

УДК 004.9.358.484 05.13 18

**Управление запасами агрегатов и запасных частей для авиационной  
техники государственной авиации: основные проблемы  
и пути решения**

**Чепко И.Н.\*, Богомолов Д.В.\*\*, Карпенко О.Н.\*\*\***

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых  
Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

*\*e-mail: [inchepko@mail.ru](mailto:inchepko@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [bogomolov.77@mail.ru](mailto:bogomolov.77@mail.ru)*

*\*\*\*e-mail: [texnnik@mail.ru](mailto:texnnik@mail.ru)*

**Аннотация**

В статье рассмотрены базовые принципы моделирования системы управления многоуровневыми запасами агрегатов для эксплуатации группы воздушных судов. Обосновано применение имитационного моделирования в системе планирования и управления запасами агрегатов для эксплуатации воздушных судов государственной авиации. В качестве критериев эффективности могут выступать такие показатели как коэффициент готовности, коэффициент исправности и затраты на закупку ЗЧ (запасных частей). Повышение степени готовности, достигается за счет минимизации дефицитов запасных частей. Представлена информация о разработанной и успешно применяемой в ВВС США модели управления запасами METRIC.

**Ключевые слова:** эксплуатация воздушных судов, система планирования и управления запасами агрегатов, имитационное моделирование.

## **Введение**

Экспертный опрос, проведенный среди большого количества руководителей инженерно-авиационной службы (ИАС) полкового и дивизионного звена показывает, что 70...80 % ошибок в планировании и организации инженерно-авиационного обеспечения (ИАО), приводящих к простоям авиационной техники (АТ), обусловлены нарастающей сложностью информационного обмена (документооборота) и отсутствием достаточной автоматизации процесса принятия решений с прогнозом их эффективности.

Углубление противоречий между растущим количеством и сложностью новых задач применения авиации, и старой нормативной технологией планирования и управления запасами запасных частей (ЗЧ) может получить кардинальное разрешение лишь путем частичной автоматизации управленческой деятельности руководителей ИАС полкового и дивизионного уровней.

### Математические модели управления запасами.

Проблема планирования и управления запасом ЗЧ для эксплуатации сложной техники, к числу которой относится воздушное судно (ВС), возникла как отдельное научное направление в 60-х годах прошлого века и была обусловлена тем, что в этих запасах сосредотачивались огромные денежные средства. В наибольшей мере эта ситуация была характерна для вооруженных сил, в особенности для ВВС. В это время начали разрабатываться и успешно применяться на практике математические модели систем планирования и управления запасами (СПУЗ), что позволило сократить объемы

запасов и затраты на их приобретение и хранение при сохранении прежнего уровня эффективности и технической готовности на 20...50 %. [1]

В классической постановке вопрос планирования и управления запасами сводился к получению следующих данных [2,3,4,5]:

- оптимальный момент подачи заявки на восполнение  $R$ ;
- оптимальный размер партии поставки  $Q$ ;
- время выполнения заявки  $T_g$ ;

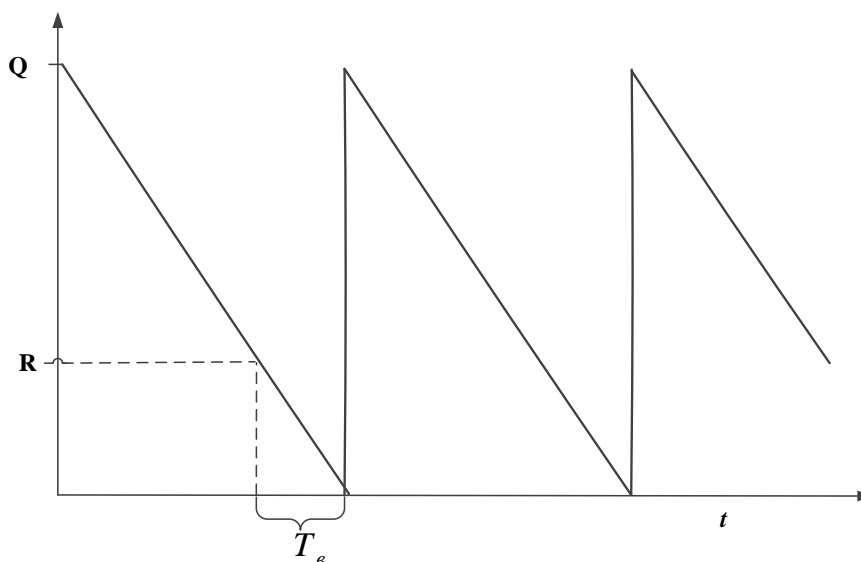


Рисунок - 1. График изменения запаса во времени при детерминированном спросе

Известна фундаментальная формула экономичного размера заказа – формула Вильсона. В ней представлена зависимость между размером заказа, величиной спроса, издержками при выполнении заказа, издержками при хранении и ценой [5]. Полученная величина размера заказа минимизирует издержки на закупку запасов и их хранение:

$$Q = \sqrt{\frac{2\Omega m}{ic}} \quad (1),$$

где:  $Q$  – экономичный размер заказа;  $m$  – величина среднегодового спроса;  $\Omega$  – стоимость подачи заказа;  $i$  – средняя стоимость хранения (в процентах от цены);  $c$  – стоимость единицы товара.

Агрегат, согласно [8], 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

Но классическая теория управления запасами (УЗ), при использовании ее в СПУЗ ЗЧ в государственной авиации, не описывает все процессы, поскольку не учитывает случайный характер наступления отказов агрегатов, находящихся в составе самолета, время доставки, возможности ремонта агрегата силами ремонтных органов разного уровня, случайный характер длительности ремонта и ряд других факторов. Поэтому существует необходимость в вероятностной постановке задач УЗ.

С развитием теории УЗ нашел применение системный подход, при котором ставится цель оптимизации СПУЗ ЗЧ для эксплуатации большого парка ВС. В качестве критериев эффективности могут выступать такие показатели как коэффициент готовности, коэффициент исправности и затраты на закупку ЗЧ. Результаты анализа могут быть представлены в виде графика зависимости готовности системы от затрат на запасы, обеспечивающие готовность [1] (рис. 2)

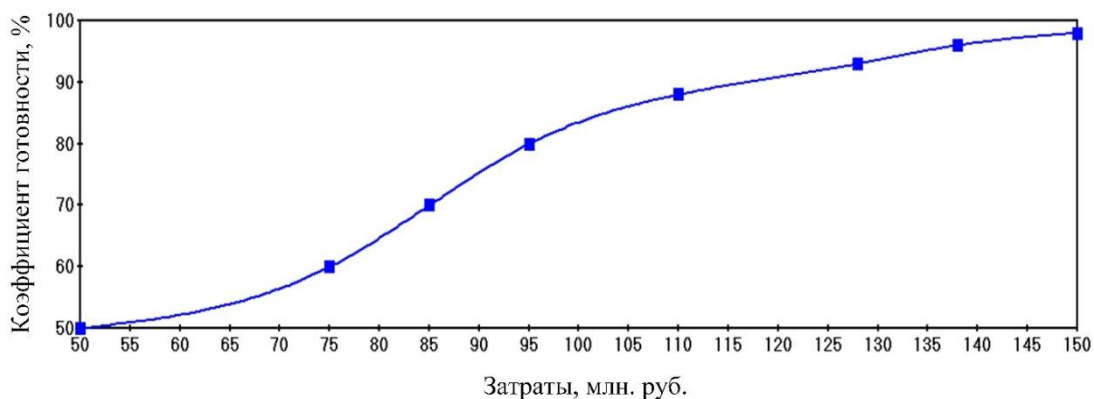


Рисунок 2 - График зависимости коэффициента готовности от затрат

Исследования, проведенные военных отраслях на Западе, показали, что около 60 % агрегатов вооружений и военной техники (ВВТ) являются ремонтпригодными, имеют значительную стоимость (цену) и относительно малый спрос, обусловленный высокой надежностью. В связи с указанной особенностью для снабжения подобных систем запасными частями были разработаны специальные модели [3,4,5,6]. Существенными свойствами моделируемых систем являются:

- ✓ многономенклатурность;
- ✓ многоуровневость;
- ✓ наличие ремонтных органов;
- ✓ политика заказов  $\{S - 1, S\}$ , что означает подачу заявки на пополнение

при каждом случае спроса.

К примеру, в системе управления запасами ВВС США применяется трехуровневая структура материально технического обеспечения (МТО) и технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) [3].

Первый уровень – оперативный (выполнение работ и хранение некоторого количества запасных частей непосредственно на площадке базирования самолета).

Второй уровень – промежуточный (выполнение работ и хранение запасных частей в специализированном подразделении, ремонтной мастерской).

Третий уровень – уровень специализированного ремонтного предприятия (предприятие-изготовителя воздушного судна).

По заказу ВВС США в 1966 году инженерами компании RAND была разработана математическая модель управления многономенклатурными запасами METRIC [3,4] (Multi-Echelon Technique for Repairable Item Control) многоуровневая стратегия управления ремонтируемыми запасными частями.

В ВВС США ТО и Р и МТО организуется по схеме "база- депо". База находится на нижнем уровне, ремонтный орган (депо) на верхнем. Горизонтальное взаимодействие между базами отсутствует.

Модель METRIC рассчитывает оптимальный уровень запаса по каждому агрегату в ремонтном органе и на каждой из нескольких баз, условия по которым могут быть различными.

Для расчета уровней запаса по базам и в депо используется алгоритм [1,2,5]:

#### Имитационная модель управления запасами

При математическом моделировании таких сложных систем как СПУЗ ЗЧ для эксплуатации ВС на пути ученых возникают новые сложности:

- а) сложность формализации конечных выражений;
- б) большое количество вводимых допущений;
- в) наличие большого числа случайных факторов;

г) сложность получения конечных зависимостей и громоздкие математические выражения;

д) невозможность или высокая трудоемкость оценки адекватности математических моделей СПУЗ ЗЧ;

Также, согласно [10,12] применение имитационного моделирования обусловлено вышеперечисленными признаками

Все большее, и на мой взгляд заслуженное, внимание при планировании уделяется имитационному моделированию (ИМ). Высокий потенциал имитационного ИМ в применении к изучению поведения сложных систем известен уже достаточно давно. К началу 80-х годов прошлого столетия использование имитационного моделирования производственных процессов при планировании ресурсов давало практические результаты для предприятий с числом рабочих мест в 200 единиц и номенклатурой 10000 наименований деталей [9]. В настоящее время эффективность этих методов существенно возросла благодаря бурному развитию вычислительной техники и программного обеспечения. Известно, что порядка 70% среди инструментов исследования занимают методы именно имитационного моделирования [13,14].

Все выше перечисленные факторы определяют необходимость рассмотрения технологий имитационного моделирования в качестве инструмента планирования для получения конечного результата.

Важным моментом здесь является то, что при инженерном подходе к разработке имитационной модели, достаточно много информации о моделируемой системе вводится в модель извне, т.е. из рабочей документации на агрегат. Рабочая документация – это совокупность комплектов конструкторских, технологических и

производственных документов. Вместе с тем, имитационное моделирование требует серьезной подготовки и структурирования исходных данных, что является сложной задачей. Ценность и эффективность системы имитационного моделирования возрастает в разы, когда налажено их взаимодействие с системами хранения баз данных, таких как PDM (Product Data Management) системы, в которой хранится рабочая документация, как совокупность первичных и вторичных электронных документов [14].

Так к примеру, применение баз данных с информацией по наработке каждого агрегата позволит ИАС накапливать большие объемы структурированной информации. На ее основе с помощью имитационных моделей возможно построить достоверные прогнозы и вырабатывать оптимальные стратегии управления запасами.

На рисунке 3 показана простейшая схема двухуровневой иерархической СПУЗ ЗЧ авиационный полк (*ап*) – авиационный ремонтный завод (АРЗ). Для описания функционирования СПУЗ ЗЧ для авиационного объединения используем принципы математических моделей METRIC, описанные в [1,3,4,5]:

1. Организационная структура двухуровневая (*ап* на нижнем уровне и предприятия промышленности на верхнем).
2. Обмен происходит по иерархическим связям. Горизонтального взаимодействия между *ап* нет.
3. Политика управления запасами  $\{S - 1, S\}$ .
4. *ап* обладает своим запасом ЗЧ и своим ремонтным органом – технико-эксплуатационной частью (*тэч*).
5. В случае если ремонт в ТЭЧ невозможен, отказавший агрегат направляется в АРЗ. Исправный агрегат поступает на склад в *ап* после ремонта в АРЗ или сразу в



зависимости от наличия или отсутствия запаса агрегатов данной номенклатуры в АРЗ в момент обращения.

6. Если в *ап* нет доступных агрегатов для замены отказавшего агрегата, возникает состояние дефицита.

7. ВС состоит из агрегатов разного уровня. Дефицит агрегата верхнего уровня означает невозможность вылета и выполнения полетного задания. агрегаты нижних уровней влияют на функционирование самолета через агрегаты верхних уровней.

8. Случайная величина спроса задается распределением Пуассона

$P(x) = \frac{\sigma_x}{x!} \cdot e^{-\sigma_x}$ , где  $x = 1, 2, 3, \dots$ , а закон распределения времени между наступлением

соседних случайных событий отказа подчиняется нормальному закону распределения [7] и имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (2),$$

где:  $m_x$  – математическое ожидание;  $x$  – случайная величина;  $\sigma_x$  – среднее квадратичное отклонение величины  $x$  от ее математического ожидания;

На рисунке 3 показана схема взаимодействия *ап* – АРЗ, принимаем, что взаимодействия между *ап*, в части касающейся передачи агрегатов, нет. При взаимодействии нескольких *ап* с пуассоновским спросом, с общим АРЗ, суммарный спрос на АРЗ также является пуассоновским [16,17].

На рисунке 4 показана схема двухуровневой СПУЗ ремонтируемых агрегатов, построенная на описанных выше принципах. Спрос в *ап* является пуассоновским с интенсивностью  $\lambda$ , деталь может быть отремонтирована на первом уровне, в

условия  $an$ , с вероятностью ремонта  $p_{рем1}$ , иначе агрегат передается на следующий уровень – АРЗ с интенсивностью  $\lambda(1 - p_{рем1})$ . Вероятность успешного ремонта на АРЗ составляет  $\lambda(1 - p_{рем1})p_{рем2}$ .

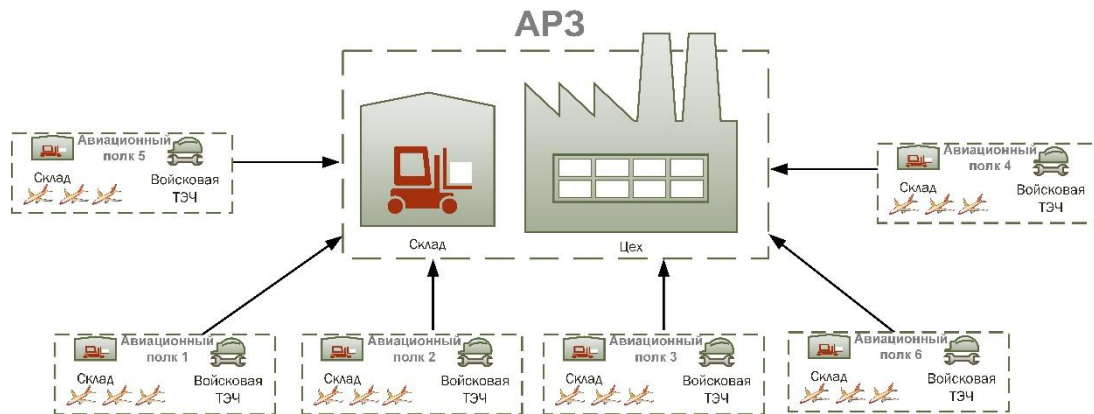


Рисунок 3 - Схема взаимодействия ап –АРЗ

Как уже отмечалось, анализ проводится с системной точки зрения, т. е. оптимизации подлежит общая операционная готовность системы. Это достигается за счет минимизации количества отложенных заказов (дефицитов) агрегатов первого уровня, без которых функционирование самолета невозможно. При этом лицо, принимающее решение, должно располагать информацией, сопоставляющей готовность системы и затраты на ее обеспечение.

Оптимальная стратегия должна соблюдать необходимый баланс многих противоречивых условий. Подходящее сочетание агрегатов различного уровня и их распределение ( $an$ , АРЗ) – это и есть задача оптимального управления запасами, которая решается с помощью имитационного моделирования. Эффективность СПУЗ агрегатов для эксплуатации ВС оценивается двумя параметрами: уровнем обслуживания и уровнем дефицита.

Уровень обслуживания – процент заявок на выдачу агрегатов, которые могут быть удовлетворены в момент обращения.

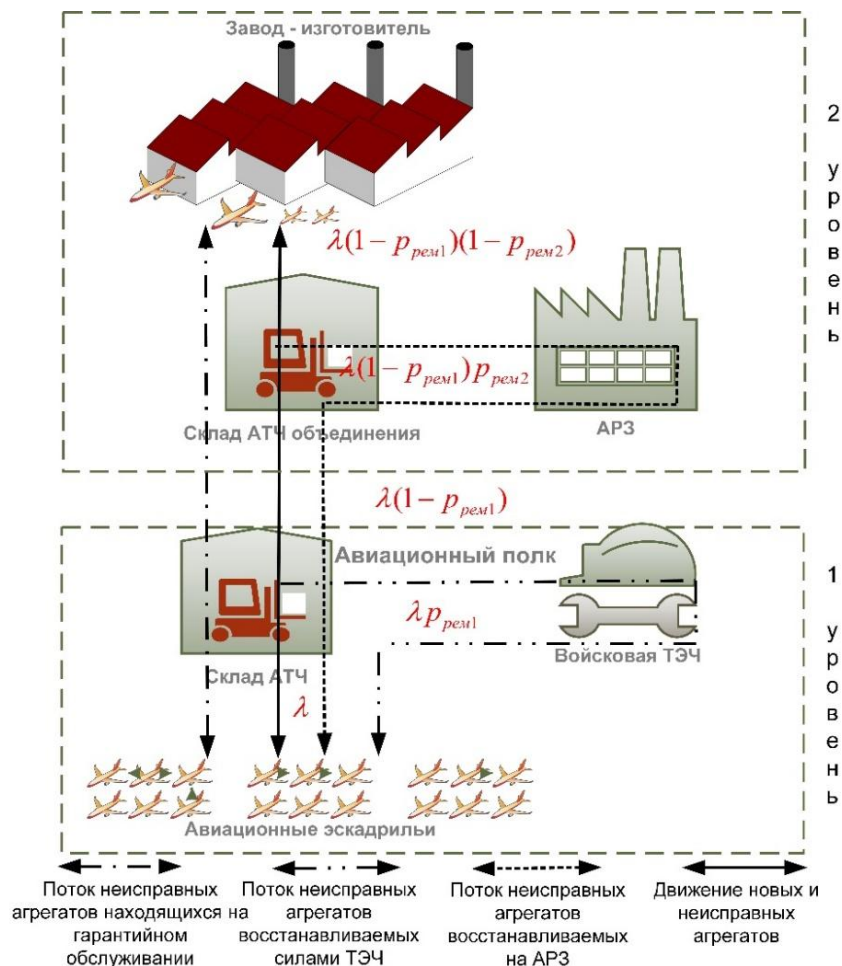


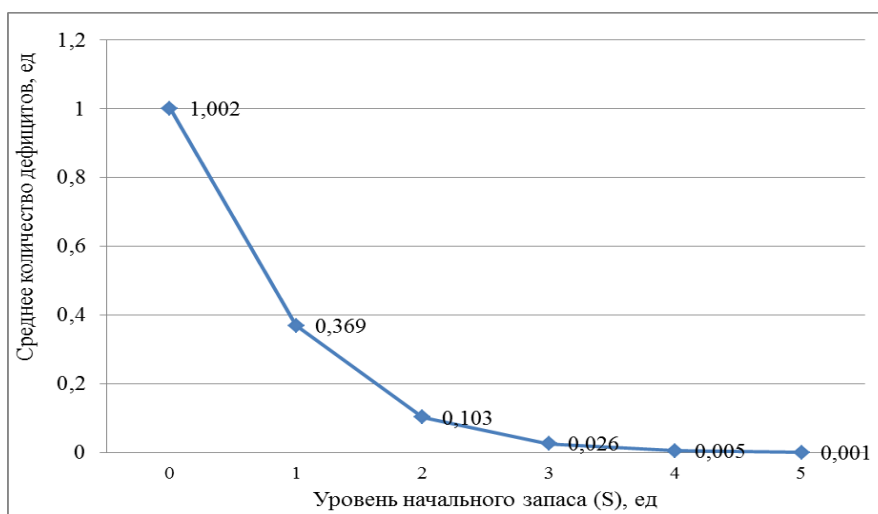
Рисунок 4 – Схема двухуровневой СПУЗ ремонтируемых агрегатов

Уровень дефицита агрегата – число неудовлетворенных заявок на выдачу агрегатов в данный момент времени. Дефицит агрегата длится до тех пор, пока осуществляется доставка или продолжается ремонт агрегата. Уровень дефицита является предпочтительной величиной для оптимизации, поскольку он напрямую связан с общей готовностью ВС, а уровень обслуживания всегда может быть получен из информации об имеющихся дефицитах агрегатов.

Для построения оптимального графика зависимости запаса ЗЧ от количества дефицитов используется техника маргинального анализа [18,19]. На основе исходных данных для каждого возможного числа агрегатов в запасе рассчитывается ожидаемое количество дефицитов. Далее на основе оценки приращения эффективности системы при добавлении очередной единицы запаса выбирается тот или иной агрегат для увеличения уровня его запаса на единицу. Математическая постановка задачи состоит в том, чтобы минимизировать число дефицитов при ограничениях на доступный запас ЗЧ.

Алгоритм маргинального анализа применим для любого числа агрегатов. В результате анализа получается оптимальная кривая зависимости уровня дефицитов агрегатов от их запаса. Пример такой кривой приведен на рисунке 5.

В связи с вышеизложенным разработка и применение имитационных моделей с целью планирования потребного количества запаса агрегатов для эксплуатации ВС является актуальным шагом.



## **Выводы**

В условиях внедрения в повседневную деятельность высокопроизводительной вычислительной техники методы расчета потребного количества ЗЧ разработанные 20-30 лет назад перестают удовлетворять растущие потребности руководящего состава ИАС с точки зрения удобства применения, а также точности обоснования принимаемых решений.

Существующая сегодня в авиации ВС РФ система планирования, заказа и поставок ЗЧ не в полной мере соответствуют современным требованиям и не используют возможностей современных технических достижений, в частности, в области информационных технологий.

На смену экспертным оценкам приходит точный расчёт обслуживания, обеспечивающего надёжность и эксплуатационную технологичность воздушного судна. Согласно [20] интегрированная логистическая поддержка (ИЛП) – комплекс управленческих процессов и процедур, выполняемых в ходе всего жизненного цикла (ЖЦ) изделия, направленных на сокращение затрат на послепродажное сопровождение при обязательном обеспечении заданного уровня технической готовности. ИЛП включает в себя процедуры планирования и управления процессами технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), направленные на минимизацию затрат на ЖЦ изделия при обеспечении требуемых параметров надёжности, готовности, ремонтпригодности.

Эффективным инструментом планирования является имитационное моделирование с использованием реальных баз данных статистической

информации. На основе имитации процесса расходования и пополнения многономенклатурного запаса возможно построить достоверные прогнозы и вырабатывать оптимальные стратегии УЗ.

### Библиографический список

1. Левин А.И., Хроменко А.А. Управление распределенными многономенклатурными запасами: состояние проблемы и пути ее решения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 4. С. 7 - 12.
2. Gross O. A Class of Discrete-Type Minimization Problems. RAND Corporation, RM-1655-PR, Santa Monica, CA, 1956.
3. Hadley G., Whitin T.M. Analysis of Inventory Systems. Englewoods Cliffs. Prentice-Hall, Inc., N. J., 1963.
4. Muckstadt J.A Model for a Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System // Management Science, INFORMS, 1973, vol. 20 (4-Part-I), pp. 472 - 481.
5. Sherbrooke C.C. Optimal Inventory Modeling of Systems Multi-echelon techniques, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004, 349 p.
6. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управления запасами. - СПб.: Питер, 2001. - 384 с.
7. Чепко И.Н., Богомолов Д.В. Обобщенная функция распределения срока службы приборов и агрегатов самолетов ИЛ-76 // Насосы. Турбины. Системы. 2017. № 4. С. 11 - 17.

8. Сборка. Термины и определения. ГОСТ 23887-79. - М.: Изд-во стандартов, 1992. - 85 с.
9. Вавилов А.А. Имитационное моделирование производственных систем. – М.: Машиностроение, 1983. - 417 с.
10. Бадалов А.Ю., Разумов Д.А. Методика моделирования в жизненном цикле большой автоматизированной системы космодрома уровня Smart City // Труды МАИ. 2018. №100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93491>
11. Загребаев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем. - М.: МИФИ, 2007. - 332 с.
12. ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and software engineering - System life cycle processes, International Organization for Standardization, 2005, 108 p.
13. Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П. Компьютерное моделирование. – СПб.: Военная Академия Связи, 2011. –348 с.
14. Кабанов А.А. Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35910>
15. Разумов Д.А., Алёшин В.Д. Имитационное моделирование в жизненном цикле автоматизированных систем управления в кризисных и чрезвычайных ситуациях // Труды V-й Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, С-Петербург, ноябрь 2011. С. 244 - 249, URL: <http://simulation.su/files/immod2011/material/38.pdf>

16. Орлов А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова-Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97(03). С. 31 - 45.
17. Диденко А.Ф., Помпушко А.З. Обобщенная функция распределения срока службы приборов и агрегатов орбитальных станций // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 28 - 33.
18. Стерлигова А. Н. Управления запасами в цепях поставок. - М.: ИНФРА-М, 2008. - 430 с.
19. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. (Глава 16. Жадные алгоритмы). - М.: Вильямс, 2005. - 1296 с.
20. Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. ГОСТ Р53393-2009. - М.: Стандартинформ, 2010. - 30 с.