

УДК 656.062.2 : 519.87

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ АЭРОПОРТОВОЙ СЕТИ

© 2023 И.В. Кольцов, В.А. Романенко

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 22.05.2023

Решается задача оптимального проектирования системы обеспечения запасными частями для систем обработки багажа группы аэропортов. Предполагается, что аэропорты, входящие в группу, будут оснащены багажными системами одного производителя, снабжающего их запасными частями на стадии эксплуатации. Один из аэропортов группы будет выполнять функции пассажирского пересадочного узла (хаба) для хабообразующей авиакомпании, предполагающей организовать массовые трансферные перевозки между аэропортами группы. Предлагается создание эшелонированной системы обеспечения запасными частями, предусматривающей наличие складов на уровнях производителя, узлового аэропорта и остальных (периферийных) аэропортов, и использование комбинированной стратегии поставок запасных частей, предполагающей периодические поставки со склада производителя на склады аэропортов, оперативные поставки со склада узлового на склады периферийных аэропортов и, при возникновении дефицита, экстренные поставки на склад узлового аэропорта. Целью решения задачи является определение объема производства запчастей оптимального по критерию минимума затрат на производство, хранение и пополнение запаса. Приведены результаты модельных примеров, свидетельствующие о правомерности рассмотренной постановки задачи и эффективности предложенной системы обеспечения запчастями.

Ключевые слова: Система обеспечения запасными частями; оптимизация; узловой аэропорт; хабообразующая авиакомпания; система обработки багажа.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-50-56

EDN: KJBCVQ

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрена задача оптимального проектирования системы обеспечения запасными частями (ЗЧ) производственных подразделений аэропортов, занимающихся эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) систем обработки багажа (СОБ). Основным поставщиком ЗЧ является предприятие – производитель и системный интегратор оборудования СОБ. Потребители ЗЧ – специализированные службы аэропортов, располагающие складами для хранения запаса ЗЧ и ремонтными органами (РО). Рассматривается группа аэропортов, оснащаемых СОБ одного производителя. Один из аэропортов группы предполагается узловым, то есть выполняющим функции пересадочного узла (хаба) для пассажиров, перевозимых между другими («периферийными») аэропортами группы. Перевозки между аэропортами группы через хаб выполняет хабообразующая авиакомпания,

которая координирует свое расписание таким образом, чтобы обеспечить пассажирам удобную пересадку в хабе [1]. На этапе предэскизного проектирования СОБ необходимо располагать расчетными моделями, позволяющими решать задачи оптимизации структуры и параметров как самих СОБ, так и систем обеспечения их ЗЧ. Предполагая, что технико-экономические параметры СОБ заданы, поставим задачу формирования сравнительно простой модели для предварительных «быстрых» оценок оптимальных объемов производства ЗЧ, выбора схем снабжения ими потребителей, затрат на производство и снабжение ЗЧ.

Обзор работ по теории снабжения ЗЧ, актуальный на начало XXI века, приводится в [2]. В самой работе делается акцент на применении методологии теории массового обслуживания при построении стохастических моделей систем снабжения запчастями. Подробно рассмотрены методики расчета многоуровневых (в основном двухуровневых) систем управления запасами восстанавливаемых ЗЧ, в том числе с экстренными поставками. Среди таких методик так называемая «METRIC» – методика эшелонированного управления восстанавливаемыми запчастями в двухуровневой системе [3,4], на нижнем уровне которой («базе») пред-

Романенко Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте.

E-mail: vla_rom@mail.ru

Кольцов Иван Владимирович, старший преподаватель кафедры организации и управления перевозками на транспорте. E-mail: koltsov.iv@ssau.ru

полагается поддержание нормативного запаса S в соответствии со стратегией восполнения «запрос-заказ» ($S-1, S$), ограниченные ремонтные возможности и составной пуассоновский входной спрос. Горизонтальный обмен между базами отсутствует. В верхнем звене («депо») все детали ремонтируемы, спрос составной (логарифмический) пуассоновский, поддержание запаса по схеме «двух уровней» (s, S). В дальнейшем методика METRIC была модифицирована применительно к структурированным изделиям при простом пуассоновском спросе [5,6]. В работах [4,7] предложена методика управления запасными частями, предполагающая принятие в режиме реального времени решения, на какую базу отправить очередное отремонтированное изделие из депо. Позже методика METRIC была распространена на двухэшелонную систему с экстренными поставками на базы из депо или извне системы, на трехуровневую систему с полностью восстанавливаемыми изделиями, а также децентрализованную систему [2]. В [2] упомянуты также приближенные модели для двухуровневых систем со стратегиями восполнения, отличающимися от стратегий ($S-1, S$) на базах и (s, S) в депо, принятых в семействе моделей METRIC [6,7]. Обстоятельному анализу результатов зарубежных исследований в области теории управления запасами ЗЧ, достигнутых к 2020 году, с привлечением материала около 150 работ посвящена статья [8]. Среди пробелов в исследованиях указанной области авторы отмечают недостаточное внимание, уделяемое системам снабжения с возможностью экстренных поставок. Число работ, посвященных системам снабжения запчастями аэропортов, невелико. Из работ отечественных авторов следует отметить [9,10], где решается задача минимизации затрат на доставку ЗЧ для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах. Из зарубежных работ интерес представляет [11], в которой на базе модели Марковской многоканальной СМО с неограниченным ожиданием и методики «METRIC» эшелонированного управления восстанавливаемыми запчастями в двухуровневой системе разработаны стратегия снабжения авиакомпаний запасными частями для воздушных судов из единого центра и модель определения оптимального расположения такого центра.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Предлагается организовать эшелонированную систему обеспечения ЗЧ со складами на трех уровнях [2]: верхнем – склад производителя («депо верхнего уровня», ДВУ), среднем – склад с ремонтными возможностями узлового аэропорта («депо нижнего уровня», ДНУ), нижнем – склады с ремонтными возможностя-

ми периферийных аэропортов («базы»). Для описания структуры системы обеспечения ЗЧ группы в составе H аэропортов введены следующие обозначения: h – индекс склада аэропорта, $h = 1, 2, \dots, H$ (где $h = 1$ – хаб, $h = 2, 3, \dots, H$ – периферийные аэропорты); i – индекс типа компонентов СОБ и, одновременно, типа ЗЧ, требующихся для восстановления указанных компонентов, $i = 1, 2, \dots, I$; λ_{hi} – интенсивность потока отказов компонентов СОБ типа i в аэропорту h (интенсивность спроса на ЗЧ i на складе аэропорта h).

Потоки отказов предполагаются стационарными пуассоновскими. Используется комбинированная стратегия поставок ЗЧ, предполагающая следующие поставки:

1) плановое производство и периодические поставки ЗЧ из ДВУ в ДНУ и на базы – стратегия с постоянным объемом заказа и восполнением через фиксированные промежутки времени q . Доставка ЗЧ экономичными наземными видами транспорта;

2) оперативные поставки ЗЧ из ДНУ на базы. Стратегия предусматривает доставку как минимум одной единицы ЗЧ необходимого типа на склад периферийного аэропорта в случае достижения нулевого запаса со склада хаба ближайшим регулярным авиарейсом хабообразующей авиакомпании (при наличии запаса ЗЧ необходимого типа на складе хаба). Предполагается, что оперативные поставки из ДВУ в ДНУ отсутствуют по причине возможного отсутствия рейсов хабообразующей авиакомпании в аэропорт пункта расположения ДВУ;

3) экстренное сверхплановое производство (или приобретение у конкурентов) и поставка ЗЧ в ДНУ при отсутствии необходимых ЗЧ как на базе, так и в ДНУ. Поставка сопряжена с существенными затратами времени и необходимостью производства при значительно более высокой себестоимости (или приобретения по цене, значительно превышающей себестоимость при плановом производстве) [2]. Введено допущение о том, что создаваемый в хабе запас достаточен для того, чтобы исключить необходимость экстренных поставок в периферийные аэропорты.

ПОСТАНОВКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

В качестве показателя эффективности системы обеспечения ЗЧ принята сумма затрат c_{Σ} на производство, хранение и пополнение ЗЧ подразделений ТОиР СОБ группы аэропортов, включающая следующие слагаемые: затраты на плановый выпуск ЗЧ; затраты на периодическую поставку ЗЧ в ДНУ и на базы; затраты на хранение ЗЧ в ДВУ, ДНУ и на базах; затраты на оперативную поставку ЗЧ на базы и на экстрен-

ную поставку ЗЧ в ДНУ. Сумма c_Σ , включающая слагаемые в перечисленном выше порядке, определяется согласно выражению:

$$\begin{aligned}
 c_\Sigma = & \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H s_{hi} c_i^B + \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H m_i s_{hi} c_h^\Pi + \\
 & + \frac{\theta}{2} c_{h=0}^X \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H m_i s_{hi} + \theta \sum_{i=1}^I \sum_{h=2}^H m_i \bar{y}_{hi} c_h^X + \\
 & + \theta c_{h=1}^X \sum_{i=1}^I m_i \bar{y}'_{h=1,i} + \sum_{i=1}^I \sum_{h=2}^H m_i \bar{v}_{hi} c_h^O + \\
 & + \sum_{i=1}^I (c_i^C \bar{v}_{h=1,i} + m_i \bar{v}_{h=1,i} c_{h=1}^O),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где s_{hi} – число ЗЧ типа i в одной периодической поставке на склад h ; c_i^B – затраты на плановый выпуск единицы ЗЧ типа i ; m_i – масса брутто единицы ЗЧ типа i ; c_h^Π – стоимость периодической поставки единицы массы брутто ЗЧ на склад h наземным транспортом; c_h^X – стоимость хранения в течение единицы времени единицы массы брутто груза на складе h ; c_h^O – стоимость оперативной поставки самолетом единицы массы брутто ЗЧ из ДНУ на h -ю базу ($h = 2, 3, \dots, H$) или экстренной ее поставки в ДНУ ($h = 1$) со склада производителя, либо его конкурента; c_i^C – затраты на сверхплановый выпуск единицы ЗЧ типа i или на приобретение ее у другого производителя; \bar{y}_{hi} – средний за период θ запас ЗЧ типа i на складе h ; $\bar{y}'_{h=1,i}$ – скорректированный с учетом оперативных поставок средний запас ЗЧ типа i в ДНУ; \bar{v}_{hi} – среднее число ЗЧ типа i , оперативно поставленных на h -ю базу ($h = 2, 3, \dots, H$) из ДНУ за период q ; $\bar{v}_{h=1,i}$ – среднее число ЗЧ типа i , экстренно поставленных в ДНУ за период θ .

Для вывода выражений, позволяющих рассчитывать величины \bar{y}_{hi} и \bar{v}_{hi} , необходимо рассмотреть однопродуктовую модель системы управления запасами с единственным источником отказов, простейшим потоком отказов интенсивностью λ , единственным складом ЗЧ. Пусть восполнение запаса ЗЧ выполняется как периодически, так и оперативно. Периодически через промежутки времени фиксированной продолжительности θ запас ЗЧ на складе пополняется на фиксированное число элементов s . Предполагается, что если в результате очередного отказа запас исчерпывается, то непосредственно после отказа делается заказ на опера-

тивную поставку одной единицы ЗЧ, который немедленно удовлетворяется. Таким образом, склад всегда располагает как минимум одной единицей ЗЧ. Величина \bar{y} среднего за период θ запаса на складе с использованием численных методов интегрирования может быть приближенно определена как

$$\bar{y} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \bar{y}(t) dt, \tag{2}$$

где $\bar{y}(t)$ – средний запас к моменту $t \in [0, \theta)$. Получим формулы для среднего запаса $\bar{y}(t)$ и среднего за период q числа \bar{v} ЗЧ, оперативно поставляемых на склад. Обозначим $x(t)$, $y(t)$ и $v(t)$, соответственно, число отказов, запас на складе и число оперативно поставленных ЗЧ к моменту $t \in [0, \theta)$. Легко видеть, что для принятой стратегии, сочетающей периодические и оперативные поставки, связь между величинами $y(t)$, $v(t)$ и $x(t)$ может быть представлена таблицей 1.

В формализованном виде связь между величинами $y(t)$, $v(t)$ и $x(t)$ может быть представлена следующими соотношениями:

$$y(t) = \begin{cases} s - x(t), & 0 \leq x(t) \leq s - 1, \\ 1, & s \leq x(t), \end{cases} \tag{3}$$

$$v(t) = \begin{cases} 0, & x(t) < s, \\ x(t) - s + 1, & s \leq x(t). \end{cases} \tag{4}$$

Учтем, что для стационарного пуассоновского потока с интенсивностью λ вероятность $P_x(t)$ наступления x отказов за время t подчиняется закону Пуассона:

$$P_x(t) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}. \tag{5}$$

Тогда, согласно выражению (3), имеем:

$$\begin{aligned}
 \bar{y}(t) = & \sum_{x=0}^{s-1} (s - x) P_x(t) + \sum_{x=s}^{\infty} P_x(t) = \\
 = & \sum_{x=0}^{s-1} (s - x) P_x(t) + 1 - \sum_{x=0}^{s-1} P_x(t) = \\
 = & 1 + \sum_{x=0}^{s-1} (s - x - 1) P_x(t).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Выражения (2), (5), (6) позволяют приближенно определять \bar{y} по заданным λ , s и θ .

Таблица 1. Связь между параметрами системы управления запасами

$x(t)$	0	1	2	...	$s - 1$	s	$s + 1$	$s + 2$...
$y(t)$	s	$s - 1$	$s - 2$...	1	1	1	1	...
$v(t)$	0	0	0	...	0	1	2	3	...

Так как по определению $\bar{v} \equiv \bar{v}(t = \theta) = \bar{v}(\theta)$, из выражения (4) получаем:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \bar{v}(\theta) = \sum_{x=s}^{\infty} (x - s + 1)P_x(\theta) = \\ &= \sum_{x=s}^{\infty} xP_x(\theta) + (1-s)\sum_{x=s}^{\infty} P_x(\theta). \end{aligned} \quad (7)$$

Чтобы избавиться от сумм с бесконечным числом слагаемых в формуле (7), используем известные формулы сумм членов бесконечных рядов [12]:

$$\sum_{x=0}^{\infty} \frac{a^x}{x!} = e^a, \quad \sum_{x=0}^{\infty} x \frac{a^x}{x!} = ae^a, \quad a \in \mathbf{R}.$$

После подстановки (5) в (7) и проведения необходимых преобразований получим расчетную формулу для \bar{v} :

$$\begin{aligned} \bar{v} &= e^{-\lambda\theta} \sum_{x=s}^{\infty} x \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} + e^{-\lambda\theta} (1-s) \sum_{x=s}^{\infty} \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} = \\ &= e^{-\lambda\theta} \left(\sum_{x=0}^{\infty} x \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} - \sum_{x=0}^{s-1} x \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} \right) + \\ &+ (1-s)e^{-\lambda\theta} \left(\sum_{x=0}^{\infty} \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} - \sum_{x=0}^{s-1} \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} \right) = \\ &= \lambda\theta - e^{-\lambda\theta} \sum_{x=0}^{s-1} x \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} + (1-s) \left(1 - e^{-\lambda\theta} \sum_{x=0}^{s-1} \frac{(\lambda\theta)^x}{x!} \right) = \\ &= \lambda\theta + 1 - s - e^{-\lambda\theta} \sum_{x=0}^{s-1} (x+1-s) \frac{(\lambda\theta)^x}{x!}. \end{aligned}$$

Используем полученные выражения для определения величин \bar{y}_{hi} и \bar{v}_{hi} , $h = 2, 3, \dots, H$, в модели эшелонированной системы обеспечения ЗЧ. При переходе к введенным ранее обозначениям эти выражения принимают вид:

$$\bar{y}_{hi} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \left(1 + \sum_{x=0}^{s_{hi}-1} (s_{hi} - x - 1) \frac{(\lambda_{hi}t)^x}{x!} e^{-\lambda_{hi}t} \right) dt, \quad (8)$$

$$\bar{v}_{hi} = 1 + \lambda_{hi}\theta - s_{hi} - e^{-\lambda_{hi}\theta} \sum_{x=0}^{s_{hi}-1} (1+x-s_{hi}) \frac{\lambda_{hi}\theta^x}{x!}. \quad (9)$$

Скорректированная с учетом оперативных поставок на базы величина $\bar{y}'_{h=1,i}$ среднего запаса ЗЧ типа i в ДНУ приближенно определяется по формуле (8), в которой вместо $s_{h=1,i}$ используется значение $s'_{h=1,i}$, полученное в результате коррекции $s_{h=1,i}$:

$$s'_{h=1,i} = s_{h=1,i} - \sum_{h=2}^H \bar{v}_{hi}, \quad i = 1, \dots, I. \quad (10)$$

Если величина $s'_{h=1,i}$ не является целым числом, то применяется следующий приближенный прием: подсчитываются величины скорректированного среднего запаса для $[s'_{h=1,i}]$ и $[s'_{h=1,i}] + 1$, где $[\cdot]$ – целая часть числа, и проводится линейная интерполяция.

Поскольку сверхплановые ЗЧ экстренно поставляются в ДНУ с целью компенсировать там дефицит, то среднее число $\bar{v}_{h=1,i}$ ЗЧ типа i , экстренно поставленных в ДНУ за период q , может быть определено по формуле (9), в которой вместо $s_{h=1,i}$ используется скорректированное по формуле (10) значение $s'_{h=1,i}$.

Предполагается, что стоимость поставки c_h^d , $d \in \{ "П", "О" \}$ определяется в первую очередь транспортными тарифами, которые зависят от вида транспорта, дальности l_h^d перевозки и массы m_h^d перевозимого груза. Эта зависимость может быть аппроксимирована степенной функцией двух аргументов:

$$c_h^d = (\alpha_1^d \cdot l_h^d + \alpha_0^d)(m_h^d)^{(\beta_1^d \cdot l_h^d + \beta_0^d)}, \quad d \in \{ "П", "О" \},$$

где $\alpha_0^d, \alpha_1^d, \beta_0^d, \beta_1^d$ – коэффициенты, зависящие от того, является ли поставка периодической или оперативной (либо экстренной), а следовательно – от вида транспорта, определенные методами регрессионного анализа по данным Интернет-ресурсов транспортных предприятий. Расстояние перевозки и масса перевозимого груза также зависят от вида поставки. В рамках периодической поставки из ДНУ на h -ю базу перевозятся ЗЧ различных типов общей массой $m_h^P = \sum_{i=1}^I s_{hi} m_i$. В случае оперативной

(или экстренной) поставки предполагается, что перевозятся отдельные ЗЧ.

Затраты $c_{\Sigma 0}^X$ на хранение ЗЧ в ДВУ определены в предположении равномерной поставки на склад выпущенных по плану ЗЧ, периодического вывоза всех выпущенных по плану ЗЧ через промежутки времени θ , немедленного экстренного вывоза без необходимости хранения на складе всех выпущенных вне плана ЗЧ.

Другие стоимостные и массовые величины из выражения (1) либо задаются, либо определяются из очевидных соображений.

Вводится следующее ограничение на нижний уровень технической надежности компонентов СОБ, который должен поддерживаться системой обеспечения ЗЧ:

$$K_{hi}^{\Gamma} \geq K_{hi}^{\Gamma \min}, \quad h = 1, \dots, H, \quad i = 1, \dots, I, \quad (11)$$

где K_{hi}^{Γ} – стационарный коэффициент готовности компонента i -го типа в h -м аэропорту, $K_{hi}^{\Gamma \min}$ – заданное минимально допустимое значение K_{hi}^{Γ} . Величина K_{hi}^{Γ} определяется с использованием среднего времени T_{hi}^P ремонта компонента и среднего времени T_{hi}^A непроизводительного простоя компонента в ожидании ремонта, связанного с возможным дефицитом ЗЧ в момент отказа и необходимостью доставки ЗЧ (а возможно, и изготовления или приобретения) для ремонта:

МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

$$K_{hi}^{\Gamma} = \frac{1}{\lambda_i(T_i^P + T_{hi}^D) + 1}.$$

Среднее время T_{hi}^D непроизводительного простоя по причине отсутствия ЗЧ i -го типа в h -м аэропорту определяется как средневзвешенные затраты времени на ликвидацию дефицита путем периодических, оперативных или экстренных поставок. Для простейшего потока отказов, комбинированной стратегии поставок и введенных допущений получены следующие выражения для оценки T_{hi}^D , которые будут различаться для случаев узлового и периферийных аэропортов:

$$T_{hi}^D = \left. \begin{cases} T_{hi}^{D\Delta} \bar{v}_{h=1,i}, & h=1 \\ \lambda_{h=1,i} \theta, & \\ T_{hi}^{DO} \bar{v}_{hi} (1 - e^{-\lambda_{hi} T_{hi}^{DO}}), & h=2, \dots, H \\ \lambda_{hi} \theta, & \end{cases} \right\} i=1, \dots, I$$

где T_{hi}^{DO} , $T_{hi}^{D\Delta}$ – величины среднего времени ликвидации дефицита ЗЧ i -го типа в h -м аэропорту (в случае его возникновения) путем, соответственно, оперативных и экстренных поставок. Величины T_{hi}^{DO} и $T_{hi}^{D\Delta}$ задаются. Например, случаю одного ежедневного рейса из узлового в периферийный аэропорт соответствует $T_{hi}^{DO} \approx 12$ ч.

Учитывается также ограничение на производственные возможности производителя, предполагающее, что производитель-поставщик способен произвести в течение промежутка времени q не более s_i^{\max} единиц ЗЧ типа i :

$$\sum_{h=1}^H s_{hi} \leq s_i^{\max}, \quad i=1, \dots, I. \quad (12)$$

Задача оптимизации системы обеспечения запчастями СОБ группы «хаб – периферийные аэропорты», решаемая производителем СОБ на ранних этапах проектирования такой системы, состоит в определении целых неотрицательных величин s_{hi} ($h=1, \dots, H$, $i=1, \dots, I$), минимизирующих значение целевой функции c_{Σ} при ограничениях (11) и (12).

Для оценки эффекта от использования хаба в качестве депо была решена модельная задача в описанной выше постановке для группы аэропортов в составе хаба и шести периферийных аэропортов с циклом работы системы обеспечения ЗЧ, равным одному месяцу (30 дням). Предполагалось, что аэропорты необходимо обеспечивать ЗЧ для восстановления таких составных частей багажных конвейеров, как конвейерная лента ($i=1$), металлоконструкция ($i=2$), электродвигатель ($i=3$) и редуктор ($i=4$). Величины интенсивности потоков отказов и характеристики аэропортов сведены в таблицу 2, технико-экономические параметры ЗЧ – в таблицу 3.

Считалось, что рейсы из хаба в периферийные аэропорты выполняются не реже одного раза в сутки. Среднее время ликвидации дефицита путем экстренных поставок принято равным 72 ч. Минимально допустимый стационарный коэффициент готовности принят равным достаточно высокому значению $K_{hi}^{\Gamma \min} = 0.995$ для всех $h=1, \dots, H$, $i=1, \dots, I$. Оптимальное значение целевой функции, составившее около 18.3 млн.руб., было получено в результате решения оптимизационной задачи с использованием программной надстройки «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel. Оптимальный ежемесячный объем производства и периодических поставок ЗЧ приведен в таблице 4. Периодические поставки ЗЧ в хаб, объем которых значительно превосходит объемы поставок в другие аэропорты, включают также ЗЧ, предназначенные для оперативных поставок в периферийные аэропорты.

Для сравнения была рассмотрена система, в которой хаб уже не служил депо, а, наряду с другими аэропортами, играл роль «рядовой» базы, при этом предполагались только периодические и экстренные поставки. При заданных выше исходных данных ухудшение по критерию минимума затрат c_{Σ} составило около 15%, что гово-

Таблица 2. Интенсивности потоков отказов и параметры аэропортов

h	λ_{hi} , 1/мес.				l_h^P , км	l_h^O , км	c_h^X , $\frac{\text{руб.}}{\text{кг} \cdot \text{нед.}}$
	i						
	1	2	3	4			
1	34	3	15	12	1000	900	5.0
2	8	1	3	3	2820	2000	4.0
3	18	1	7	6	1429	1150	3.0
4	13	1	5	4	2100	1630	4.0
5	21	2	8	7	1660	1320	3.0
6	50	5	35	30	1840	1360	7.0
7	19	1	8	7	2050	1800	6.0

Таблица 3. Характеристики ЗЧ

Параметр	<i>i</i>			
	1	2	3	4
m_i , кг.	15.9	19.8	12.1	8.2
c_i^B , тыс.руб.	43.0	101.1	42.8	47.4
c_i^O , тыс.руб.	214.0	505.6	213.9	237.2
T_i^P , ч.	8.4	10.0	4.7	1.8
λ_i , 1/мес.	0.26	0.02	0.13	0.11

Таблица 4. Оптимальные значения s_{hi} , шт.

<i>h</i> \ <i>i</i>	1	2	3	4
1	75	16	85	72
2	4	1	1	1
3	14	1	1	0
4	9	1	1	1
5	17	1	1	2
6	40	1	2	1
7	16	1	1	1

рит о целесообразности создания депо в хабе. Результаты решения задачи позволяют сформировать оптимальный план производства ЗЧ по типам, спрогнозировать уровни периодических, оперативных и экстренных поставок ЗЧ с распределением их по видам транспорта и производственным подразделениям аэропортов сети хабообразующей авиакомпании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная комбинированная стратегия, сочетающая периодические, оперативные и экстренные поставки запчастей для СОБ, с организацией депо в узловом аэропорту позволяет сократить затраты на производство, хранение и пополнение ЗЧ подразделений ТОиР СОБ аэропортовой сети хабообразующей авиакомпании. Область применения сформированной оптимизационной модели не ограничивается только багажными системами и может быть расширена на другие типы аэропортовой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко, В.А. Математические модели функционирования узловых аэропортов в условиях современного авиатранспортного рынка: монография / В.А. Романенко. – Самара: Изд-во «Ас Гард», 2010. – 244 с.
2. Рыжиков, Ю.И. Теория очередей и управление запасами / Ю.И. Рыжиков. СПб.: Питер, 2001. 384 с.
3. Sherbrooke C.C. Metric: A multi-echelon technique for recoverable item control // *Operations Research*. 1968. V.16. No.1. P.122–141.
4. Sherbrooke C.C. Optimal Inventory Modeling of Systems. Multi-Echelon Techniques. Springer, 2004. – 368 p.
5. Miller B.L. Dispatching from depot repair in a recoverable item inventory system: on the optimality of a heuristic rule // *Management Science*. – 1974. – V.21. – Issue 3. – P.316-325.
6. Muckstadt J.A. Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains. – Springer, 2005. – 277 p.
7. Petrovic R., Senborn A., Vujosevic M. Hierarchical Spare Parts Inventory Systems. – Amsterdam etc: Elsevier, 1986. – 296 p.
8. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review // *Sustainability*. – 2021. – V.13(5). – P.1-23. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052460>.
9. Арифуллин, И.В. Методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах / И.В. Арифуллин // *Вестник гражданских инженеров*. – 2017. – №3(62). – С.211-215. – DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-211-215
10. Арифуллин, И.В. Оптимизация технического обслуживания автомобилей (на примере аэродромных машин) с использованием основ логистических принципов доставки запасных частей / И.В. Арифуллин // *Вестник гражданских инженеров*. – 2016. №3(56). – С.218-220.
11. Rui Wang, Yicong Qin, Hui Sun. Research on Location Selection Strategy for Airlines Spare Parts Central Warehouse Based on METRIC // *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2021. V.2021. P.1-16. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4737700>.
12. Прудников, А.П. Интегралы и ряды / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1981.

OPTIMIZATION OF SPARE PARTS SUPPLY SYSTEM FOR PRODUCTION DIVISIONS OF AIRPORT NETWORK

© 2023 I.V. Koltsov, V.A. Romanenko

Samara National Research University, Samara, Russia

The problem of optimal design of the spare parts supply system for the baggage handling systems of a group of airports is solved. It is assumed that the airports belonging to the group will be equipped with baggage systems of one manufacturer, which will supply them with spare parts during the operational phase. One of the airports will function as a passenger transfer center (hub) for a hub-forming airline, which will organize mass transfer flights between the airports of the group. The proposed system will consist of a tiered system for spare parts supply, including warehouses at the manufacturer's, hub airport and other (peripheral) airports, and a combined strategy of spare parts supplies, including periodic supplies from the manufacturer's warehouse to the warehouses of airports, on-line supplies from the hub warehouse to the warehouses of peripheral airports, and, in case of deficit, on-line supplies to the hub airport's warehouse. The aim of the solution of the problem is to determine the volume of spare parts production which is optimal by the criterion of minimum costs of production, storage and stock replenishment. The results of model examples, testifying to the validity of the considered statement of the problem and efficiency of the proposed system of spare parts supply, are presented.

Keywords: Spare parts supply system; optimization; hub airport; hub-forming airline; baggage handling system.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-50-56

EDN: KJBCBQ

REFERENCES

1. Romanenko, V.A. Matematicheskie modeli funkcionirovaniya uzlovyh aeroportov v usloviyah sovremennogo aviatransportnogo rynka: monografiya / V.A. Romanenko. – Samara: Izd-vo «As Gard», 2010. – 244 s.
2. Ryzhikov, Yu.I. Teoriya ocheredey i upravlenie zapasami / Yu.I. Ryzhikov. SPb.: Piter, 2001. 384 s.
3. Sherbrooke C.C. Metric: A multi-echelon technique for recoverable item control // Operations Research. 1968. V.16. No.1. P.122–141.
4. Sherbrooke C.C. Optimal Inventory Modeling of Systems. Multi-Echelon Techniques. Springer, 2004. – 368 p.
5. Miller B.L. Dispatching from depot repair in a recoverable item inventory system: on the optimality of a heuristic rule // Management Science. – 1974. – V.21. – Issue 3. – P.316-325
6. Muckstadt J.A. Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains. – Springer, 2005. – 277 p.
7. Petrovic R., Senborn A., Vujosevic M. Hierarchical Spare Parts Inventory Systems. – Amsterdam etc: Elsevier, 1986. – 296 p.
8. Zhang S., Huang K., Yuan Y. Spare Parts Inventory Management: A Literature Review // Sustainability. – 2021. – V.13(5). – P. 1-23. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052460>.
9. Arifullin, I.V. Metodika organizacii postavok zapasnyh chastej dlya special'nyh avtomobilej, ekspluatiruyushchihsya v aeroportah / I.V. Arifullin // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2017. – № 3(62). – S.211-215. – DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-211-215
10. Arifullin, I.V. Optimizaciya tekhnicheskogo obsluzhivaniya avtomobilej (na primere aerodromnyh mashin) s ispol'zovaniem osnov logisticheskikh principov dostavki zapasnyh chastej / I.V. Arifullin // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2016. № 3(56). – S. 218-220.
11. Rui Wang, Yicong Qin, Hui Sun. Research on Location Selection Strategy for Airlines Spare Parts Central Warehouse Based on METRIC // Computational Intelligence and Neuroscience. 2021. V.2021. P.1-16. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4737700>.
12. Prudnikov, A.P. Integraly i ryady / A.P. Prudnikov, Yu.A. Brychkov, O.I. Marichev. – M.: Nauka, 1981.

Vladimir Romanenko, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transportation Management and Control.

E-mail: vla_rom@mail.ru

Ivan Koltsov, Senior Lecturer of the Department of Transportation Management and Control.

E-mail: koltsov.iv@ssau.ru