ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ АЭРОПОРТОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Романенко В.А., Скороход М.А.

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

Аннотация. Сформулированы задачи совместной оптимизации структуры и параметров технологических систем аэропортовых предприятий. Рассмотрены одни из наиболее дорогостоящих систем, применяемых при обслуживании пассажирских перевозок, - системы обработки багажа. Описаны постановки одно- и многокритериальных задач с вероятностными ограничениями. Сделаны выводы о необходимости разработки комплекса математических, в том числе, имитационных, моделей для решения поставленных задач.

Ключевые слова: аэропортовое предприятие, воздушный транспорт, технологическая система, структурно-параметрическая оптимизация, имитационная модель.

Одной из наиболее дорогостоящих и сложных технологических систем, широко используемых аэропортовыми предприятиями для наземного обслуживания пассажирских перевозок, является система обработки багажа (СОБ). Наличие высокопроизводительной СОБ представляется необходимым условием конкурентоспособности и эффективности аэропортов такой перспективной категории, как узловые аэропорты (авиатранспортные хабы). Необходимость учета стохастичности и специфики условий узлового аэропорта делают имитационное компьютерное моделирование единственным надежным методом решения задач проектирования СОБ оптимальных по критерию экономической эффективности. На этапе принятия аэропортом решения о необходимости внедрения новой или модернизации эксплуатируемой СОБ представляется крайне полезным наличие относительно простых компьютерных моделей, позволяющих решать задачи формирования «предэскизных» проектов СОБ, обладающих оптимальными в соответствии с определенным набором критериев характеристиками, оценивать целесообразность их применения в условиях конкретного хаба, определять круг предпочтительных для использования типов СОБ и их конструктивных элементов.

Для формулирования задачи оптимального проектирования СОБ вводятся следующие обозначения характеристик этой системы:

$\mathbf{\Lambda}'$ - вектор внешних факторов (сигналов), к которым относятся случайные потоки мест багажа (МБ), поступающих в СОБ;

$\mathbf{X}' = \{\mathbf{x}^o, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}'^f\}$ – вектор внутренних характеристик СОБ, таких как структура, проектные технические и технологические характеристики СОБ и ее элементов, в большинстве не являющихся случайными;

$\mathbf{x}^o, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}'^f$ - соответственно, векторы оптимизируемых, детерминированных фиксируемых и случайных фиксируемых параметров СОБ, первые два из которых включают только детерминированные величины, а третий - только стохастические;

$\mathbf{Y}'$ - вектор первичных выходных характеристик системы, к которым относятся непосредственно наблюдаемые выходные сигналы системы;

$\mathbf{y}$ - вектор вторичных выходных характеристик или выходных показателей технического уровня СОБ, характеризующих достижение системой поставленных целей и являющихся в этом смысле неслучайными;

$\mathbf{u}$ - вектор управляющих воздействий на систему со стороны человека-оператора.

С использованием введенных обозначений рассматриваемую систему правомерно представить в виде оператора $\mathbf{G}'(\cdot)$, преобразующего ее внутренние характеристики, входные и управляющие воздействия в первичные выходные характеристики:

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{G}'(\mathbf{\Lambda}', \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}'^f, \mathbf{u}). \tag{1}$$

Элементы вектора $\mathbf{Y}'$ не могут использоваться в качестве показателей технического уровня, поскольку в общем случае они являются случайными. Поэтому в роли показателей $\mathbf{y}$ используются некоторые параметры вероятностных распределений первичных характеристик $\mathbf{Y}'$. Если оценка технического уровня СОБ выполняется на основе выборки значений некоторой первичной выходной характеристики $Y \in \mathbf{Y}'$, то в качестве показателя могут быть применены: оценка математического ожидания $\bar{y} \approx M[Y]$, отдельное значение статистической функции распределения $F_Y(y)$, значение p-квантиля СВ $Y \in \mathbf{Y}'$ при заданной вероятности p.

Так, если одной из целей работы СОБ является надежное обеспечение уровня характеристики Y, не превосходящего некоторого заданного фиксированного значения $y_З$, то роль соответствующего показателя целевой надежности следует отвести вероятности $P(Y \le y_З)$ наступления случайного события, состоящего в выполнении условия $Y \le y_З$. При наличии функции распределения $F_Y(y)$ вероятность $P(Y \le y_З)$ определяется как

$$P(Y \le y_З) \equiv F_Y(y_З).$$

Если же одна из целей состоит в сокращении значений характеристики Y, вероятных на заданном уровне вероятности $p_З$, то в этом случае показателем становится значение квантиля $y^{P_З}$ случайной величины Y, определяемое обращением функции распределения как

$$y^{P_З} = F_Y^{-1}(p_З).$$

Выделим в составе вектора $\mathbf{y}$ три компонента $\mathbf{y} = (\mathbf{y}^M, \mathbf{y}^P, \mathbf{y}^Y)$, где $\mathbf{y}^M$ - математические ожидания, $\mathbf{y}^P$ - вероятности, $\mathbf{y}^Y$ - квантили:

$$\mathbf{y}^M = (\bar{y}_i = M[Y_i],\ i = 1,\dots,n^M), \qquad \mathbf{y}^P = (P(Y_j \le y_{jЗ}),\ j = 1,\dots,n^P),$$

$$\mathbf{y}^Y = (F_{Y_k}^{-1}(p_{kЗ}),\ k = 1,\dots,n^Y).$$

Будем считать, что заданы векторы $\mathbf{y}_З^P = (y_{jЗ},\ j = 1,\dots,n^P)$ и $\mathbf{y}_З^Y = (p_{kЗ},\ k = 1,\dots,n^Y)$.

Для получения значений оценок элементов вектора $\mathbf{y}$, характеризующих некоторую СОБ, необходимо располагать выборками значений случайных величин - элементов вектора $\mathbf{Y}'$, для получения которых в свою очередь необходимы выборки случайных величин, образующих векторы $\mathbf{\Lambda}'$ и $\mathbf{X}'^f$. Предположим, что мы располагаем функциями распределения этих случайных величин. Сведем эти законы соответственно в векторы $\mathbf{\Lambda}$ и $\mathbf{X}^f$.

Пусть мы располагаем моделирующим алгоритмом, позволяющим генерировать реализации СВ по заданным распределениям $\mathbf{\Lambda}$ и $\mathbf{X}^f$, имитировать работу системы (1) при заданных $\mathbf{x}^o, \mathbf{x}^f, \mathbf{u}$ и определять выходные показатели $\mathbf{y}$ (точнее, их оценки) по заданным $\mathbf{y}_З^P$ и $\mathbf{y}_З^Y$. Для моделирования логики человека-оператора, осуществляющего управление, используются алгоритмы нечеткой логики. Обозначим нечетко-логический алгоритм управления $\tilde{\mathbf{u}}$.

Будем считать, что мы располагаем двумя моделями, из которых первую условно назовем «технической», вторую - «технико-экономической». Техническую модель представим вектор-функцией $\mathbf{G}(\cdot)$, устанавливающей следующую зависимость:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{y}_З^P, \mathbf{y}_З^Y\right).$$

Технико-экономическая модель связывает внутренние характеристики СОБ, стоимостные характеристики ее элементов с величиной стоимостной характеристики СОБ С, которую следует рассматривать как затраты на внедрение и эксплуатацию СОБ в аэропорту:

$$C = f^{Cm.}\left(\mathbf{c}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f\right), \tag{2}$$

где $\mathbf{c}$ - вектор стоимостных характеристик элементов СОБ.

Однокритериальная задача проектирования состоит в определении таких характеристик СОБ $\mathbf{x}_{opt}^0$, которые доставляют экстремальное значение выбранной целевой функции, связанной со стоимостью СОБ, обеспечивая при этом производительность, достаточную для обработки потока багажа, имеющего заданные характеристики $\mathbf{\Lambda}$, с надежностью не ниже заданной. Для удобства формулировки оптимизационных задач в самом общем виде предположим, что критерий требуется минимизировать.

Таким образом, задача проектирования СОБ с оптимальными структурой и параметрами формулируется как задача поиска при заданных $\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{y}_З^P, \mathbf{y}_З^Y$ вектора $\mathbf{x}_{opt}^o$, оптимального по критерию

$$C = f^{Cm.}\left(\mathbf{c}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f\right) \xrightarrow[\mathbf{x}^o \in X^0]{} \min,$$

при вероятностных ограничениях

$$\begin{aligned} \bar{y}_i &= G_i^M\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}\right) < \bar{y}_{i з}, \quad i = 1,..., n^M, \\ P\left(Y_j \le y_{j з}\right) &= G_j^P\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, y_{j з}\right) < P_{i з}, \quad j = 1,..., n^F, \\ F_{Y_k}^{-1}\left(p_{k з}\right) &= G_k^Y\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, p_{k з}\right) < y_{k з}, \quad k = 1,..., n^P, \end{aligned} \tag{3}$$

где X^0 - пространство векторов оптимизируемых параметров, $\bar{y}_{i з}$, $P_{i з}$ $y_{k з}$ - заданные ограничения средних, вероятностей и квантильных значений, соответственно, $G_i^M(\cdot), G_j^P(\cdot), G_k^Y(\cdot)$ - элементы вектор-функции *G*, используемые для определения параметров $\bar{y}_i$, $P\left(Y_j \le y_{j з}\right)$ и $F_{Y_k}^{-1}\left(p_{k з}\right)$, соответственно.

Многокритериальная задача соответствует случаю, когда некоторые элементы вектора $\mathbf{y}$ переводятся в категорию целевых функций. Пусть представляется целесообразным не ограничивать, а минимизировать значения одной или нескольких вторичных выходных характеристик, образующих вектор $\mathbf{y}^C = \left(\mathbf{y}^{CM}, \mathbf{y}^{CP}, \mathbf{y}^{CY}\right) \in \mathbf{y}$,

где

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{CM} &= \left(\bar{y}_{i''}^C \in \mathbf{y}^M, \quad i'' = 1,..., n^{CM}\right), \\ \mathbf{y}^{CP} &= \left(P\left(Y_{j''}^C \le y_{j'' з}^C\right) \in \mathbf{y}^P, \quad j'' = 1,..., n^{CP}\right), \\ \mathbf{y}^{CY} &= \left(F_{Y_{k''}^C}^{-1}\left(p_{k'' з}^C\right) \in \mathbf{y}^Y, \quad k'' = 1,..., n^{CY}\right). \end{aligned}$$

Для задания ограничений используем векторы $\mathbf{y}^M$, $\mathbf{y}^F$ и $\mathbf{y}^P$, которые преобразуем путем исключения элементов, переводимых в разряд целевых функций, к виду, соответственно:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{SM} &= \left(\bar{y}_{i'}^S \in \mathbf{y}^M / \mathbf{y}^{CM}, \quad i' = 1,..., n^{SM}\right), \\ \mathbf{y}^{SP} &= \left(P\left(Y_{j'}^S \le y_{j' з}^S\right) \in \mathbf{y}^F / \mathbf{y}^{CP}, \quad j' = 1,..., n^{SP}\right), \\ \mathbf{y}^{SY} &= \left(F_{Y_{k'}^S}^{-1}\left(p_{k' з}^S\right) \in \mathbf{y}^Y / \mathbf{y}^{CY}, \quad k' = 1,..., n^{SY}\right). \end{aligned}$$

На элементы сформированных векторов по-прежнему остаются наложенными ограничения аналогичного (3) вида:

$$\bar{y}_{i'}^{S} = G_{i'}^{M}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}\right) < \bar{y}_{i'З}^{S}, \quad i' = 1,\ldots,n^{SM},$$

$$P\left(Y_{j'}^{S} \le y_{j'З}^{S}\right) = G_{j'}^{P}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, y_{j'З}^{S}\right) < P_{j'З}^{S}, \quad j' = 1,\ldots,n^{SP},$$

$$F_{Y_{k'}^{S}}^{-1}\left(p_{k'З}^{S}\right) = G_{k'}^{Y}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, p_{k'З}^{S}\right) < y_{k'З}^{S}, \quad k' = 1,\ldots,n^{SY}.$$

Как и в задаче с единственным критерием предполагаются заданными векторы параметров ограничений $\mathbf{y}_{З}^{SP} = \left(y_{j'З}^{S},\ j' = 1,\ldots,n^{SP}\right)$ и $\mathbf{y}_{З}^{SY} = \left(p_{k'З}^{S},\ k' = 1,\ldots,n^{SY}\right)$. Таким образом, требуется при заданных $\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{y}_{З}^{SP}, \mathbf{y}_{З}^{SY}$ найти множество $X_{П}^{0} \subset X^{0}$ Парето-оптимальных точек $\mathbf{x}_{П}^{0} \in X_{П}^{0}$ по векторному критерию (также для удобства предполагается, что ведется поиск минимумов)

$$C = f^{Cm.}\left(\mathbf{c}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f\right) \xrightarrow[\mathbf{x}^0 \in X^0]{} \min,$$

$$\left(\bar{y}_{i''}^{C} = G_{i''}^{M}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}\right) \xrightarrow[\mathbf{x}^0 \in X^0]{} \min, \quad i'' = 1,\ldots,n^{CM}\right),$$

$$\left(P\left(Y_{j''}^{C} \le y_{j''З}^{C}\right) = G_{j''}^{P}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, y_{j''З}^{C}\right) \xrightarrow[\mathbf{x}^0 \in X^0]{} \min, \quad j'' = 1,\ldots,n^{CP}\right),$$

$$\left(F_{Y_{k''}^{C}}^{-1}\left(p_{k''З}^{C}\right) = G_{k''}^{Y}\left(\mathbf{\Lambda}, \mathbf{x}^0, \mathbf{x}^f, \mathbf{X}^f, \tilde{\mathbf{u}}, p_{k''З}^{C}\right) \xrightarrow[\mathbf{x}^0 \in X^0]{} \min, \quad k'' = 1,\ldots,n^{CY}\right).$$

Решение сформулированных оптимизационных задач требует использования достаточно детальных технической и технико-экономической моделей, способных оперировать с векторами $\mathbf{X}$ и $\mathbf{c}$ довольно высокой размерности. По ряду перечисленных выше причин, элементы вектора стоимостных характеристик $\mathbf{c}$ могут характеризоваться неопределенностью, «размытостью», и поэтому их потребуется задавать в форме нечетких величин. Переход к нечеткой форме задания элементов этого вектора неизбежно повлечет за собой усложнение как технической, так технико-экономической моделей, что может сделать неприемлемыми временные затраты на решение оптимизационной задачи. Кроме того, формирование нечеткого вектора стоимостных характеристик, обладающего высокой размерностью, может потребовать больших расходов на проведение экспертного опроса, а в ряде случаев необходимая информация может оказаться просто недоступной. Чтобы избежать перечисленных трудностей откажемся от использования модели (2) в нечеткой форме при оптимизации. Сформируем упрощенную технико-экономическую модель вида

$$\tilde{C} = f^{Cm.}\left(\tilde{\mathbf{c}}^{F}, \mathbf{x}^{F}\right), \tag{4}$$

где $\tilde{\mathbf{c}}^{F}$ - сокращенный вектор нечетких стоимостных характеристик элементов СОБ, $\mathbf{x}^{F}$ - сокращенный вектор внутренних характеристик СОБ. Пусть вектор $\tilde{\mathbf{c}}^{F}$ включает меньшее число элементов по сравнению с вектором $\mathfrak{c}$, а вектор $\mathbf{x}^{F}$ меньшее число элементов, чем векторы $\mathbf{x}^{0}, \mathbf{x}^{f}$ совокупно. Будем использовать модель (4) на этапе сравнительного анализа полученной в результате проектирования СОБ с имеющимися аналогами.

Таким образом, решение задач структурно-параметрической оптимизации СОБ требует разработки трех следующих моделей СОБ: «технической», «технико-экономической» («четкой»), «технико-экономической» упрощенной («нечеткой»).

Список литературы

1. Романенко В.А., Скороход М.А. Нечеткая технико-экономическая модель системы обработки багажа аэропорта // Математические модели современных экономических процессов, методы анализа и синтеза экономических механизмов. Актуальные проблемы и перспективы менеджмента организаций в России: сб. ст. XI Всерос. науч.-практ. конф. Вып. 11 / под ред. Д. А. Новикова – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. - С. 118 - 123.

PROBLEMS OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF THE AIRPORT ENTERPRISES

V.A. Romanenko, M.A. Skorokhod

Samara National Research University,
Samara, Russian Federation

Abstract. The tasks of joint optimization of structure and parameters of technological systems of airport enterprises are formulated. The paper considers one of the most expensive systems used to service passenger transportation - baggage handling systems. Settings of single and multi-criteria tasks with probabilistic constraints are described. Conclusions are made about the necessity to develop a set of mathematical, including imitation, models for solving the tasks.

Keywords: airport enterprise, air transport, technological system, structural and parametric optimization, simulation model.