

Модель и методика оптимизации объема оборотного фонда запасных частей, обеспечивающего заданные показатели готовности парка воздушных судов

Краткая справка

Данная статья посвящена решению задачи определения объема оборотного фонда запасных частей, обеспечивающего заданные показатели готовности воздушных судов, при минимизации затрат на создание такого фонда. Для решения указанной задачи разработана математическая модель, описывающая задачу как оптимизационную, и разработано программное обеспечение для численного расчета. Приведены примеры расчетов.

Введение

Обеспечение высокого уровня готовности парка воздушных судов за счет сокращения времени их вынужденных простоев является основной задачей инженерно-технической службы любой авиакомпании. Простои воздушных судов (ВС) могут быть обусловлены выполнением планового технического обслуживания (ТО), непланового ТО (устранением неисправностей), а также являться следствием отсутствия необходимых для выполнения ТОиР запасных частей.

При априорной оценке уровня готовности парка ВС, различные причины простоев учитываются в частных показателях готовности (каждый из которых отражает ту или иную причину простоев), с использованием которых, в свою очередь, рассчитывается уровень готовности в целом. Рассмотрим эти показатели готовности более подробно:

Согласно [1] **Коэффициент готовности** – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Как правило, при вычислении данного показателя не учитываются простои, связанные с ожиданием необходимых запчастей, длительность которых может быть сравнима со временем самого ТО. Для устранения этого

недостатка в отечественной учебной литературе ([2]) дополнительно вводятся следующие коэффициенты:

§ **Коэффициент готовности изделия при бесконечной системе ЗИП** ($K_{г\infty}$) - определение этого показателя совпадает с определением коэффициента готовности (далее используется термин « $K_{г}$ при бесконечном объеме запасов»);

§ **Коэффициент готовности системы ЗИП** ($K_{г\text{ЗИП}}$) - отражает долю времени, в течение которого система ЗИП находится в работоспособном состоянии, то есть все заявки на запасные части удовлетворяются, т.е. данный коэффициент позволяет оценить долю простоев изделия в ожидании запасных частей (далее вместо термина «система ЗИП» используется термин «система материально-технического снабжения (МТО)»).

В современных нормативных документах также введен показатель «коэффициент эксплуатационной готовности», который наилучшим образом характеризует уровень готовности комплекса «воздушное судно – система технической эксплуатации» и учитывает все виды простоев: связанные как с выполнением планового и непланового ТО, так и с ожиданием необходимых запчастей. Приближенную формулу для расчета коэффициента эксплуатационной готовности можно представить как произведение трех показателей:

$$K_{эг} \approx K_{ПП} \times K_{г\infty} \times K_{г\text{ЗИП}}, \quad (1)$$

где

$K_{ПП}$ - коэффициент планируемого применения (отражает долю времени, в течение которого ВС не должно находиться на плановом ТО);

$K_{г\infty}$ - коэффициент готовности ВС при бесконечной системе МТО (бесконечном объеме запасов);

$K_{г\text{ЗИП}}$ - коэффициент готовности системы МТО.

Для обобщенной оценки эффективности пары «изделие- система технической эксплуатации» может быть использован **коэффициент эксплуатационно-экономической эффективности**.

Эксплуатационно-экономическая эффективность - мера совершенства конструкции комплекса (образца) и системы его технической

эксплуатации, отражающая взаимовлияние характеристик готовности и стоимости владения.

Приближенную формулу для расчета $K_{эээ}$ можно представить в следующем виде:

$$K_{эээ} \approx \frac{K_{эг}}{C_{эг}} \approx \frac{K_{пп} \times K_{г\infty} \times K_{гзипп}}{C_{общ.}}, \quad (2)$$

где

$K_{пп}$ - коэффициент планируемого применения (отражает долю времени, в течение которого ВС не должно находиться на плановом ТО);

$K_{г\infty}$ - коэффициент готовности ВС при бесконечной системе ЗИП (бесконечном объеме запасов);

$K_{гзипп}$ - коэффициент готовности системы МТО.

$C_{общ.}$ - общие затраты на обеспечение заданного $K_{эг}$. Составляющими частями общих затрат являются затраты на обеспечение заданных $K_{пп}$, $K_{г\infty}$ и $K_{гзипп}$;

Таким образом, $K_{эээ}$ – это отношение коэффициента эксплуатационной готовности к величине затрат на обеспечение технической эксплуатации.

Далее более подробно будет рассмотрена задача оптимизации одной из составляющих приведенной выше формулы: $\frac{K_{гзипп}}{C_{зипп}}$, т.е. обеспечение необходимого $K_{гзипп}$ при минимальном $C_{зипп}$.

Теоретические основы для решения задачи оптимизации объема оборотного фонда запасных частей

Одним из условий обеспечения заданного уровня готовности изделия является поддержание оптимального объема оборотного фонда запасных частей. При этом особый интерес представляет установление зависимости между достигаемым значением K_g (в данном случае - $K_{гзипп}$) и объемом фонда, т.е. его стоимостью.

Исходными данными для расчета значения $K_{г\text{зип}}$ являются:

- § данные о составе ВС,
- § 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.

Теоретические основы оптимизации объема запасов достаточно подробно рассмотрены в [2],[3],[4],[5]. Так, в [5] подробно рассмотрены вопросы расчета коэффициента готовности системы МТО. В соответствии с приведенной в [5] методикой $K_{г\text{зип}}$ рассчитывается как произведение коэффициентов готовности для каждого типа изделий:

$$K_{г\text{зип}} = \prod_{i=1}^M K_{г\text{зип}_i}, \quad (3)$$

где

M - число видов (номенклатура) запасных частей),

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

Расчетные формулы для оценки коэффициента готовности системы МТО для изделий i -го типа $K_{г\text{зип}_i}$ зависят от принятой для данного типа изделий модели управления запасами. Параметром любой модели управления запасами является начальный объем запасов $A_{\text{нач.-непл}} = (A_1, \dots, A_M)$ (A_i - величина начального запаса изделий i -го типа, $i = 1..M$).

Существует множество вариантов организации системы МТО. Среди них можно выделить следующие типовые случаи:

- § **одиночный запас (О)** – предназначен для восстановления одного образца изделия и размещается вблизи места его эксплуатации
- § **групповой запас (Г)** – обслуживает несколько образцов изделия, эксплуатируемых в одном месте или территориально распределённых на незначительное расстояние, так что время

доставки запасных частей к каждому из образцов остается приемлемым;

§ двухуровневая система управления запасами (-2У) – на первом (нижнем) уровне размещаются комплекты одиночного запаса (О), на втором (верхнем) уровне находятся групповые запасы, пополняемые из «условно неиссякаемого внешнего источника» (далее **НИП**). Одиночные запасы могут пополняться либо из за счет групповых запасов либо из внешнего источника .

§ многоуровневая система управления запасами (МУ) – является развитием двухуровневой системы.

При этом, на каждом уровне могут быть использованы следующие стратегии пополнения запасов:

§ стратегия Периодического пополнения– запасы восстанавливаются до начального уровня через фиксированные, заранее заданные промежутки времени

§ стратегия Периодического пополнения с экстренными доставками - запасы восстанавливаются до начального уровня через фиксированные, заранее заданные промежутки времени, кроме того могут проводиться экстренные доставки по определенному признаку при возникновении особых событий

§ стратегия Непрерывного пополнения – после каждого уменьшения уровня запасов формируется заявка на пополнение

§ стратегия Пополнения по уровню – заявка на пополнение запасов формируется при уменьшении количества запасных частей заданного типа до заданного уровня.

Рассмотрим более подробно систему групповых запасов со смешанной стратегией пополнения запасов:

§ периодическое пополнение запасов для неремонтопригодных изделий

§ непрерывное пополнение для ремонтпригодных изделий.

С теми или иными оговорками, именно эта модель используется в большинстве российских авиакомпаний.

Модель с непрерывным пополнением запасов. Эта модель подразумевает, что при отказе установленного на ВС изделия восстановление

производится путем замены отказавшего изделия на работоспособное из оборотного фонда, после чего сразу же формируется заявка на пополнение комплекта. Модель чаще всего применяется для ремонтпригодных изделий в ситуации, когда у эксплуатирующей организации есть возможность сразу же отправлять неисправные изделия в ремонт и получать их обратно (исправными) через известное среднее время ремонта.

Для этой модели формула расчета коэффициента готовности системы МТО для изделий i -го типа ($Kz_{зип_i}$) выглядит следующим образом [2]:

$$Kz_{зип_i} = 1 - \frac{(m_i I_i T_i)^{A_i+1}}{(A_i+1)! \sum_{j=1}^{A_i+1} \frac{(m_i I_i T_i)^j}{j!}}, \quad (4)$$

где

m_i - количество эксплуатируемых изделий i -го типа,

I_i - интенсивность отказов изделий i -го типа, выраженная в календарном времени,

T_i - среднее время от момента формирования заявки на пополнение запасов до момента доставки, то есть среднее время ремонта (для ремонтируемых изделий) или среднее время поставки (для неремонтируемых изделий),

A_i - начальный запас изделий i -го типа.

Модель с периодическим пополнением запасов. Эта модель подразумевает, что пополнение запасов производится через фиксированные промежутки времени. При этом пополнение осуществляется до начального (A_i) уровня. Данная модель применяется в случаях, когда парк техники эксплуатируется в удаленном регионе, и транспортировка запасных частей осуществляется через заданные периоды времени (например, транспортный самолет осуществляет перевозки только раз в полгода).

Для этой модели формула расчета $Kz_{зип_i}$ выглядит следующим образом [2]:

$$Kz_{зип_i} = \frac{1}{m_i I_i T_i} \sum_{j=0}^{A_i} \left(1 - \sum_{k=0}^j \frac{(m_i I_i T_i)^k}{k!} e^{-m_i I_i T_i} \right), \quad (5)$$

где

T_i - периодичность пополнения запасов.

Приведенные методики оценки уровня готовности можно использовать для расчета величины начальных запасов при заданных требованиях к готовности (обратная задача).

Для ее решения коэффициент готовности системы МТО запишем как функцию от величины начальных запасов $A_{нач.-непл} = (A_1, \dots, A_M)$. Предположим, что требуется обеспечить значение коэффициента эксплуатационной готовности не менее m , то есть:

$$K_{ЭГ} \approx K_{ПП} \times K_{Z_\infty} \times K_{Z_{ПП}}(A_{нач.-непл}) \geq m, \quad (6)$$

Предположив, что коэффициент планируемого применения $K_{ПП}$ и коэффициент готовности при бесконечном объеме запасов K_{Z_∞} известны, это выражение можно записать в следующем виде:

$$K_{Z_{ПП}}(A_{нач.-непл}) \geq \frac{m}{K_{ПП} \times K_{Z_\infty}} = g, \quad (7)$$

То есть требуется сформировать такой начальный запас, чтобы обеспечить значение коэффициента готовности системы МТО не меньше, чем известная величина g . Поскольку эта задача имеет бесконечное число решений, так как обеспечить данный уровень готовности можно бесконечной комбинацией достаточно больших объемов запасов, в качестве дополнительного условия примем, что начальный запас должен иметь минимальную стоимость приобретения. Тогда задачу определения количества начальных запасов можно представить как оптимизационную:

$$\sum_{i=1}^M A_i \cdot C_i \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$K_{Z_{ПП}}(A_{нач.-непл}) \geq g,$$

где

C_i - стоимость изделия i -го типа.

Эта задача решается с использованием метода покоординатного спуска и состоит из следующих шагов:

Шаг 0. Устанавливается начальный вектор параметров $A_{нач.-непл}^{(0)}$, в котором запасы изделий всех типов равны нулю: $A_{нач.-непл}^{(0)} = (0, \dots, 0)$. Рассчитывается величина $K_{Z_{ПП}}(A_{нач.-непл}^{(0)})$.

Шаг $i+1$. На $i+1$ шаге рассматриваются вектора $A_{нач.-непл}^{(i)(+j)}$, полученные путем увеличения величины запасов j -го типа на единицу. Количество таких векторов будет равно количеству типов изделий M .

Для каждого j -го типа рассчитывается значение:

$$\Delta N_j = \frac{\ln Kz_{зип}(A_{нач.-непл}^{(i)(+j)}) - \ln Kz_{зип}(A_{нач.-непл}^{(i)})}{C_j}, \quad (9)$$

Значение вектора $A_{нач.-непл}^{(i+1)}$ устанавливается равным значению вектора $A_{нач.-непл}^{(i)(+j)}$ с таким индексом j , для которого величина ΔN_j максимальна.

После этого выполняется проверка условия $Kz_{зип}(A_{нач.-непл}^{(i+1)}) \geq g$. Если это условие выполняется, искомый вектор равен $A_{нач.-непл}^{(i+1)}$ и алгоритм прекращает работу. В противном случае осуществляется переход на шаг $i+2$.

Реализация алгоритма расчета оборотного фонда

Алгоритм расчета $Kz_{зип}$ для группового запаса со смешанной моделью пополнения запасов после оптимизации может быть представлен в виде следующей блок-схемы (рисунок 1). Наиболее ресурсоемким шагом данного алгоритма является расчет отдельных $Kz_{зип}$ для изделий (3). Во первых, на данном шаге присутствует несколько возведений в степень и вычисление факториала достаточно больших чисел. Во вторых, при использовании классического метода покоординатного спуска «в лоб», без оптимизации, необходимо на каждом шаге заново вычислять все частные значения $Kz_{зип}$, что еще более усугубляет проблемы производительности данного алгоритма. В чистом виде оптимизация $Kz_{зип}$ по условию достаточности с помощью данного алгоритма заняла около 12 часов на современной рабочей станции, что является абсолютно неприемлемым.

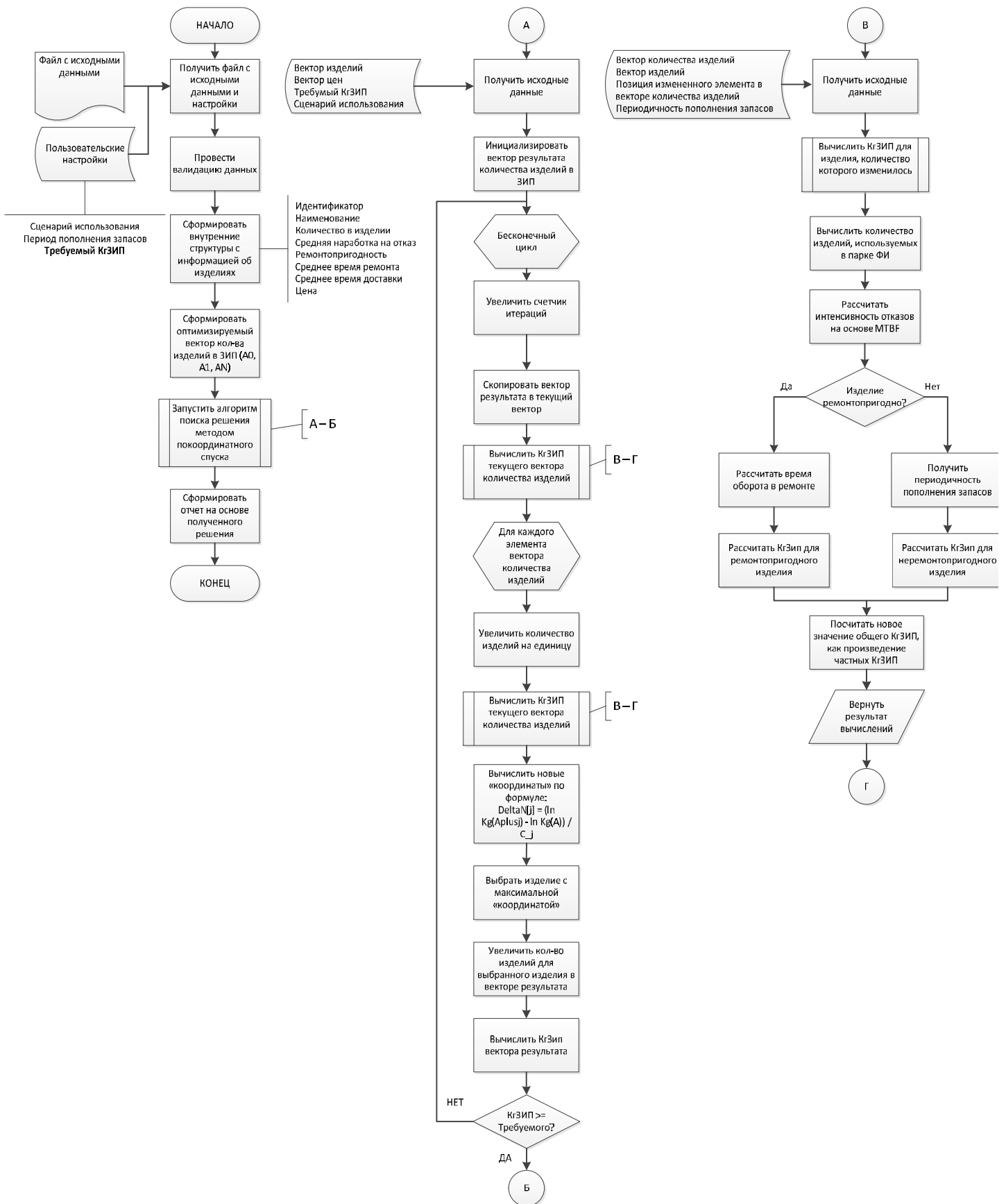


Рисунок 1 - Алгоритм расчета KгЗип

Однако, быстродействие алгоритма удалось значительно увеличить, применив два несложных метода оптимизации.

Во первых, если обратиться к формулам, то можно заметить, что одним из самых «тяжелых» этапов вычисления является вычисления неполной гамма-функции [2]:

$$1 - \sum_{k=0}^j \frac{(m_i I_i T_i)^k}{k!} e^{-m_i I_i T_i} \quad (10)$$

Для упрощения расчёта примем $m_i I_i T_i$ за “x” и обратимся к общеизвестной формуле $a = e^{\ln a}$:

$$1 - \sum_{k=0}^j \frac{(x)^k}{k!} e^{-x} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{\frac{\ln(x)^k}{k!} e^{-x}} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{(\ln(x^k) + \ln(e^{-x}) - \ln(k))} = 1 - \sum_{k=0}^j e^{(k \ln(x) - \ln(k!) - x)} \quad (11)$$

Учитывая, что сумма логарифмов равна логарифму произведения можно записать:

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

С использованием циклов формулу 10 можно записать в следующем виде (рисунок 2)

```
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;
```

Рисунок 2 - Цикл расчета значения неполной гамма-функции

С помощью приведенных выше преобразований удалось значительно снизить сложность исходного алгоритма расчета частных $K_{z_{шт}}$.

Однако данная оптимизация явно недостаточна, т.к. все равно на каждом шаге алгоритма по координатного спуска вычисляются частные $K_{z_{шт}}$ для каждого элемента в оптимизируемом векторе количества изделий. Чтобы избавиться от этой проблемы достаточно незначительно модифицировать алгоритм:

- § добавить функцию сохранения вектор всех частных значений $K_{z_{шт}}$ предыдущего шага алгоритма;

- § в функцию расчета значения общего $Kz_{зип}$ текущего шага алгоритма в качестве дополнительных параметров передавать вектор значений частных $Kz_{зип}$ предыдущего шага алгоритма и изделие, количество которых было увеличено на данном шаге алгоритма;
- § вместо полного пересчета всех частных $Kz_{зип}$, выполнить расчет только для изделий, количество которых изменилось;
- § вычислить новое значение общего $Kz_{зип}$ на основе известных, не изменившихся с прошлого шага значений частных $Kz_{зип}$ и одного нового, вычисленного на данном шаге значения.

После оптимизации алгоритма скорость расчета объема запасов для обеспечения требуемого $Kz_{зип}$ увеличилась в разы, и расчет стал занимать вполне приемлемые несколько минут.

Практический расчет объема запасов, необходимого для обеспечения заданного уровня готовности

В предыдущих разделах были рассмотрены актуальность данной задачи, её теоретические основы, и возможная реализация алгоритма решения. Логичным продолжением всего выше сказанного является практическое применение алгоритма.

Как уже было отмечено выше, исходными данными для данной задачи являются:

- § данные о составе ВС,
- § данные о надежности СЧ (интенсивности отказов),
- § данные о среднем времени поставки (ремонта) СЧ,

Возникает вопрос, где взять данные, необходимые для расчета и оптимизации состава запасов?

Необходимые данные могут отсутствовать, существовать в виде первичных бумажных документов или храниться в разных слабо интегрированных информационных системах предприятия.

Удобным вариантом представления исходных данных является БД АЛП [6], сформированная специализированным программным средством.

Для приведенного ниже расчета были использованы данные из БД АЛП одного из предприятий российской авиационной промышленности, сформированная с использованием программного комплекса LSS.

Расчеты произведены для сценария эксплуатации, указанного в таблице 1:

Количество воздушных судов	20
Наработка одного воздушного судна за год	1800 часов
Продолжительность вылета	2,5 часа
Количество полетов в день	2 полета
Период восполнения запасов	12 месяцев

Таблица 1 - Сценарий эксплуатации парка ФИ

Было выполнено четыре расчета для $K_{г\text{зип}} = 0,8$, $K_{г\text{зип}} = 0,85$, $K_{г\text{зип}} = 0,9$, $K_{г\text{зип}} = 0,95$.

Результатом расчета оптимального по цене и достаточного для обеспечения заданного $K_{г\text{зип}}$ является отчет вида, представленного на рисунке 3. В полном отчете представлено более 800 наименований различных составных частей, вошедших в оборотный фонд запчастей, необходимый для обеспечения заданного $K_{г\text{зип}}$.

№ п/п	Обозначение	Наименование	Кол-во в год	Единица измерения	Результат расчета	Код запчасти по каталогу	Исходные данные	Средняя стоимость	Необходимый запас при $K_{г\text{зип}}=0,8$	Необходимый запас при $K_{г\text{зип}}=0,85$	Необходимый запас при $K_{г\text{зип}}=0,9$	Необходимый запас при $K_{г\text{зип}}=0,95$	Цена за 1 шт	Стоимость запаса (1 год, $K_{г\text{зип}}=0,8$)	Стоимость запаса (1 год, $K_{г\text{зип}}=0,85$)	Стоимость запаса (1 год, $K_{г\text{зип}}=0,9$)	Стоимость запаса (1 год, $K_{г\text{зип}}=0,95$)
1		ТАКТИЧЕСКИЙ СЕРВООУСТРОЙСТВО	32	шт	38	44529	Фабричный МТФ	1,6	1	1	2						
2		Привод датчика скорости	3,6	шт	4	1825	МТФ	2,0	15	14	14						
3		Выключатель магнитный выключатель	3,6	шт	3,6	10933	Фабричный МТФ	0,1	4	3	3						
4		УПАКОВКА СЕРВИСНАЯ	27	шт	28	8839	Наименование МТФ	0,1	8	7	7						
5		Толкатель магнитный	35	шт	34	1805	МТФ	0,3	5	5	5						
6		Привод датчика скорости	0,2	шт	0,2	20400	МТФ	0,2	1	1	1						
7		Толкатель магнитный	2,4	шт	2,4	44529	Фабричный МТФ	1,6	2	2	2						
8		Толкатель магнитный	2,4	шт	2,4	1888	Фабричный МТФ	0,8	4	3	3						
9		Выключатель ГСМ	3,6	шт	3,6	1421	Фабричный МТФ	4,8	4	4	4						
10		Датчик скорости	0,1	шт	0,1	24787	Наименование МТФ	0,3	4	3	3						
11		Устройство датчика скорости	35	шт	36	2180	МТФ	14,1	15	14	14						
12		Выключатель магнитный	4,2	шт	3,6	1805	МТФ	0,3	2	4	4						
13		Выключатель магнитный	3,6	шт	3,6	24787	Фабричный МТФ	43,7	15	16	17						
14		Выключатель магнитный	3,6	шт	3,6	31845	Фабричный МТФ	2,3	3	3	4						
15		Выключатель магнитный	27	шт	2,4	11118	Фабричный МТФ	2,3	3	3	4						
16		Выключатель магнитный	3,6	шт	3,6	32081	Фабричный МТФ	0,8	2	3	2						
17		Выключатель магнитный	27	шт	2,4	2463	Фабричный МТФ	0,3	4	3	3						
18		Резистор	17	шт	18	188	МТФ	2,1	8	3	3						
19		Привод датчика скорости	3,6	шт	3,6	4900	МТФ	3,0	3	3	3						

Рисунок 3 – Фрагмент результатов расчета объема запасов

На основе результатов анализа был построен график, наглядно демонстрирующий удорожание оборотного фонда при увеличении требований к $K_{г\text{зип}}$ (рисунок 4).

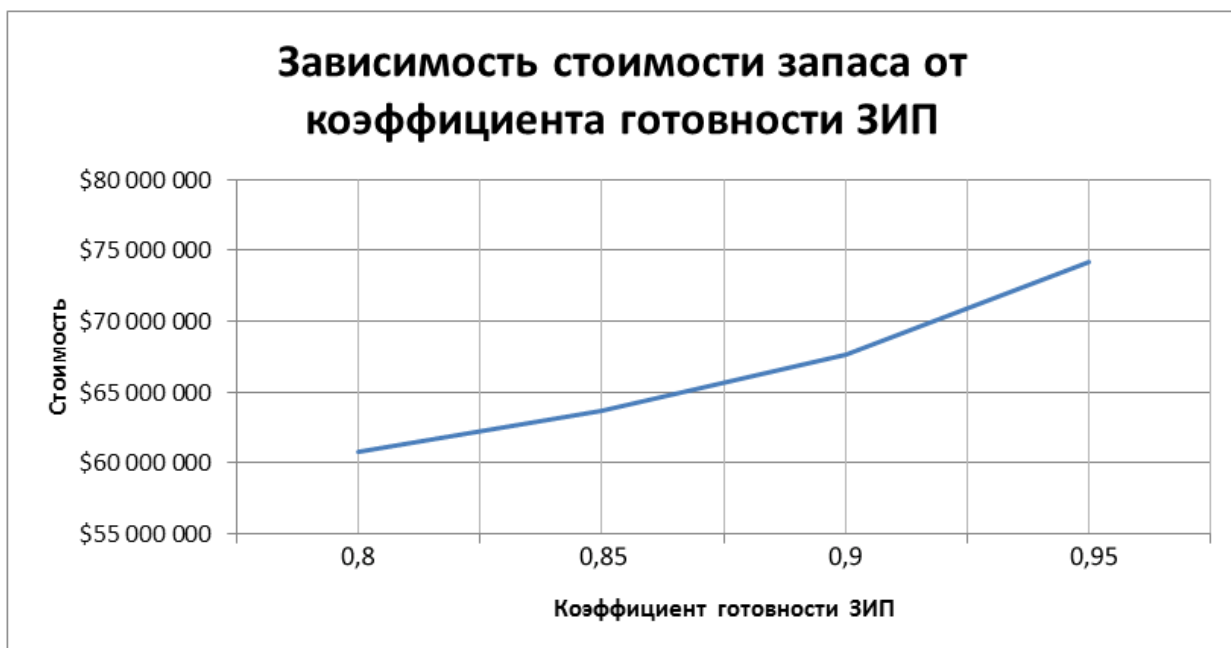


Рисунок 4 - Зависимость стоимости запаса от $K_{г\text{ЗИП}}$

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения приемлемых показателей $K_{г\text{ЗИП}}$ 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.
2. Стоимость оборотного фонда запчастей по результатам расчета (рисунок 4) для парка из 20 самолетов при сценарии использования, описанном в таблице 1, может быть сопоставима с каталожной стоимостью нового самолета.
3. 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.

Направления исследований

Дальнейшими направлениями развития рассмотренных в статье вопросов может быть:

1. Реализация методик расчета оборотных фондов для стратегий периодического пополнения с экстренными доставками и пополнения запасов по уровню.
2. Разработка алгоритмов расчета величины оборотных фондов для многоуровневых систем управления запасами.
3. Разработка методов и алгоритмов расчета потребностей в запасных частях для изделий, у которых время между отказами является случайной величиной с распределением, отличным от экспоненциального.
4. 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).
5. Более глубокое исследование влияния $K_{г\text{зип}}$ на $K_{эээ}$ в различных условиях.

Выводы

В данной статье были рассмотрены теоретические основы формирования и оптимизации оборотных фондов, их формализация, возможные реализации, конкретный пример расчета объема оборотного фонда запасных частей для изделий гражданской авиационной техники. Показано, как применение предложенной методики позволяет авиакомпании получить значительное конкурентное преимущество: сократить издержки и окупить вложенные в исследования и разработку ПО инвестиции.

Список литературы

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.