

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАПАСНЫМИ ЧАСТЯМИ АЭРОПОРТОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Романенко В.А., Скороход М.А.**

*Российская Федерация, г. Самара,  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева*

**Аннотация.** Рассматривается задача оптимизации системы обеспечения запасными частями производственных подразделений аэропортов, занимающихся эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом систем обработки багажа пассажиров, при реализации бизнес-модели авиаперевозок «ось – спицы».

**Ключевые слова:** модель «ось – спицы», поставка запасных частей, система обработки багажа, оптимизация.

При реализации модели авиаперевозок «ось – спицы», характеризующейся высокой долей стыковочных рейсов, как для хаба, так и для периферийных аэропортов особо важен процесс обеспечения запасными частями (ЗЧ) производственных подразделений, занимающихся эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) систем обработки багажа (СОБ) пассажиров. Вызванные отказами длительные простои компонентов СОБ в хабе угрожают разрушить скоординированную систему стыковочных рейсов, что приводит к массовым опозданиям пассажиров и, соответственно, росту компенсационных выплат. Необходимость обеспечения ТОиР одновременно или почти одновременно нескольких СОБ требует сравнительно простых моделей для оценок оптимальных объемов производства ЗЧ и выбора логистических схем снабжения, а также затрат на производство и снабжение.

Задачам оптимизации отдельных элементов системы обеспечения ЗЧ в промышленности и на транспорте посвящено множество работ, например [1-6]. В работе [5] в основе повышения эффективности системы управления запасами агрегатов для эксплуатации воздушных

судов лежит минимизация дефицитов запасных частей, а в [1] в качестве решения проблемы оптимизации ТОиР специализированной автомобильной техники для служб аэропорта предлагается создание общего интегрированного логистического центра по обеспечению доставки необходимых ЗЧ. В настоящей работе предлагается комбинированная логистическая схема снабжения, основанная на возможностях, присущих именно модели «ось – спицы».

С целью оптимизации системы обеспечения ЗЧ производственных подразделений аэропортов, предлагается использовать модель поставок (рисунок 1), включающую:

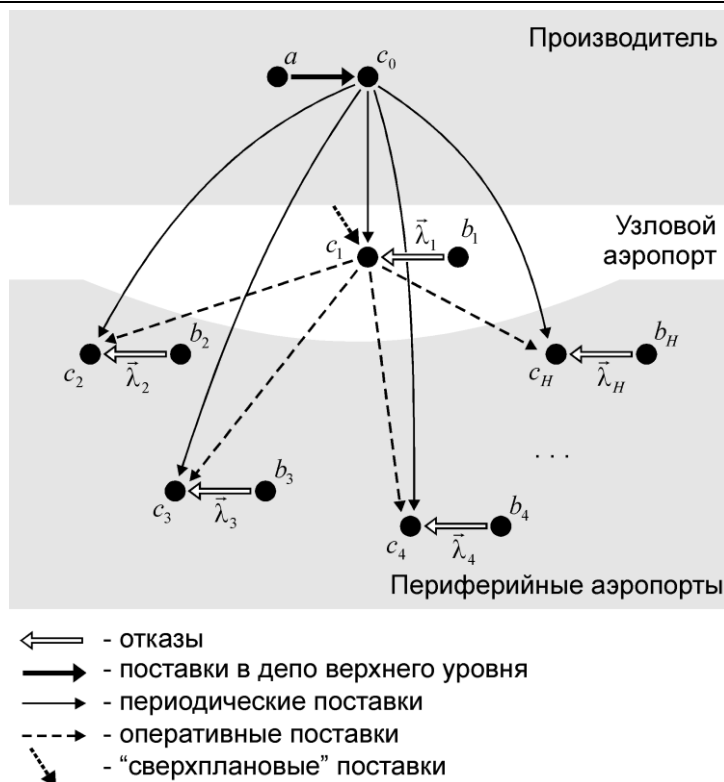
- 1) периодические поставки ЗЧ со склада поставщика в хаб и периферийные аэропорты;
- 2) оперативные поставки ЗЧ из хаба в периферийные аэропорты;
- 3) экстренное «сверхплановое» производство и поставка ЗЧ в хаб и периферийные аэропорты при отсутствии в них необходимых ЗЧ.

Структура и элементы системы управления запасами ЗЧ:

$$\{a, c_0, c_1, \dots, c_H, b_1, b_2, \dots, b_H\},$$

где  $a$  – производственные подразделения поставщика;  $c_0$  – склад поставщика («депо верхнего уровня»);  $c_1$  – склад с ремонтными возможностями аэропорта-хаба («депо нижнего уровня»);  $c_2, c_3, \dots, c_H$  – склады с ремонтными возможностями периферийных аэропортов («базы»);  $H$  – численность аэропортов группы (включая хаб);  $b_1, b_2, \dots, b_H$  – специализированные службы аэропортов («потребители»).

Будем считать, что уровень периодических поставок в хаб достаточен для обеспечения оперативных поставок в периферийные аэропорты, таким образом вероятностью экстренных поставок в периферийные аэропорты можно пренебречь.



**Рисунок 1. Комбинированная модель обеспечения ЗЧ производственных подразделений аэропортов в модели «ось-спицы».**

Задача оптимизации системы обеспечения ЗЧ в модели «ось – спицы», решаемая производителем СОБ на ранних этапах проектирования, заключается в определении величины поставок ЗЧ  $s_{hi}$  от поставщика потребителям, минимизирующих значение целевой функции  $c_{\Sigma}$ :

$$c_{\Sigma} = c_{\Sigma}^B + c_{\Sigma}^{\Pi} + c_{\Sigma 0}^X + c_{\Sigma Б}^X + c_{\Sigma 1}^X + c_{\Sigma Б}^0 + c_{\Sigma}^C,$$

где  $c_{\Sigma}^B$  – затраты на «плановый» выпуск ЗЧ,  $c_{\Sigma}^{\Pi}$  – затраты на периодическую поставку ЗЧ на склады аэропортов,  $c_{\Sigma 0}^X$  – затраты на хранение в депо верхнего уровня,  $c_{\Sigma Б}^X$  – затраты на хранение на базах,  $c_{\Sigma 1}^X$  – затраты на хранение в депо нижнего уровня,  $c_{\Sigma Б}^0$  – затраты на оперативную поставку ЗЧ на базы,  $c_{\Sigma}^C$  – затраты на оперативную поставку ЗЧ в депо нижнего уровня.

1. Затраты на «плановый» выпуск ЗЧ:

$$c_{\Sigma}^B = \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H s_{hi} c_i^B,$$

где  $c_i^B$  – затраты на «плановый» выпуск  $i$ -й ЗЧ.

2. Затраты на периодическую поставку ЗЧ на склады аэропортов:

$$c_{\Sigma}^{\Pi} = \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H m_i s_{hi} c_h^{\Pi},$$

где  $m_i$  – масса брутто ЗЧ типа  $i$ ;  $c_h^{\Pi}$  – стоимость периодической поставки единицы массы брутто груза на склад  $h$ .

В соответствии с результатами анализа материалов веб-сайтов транспортных предприятий [7] тариф следует считать зависящим от дальности перевозки ( $l_h$ ) и массы перевозимого груза ( $m_h$ ):

$$c_h^{\Pi} = c^{\Pi}(l_h, m_h).$$

3. Затраты на хранение в депо верхнего уровня:

$$c_{\Sigma 0}^X = \frac{\theta}{2} c_0^X \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H m_i s_{hi},$$

где  $\theta$  – цикл (период) работы системы управления запасами;  $c_0^X$  – стоимость хранения в течение единицы времени единицы массы брутто груза на складе поставщика.

4. Затраты на хранение на базах:

$$c_{\Sigma Б}^X = \theta \sum_{i=1}^I \sum_{h=2}^H m_i \bar{y}_{hi} c_h^X,$$

где  $c_h^X$  – стоимость хранения в течение единицы времени единицы массы брутто груза на складе  $h$ ;  $\bar{y}_{hi}$  – средний запас ЗЧ типа  $i$  на складе  $h$ , определяемый согласно следующим выражениям, полученным на основе теоретико-вероятностного подхода [8]:

$$\bar{y}_{hi} = \frac{\int_0^{\theta} \bar{y}_{hi}(t) dt}{\theta},$$

$$\bar{y}_{hi}(t) = 1 + \sum_{x=0}^{s_{hi}-1} (s_{hi} - x - 1) P_x(t), \quad h = 2, \dots, H, \quad i = 1, \dots, I, \quad (1)$$

$$P_x(t) = \frac{(\lambda_{hi} t)^x}{x!} e^{-\lambda_{hi} t},$$

где  $\lambda_{hi}$  – интенсивность потока отказов компонентов  $i$  в аэропорту  $h$ ;  $x$  – спрос, число отказов в подразделении нижнего уровня.

5. Затраты на хранение в депо нижнего уровня. Необходимо учитывать сокращение хранимого в депо запаса из-за оперативных поставок на базы; сокращение неравномерное, так как оперативные поставки

активизируются в конце периода  $\theta$ , когда исчерпываются запасы в базах.

$$c_{\Sigma 1}^X = \theta c_1^X \sum_{i=1}^I m_i \bar{y}'_{hi},$$

где  $\bar{y}'_{hi}$  – скорректированная с учетом оперативных поставок величина среднего запаса ЗЧ типа  $i$  на складе узлового аэропорта.

Величину  $\bar{y}'_{hi}$  предлагается приближенно определять по формулам (1), заменяя в них  $s_{1,i}$  значением  $s'_{1,i}$ , полученным в результате следующей коррекции:

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

где  $\bar{v}_{hi}$  – средний дефицит, или среднее число ЗЧ типа  $i$ , оперативно поставленных на базу  $h$  из депо нижнего уровня за период  $\theta$ :

$$\bar{v}_{hi} = \lambda_{hi}\theta + 1 - s_{hi} - e^{-\lambda_{hi}\theta} \sum_{x=0}^{s_{hi}-1} (x+1 - s_{hi}) \frac{(\lambda_{hi}\theta)^x}{x!}. \quad (3)$$

6. Затраты на оперативную поставку ЗЧ на базы:

$$c_{\Sigma Б}^0 = \sum_{i=1}^I \sum_{h=2}^H m_i \bar{v}_{hi} c_h^0,$$

где  $c_h^0$  – стоимость оперативной поставки единицы массы брутто груза на склад  $h$ .

7. Затраты на экстренную поставку ЗЧ в депо нижнего:

$$c_{\Sigma}^C = \sum_{i=1}^I (c_1^C \bar{v}_{1,i} + m_i \bar{v}_{1,i} c_1^0).$$

Затраты включают затраты на «сверхплановый» выпуск ЗЧ типа  $i$  (или приобретение ее у другого производителя) и оперативную доставку в хаб. Предполагается, что «сверхплановые» ЗЧ компенсируют дефицит в хабе, поэтому  $\bar{v}_{1,i}$  определяется по формуле (3), в которой вместо  $s_{1,i}$  используется скорректированное по формуле (2) значение  $s'_{1,i}$ .

Вводятся ограничения на производственные возможности поставщика и уровень технической надежности компонентов СОБ. Состав и численность элементов СОБ определяется в результате решения оптимизационной задачи с использованием разработанной авторами имитационной модели [9, 10]. Расчетный уровень надежности элементов

СОБ принят по результатам анализа материалов специальной литературы [11-16].

Предложенная комбинированная стратегия снабжения позволяет минимизировать затраты на обеспечение аэропортов ЗЧ для СОБ при приемлемом времени восстановления, поскольку централизованное оперативное снабжение позволяет сократить запасы ЗЧ в каждой базе и суммарное потребное их количество за счет возможности их перераспределения между потребителями.

### **Список литературы**

1. Арифуллин И. В. Методика организации поставок запасных частей для специальных автомобилей, эксплуатирующихся в аэропортах: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Арифуллин Илья Владимирович. – СПб., 2017. – 140 с.
2. Ванюжин А.В. Системы обеспечения производства запасными частями // Известия вузов. Машиностроение. 2006. №12. С.75-82.
3. Дорман В. Н., Баскакова Н.Т. К вопросу оптимизации затрат на ремонт металлургического оборудования // Вестник УГТУ-УПИ. Серия: Экономика и управление. 2009. № 1. С. 4-11.
4. Судак Ф.М., Воронина И.Ф., Еремин А.В., Новиков Г.В. Оптимизация затрат на управление резервом запасных частей на автосервисных предприятиях // Вести Автомобильно-дорожного института. 2019. № 2(29). С. 35-41.
5. Чепко И.Н., Богомолов Д.В., Карпенко О.Н. Управление запасами агрегатов и запасных частей для авиационной техники государственной авиации: основные проблемы и пути решения // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 30.
6. Шадрин А. И., Зырянов И.В., Гамбаль М.Ю. Оптимизация потребности запасных частей для карьерных автосамосвалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2008. № 4(36). С. 119-122.
7. Unicom Cargo. Тарифы на грузоперевозки. – URL: <https://unicomcargo.ru/tarify> (дата обращения 09.09.2022).
8. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управление запасами. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
9. Guzha E.D., Romanenko V.A., Skorokhod M.A. Simulation and histogram modeling of conveyor systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. Issue 3.
10. Romanenko V.A., Skorokhod M.A., Guzha E.D. Fuzzy control in

the simulation model of airport baggage handling systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919. Issue 4.

11. Koenig F., Found P, Kumar M., Rich N. Condition-based maintenance for major airport baggage systems // Journal of Manufacturing Technology Management. 2021. Vol. 32. No. 3. P. 722-741.

12. Koenig F., Found P., Kumar M. Improving maintenance quality in airport baggage handling operations // Total Quality Management & Business Excellence. 2019. Vol. 30. P. 35-52.

13. Дмитриева В.В., Сизин П.Е. Оценка надежности става ленточного конвейера при различных схемах резервирования роликкоопор // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №7. С.85–95.

14. Козак Т.Н. Анализ параметров надежности прибора досмотрового контроля // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 4. № 9(58). С. 49-52.

15. Конвейеры: справочник / под общ. ред. Ю. А. Пертена. – Л.; Машиностроение, 1984. – 367 с.

16. Юдаев В.В., Богданов А.В., Королев О.А. Моделирование систем физической безопасности на основе аппарата сетей Петри // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 4. С. 82-88.

## OPTIMIZATION OF THE SUPPLYING SPARES PARTS SYSTEM OF AIRPORTS ENTERPRISES

V.A. Romanenko, M.A. Skorokhod

*Samara University,  
Samara, Russian Federation*

**Abstract.** The optimization problem of the supplying spares parts system to airport production departments that operate, maintain and repair of passenger baggage handling systems in the hub-and-spoke air transportation business model is considered.

**Key words:** hub-and-spoke model, supplying spares parts, baggage handling system, optimization.