

## Оценка адекватности имитационной модели расходования запаса агрегатов для эксплуатации воздушных судов в составе авиационного полка

© И.Н. Чепко<sup>1</sup>, Д.В. Богомолов<sup>1</sup>, С.А. Серебрянский<sup>2</sup>,  
М.В. Трофимчук<sup>1</sup>, И.В. Герасимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394064, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 152993, Россия

*Приведены основные составляющие процесса планирования материально-технического обеспечения. Обоснована связь качественного планирования требуемого количества агрегатов с коэффициентом готовности воздушных судов. Описан потенциал имитационного моделирования применительно к изучению поведения сложных систем. Обосновано использование имитационного моделирования в системе планирования и управления запасами агрегатов для эксплуатации воздушных судов государственной авиации. В качестве критериев эффективности могут выступать коэффициент готовности, коэффициент исправности и затраты на закупку запасных частей. Повышение степени готовности или исправности воздушных судов достигается за счет минимизации простоев вследствие отсутствия запасных частей. Описана и проверена на корректность имитационная модель расходования запаса агрегатов для эксплуатации воздушных судов в составе авиационного полка. Имитационная модель показала почти полное совпадение с результатами аналитической модели системы массового обслуживания. Это означает, что при планировании материально-технического обеспечения на основе данной имитационной модели можно строить более сложные модели для анализа многономенклатурных запасов агрегатов, не прибегая к использованию сложного математического аппарата. Модель может быть использована в качестве инструмента планирования требуемого количества агрегатов для эксплуатации воздушных судов государственной авиации.*

**Ключевые слова:** эксплуатация, средства материально-технического обеспечения, планирование, имитационное моделирование, запас агрегатов, количество дефицитов

**Введение.** Современная авиационная техника (АТ), поступающая на вооружение Воздушно-космических сил РФ, представляет собой сложную наукоемкую продукцию, доля научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в жизненном цикле (ЖЦ) которых превышает 12 %.

Выбор модели организации процессов технического обслуживания (ТО) на этапе эксплуатации направлен на повышение коэффициента готовности самолетного парка и диктует номенклатуру средств материально-технического обеспечения (МТО) для каждого уровня

ТО, а также обоснование методов управления запасами на каждом таком уровне. Доля затрат на создание фондов запасных частей в общих затратах на обеспечение технической эксплуатации может достигать предельных значений. Недостаточные объемы запасных частей приведут к простоям воздушного судна (ВС), а избыточные — к обесцениванию капитала.

Применение имитационного моделирования (ИМ) в системе планирования и управления запасами (СПУЗ) агрегатов обусловлено следующими факторами [1, 2]:

- сложностью формализации конечных выражений;
- большим числом вводимых допущений;
- наличием большого числа случайных факторов;
- сложностью получения конечных зависимостей и громоздкими математическими выражениями;
- невозможностью или высокой трудоемкостью оценки адекватности математических моделей.

В настоящее время эффективность ИМ существенно возросла вследствие бурного развития вычислительной техники и программного обеспечения. Известно, что порядка 70 % среди инструментов исследования занимают методы именно ИМ [3, 4]. Так, применение баз данных с информацией по наработке каждого агрегата позволит инженерно-авиационной службе (ИАС) накапливать большие объемы структурированной информации. На ее основе с помощью имитационных моделей можно строить достоверные прогнозы и выработать оптимальные стратегии управления запасами [5].

Все приведенные выше факторы определяют задачу исследования как оценку технологий ИМ в качестве инструмента планирования расхода запаса агрегатов. Для получения конечного результата необходимы разработка модели, имитация результатов и проверка адекватности модели.

**Разработка имитационной модели расходования запаса агрегатов для эксплуатации ВС в составе авиационного полка (АП).** Все большее внимание при планировании уделяется ИМ. Высокий потенциал ИМ применительно к изучению поведения сложных систем известен уже достаточно давно. Средства ИМ позволяют:

- создавать модель, отражающую динамику поведения сложного объекта;
- исследовать влияние различных факторов на поведение изучаемого объекта;
- визуализировать предмет исследования с применением ряда прикладных средств.

В данной статье имитационная модель расходования запаса агрегатов для эксплуатации ВС в составе АП рассматривается как систе-

ма массового обслуживания (СМО). Теория массового обслуживания оперирует такими понятиями, как заявка, канал обслуживания, поток заявок, очередь и т. д.

Задача теории массового обслуживания заключается в установлении зависимости между потоком заявок, производительностью отдельного канала и их числом. Важным фактором в СМО является эффективность обслуживания, критерием которой могут служить среднее время пребывания заявки в системе или длина очереди [6].

Агрегат — это сборочная единица, обладающая полной взаимозаменяемостью, возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия или изделия в целом и способностью выполнять определенную функцию в изделии или самостоятельно [7].

Согласно работе [8], уровень запаса агрегатов задается тремя случайными величинами:

$$S = OH + DI - BO = \text{const},$$

где  $OH$  — число агрегатов в наличии;  $DI$  — число агрегатов в процессе устранения неисправности (монтаж, демонтаж, доставка со склада);  $BO$  — число дефицитов запасных частей (ЗЧ).

Любое изменение одной из приведенных случайных величин приводит к одновременному изменению другой. При интенсивной эксплуатации ВС число отказов агрегатов увеличивается. Восполнение отказавших агрегатов происходит со склада авиационно-технического имущества (АТИ).

Рассмотрим в качестве примера отказ агрегата на самолете.

1. В случае отсутствия запаса агрегатов данного наименования на складе ( $OH = 0$ ) число дефицитов ЗЧ возрастает на единицу ( $BO = BO + 1$ ), число агрегатов в процессе устранения неисправности также увеличивается на единицу ( $DI = DI + 1$ ).

2. Если на складе имеются агрегаты данной номенклатуры ( $OH > 0$ ), их число уменьшается на единицу ( $OH = OH - 1$ ), число агрегатов в процессе устранения неисправности увеличивается на единицу ( $DI = DI + 1$ ), число дефицитов ЗЧ равно нулю ( $BO = 0$ ). Равенство сохраняется при любых исходных значениях.

Для оценки и анализа среднего числа дефицитов агрегатов для эксплуатации ВС воспользуемся методом ИМ.

В качестве среды, позволяющей не только моделировать, но и визуализировать описанные выше процессы, выбран прикладной продукт MATLAB компании MathWorks [9, 10].

Опишем имитационную модель расходования запаса агрегатов в СПУЗ ЗЧ АП, рассматриваемую как комбинированную СМО. Данная система состоит из ИАС в составе авиационных эскадрилий, скла-

да авиационно-технического имущества (АТИ) и технико-эксплуатационной части. Построим имитационную модель для агрегатов одной номенклатуры. Общая схема блоков имитационной модели представлена на рис. 1.

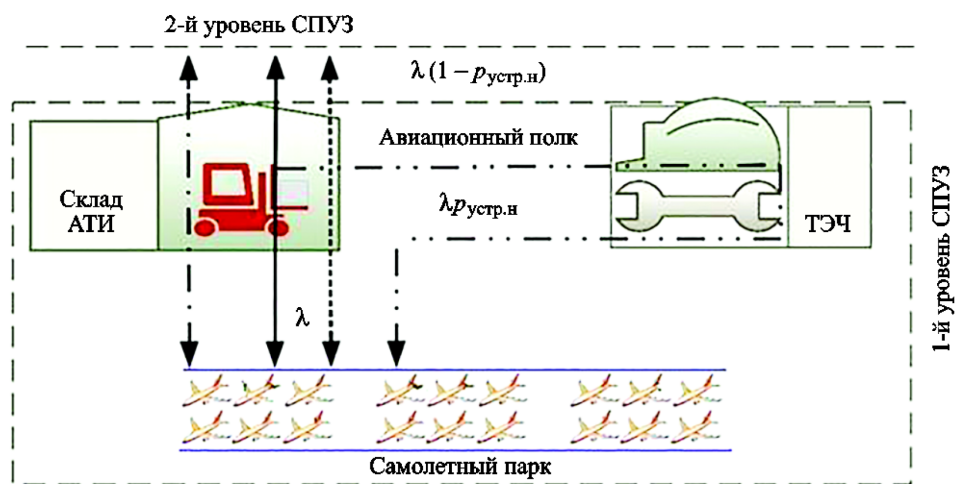


Рис. 1. Структурная схема потоков агрегатов СПУЗ, агрегатов для эксплуатации ВС в составе АП:

- ← · · · → — поток неисправных агрегатов, находящихся на гарантийном обслуживании;
- ← · · · → — поток неисправностей, устраняемых силами ИАС;
- ← · · · · · → — поток неисправных агрегатов, восстанавливаемых на АРЗ;
- ← ————— → — движение новых и неисправных агрегатов

Описываемая имитационная модель позволяет отображать изменения основных показателей запаса, т. е. величин  $OH$ ,  $DI$ ,  $BO$ . В результате ИМ получим статистические характеристики: текущее и среднее число обслуженных заявок, текущее и среднее число дефицитов ЗЧ, среднее время обслуживания и т. д. Основной целью моделирования является получение среднего числа дефицитов агрегатов.

Входными данными для моделирования являются математическое ожидание наработки на отказ агрегатов, среднее время восстановления исправности и др.

Логику работы модели можно условно подразделить на две части:

- 1) генерация и обслуживание заявок;
- 2) расчет переменных состояния запаса агрегатов.

Заявки создаются в соответствии с указанным временным законом и поступают в блок обработки заявок. По факту поступления заявки формируется запрос на выдачу агрегата из запаса. Если агрегат имеется — заявка считается обработанной (с точки зрения потребителя услуг). Если агрегата в наличии нет, ВС простаивает в неис-

правном состоянии до того момента, пока не придет заказанный агрегат. В случае если агрегата данной номенклатуры нет на складе АП, подается заявка на доставку необходимой ЗЧ на склад объединения и далее по коммуникационной схеме взаимодействия. В блоке восстановления исправности заявка находится случайное время, определяются выявленным законом распределения случайной величины. При выходе заявки из блока восстановления исправности формируется сигнал о завершении восстановления исправности. Путь заявки в системе заканчивается. Результатом моделирования является информация о среднем числе дефицитов ЗЧ за время моделирования. Также формируется зависимость среднего числа дефицитов от запаса агрегатов данной номенклатуры на заданном временном отрезке.

Модель имитирует восстановление исправности ВС, простой которого вызван отсутствием ЗЧ в запасе одного авиационного полка (АП).

**Имитационная модель расходования запаса агрегатов для эксплуатации ВС АП.** Имитационная модель выполнена с помощью программной оболочки MATLAB с использованием модуля SimEvents, предназначенного для моделирования дискретных событий в системе [12]. Схема блоков имитационной модели представлена на рис. 2.

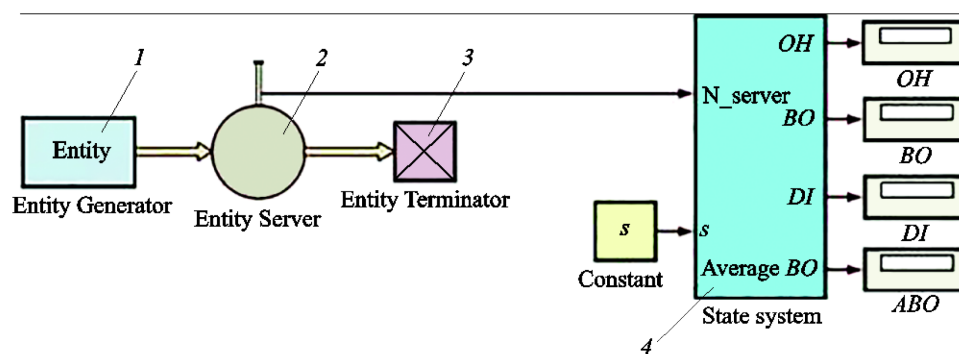


Рис. 2. Схема блоков имитационной модели

Основные блоки модели:

- Entity Generator (1) — блок генерации заявок (заявка — возникновение события отказа единицы оборудования);
- Entity Server (2) — блок обработки заявок в системе с бесконечным числом каналов (обработка — восстановление исправности ВС);
- Entity Terminator (3) — блок уничтожения заявки в системе;
- State System (4) — блок определения состояния системы.

В блоке 4 проводится отслеживание основных показателей запаса по каждому виду агрегатов:

- число доступного наличного запаса (OH);

- число агрегатов в процессе восстановления исправности ( $DI$ );
- число дефицитов ЗЧ агрегатов ( $BO$ ).

**Имитация и результаты моделирования.** Результаты моделирования можно представить в виде зависимостей основных показателей уровня запаса  $S$  и среднего числа дефицитов  $ABO(S)$ . Модельное время установлено 500 лет. При выборе данного времени среднее значение числа дефицитов ЗЧ стабилизируется и выходит на средний уровень (рис. 3).

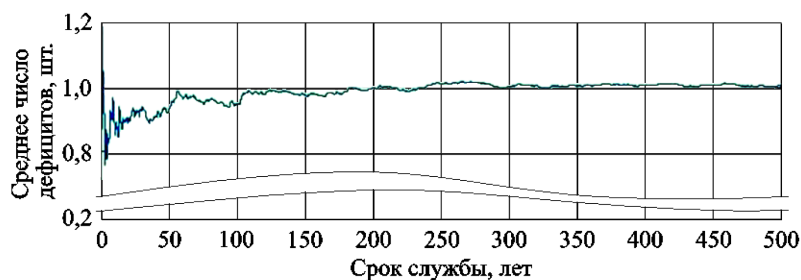


Рис. 3. Среднее число дефицитов ЗЧ при моделировании в течение 500 лет ( $s = 0$ )

На рис. 4 представлена часть процесса ИМ при запасе агрегатов  $s = 2$  единицы на промежутке времени 5 лет при следующих переменных запаса ЗЧ: число доступного наличного запаса  $OH$ ; число агрегатов в процессе устранения неисправности  $DI$ ; число дефицитов агрегатов  $BO$ .

Условные параметры имитационной модели приведены ниже:

Распределение времени между отказами (заявками) .....	Экспоненциальное
Математическое ожидание наработки на отказ, ч .....	1000
Распределение времени восстановления исправности .....	Экспоненциальное
Среднее время восстановления исправности, ч .....	1000
Время моделирования, лет .....	500

Процесс изменения количественных показателей переменных запаса агрегатов  $s$  отображен на рис. 4. Видно, как с течением времени число агрегатов в процессе устранения неисправности ( $DI$ ) изменяется от 0 в начале срока службы до 4 шт. по прошествии не многим более полутора лет (рис. 4, а).

Число дефицитов ( $BO$ ) примерно в то же время составило 2 шт. (рис. 4, б), а число доступного наличного запаса ( $OH$ ) не превышало 2 шт. (рис. 4, в) за весь период наблюдения.

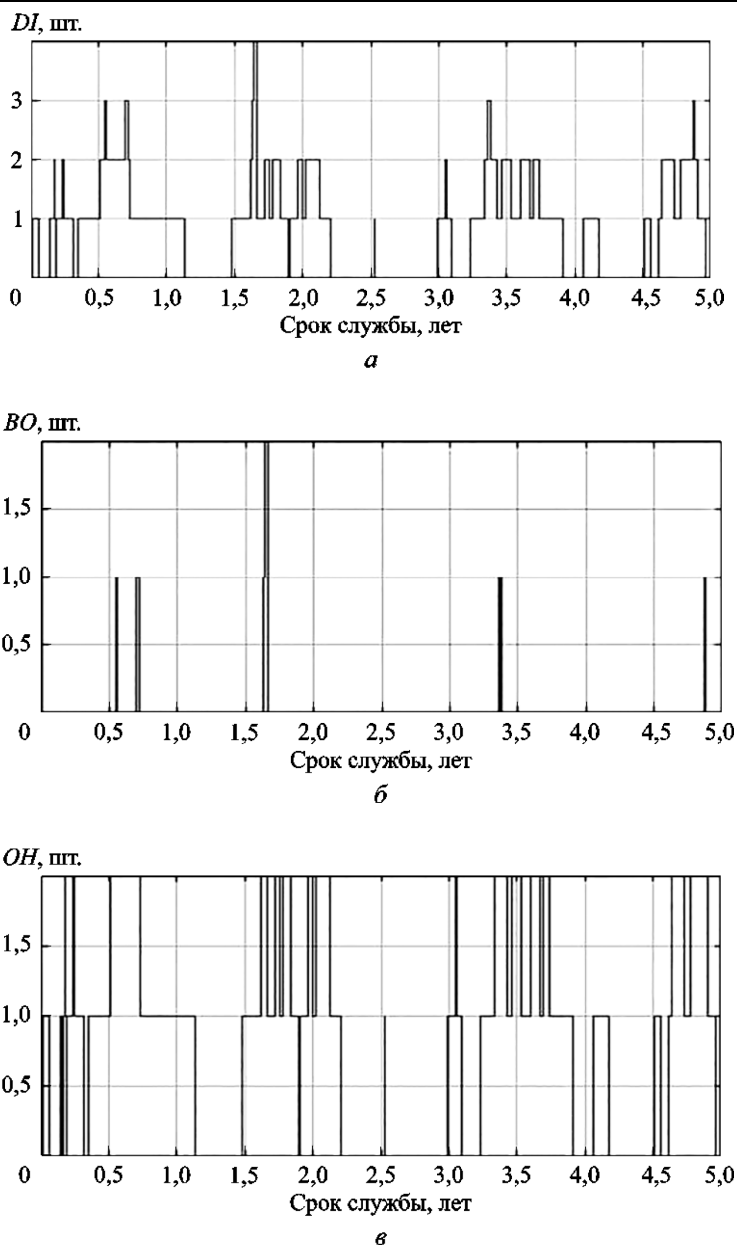


Рис. 4. Изменение числа агрегатов в процессе устранения неисправности (а), числа дефицитов (б) и числа доступного наличного запаса (в)

**Проверка адекватности модели.** Рассмотренная модель расходования и восполнения запаса агрегатов для эксплуатации ВС в АП в случае экспоненциального распределения наработки на отказ и времени восстановления исправности является классической моделью СМО с бесконечным числом каналов обслуживания [13]. Такая СМО описывается аналитически.

Исходными данными являются интенсивность отказов  $\lambda$  и интенсивность времени, затраченного на восстановление исправности  $\mu$ . Значения исходных данных для аналитического расчета приведены ниже:

Математическое ожидание наработки на отказ, ч .....	1000
Интенсивность отказов $\lambda$ , ч .....	0,001
Среднее время восстановления исправности, ч .....	1000
Интенсивность восстановления исправности $\mu$ , ч .....	0,001

Финальные вероятности нахождения системы в состояниях определяют, исходя из интенсивности нагрузки

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}.$$

Интенсивность нагрузки  $\rho$  отражает степень согласованности входного и выходного потоков заявок канала обслуживания и определяет устойчивость системы массового обслуживания.

Вероятность того, что канал свободен (доля времени простоя каналов)

$$p_0 = \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\rho^k}{k!} \right)^{-1}.$$

Вероятность того, что обслуживанием занято  $n$  каналов

$$p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0.$$

Отметим следующее: вероятность событий, что каналы свободны и занято 1, 2, ...  $n$  каналов ( $n \rightarrow \infty$ ), составляет полную группу событий. Другими словами,

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1.$$

Используя приведенные выражения, можно оценить среднее число дефицитов ЗЧ для заданного значения начального запаса агрегатов на складе АП:

$$PBO(s) = \sum_{n=s}^{\infty} [(n-s) p_n],$$

где  $s$  — уровень начального запаса агрегатов на базе;  $p_n$  — вероятность того, что обслуживанием занято  $n$  каналов.



Для проверки адекватности модели было проведено сравнительное моделирование полученной имитационной модели с представленной аналитической моделью:

$$\Delta(s) = |PBO(s) - ABO(s)|.$$

Приведенная погрешность применяется при исследовании малых значений и выражается отношением абсолютной погрешности к условно принятому значению, постоянному во всем диапазоне:

$$\delta(s) = \frac{|PBO(s) - ABO(s)|}{\max[PBO(s)]}.$$

В ходе моделирования было сгенерировано 4309 заявок. Результаты расчета представлены в таблице.

**Результаты имитационного моделирования**

Уровень запаса $s$ , ед.	Расчет с использованием ИМ, ед.	Расчет по аналитической модели, ед.	Абсолютная погрешность $\Delta$ , ед.	Приведенная погрешность $\delta$ , %
0	1,002	1,000	0,002	0,2
1	0,369	0,368	0,001	0,1
2	0,103	0,104	0,001	0,1
3	0,026	0,023	0,003	0,3
4	0,005	0,004	0,001	0,1
5	0,001	0,001	0,000	0
Средние значения				
			0,001	0,133

Совпадение результатов расчетов хорошо отображают рис. 5 и рис. 6. В большинстве экспериментов абсолютная погрешность не превышает 0,003, а приведенная погрешность результатов не превышает 0,3 %.

Планирование МТО включает в себя расчет потребностей в средствах эксплуатации ВС. Процесс планирования МТО предполагает решение следующих задач:

- а) оценка общей потребности в ЗЧ и материалах для планового и непланового ТО на период эксплуатации;
- б) расчет объема начального запаса ЗЧ и материалов, поставляемых с ВС в рамках начального МТО;
- в) расчет объема текущих запасов, необходимых для обеспечения эксплуатации ВС;
- г) определение основных параметров системы управления запасами: объема минимального запаса и объема партии поставки агрегатов [14].

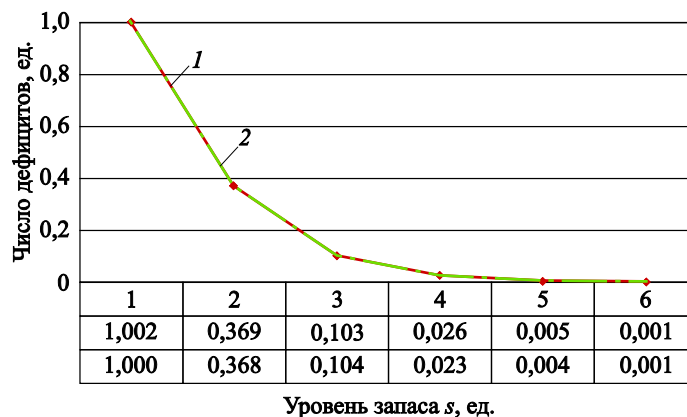


Рис. 5. Результаты расчета, выполненного с помощью аналитической (штриховая кривая 1) и имитационной (полужирная 2) моделей

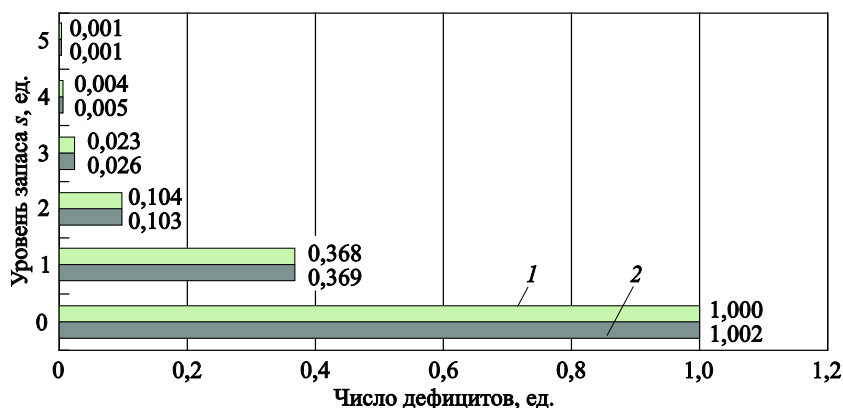


Рис. 6. Расхождение результатов расчета, выполненного с помощью аналитической (1) и имитационной (2) моделей

Исходные данные для решения этих задач:

- сценарий эксплуатации (содержащий сведения о числе эксплуатируемых ВС, планируемой наработке, условиях эксплуатации и др.);
- сведения о составе систем ВС и их составных частей, требующих ТО, перечне работ и технологии ТО, номенклатуре и нормах расхода материалов и т. д.

В указанных условиях необходимо:

- сформировать перечень изделий с ограниченным ресурсом (эксплуатируемых методом технической эксплуатации по ресурсу);
- рассчитать объем ЗЧ для планового и непланового ТО (в расчете на срок службы ВС/на один год/на 1 ч налета и т. д.);
- оценить номенклатуру и объем ЗЧ, поставляемых в рамках начального МТО;

г) выделить наиболее востребованные для замены СЧ (для анализа причин и поиска путей снижения затрат);

д) рассчитать объем запасов для непланового ТО, значение минимального запаса, размер партии поставки и т. д.

**Заключение.** Имитационная модель расходования запаса агрегатов показала почти полное совпадение с результатами расчетов на основе хорошо зарекомендовавшей себя аналитической модели СМО. Это означает, что при планировании МТО на основе данной имитационной модели можно строить более сложные модели для анализа многономенклатурных запасов ЗЧ, не прибегая к использованию громоздкого математического аппарата. В дальнейшем планируется построение двухуровневой имитационной модели, включающей в себя авиаремонтный завод и завод-изготовитель, для анализа многономенклатурных запасов авиационного объединения по критерию эффективности, объединяющему коэффициент готовности и затраты на закупку ЗЧ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Загребаев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. *Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем*. Москва, МИФИ, 2007, 332 с.
- [2] ISO/IEC/IEEE 15288:2015. *Systems and Software Engineering — System Life Cycle Processes*. International Organization for Standardization, 2005, 108 p.
- [3] Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П. *Компьютерное моделирование: пособие для курсового и дипломного проектирования*. Санкт-Петербург, Военная академия связи, 2011, 348 с.
- [4] Кабанов А.А. Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2013, вып. 65.  
URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2013-kabanov.pdf>
- [5] Чепко И.Н., Богомоллов Д.В., Карпенко О.Н. Управление запасами агрегатов и запасных частей для авиационной техники государственной авиации: основные проблемы и пути решения. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2018, вып. 103.  
URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/be9/СЧепко\\_Богомоллов\\_Карпенко\\_rus.pdf?lang=ru&issue=103](http://trudymai.ru/upload/iblock/be9/СЧепко_Богомоллов_Карпенко_rus.pdf?lang=ru&issue=103)
- [6] Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. 4-е изд. Москва, Наука, 1969, 576 с.
- [7] ГОСТ 23887–79. *Сборка. Термины и определения*. Москва, Издательство стандартов, 1992, 85 с.
- [8] Sherbrooke C.C. *Optimal Inventory Modeling of Systems Multi-echelon techniques*. 2nd edition. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [9] Дьяконов В.П. *MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения*. Москва, СОЛОН-Пресс, 2005, 800 с. (Серия «Библиотека профессионала»).
- [10] Иглин С.П. *Математические расчеты на базе MATLAB*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005, 640 с.
- [11] Кондрашев В.Е., Королев С.В. *MATLAB как система программирования научно-технических расчетов*. Москва, Мир, Институт стратегической стабильности Минатома РФ, 2002, 350 с.

- [12] Потемкин В.Г. *Вычисления в среде MATLAB*. Москва, ДИАЛОГ-МИФИ, 2004, 720 с.
- [13] Клейнрок Л. *Теория массового обслуживания*. Москва, Мир, 1979, 432 с.
- [14] Судов Е.В., Петров А.Н., Петров А.В., Осяев А.Т., Серебрянский С.А. *Технологии интегрированной логистической поддержки в процессах жизненного цикла авиационной техники*. Москва, Эдитус, 2018, 174 с.

Статья поступила в редакцию 11.04.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чепко И.Н., Богомолов Д.В., Серебрянский С.А., Трофимчук М.В., Герасимов И.В. Оценка адекватности имитационной модели расходования запаса агрегатов для эксплуатации воздушных судов в составе авиационного полка. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-7-1900>

**Чепко Игорь Николаевич** — адъюнкт 71 кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж). e-mail: [incherko@mail.ru](mailto:incherko@mail.ru)

**Богомолов Дмитрий Валерьевич** — канд. физ.-мат. наук, доцент 71 кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж). e-mail: [bogomolov.77@mail.ru](mailto:bogomolov.77@mail.ru)

**Серебрянский Сергей Алексеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» МАИ (Москва). e-mail: [s-s-alex@mail.ru](mailto:s-s-alex@mail.ru), [maksmai33@gmail.com](mailto:maksmai33@gmail.com)

**Трофимчук Максим Васильевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела Научно-исследовательского центра проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж). e-mail: [trofim109@mail.ru](mailto:trofim109@mail.ru)

**Герасимов Игорь Викторович** — начальник отдела Военно-воздушных сил Учебного военного центра при МАИ (Москва). e-mail: [iv\\_gerasimov@mail.ru](mailto:iv_gerasimov@mail.ru)

## **A simulation model of inventory stock usage and its adequacy assessment for aircraft operating as part of aviation regiment**

I.N. Chepko<sup>1</sup>, D.V. Bogomolov<sup>1</sup>, S.A. Serebryanskiy<sup>2</sup>,  
M.V. Trofimchuk<sup>1</sup>, I.V. Gerasimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh, 394064, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

*The paper focuses on the main components of the logistics planning process and justifies the connection between the qualitative planning of the required number of units and the availability factor of aircraft. We consider the potential of simulation modeling as applied to the study of the complex systems behavior, and substantiate the application of such modeling in the inventory planning and control system for the operation of state aircraft. It was found that the availability factor, the health coefficient and the cost of purchasing spare parts can serve as efficiency criteria. The increased aircraft availability or serviceability is achieved by minimizing downtime due to the lack of spare parts. In our research we describe the simulation model of inventory stock usage and test the model for aircraft operating as part of an aviation regiment. The simulation model showed almost complete coincidence with the results of an analytical model of a queuing system. This means that when planning material and technical support, on the basis of this simulation model, it is possible to build more complex models for analyzing multi-inventory stocks without applying a complex mathematical apparatus. The model can be used as a tool for planning the required number of units for the operation of state aircraft.*

**Keywords:** operation, logistic means, planning, simulation modeling, inventory, number of deficiencies

### REFERENCES

- [1] Zagrebaev A.M., Kritsyna N.A., Kulyabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. *Metody matematicheskogo programmirovaniia v zadachakh optimizatsii slozhnykh tekhnicheskikh system* [Methods of mathematical programming in the optimization problems of complex technical systems]. Moscow, MIFI Publ., 2007, 332 p.
- [2] ISO/IEC/IEEE 15288:2015. *Systems and software engineering — System life cycle processes*. International Organization for Standardization, 2005, 108 p.
- [3] Boev V.D., Kirik D.I., Sypchenko R.P. *Kompyuternoe modelirovanie: Posobie dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya* [Computer modeling: A study guide for course and diploma design]. St. Petersburg, S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps Publ., 2011, 348 p.
- [4] Kabanov A.A. *Elektronny zhurnal «Trudy MAI» (Proceedings of MAI)*, 2013, no. 65. Available at: <http://simulation.su/uploads/files/default/2013-kabanov.pdf>
- [5] Chepko I.N., Bogomolov D.V., Karpenko O.N. *Elektronny zhurnal «Trudy MAI» (Proceedings of MAI)*, 2018, no. 103. Available at: [http://trudymai.ru/upload/iblock/be9/CHepko\\_Bogomolov\\_Karpenko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=103](http://trudymai.ru/upload/iblock/be9/CHepko_Bogomolov_Karpenko_rus.pdf?lang=ru&issue=103)
- [6] Ventsel E.S. *Teoriya veroiatnostey* [Probability theory]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1969, 576 p.

- [7] *GOST 23887–79. Sbornik. Terminy i opredeleniya* [State Standard 23887–79. Assembling. Terms and definitions]. Moscow, Izd. standartov Publ., 1992, 85 p.
- [8] Sherbrooke C.C. *Optimal Inventory Modeling of Systems Multi-echelon techniques*. Second edition. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [9] Dyakonov V.P. *MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Osnovy primeneniya* [MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Basics of application]. Moscow, SOLON-Press, 2005, 800 p.
- [10] Iglin S.P. *Matematicheskie raschety na baze MATLAB* [Mathematical calculations based on MATLAB]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2005, 640 p.
- [11] Kondrashev V.E., Korolev S.V. *MATLAB kak sistema programmirovaniya nauchno-tehnicheskikh raschetov* [MATLAB as a programming system for scientific and technical calculations]. Moscow, Mir Publ., ISS-Atom Publ., 2002, 350 p.
- [12] Potemkin V.G. *Vychisleniya v srede MATLAB* [Calculations in the MATLAB environment]. Moscow, DIALOG-MIFI, 2004, 720 p.
- [13] Kleinrock L. *Theory, Volume 1, Queueing Systems*. Wiley-Interscience New York, NY, USA, 1975, 417 p. [In Russ.: Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. Moscow, Mir Publ., 1979, 432 p.].
- [14] Sudov E.V., Petrov A.N., Petrov A.V., Osyayev A.T., Serebryanskiy S.A. *Tekhnologii integrirovannoy logisticheskoy podderzhki v protsessakh zhiznennogo tsikla aviatsionnoy tekhniki* [Technologies of integrated logistic support in the life cycle processes of aviation equipment]. Moscow, Editus Publ., 2018, 174 p. ISBN 978-5-00058-821-5

**Chepko I.N.**, service student, 71 Department, Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh. e-mail: [inchepko@mail.ru](mailto:inchepko@mail.ru)

**Bogomolov D.V.**, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, 71 Department, Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh. e-mail: [bogomolov.77@mail.ru](mailto:bogomolov.77@mail.ru)

**Serebryanskiy S.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, 101 Department “Aircraft Design and Certification”, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow. e-mail: [s-s-alex@mail.ru](mailto:s-s-alex@mail.ru), [maksmai33@gmail.com](mailto:maksmai33@gmail.com)

**Trofimchuk M.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Research Center for Problems of Application, Support and Management of Air Component, Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh. e-mail: [trofim109@mail.ru](mailto:trofim109@mail.ru)

**Gerasimov I.V.**, Head of the Department of the Air Force Military Training Center, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow. e-mail: [iv\\_gerasimov@mail.ru](mailto:iv_gerasimov@mail.ru)