



Модель и методика оптимизации объема оборотного фонда запасных частей, обеспечивающего заданные показатели готовности парка сложных технических изделий

ОАО РКК «Энергия», г. Королев, 11 ноября 2014 г.

Карасев Вадим Олегович

АНО НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»,
Главный специалист отдела разработки систем анализа логистической поддержки, магистрант кафедры ИУ-1 МГТУ им. Баумана



Основные причины внепланового простоя техники

Недоступность инфраструктуры



Отсутствие или занятость специалистов



Отсутствие необходимых запасных частей и материалов





Показатели готовности парка СТИ

Коэффициент эксплуатационной готовности

Коэффициент планируемого применения

Коэффициент готовности изделия при бесконечной системе ЗИП

Коэффициент готовности системы ЗИП

Эксплуатационно-экономическая эффективность



Коэффициент планируемого применения (Кпп)

Отражает долю времени, в течение которого Изделие не должно находиться на плановом ТО.

Учитывает:

- Плановые простои
- Техническое обслуживание



Не учитывает:

- Простой по ожиданию запчастей
- Неплановое ТО





Коэффициенты готовности ЗИП

Коэффициент готовности изделия при бесконечной системе ЗИП ($K_{гЗИПinf}$) – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности системы ЗИП ($K_{гЗИП}$) - отражает долю времени, в течение которого система ЗИП (в общем случае МТО) находится в работоспособном состоянии, то есть все заявки на запасные части удовлетворяются.



Эксплуатационные коэффициенты

Коэффициент эксплуатационной готовности

является произведением $K_{ЭГ} \approx K_{ПП} \times K_{z_{\infty}} \times K_{z_{ЗИП}}$

Эксплуатационно-экономическая эффективность - мера совершенства конструкции комплекса (образца) и системы его технической эксплуатации, отражающая взаимовлияние характеристик готовности и стоимости владения. Приближенная формула для расчета:

$$K_{ЭЭЭ} \approx \frac{K_{ЭГ}}{C_{ЭГ}} \approx \frac{K_{ПП} \times K_{z_{\infty}} \times K_{z_{ЗИП}}}{C_{общ.}}$$



Постановка задачи

Необходимо обеспечить требуемое значение **Коэффициента Эксплуатационно-экономической эффективности** при условии минимальных затрат:

$$K_{эээ} \approx \frac{\uparrow K_{ЭГ}}{\downarrow C_{ЭГ}} \approx \frac{\uparrow K_{ПП} \times \uparrow K_{г\infty} \times \uparrow K_{гЗИП}}{\downarrow C_{общ.}}$$

В качестве подзадачи рассмотрим оптимизацию объема оборотного фонда запчастей (по условию минимальной стоимости), для обеспечения заданного коэффициента $K_{гЗИП}$ для группового запаса со смешанной моделью пополнения запасов.

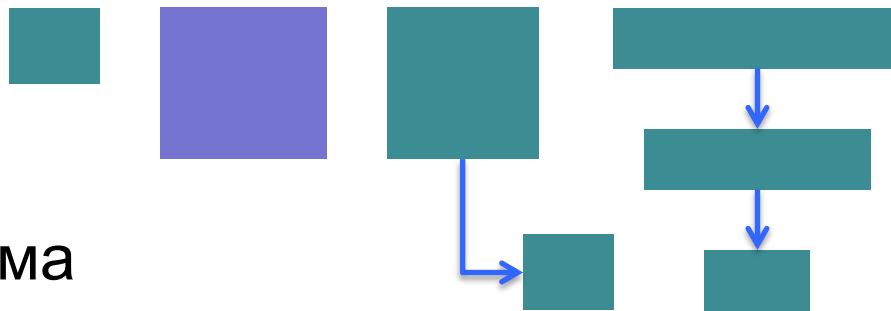
$$\sum_{i=1}^M A_i \cdot C_i \rightarrow \min, \quad K_{гЗИП}(A_{нач.-непл}) \geq \gamma$$

A – Количество изделий одного типа
C – Цена одного изделия



Системы МТО. Стратегии пополнения запасов.

- **Одиночный запас**
- **Групповой запас**
- Двухуровневая система
- Многоуровневая система



- Стратегия периодического пополнения
- Стратегия периодического пополнения с экстренными доставками
- Стратегия непрерывного пополнения
- Стратегия пополнения по уровню
- **Смешанная стратегия пополнения**



Исходные данные для расчета значения $K_{г\text{зип}}$

- Данные о составе Изделия
- Данные о надежности СЧ (интенсивности отказов)
- Данные о среднем времени поставки (ремонта) СЧ
- Данные о начальном объеме запасных частей каждого типа
- Данные о модели (стратегии) управления запасами

Для решения задачи оптимизации дополнительно необходима информация о ценах составных частей.



Источники исходных данных

- Логистическая структура
- Данные о надежности
- Период пополнения склада МТО
- Модель управления запасами
- Средняя время и цены поставки изделий

**PDM
Система**

Состав изделия

**ERP, MRP,
MRP-2**

Информация о
поставках, ценах,
и т.д.

**Система
АЛП**

**Система
мониторинга
эксплуатации**

Фактические данные о надежности и
эксплуатации

**Оптимизация
оборотного
фонда
запчастей**



Источники исходных данных

Состав изделия

 **PDM Step Suite**

- Логистическая структура
- Данные о надежности
- Период пополнения склада МТО
- Модель управления запасами
- Средняя время и цены поставки изделий

 ERP, MRP,
MRP-2

Информация о поставках, ценах, и т.д.

 **LSA Suite**
Logistic Support Analysis

 Оптимизация
оборотного
фонда
запчастей

 **ILS Suite**

Фактические данные о надежности и эксплуатации



Формулы расчета $K_{г\text{зип}}$

$$K_{г\text{зип}} = \prod_{i=1}^M K_{г\text{зип}i}$$

M - Число видов (номенклатура) запасных частей)

$K_{г\text{зип}}$ - Коэффициент готовности системы МТО для изделий i -го типа ($i = 1 \dots M$).

$$K_{г\text{зип}i} = 1 - \frac{(m_i \lambda_i T_i)^{A_i+1}}{(A_i+1)! \sum_{j=1}^{A_i+1} \frac{(m_i \lambda_i T_i)^j}{j!}}$$

Для ремонтпригодных изделий

T_i - Среднее время от момента формирования заявки на пополнение запасов до момента доставки

$$K_{г\text{зип}i} = \frac{1}{m_i \lambda_i T_i} \sum_{j=0}^{A_i} \left(1 - \sum_{k=0}^j \frac{(m_i \lambda_i T_i)^k}{k!} e^{-m_i \lambda_i T_i} \right)$$

Для неремонтпригодных изделий

T_i - Периодичность пополнения запасов

m_i - Количество эксплуатируемых изделий i -го типа,

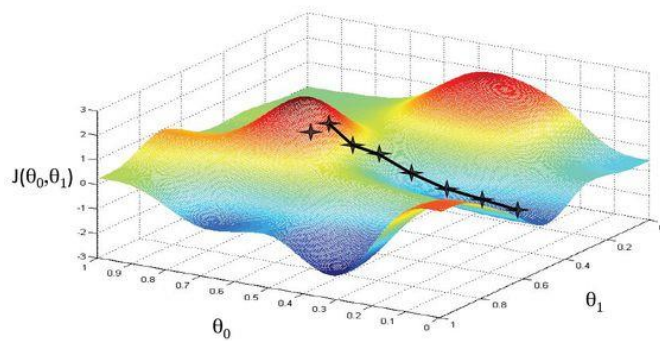
λ_i - Интенсивность отказов изделий i -го типа, выраженная в календ. времени

A_i - Начальный запас изделий i -го типа



Алгоритм расчета

Для расчета $K_{г\text{ЗИП}}$ применен метод градиентного спуска по многомерному пространству, описываемому вектором показателей надежности всей номенклатуры изделий.



Дополнительным ограничением при выборе направления следующей итерации является условие максимального увеличения логарифма $K_{г\text{ЗИП}}$ при минимальном увеличении Стоимости нового вектора номенклатуры изделий:

$$\frac{\ln(K_{г\text{ЗИП}(j)}(A + 1)) - \ln(K_{г\text{ЗИП}(j)}(A))}{\Delta C_j} \Rightarrow MAX$$



Узкие места (Bottle necks)

Вычисление неполной гамма-функции: $1 - \sum_{k=0}^j \frac{(m_i \lambda_i T_i)^k}{k!} e^{-m_i \lambda_i T_i}$

$$1 - \sum_{k=0}^j \frac{(x)^k}{k!} e^{-x} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{\ln \frac{(x)^k}{k!} e^{-x}} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{(\ln(x^k) + \ln(e^{-x}) - \ln(k))} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{(k \ln(x) - \ln(k!) - x)} =$$

$$1 - \sum_{k=0}^j e^{(k \ln(x) - \ln(k!) - x)} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{(k \ln(x) - \sum_0^k \ln(k) - x)}$$

```
Result := 0;  
PartResult := 0;  
for k := 0 to j do  
begin  
  if k <> 0 then  
    PartResult := PartResult + Ln(x) - Ln(k);  
    Result := Result + Exp(PartResult - x);  
end;  
Result := 1 - Result;
```

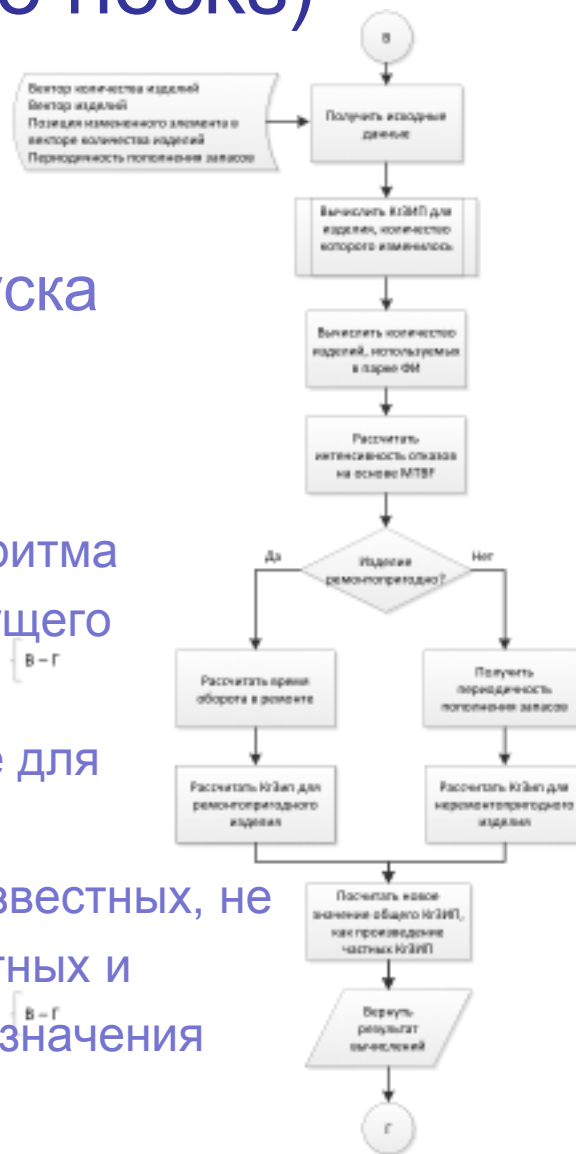



Узкие места (Bottle necks)

Полный пересчет вектора частных $K_{г\text{ZIP}}$ на каждом шаге градиентного спуска

Решение:

- Всегда хранить вектор предыдущего шага алгоритма
- В функцию расчета передавать вектор предыдущего шага и позицию изменившегося элемента В – Г
- Вместо полного пересчета рассчитать значение для изменившегося элемента
- Вычислить новое значение общего на основе известных, не изменившихся с прошлого шага значений частных и одного нового, вычисленного на данном шаге значения В – Г

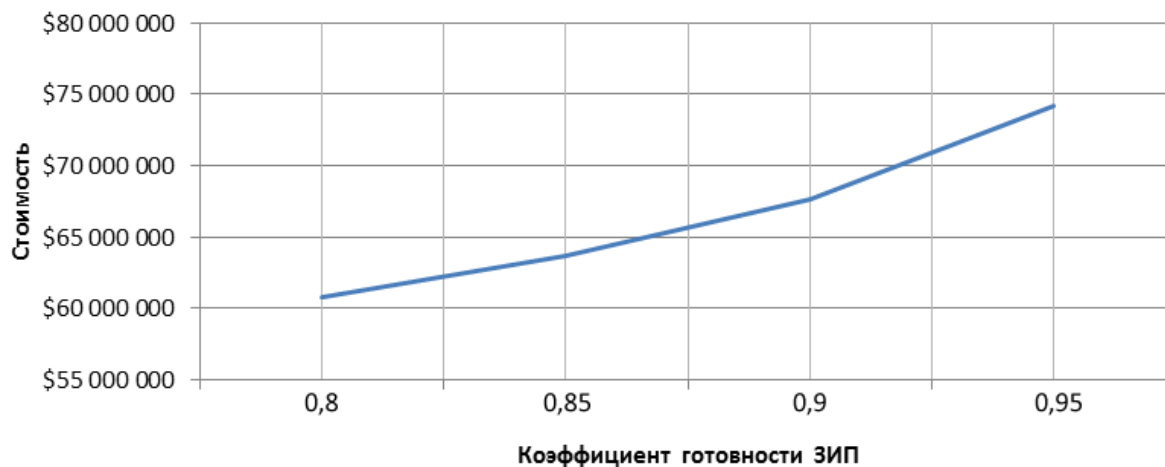




Пример расчета

№ пп	Обозначение	Наименование	Используется в системах	Кол-во в системе	Ремонто-пригодное	Наработка на отказ/внеш.съем. л.ч.	Исходные данные о надежности	Среднее кол-во отказов в год	Необходимый запас при КЗИП=0,8	Необходимый запас при КЗИП=0,9	Необходимый запас при КЗИП=0,95	Цена за 1 шт	Стоимость запаса (1 год, КЗИП=0,8)	Стоимость запаса (1 год, КЗИП=0,9)	Стоимость запаса (1 год, КЗИП=0,95)
1		ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ	72	2	Да	44526	Фактический MTBF	1,8	1	1	2				
2		Приемооперативный ответчика многофункционального (ОМФ)	34	1	Нет	4500	MTBUR	8,0	13	14	14				
3		Вычислитель системы самолетоуправления	34	2	Да	8005,2	Фактический MTBF	8,1	4	5	5				
4		УСТАНОВКА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА	21	2	Да	8839	Назначенный MTBF	8,1	4	5	5				
5		Усилитель мощности СВ связи	23	2	Да	8800	MTBUR	8,2	5	5	6				
6		Приемооперативный системы спутниковой связи	23	1	Нет	200000	MTBUR	0,2	1	1	2				
7		Привод-генератор	24	2	Да	44539	Фактический MTBF	1,8	2	2	2				
8		Пульт управления полетом	22	1	Да	5588	Фактический MTBF	8,3	4	5	5				
9		Вычислитель T2CA8	34	1	Да	7421	Фактический MTBF	4,9	4	4	4				
10		Дисплей основной	31	5	Да	28787	Назначенный MTBF	8,3	4	5	5				
11		Установка кресла бортоводника	25	3	Да	3150	MTBUR	34,3	13	14	14				
12		Вспомогательная силовая установка (ВСУ)	49	1	Да	9800	MTBUR	3,8	3	4	4				
13		Вычислитель воздушных данных	34	3	Да	2473,87	Фактический MTBF	43,7	15	16	17				
14		Вычислитель инерциальный	34	3	Да	33384,3	Фактический MTBF	3,2	3	3	4				
15		Механизм паростановки стабилизатора	27	1	Да	1131,3	Фактический MTBF	3,2	3	3	4				
16		Аварийный генеродвигатель	24	1	Да	22283	Фактический MTBF	1,8	2	2	2				
17		Боковая ручка левая	27	1	Да	5585	Фактический MTBF	8,3	4	5	5				
18		Блок Продвинутого Контроля Вибрации Двигателя	77	1	Да	8300	MTBUR	5,7	4	5	5				
19		Принтер полноформатный	31	1	Да	18000	MTBUR	2,0	2	3	3				

Зависимость стоимости запаса от коэффициента готовности ЗИП





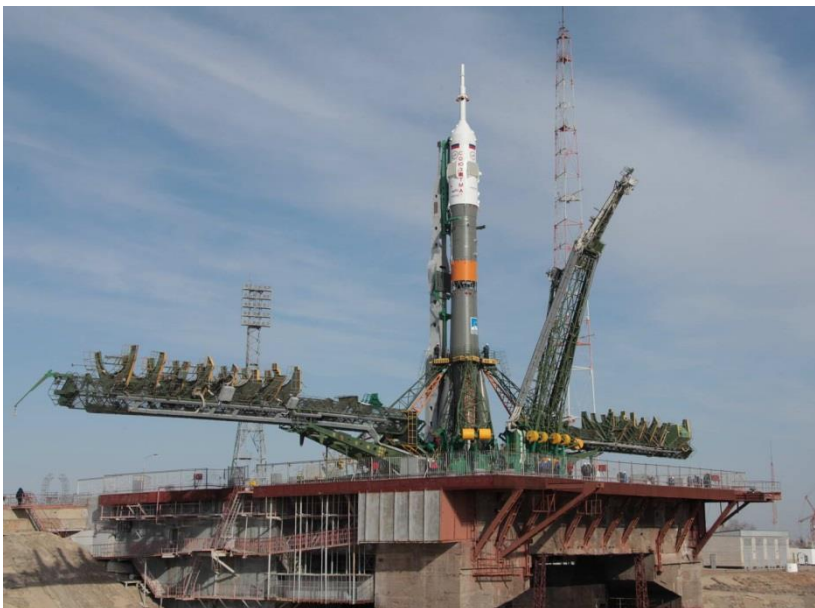
Анализ результатов

- Для обеспечения приемлемых показателей при использовании смешанной модели пополнения запасов и системы групповых запасов для отдельных образцов авиационной техники при заданных условиях показателей эксплуатации может быть необходима достаточно широкая номенклатура запасных частей
- Стоимость оборотного фонда запчастей по результатам расчета для парка из 20 изделий за год при нормальном сценарии использования, может быть сопоставима с каталожной стоимостью нового изделия.
- Эксплуатационно-экономическая эффективность и обоснованность затрат на оборотные фонды, обеспечивающие высокий $K_{г\text{ЗИП}}$ напрямую зависят от показателей $K_{\text{ПП}}$, $K_{г\infty}$ и затрат на них, а так же, возможности влияния на них в конкретной ситуации. Так как именно вместе с этими показателями $K_{г\text{ЗИП}}$ и его стоимость влияют на коэффициент эксплуатационной готовности и эксплуатационно-экономическую эффективность, как парка ВС, так и отдельных бортов.



Перспективы применения в космической отрасли

- Стартовые комплексы
- Многоходовые космические корабли (ППТС, ПТК-НП)





Направления исследований

- Реализация методик расчета оборотных фондов для стратегий периодического пополнения с экстренными доставками и пополнения запасов по уровню.
- Разработка алгоритмов расчета величины оборотных фондов для многоуровневых систем управления запасами.
- Разработка методов и алгоритмов расчета потребностей в запасных частях для изделий, у которых время между отказами является случайной величиной с распределением, отличным от экспоненциального.
- Подробное исследование и сравнение результатов представленного алгоритма расчета оборотных фондов с результатами альтернативных программных продуктов для расчета и формирования оборотных фондов (АСОНИКА-К-РЭС, ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП и другие).
- Более глубокое исследование влияния $K_{г\text{ЗИП}}$ на $K_{эээ}$ в различных условиях.



Литература

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Г.Н. Черкесов «Оценка надежности систем с учетом ЗИП», СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 480с.
3. Craig C. Sherbrooke “Optimal inventory modeling of systems Multi-Echelon Techniques. Second Edition”, Kluwer Academic Publishers Group, 2004
4. Шура-Бура А.Э., Топольский М.В, «Методы организации расчета и оптимизации комплектов запасных элементов сложных технических систем»
5. Е.В. Судов, А.И. Левин, А.Н. Петров, А.В. Петров, Д.Н. Бороздин «Анализ логистической поддержки. Теория и практика», М.: ООО Издательство «Информ-Бюро», 2014. – 260с.
6. ГОСТ Р 53392-2009. Интегрированная логистическая поддержка. Анализ логистической поддержки, М.:Стандартинформ, 2010.



***Спасибо за внимание!
Вопросы?***

Карасев Вадим Олегович

karasev@cals.ru

www.cals.ru