

НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФЕРНОЙ СИСТЕМЫ АВИАПЕРЕВОЗОК

В.А. Романенко

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: vla_rom@mail.ru

На основе нечетко-множественного подхода решена задача оптимизации расписания движения воздушных судов (ВС) с учетом параметров технологического графика наземного обслуживания для аэропорта, действующего в рамках трансферной системы авиаперевозок. Приведен модельный пример решения задачи.

Ключевые слова: оптимизация, нечеткие числа, узловой аэропорт.

Введение. Трансферная система пассажирских авиаперевозок включает в качестве основных элементов узловой аэропорт (хаб) и хабообразующую авиакомпанию. Для сокращения времени пребывания трансферных пассажиров в хабе его расписание строится по волновому принципу: массовые прибытия рейсов сменяются их массовыми отправлениями, между «волнами» прибытий-отправлений следуют паузы для обеспечения трансфера пассажиров между стыковочными рейсами.

Рассматривается задача оптимизации, предполагающая поиск совокупности плановых (по расписанию) моментов прилетов и вылетов ВС в пределах определенной волны, обеспечивающей максимум доходам хабообразующей авиакомпании от перевозки трансферных пассажиров, пересекающихся в хабе в течение рассматриваемой волны прилетов-вылетов. Решение задачи связано с наличием неопределенности в исходных данных. Так, выбранная в качестве критерия величина суммарных доходов зависит от величин тарифа и уровней пассажиропотока на трансферных авиасвязях, носящих неопределенный характер. Неопределенной и трудноформализуемой является степень привлекательности времени пребывания в хабе с точки зрения трансферного пассажира, влияющая на уровень пассажиропотока. Вероятностный характер носят продолжительности наземного обслуживания ВС и пассажиров, а также отклонения прилетов и вылетов ВС от расписания. Представляется целесообразным представить все неопределенные величины в единой нечеткой форме. В этом случае задача оптимизации расписания сводится к задаче нечеткого математического программирования. Учет неопределенности временных характеристик аэропортового обслуживания рейсов требует включения некоторых из них в состав оптимизируемых параметров наряду с параметрами расписания.

Постановка оптимизационной задачи. Рассмотрим отдельную волну прибытий-отправлений, в течение которой в хаб прилетают, проходят обслуживание и вылетают K ВС. Пусть перевозчик может по своему усмотрению задавать плановые моменты времени прибытия t_k^a и отправления t_k^d k -го ($k = 1, \dots, K$) ВС, а также интервал времени T_k^F от момента наступления готовности ВС к посадке пассажиров до планового времени вылета. Используем также фактические (с учетом отклонения от

расписания) нечеткие моменты времени прибытия $\tilde{t}_k^a$ и отправления $\tilde{t}_k^d$ k -го ВС.

Обозначим как ij трансферную авиасвязь, поддерживаемую двумя рейсами, первый из которых выполняет прилетающий ВС под номером $i = 1, \dots, K$, а второй – вылетающий ВС под номером $j = 1, \dots, K$. Предполагается, что экспертами для трансферных авиасвязей определены нечеткие величины тарифов $\tilde{c}_{ij}$ ($i, j = 1, \dots, K$) и емкостей авиарынка $\tilde{D}_{ij}$ ($i, j = 1, \dots, K$). Под $\tilde{D}_{ij}$ понимается максимальное число потенциальных пассажиров, имеющих потребность и возможности совершить поездку на авиасвязи ij по установленному тарифу в течение рассматриваемой волны.

Необходимо учесть, что не все пассажиры, составляющие $\tilde{D}_{ij}$, принесут доход хабообразующей авиакомпании. Так, от ее услуг, вероятно, откажутся пассажиры, которых не устраивает длительность пересадки в хабе. Также не принесут авиакомпании положительных коммерческих результатов пассажиры рейсов, отправленных с опозданием, или трансферные пассажиры, опоздавшие к посадке на ВС.

Введем величину $\tilde{d}_{ij}$, выражающую нечеткое число пассажиров, воспользовавшихся перевозкой на авиасвязи ij и при этом принесших доход авиакомпании:

$$\tilde{d}_{ij} = \tilde{D}_{ij} k_{ij}^H k_j^C k_{ij}^T \quad (i, j = 1, \dots, K),$$

где k_{ij}^H – доля пассажиров, воспользовавшихся трансферной перевозкой на авиасвязи ij , от общего числа потенциальных пассажиров этой авиасвязи; k_j^C – доля вылетов j -х ВС, выполненных без нарушения расписания, от общего числа вылетов j -х ВС за некоторый интервал времени; k_{ij}^T – доля трансферных пассажиров авиасвязи ij , своевременно прошедших предполетное обслуживание в хабе и не опоздавших к началу посадки, от общего числа трансферных пассажиров авиасвязи ij .

Учитывая зависимость введенных коэффициентов от параметров оптимизации, формулу нечеткой суммы доходов авиакомпании от перевозки трансферных пассажиров одной волны прилетов-вылетов рейсов в хабе $\tilde{C}$ запишем в виде

$$\tilde{C} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \tilde{c}_{ij} \tilde{d}_{ij} (t_i^a, t_j^d, T_j^\Gamma) \quad (i, j = 1, \dots, K). \quad (1)$$

При решении оптимизационной задачи необходимо учитывать ограничение на временной интервал между взлетно-посадочными операциями (ВПО). Для всех $m = 1, 2, \dots, (2K - 1)$ должно выполняться условие

$$\Delta t \leq (t_n^{BPO} - t_m^{BPO}) \quad (n = (m + 1), \dots, 2K), \quad (2)$$

где t_m^{BPO} – момент времени выполнения m -й ВПО. Элементы множества моментов выполнения ВПО определяются как

$$t_m^{BPO} = \begin{cases} t_i^a, & m = i, \quad i = 1, \dots, K, \\ t_j^d, & m = K + j, \quad j = 1, \dots, K. \end{cases}$$

Таким образом, рассматриваемая задача оптимизации состоит в определении переменных t_k^a , t_k^d и T_k^Γ ($k = 1, \dots, K$), обеспечивающих максимум целевой функции

$\tilde{C}$ (1) и удовлетворяющих ограничению (2).

Модельный технологический график наземного обслуживания ВС. Коэффициенты k_j^C и k_{ij}^T , используемые при расчетах целевой функции $\tilde{C}$, зависят от затрат времени пребывания ВС и трансферных пассажиров в хабе. Поэтому прежде чем перейти к описанию методики определения $\tilde{C}$, рассмотрим вопросы, связанные с технологией обслуживания перевозок в хабе. С целью упрощения технологического графика наземного обслуживания ВС, включающего несколько десятков операций, объединим все технологические операции в четыре следующие работы.

Работа 1. Обслуживание ВС и пассажиров, выполняемое по прилету.

Работа 2. Обслуживание ВС, выполняемое при отсутствии пассажиров на борту.

Работа 3. Обслуживание трансферных пассажиров в терминале, которое для k -го ВС рассматривается как совокупность работ по обслуживанию групп пассажиров, пересеживающихся с ряда прилетевших i -х ($i=1, \dots, K$) ВС на вылетающее k -е ВС.

Работа 4. Обслуживание ВС и пассажиров, выполняемое перед вылетом.

С учетом введенного группирования операций модельный технологический график принимает вид, представленный на рис. 1, где кружками обозначены события, а стрелками следующие фактические и фиктивные работы или интервалы времени:

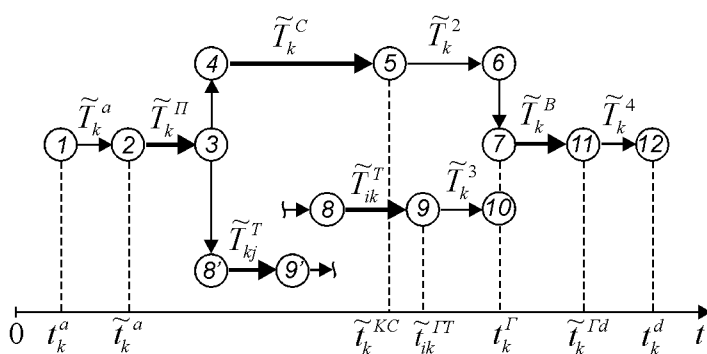


Рис. 1. Модельный технологический график обслуживания ВС

1-2 – интервал между плановым t_k^a и фактическим $\tilde{t}_k^a$ моментами времени прилета k -го ВС нечеткой продолжительностью $\tilde{T}_k^a = \tilde{t}_k^a - t_k^a$;

2-3 – работа 1 нечеткой фактической продолжительностью $\tilde{T}_k^\Pi$;

4-5 – работа 2 нечеткой фактической продолжительностью $\tilde{T}_k^C$, начинающаяся сразу по окончании работы 1 и оканчивающаяся в нечеткий момент времени $\tilde{t}_k^{KC}$;

5-6 – интервал времени простоя ВС в ожидании начала выполнения работы 4 нечеткой продолжительностью $\tilde{T}_k^2$. Фиктивная работа 5-6 имеет место в случае, если выполнение работы 2 завершается раньше наступления планового момента готовности ВС к началу выполнения работы 4 $t_k^\Gamma = t_k^d - T_k^\Gamma$, где T_k^Γ – интервал от начала выполнения работы 4 до вылета, задаваемый технологическим графиком;

7-11 – работа 4 нечеткой фактической продолжительностью $\tilde{T}_k^B$, начинающаяся при соблюдении технологического графика в момент t_k^Γ или в случае отставания от

графика по окончании работы 2. Фактическое время окончания работы 4 совпадает с фактическим временем готовности ВС к вылету $\tilde{t}_k^{Td}$;

11-12 – интервал нечеткой фактической продолжительностью $\tilde{T}_k^4$ между готовностью ВС к вылету $\tilde{t}_k^{Td}$ и плановым временем вылета t_k^d ;

8'-9' – технологические операции нечеткой продолжительностью $\tilde{T}_{kj}^T$ по обслуживанию группы трансферных пассажиров, пересеживающихся с k -го на j -й ВС ($i = 1, \dots, K$). Не входят в состав технологического графика обслуживания k -го ВС, поэтому обозначены штрихами и приводятся для справки;

8-9 – технологические операции нечеткой продолжительностью $\tilde{T}_{ik}^T$, входящие в состав работы 3 по обслуживанию группы трансферных пассажиров, пересеживающихся на k -е с i -го ВС ($i = 1, \dots, K$). Предполагается, что на k -е ВС успевают только те группы трансферных пассажиров, пересеживающихся с i -х ($i = 1, \dots, K$) ВС, для которых работа 8-9 завершается до начала выполнения работы 4 k -го ВС. Нечеткое время окончания работы 8-9 – $\tilde{t}_{ik}^{IT}$.

9-10 – интервал времени нечеткой продолжительностью $\tilde{T}_k^3$ между окончанием обслуживания трансферных пассажиров и плановым временем готовности ВС к выполнению предполетных операций.

Определение целевой функции. Предварительно определимся с типами нечетких величин, используемых при нахождении $\tilde{C}$. Будем считать $\tilde{D}_{ij}$ и $\tilde{c}_{ij}$ ($i, j = 1, \dots, K$) нечеткими числами с треугольными функциями принадлежности. Следуя обозначениям, использованным на рис. 2, а, представим их в виде $\tilde{D}_{ij} = (D_{ij}^L, D_{ij}^M, D_{ij}^R)$ и $\tilde{c}_{ij} = (c_{ij}^L, c_{ij}^M, c_{ij}^R)$. Нечетким продолжительностям работ и интервалу $\tilde{T}_k^a$ поставим в соответствие трапециевидальные функции принадлежности с четырьмя реперными точками $(t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}, t^{(4)})$ (рис. 2, б).

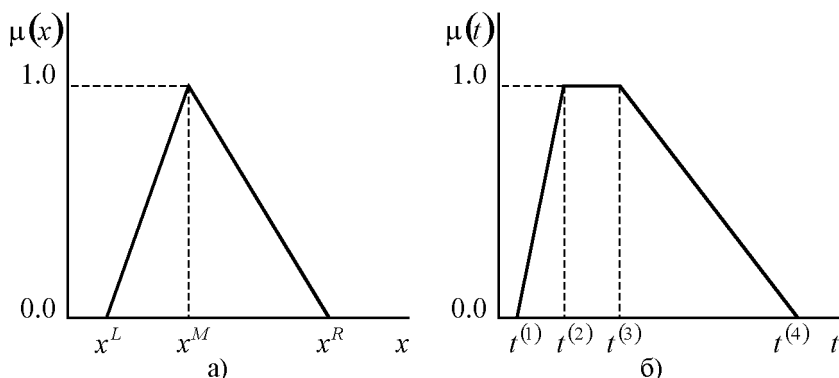


Рис. 2. Треугольная (а) и трапециевидальная (б) функции принадлежности

Для определения коэффициента k_{ij}^{Π} выразим предпочтения трансферных пассажиров в отношении времени пребывания в хабе $T_{ij}^X = t_j^d - t_i^a$ с помощью трапеци-

дальной функции желательности $\lambda_{T^X}(t)$, четырем реперным точкам, которой придадим согласно [1] следующие значения: $t^{(1)} = 45$ мин., $t^{(2)} = 75$ мин., $t^{(3)} = 90$ мин., $t^{(4)} = 360$ мин. В рассматриваемой задаче функция желательности $\lambda_{T^X}(t)$ по смыслу совпадает с коэффициентом k_{ij}^{Π} , поэтому будем считать $k_{ij}^{\Pi}(t) \equiv \lambda_{T^X}(t)$.

Определим теперь k_j^C и k_{ij}^T . Процедуру решения данной задачи иллюстрирует рис. 2, где отображены графики функций принадлежности необходимых нечетких временных характеристик.

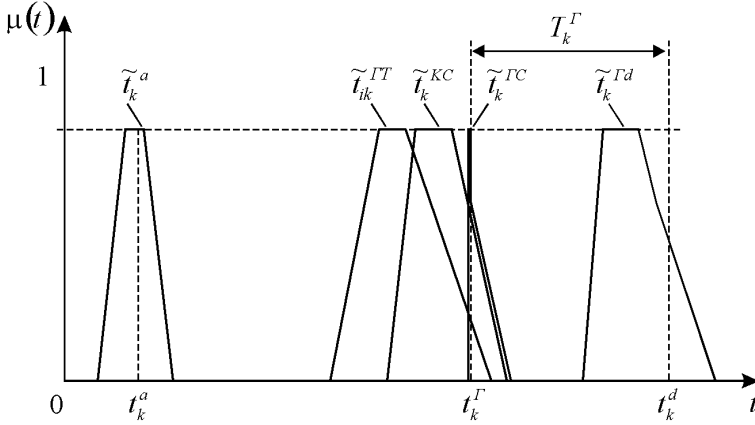


Рис. 3. К определению коэффициентов k_j^C и k_{ij}^T

Коэффициент k_k^C будем рассматривать как вероятность того, что фактическая готовность к вылету k -го ВС наступит раньше планового момента вылета t_k^d , т. е. $k_k^C = P(\tilde{t}_k^{\Gamma d} < t_k^d)$.

Используя введенные выше обозначения, запишем формулы для определения $\tilde{t}_k^{\Gamma d}$, в которых операции сложения и взятия максимума нечетких чисел выполняются с использованием уровней множеств [2]:

$$\begin{aligned}\tilde{t}_k^{\Gamma d} &= \tilde{t}_k^{\Gamma C} + \tilde{T}_k^B, \\ \tilde{t}_k^{\Gamma C} &= \max(\tilde{t}_k^{KC}, t_k^{\Gamma}), \\ \tilde{t}_k^{KC} &= \tilde{t}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_k^C = t_k^a + \tilde{T}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_k^C,\end{aligned}$$

где $\tilde{t}_k^{\Gamma C}$ – фактическое время готовности ВС к началу выполнения работы 4.

Коэффициент k_{ij}^T интерпретируем как вероятность того, что готовность к посадке на j -е ВС пассажиров, пересаживающихся с i -го ВС, наступит раньше, чем начнутся операции, выполняемые перед вылетом j -го ВС, т. е. $k_{ij}^T = P(\tilde{t}_{ij}^{\Gamma T} < \tilde{t}_j^{\Gamma C})$.

Величина $\tilde{t}_{ik}^{\Gamma T}$ определяется в результате нечеткого сложения по формуле

$$\tilde{t}_{ik}^{\Gamma T} = \tilde{t}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_{ik}^T = t_k^a + \tilde{T}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_{ik}^T.$$

Примем, что $\tilde{T}_{ik}^T$ зависит от продолжительности наиболее трудоемкой операции по обслуживанию трансферных пассажиров в хабе и определяется как произведение

$$\tilde{T}_{ik}^T = \tilde{T}^{1T} \tilde{d}'_{ik},$$

где $\tilde{T}^{1T}$ – нечеткая продолжительность регистрации одного трансферного пассажира; $\tilde{d}'_{ik} = \tilde{D}_{ik} k_{ik}^{\Pi}$ – нечеткое число пассажиров, воспользовавшихся перевозкой на трансферной авиасвязи через рассматриваемый хаб.

Для вычисления вероятностей $P(\tilde{t}_k^{Td} < t_k^d)$ и $P(\tilde{t}_{ij}^{1T} < \tilde{t}_j^{1C})$ используется несколько модифицированный теоретико-вероятностный подход, предложенный в [3].

Нечеткий вид целевой функции $\tilde{C}$, определяемой по изложенной методике, приводит к многокритериальности оптимизационной задачи, множество решений которой не представляет большой ценности для практики аэропорта. Дефазсификация целевой функции, производимая здесь по методу центра тяжести [4], позволяет, применив известные методы оптимизации, получить единственное решение.

Модельный пример. Ниже описаны результаты решения задачи оптимизации параметров трансферной системы перевозок на базе одного из крупных аэропортов РФ. Рассмотрена гипотетическая волна прилетов-вылетов, формируемая 10 ВС. Экспертные оценки потенциального пассажиропотока и трансферных тарифов (последние выражены в некоторых условных единицах) приведены в табл. 1. Прочерки означают авиасвязи, к которым отсутствует интерес со стороны потенциальных пассажиров. В целях экономии места в табл. 1 приведены значения D_{ij}^M и c_{ij}^M , соответствующие ядрам нечетких множеств $\tilde{D}_{ij}$ и $\tilde{c}_{ij}$. Следующие примеры позволяют оценить характер нечетких данных: $\tilde{D}_{9;2} = (1, 2, 4)$ пас., $\tilde{c}_{9;2} = (20.5, 21.2, 21.8)$ у.е., $\tilde{D}_{1;1} = (4, 16, 20)$ пас., $\tilde{c}_{1;1} = (20.3, 21.0, 21.6)$ у.е., $\tilde{D}_{7;4} = (8, 53, 125)$ пас., $\tilde{c}_{7;4} = (15.0, 15.6, 16.2)$ пас. Заметен значительный разброс уровней возможного пассажиропотока и сравнительно малый разброс тарифов.

Таблица 1

Характеристики трансферных авиасвязей D_{ij}^M , пас. / c_{ij}^M , у.е.

i	j									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16 / 21,0	–	–	–	–	4 / 14,2	–	–	–	–
2	–	–	–	–	–	–	18 / 13,9	–	2 / 13,8	3 / 13,7
3	–	–	26 / 18,4	9 / 16,4	–	–	–	2 / 24,8	–	–
4	–	–	–	18 / 12,2	–	–	–	–	16 / 21,2	19 / 21,5
5	–	–	48 / 17,6	–	–	–	–	6 / 24,0	–	–
6	–	11 / 13,8	–	–	–	21 / 13,8	5 / 13,7	–	19 / 13,9	–
7	–	–	–	53 / 15,6	–	–	–	–	–	–
8	–	24 / 12,8	–	–	3 / 12,7	10 / 12,8	2 / 12,9	–	–	82 / 12,8
9	–	2 / 21,2	–	–	–	–	11 / 21,2	–	3 / 21,2	–
10	–	35 / 14,8	–	–	–	–	45 / 14,8	–	35 / 14,8	–

В модельном примере все ВС разделены на две категории, различающиеся пассажироместимостью и временными параметрами технологического графика. ВС I

категории считаются большими, требующими больших затрат на аэропортовое обслуживание. В рассматриваемом примере к I категории отнесены последние 3 ВС. Нечеткие продолжительности выполнения работ 1, 2 и 4 для обеих категорий ВС, полученные в результате обработки статических материалов базы данных производственной информационной системы аэропорта, приведены в табл. 2. Нечеткое время обслуживания одного трансферного пассажира $\tilde{T}^{1T} = (0.2, 0.3, 0.4, 0.7)$ мин получено по результатам наблюдений в ряде аэропортов.

Модельное расписание для рассматриваемой волны, составляющее главный результат решения оптимизационной задачи, представлено в табл. 3.

Таблица 2

Нечеткие продолжительности работ

Категория ВС	$\tilde{T}^{\Pi}$, мин	$\tilde{T}^C$, мин	$\tilde{T}^B$, мин
I	(6.5, 9.0, 13.0, 22.0)	(12.0, 19.0, 28.0, 50.0)	(12.0, 17.0, 25.5, 41.0)
II	(5.5, 7.5, 10.0, 16.0)	(10.0, 15.0, 21.0, 38.0)	(9.0, 15.5, 21.0, 37.0)

Таблица 3

Оптимальное расписание

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Категория ВС	II	II	II	II	II	II	II	I	I	I
t_k^a , мин	28	18	21	22	7	20	6	0	2	12
t_k^d , мин	112	104	110	109	86	118	105	98	113	123
$(t_k^d - t_k^a)$, мин	84	86	89	87	79	98	99	98	111	111

В оптимальном расписании наглядно отразился групповой характер движения ВС, являющийся одним из атрибутов хаба. ВС прибывают и отправляются тесными группами с малыми интервалами между ВПО, что требует высокой пропускной способности элементов летной полосы и технологических комплексов хаба.

Оптимальные значения времени T^T составляют для ВС I категории 38 мин и для ВС II категории 35 мин, что вполне соответствует практике.

Оптимизация расписания позволила в целом сохранить потенциальный трансферный пассажиропоток. Полученное модельное нечеткое общее число трансферных пассажиров, принесших доходы авиакомпании в течение волны, всего на 14-16 % меньше их заданного потенциального числа.

Заключение. Представленные результаты подтверждают правомерность постановки сформулированной задачи оптимизации расписания движения ВС и работоспособность предложенного алгоритма ее решения. Использование нечетко-множественного подхода позволяет на базе стандартной вычислительной техники быстро получать оптимальные решения, учитывающие неопределенность исходных данных, доступных в условиях работы реальных аэропортовых и авиатранспортных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Danesi A. Spatial concentration, temporal co-ordination and profitability of airline hub-and-spoke networks. Ph.D. thesis. – Università di Bologna, 2006. – 143 p.
2. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. –

- М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
3. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 398 с.
 4. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2012 г.

FUZZY OPTIMIZING OF TRANSFER AIR TRANSPORTATION SYSTEM PARAMETERS

V.A. Romanenko

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University)
34, Moskovskoye sh, Samara, 443086

Based on fuzzy set theory the problem of flight timetable optimizing taking account of aircrafts ground handling activity network parameters for hub-and-spokes system is solved. The model example of a problem solution is considered.

Keywords: *optimizing, fuzzy numbers, hub airport.*