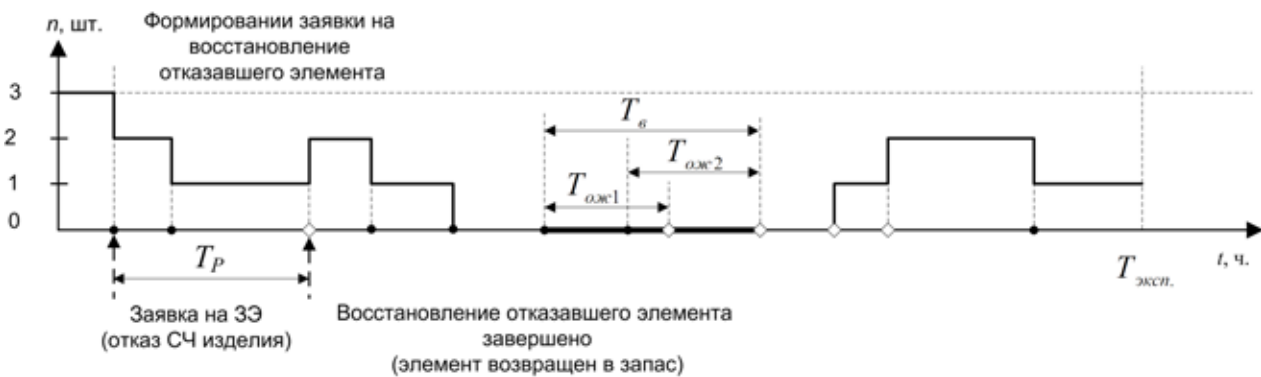


Рис. 4. Временная диаграмма непрерывного пополнения

- если тип события  $E_3$ , то переходим к пункту 7;
- если тип события  $E_4$ , то переходим к пункту 9;
- если тип события  $E_5$ , то переходим к пункту 10.

Иначе переход к пункту 11 с сообщением об ошибке: «неверный тип события»;

6. Увеличиваем значение счетчика заявок на ЗЭ ( $CЗ = CЗ + 1$ ) и проверяем текущий уровень запаса. Если  $n = 0$  (произошел отказ запаса), то запоминаем момент отказа ( $T_{отк.} = T_{E1}$ ) и для стратегии  $S_2$  формируем заявку

на экстренное пополнение запаса. Иначе уменьшаем текущий уровень запаса по формуле (2) и помещаем событие восстановления СЧ ( $E_2$ ) в очередь исходящих событий. Для стратегии  $S_3$  формируем заявку на пополнение (замену). Далее переходим к пункту 3.

$$n = n - 1; \quad (2)$$

7. Увеличиваем текущий уровень запаса по формуле (3). Для стратегии  $S_2$  формируем заявку на очередное плановое пополнение запаса (если текущее пополнение не было экстренным). Проверяем очередь ожидающих обслуживания заявок. Если очередь не пуста, то переходим к пункту 8. Иначе переходим к пункту 3.

$$n = n + n_{ист.}, \quad (3)$$

где  $n_{ист.}$  – количество ЗЭ, поступивших в запас из источника пополнения;

8. Пока в очереди присутствуют ожидающие обслуживания заявки и  $n > 0$ , извлекаем заявку из очереди и вычисляем время ожидания ее выполнения по формуле (4):

$$T_{ож.} = T_{E4} - T_{E1}, \quad (4)$$

где  $T_{E1}$  – момент времени, когда заявка была помещена в очередь ожидания обслуживания.

Суммарное время ожидания вычисляется по формуле (5):

$$T_{ож.}^{\Sigma} = T_{ож.}^{\Sigma} + T_{ож.}, \quad (5)$$

где  $T_{ож.}^{\Sigma}$  – время ожидания выполнения заявки, вычисленное по формуле (4).

При этом, после каждого восстановления корректируется текущий уровень запаса по формуле (2), а в очередь исходящих событий модели помещается событие  $E_2$ . Если все ожидающие заявки были обслужены и запас находился в состоянии отказа ( $T_{ож.} \geq 0$ ), то рассчитываем суммарное время восстановления запаса по формуле (6). Далее переходим к пункту 3.

$$T_B^{\Sigma} = T_B^{\Sigma} + (T_{E4} - T_{отк.}); \quad (6)$$

9. Если текущего уровня запаса достаточно для удовлетворения заявки на ЗЭ, то производится его уменьшение по формуле (7). Иначе заявка удовлетворяется частично и помещается в очередь ожидания обслуживания.

$$n = n - n_{зан.}, \quad (7)$$

где  $n_{зан.}$  – количество запрошенных в заявке ЗЭ.

Далее переходим к пункту 3;

10. Производим расчет ПД запаса. Коэффициент готовности запаса ( $K_3$ ) рассчитывается по формуле (8), а среднее время задержки в удовлетворении заявки на ЗЭ ( $\Delta t_3$ ) – по формуле (9). Далее переходим к пункту 11.

$$K_3 = 1 - \frac{T_B^{\Sigma}}{T_{экс.}}, \quad (8)$$

$$\Delta t_3 = \frac{T_{ож.}^{\Sigma}}{CЗ}; \quad (9)$$

11. Моделирование завершено.

Алгоритм моделирования функционирования запаса, пополняемого по стратегии периодического пополнения с экстренными доставками, может использоваться и для моделирования стратегии периодического пополнения. Только следует учесть факт отсутствия возможности организовать экстренную доставку ЗЭ.

Зная данные для вычисления ПД запасов, входящих в состав комплекта ЗИП, можно вычислить ПД всего комплекта ЗИП по формулам (10) и (11):

$$K_{ЗИП} = \prod_{i=1}^N K_{3i}, \quad (10)$$

где  $K_{3i}$  – коэффициент готовности запаса  $i$ -го типа;

$N$  – размер номенклатуры комплекта ЗИП.

$$\Delta t_{ЗИП} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{ож.}^{\Sigma}}{\sum_{i=1}^N CЗ_i}, \quad (11)$$

где  $T_{ож.}^{\Sigma}$  – суммарное время, которое заявки на восстановление СЧ прождут из-за нехватки ЗЭ  $i$ -го типа;

$CЗ_i$  – количество заявок на ЗЭ, поступивших в запас  $i$ -го типа;

$N$  – размер номенклатуры комплекта ЗИП.

Основная задача модели «Источник пополнения» заключается в обслуживании заявок на пополнения от комплектов ЗИП и формирование событий пополнения запаса. В качестве типа источника пополнения запаса может выступать:

1. НИП, всегда удовлетворяющий все заявки на пополнение;

2. РО, осуществляющий ремонт неисправных элементов. При этом в имитационной модели имеется возможность задать пропускную способность РО для ремонта ЗЭ каждого типа, а также обеспечить приоритетную дисциплину обслуживания заявок. В то время как в существующих аналитических методиках рассматриваются только два крайних случая: полностью ограниченное восстановление (одновременно может ремонтироваться только один элемент) и неограниченное восстановление (одновременно могут ремонтироваться сколь угодно много элементов).

3. Комплект ЗИП, использующийся в качестве источника ЗЭ для пополнения нижестоящих комплектов в многоуровневых системах ЗИП.

Для автоматизации задач, возникающих при проектировании комплектов ЗИП, автором данной статьи совместно с Филипповым Р.Н был разработан программный комплекс «ZIP Progress» [8, 9]. Комплекс позволяет производить оценку и расчет запасов как с использованием аналитических методик, так и методик, основанных на методе имитационного моделирования. Программное обеспечение предназначено для автоматизации проектирования комплектов ЗИП для разрабатываемой (или модернизируемой) радиоэлектронной аппаратуры, прибо-

ров и устройств, а также для оценки уровня достаточности запасов в комплектах ЗИП, представленных на испытание опытных образцов аппаратуры.

Исследование разработанной имитационной модели проводилось при помощи программного комплекса «ZIP Progress». Исследование заключалось в расчете оптимального комплекта ЗИП-Г с использованием аналитической методики и последующей оценке рассчитанного комплекта при помощи предлагаемой имитационной модели. В качестве исходных данных для расчета использовалась номенклатура комплекта ЗИП-Г, приведенная в [2]. Результаты расчета и последующей оценки комплекта ЗИП-Г, приданного трем однотипным изделиям «Памир-1», приведены в таблице 3. При этом были приняты следующие обозначения:

1.  $\Delta t_{ЗИП}^{TP}$  – требуемое значение ПД комплекта ЗИП-Г (в качестве ПД использовалось среднее время задержки в удовлетворении заявки на ЗЭ комплектом ЗИП-Г);
2.  $\Delta t_{ЗИП}^{AM}$  – значение ПД, полученное в результате оптимизации комплекта ЗИП-Г с применением аналитической методики;
3.  $\Delta t_{ЗИП}^{ИМ}$  – значение ПД, полученное в результате оценки оптимального комплекта ЗИП-Г с применением имитационной модели;
4.  $C_{ЗИП}$  – суммарные затраты на комплект ЗИП-Г.

Таблица 3  
Результаты оптимизации и последующей оценки комплекта ЗИП-Г

$\Delta t_{ЗИП}^{TP}$ , ч	$\Delta t_{ЗИП}^{AM}$ , ч	$\Delta t_{ЗИП}^{ИМ}$ , ч	$C_{ЗИП}$ , руб.
0,5	0,475845	0,171258	12 817 250,00
1,0	0,994681	0,341882	12 531 500,00
1,5	1,47066	0,439953	12 376 300,00
2,0	1,97738	0,616168	12 253 600,00

Анализ полученных расчетных значений показал, что аналитические методики расчета оптимальных запасов обеспечивают завышенные значения ПД комплекта ЗИП-Г по сравнению с имитационным подходом. Это приводит к неоправданному повышению затрат на комплект ЗИП-Г, который рассчитывается для обеспечения заданного значения ПД.

Предлагаемая имитационная модель оценки запасов может быть использована для модификации пошаговой методики расчета оптимальных запасов, изложенной в [2]. Методика основана на методе градиентного покоординатного спуска, где на каждом шаге оптимизации добавляется только один элемент и только в тот запас, увеличение которого на этом шаге дает наибольший прирост ПД в расчете на единицу затрат. Модификация заключается в замене аналитических моделей определения ПД отдельных запасов в комплекте ЗИП на имитационные модели, описанные в данной статье.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной статье имитационная модель оценки запасов в комплектах ЗИП принципиально отличается от используемых в настоящее время методик и имеет ряд преимуществ:

- оценка и расчет запасов может быть выполнена не только для типовых структур одноуровневых и двухуровневых систем ЗИП, но и для многоуровневых систем ЗИП различной сложности;
- использование в расчетах различных законов распределения потоков отказов;
- учет изделий, имеющих в своей структуре резервированные группы элементов;
- возможность пополнения комплектов ЗИП за счет РО, включая приоритетную дисциплину обслуживания заявок.

Исследования разработанной имитационной модели показали целесообразность ее применения при решении задач проектирования ЗИП, так как существующие аналитические подходы обеспечивают завышенные значения критериев достаточности запасов в комплектах ЗИП по сравнению с требуемыми значениями, что приводит к увеличению затрат на комплекты ЗИП в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП : учеб. пособие. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 480 с.
2. ГОСТ РВ 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – М. : Стандартинформ, 2005. – 37 с.
3. Половко А.М. Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
4. Жаднов ВВ. Автоматизация проектирования запасов компонентов в комплектах ЗИП // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С. 173–176.
5. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов : учеб. пособие. – СПб. : Питер, 2005. – 479 с.
6. 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.
7. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
8. Филиппов Р.Н., Фомин М.С. Программа для расчета комплектов запасных частей инструментов и принадлежностей : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014610069 от 09.01.2014.
9. 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. ст. XIII-й Междунар. научно-техн. конф. – Пенза : ПДЗ, 2013. – С. 74–76.

## REFERENCES

1. Cherkesov G.N. *Otsenka nadezhnosti sistem s uchetom ZIP : ucheb. posobiye* [System Reliability Evaluation with the Spares: Tutorial]. Sankt-Peterburg, BHV-Peterburg Publ., 2012. 480 p.
2. GOST RV 27.3.03-2005. *Nadezhnost voyennoy tekhniki. Otsenka i raschet zapasov v komplektakh ZIP* [Military Equipment Reliability. Evaluation and Estimation of Reserves in Spare Kits]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 37 p. (In Russian)
3. Polovko A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti. 2-e izd., pererab. i dop.* [Reliability Theory. Second Edition, Revised and Enlarged]. Sankt-Peterburg, BHV-Peterburg Publ., 2006. 704 p.
4. Zhadnov VV. *Avtomatizatsiya proyektirovaniya zapasov komponentov v komplektakh ZIP* [Computer-Aided Design for Component Reserves in Spare Kits]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies Magazine], 2010, no. 5, pp. 173–176.
5. Cherkesov G.N. *Nadezhnost apparatno-programmnykh kompleksov : ucheb. posobiye* [Reliability of Hardware and Software Complexes: Textbook]. Sankt-Peterburg, Piter Publ., 2005. 479 p.
6. Golovin I.N., Chuvarygin B.V., Shura-Bura A.E. *Raschet i optimizatsiya komplektov zapasnykh elementov radioelektronnykh sistem* [Estimation and Optimization of Radioelectronic System Spare Kits]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1984. 176 p.
7. Aliev T.I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Modeling of Discrete Systems]. Sankt-Peterburg, SPbGU ITMO Publ., 2009. 363 p.
8. Filippov R.N., Fomin M.S. *Programma dlya rascheta komplektov zapasnykh chastey instrumentov i prinadlezhnostey: svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM* [Spare-Kit Computer Program]. Certificate of State Registration RF, no. 2014610069, dated 09.01.2014.
9. Fomin M.S., Filippov R.N. *Krossplatformennyy podkhod k razrabotke programmogo obespecheniya dlya rascheta optimalnykh zapasov v sistemakh ZIP* [Cross-platform Approach to Software Design for Estimation of Spare-Kit Reserves]. *Sbornik Statey 8 Mezhdunarodnoi Nauchno-Technicheskoi Konferentsii: Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike* [Proc. 8th Int. Scientific Conference: Computer Science Problems in Education, Management, Economy, and Engineering]. Penza, PDZ Publ., 2013, pp. 74–76.