

УДК 656.7.022.92 : 519.816

НЕЧЁТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ ПАССАЖИРСКИХ АВИАЛИНИЙ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ УЗЛОВЫХ АЭРОПОРТОВ

© 2012 В. А. Романенко

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрена задача поиска оптимальной структуры сети внутрироссийских авиалиний, формируемой на основе системы узловых аэропортов. В качестве критерия оптимальности использован минимум себестоимости перевозки пассажира. Уровень пассажиропотока между парами аэропортов задан нечёткими числами. Определён состав совокупности узловых аэропортов.

Нечёткие числа, оптимизация, сеть авиалиний, узловой аэропорт.

Узловой аэропорт (хаб) представляет собой крупный авиатранспортный узел, ориентированный на эффективное обслуживание большого объёма трансферных пассажирских перевозок. Необходимость формирования сети хабов как основы авиатранспортной системы РФ была признана на правительственном уровне в Транспортной стратегии РФ на период до 2020 г.

В нечёткой постановке решается задача формирования оптимальной сети внутрироссийских авиалиний на базе системы узловых аэропортов. В качестве социально значимого критерия оптимальности принят минимум средней себестоимости перевозки авиапассажира. Источником нечёткости служит величина пассажиропотока между аэропортами, меняющаяся по времени под воздействием большого числа вероятностных факторов. Решение разбито на два этапа, на первом из которых задача рассматривается как чёткая, на втором - вводится учёт нечёткости.

Чёткая постановка задачи описывается следующим образом. Рассматривается система, состоящая из аэропортов различных уровней, обслуживающих сколь-нибудь заметный пассажиропоток. По имеющимся статистическим данным таких аэропортов в современной России около 150. Вводится множество всех аэропортов A , включающее N_A элементов:

$$A = \{1, 2, \dots, a, \dots, N_A\},$$

где a – произвольный элемент множества A

– номер аэропорта.

Множество A разделяется на два непересекающихся подмножества, одно из которых включает узловые аэропорты (хабы), а другое – все остальные (периферийные) аэропорты. Вводятся следующие обозначения:

N_H, N_R – число хабов и периферийных аэропортов, соответственно;

h и r – номера хабов и периферийных аэропортов, соответственно;

H, R – соответственно, множества хабов и периферийных аэропортов, определяемые как $H = \{h : h \in A \text{ и } h \notin R\}$ и $R = \{r : r \in A \text{ и } r \notin H\}$, для которых справедливы следующие выражения:

$$H \subset A, R \subset A, H \cup R = A, H \cap R = \emptyset,$$

$$N_H + N_R = N_A.$$

На множестве A определяются транспортные связи – упорядоченные пары аэропортов, в которых первый элемент означает пункт отправления пассажиров, второй – пункт их назначения. Каждая связь обозначается парой цифр $(a_1 a_2)$, первая из которых – номер пункта отправления, вторая – номер пункта назначения: $a_1, a_2 \in A$.

Транспортные связи характеризуются величинами протяжённости и пассажиропотока. Протяжённость связи $(a_1 a_2)$ обозначается $l_{a_1 a_2}$ и представляет собой расстояние воздушной перевозки пассажиров от a_1 до a_2 . Число пассажиров, перевезенных из a_1 в a_2 , обозначается $p_{a_1 a_2}$.

Совокупности всех величин протяжённости и пассажиропотока связей образуют квадратные матрицы $L = (l_{a_1 a_2})$, $P = (p_{a_1 a_2})$ размерностью $N_A \times N_A$ с нулевыми значениями на главной диагонали. Для поддержания связей между аэропортами устанавливаются авиалинии. В общем случае авиалиния не соответствует связи. Одна авиалиния с промежуточными посадками воздушных судов (ВС) обеспечивает целый ряд авиасвязей между начальным, конечным и промежуточными аэропортами. С другой стороны, протяжённые связи поддерживаются несколькими авиалиниями, что предполагает пересадки пассажиров этих авиасвязей.

Ясно, что не любой аэропорт - элемент множества A - может рассматриваться в качестве возможного элемента множества H , а только тот, который удовлетворяет следующим требованиям, предъявляемым к хамам:

- 1) располагает техническими возможностями, достаточными для обслуживания значительных пиковых потоков ВС, пассажиров, багажа, грузов;
- 2) характеризуется значительными внутренними и международными пассажиропотоками;
- 3) занимает выгодное географическое положение.

Анализ аэропортовой системы РФ позволяет выделить из A подмножество $H' \supset H$ «потенциальных хабов», т.е. аэропортов, обладающих перечисленными выше свойствами в достаточной степени. Формирование системы узловых аэропортов происходит путём отбора «полноценных» хабов (H) из множества «потенциальных» (H').

Для упрощения математической модели вводятся два допущения:

- 1) прямые связи установлены между всеми узловыми аэропортами – элементами множества H ;
- 2) прямые связи отсутствуют между периферийными аэропортами – элементами множества R .

Под прямыми здесь понимаются связи, не предусматривающие пересадок пассажиров. Предполагается, что для

обеспечения прямых связей установлены прямые авиалинии, не предполагающие промежуточных посадок ВС. Считается, что все авиалинии являются прямыми. Для авиалиний вводится обозначение $(a_1 a_2)^*$.

Выполнение допущений означает, что пассажиры, следующие из одного периферийного аэропорта в другой периферийный аэропорт обязательно вынуждены совершать от одной до двух пересадок в одном или двух узловых аэропортах.

Введение допущений позволяет разбить множество R на N_H непересекающихся подмножеств R_h ($h \in H$) в соответствии с признаком принадлежности к области тяготения того или иного хаба. На рис.1 приведены принципиальные схемы исходного распределения авиалиний между 12 аэропортами (рис.1а) и распределения авиалиний, преобразованного с использованием системы трёх хабов (рис.1б).

Таким образом, рассматриваемая задача сводится к определению оптимального числа и состава узловых аэропортов, а также распределению периферийных аэропортов по областям тяготения хабов. Средняя себестоимость перевозки пассажира, выбранная в качестве целевой функции, рассчитывается по формуле

$$c = \frac{\sum_{a_1} \sum_{a_2} C_{a_1 a_2}^*}{\sum_{a_1} \sum_{a_2} p_{a_1 a_2}^*},$$

$$a_1 = 1, 2, \dots, N_A, \quad a_2 = 1, 2, \dots, N_A, \quad a_1 \neq a_2,$$

где $C_{a_1 a_2}^*$ и $p_{a_1 a_2}^*$ – соответственно себестоимость перевозок пассажиров и пассажиропоток на авиалинии $(a_1 a_2)^*$ в единицу времени (например, год).

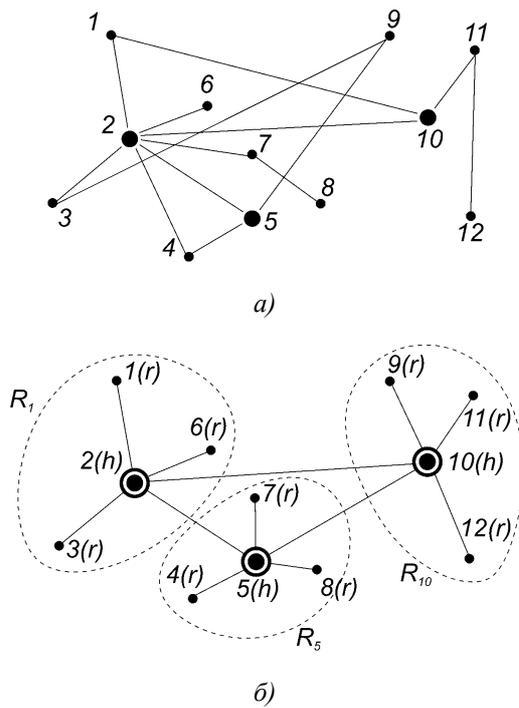


Рис. 1. Схемы распределения авиалиний: а) – исходная; б) – преобразованная

(«h» – хаб, «r» – периферийный аэропорт)

Так как себестоимость перевозок на авиалинии определяется факторами, в большинстве зависящими от типа самолёта, выполняющего рейсы, то задачи формирования сети авиалиний и определения необходимого состава авиапарка перевозчиков следует решать совместно. Математически общая задача формулируется в виде:

$$(N_H, H, R_h, n_i)^{min} = \underset{(N_H, H, R_h, n_i)}{arg \min} c(C_{a_1 a_2}^*, p_{a_1 a_2}^*),$$

$$a_1 = 1, 2, \dots, A, a_2 = 1, 2, \dots, A, a_1 \neq a_2,$$

$$i = 1, 2, \dots, I, h \in H,$$

где I – число типов самолётов, n_i – число самолётов i -го типа.

Для решения поставленной задачи разработан итерационный алгоритм, включающий следующие шаги.

1. Предварительное формирование множества H – выбор некоторого сочетания узловых аэропортов из множества потенциальных хабов H' .

2. Предварительное распределение периферийных аэропортов по областям

тяготения узловых аэропортов, минимизирующее суммарное расстояние перевозки, – формирование начального приближения совокупности подмножеств R_h ($h \in H$).

3. Расчёт пассажиропотоков преобразованной сети авиалиний с учётом трансферных пассажиров.

4. Определение средней себестоимости перевозки пассажира, включающее следующие шаги.

4.1. Расчёт ежедневного числа рейсов, выполняемых ВС i -го типа на определённой авиалинии $(a_1 a_2)^*$, включающий определение временных характеристик рейса: лётного времени, продолжительности обратного рейса, продолжительности перевозки пассажира.

4.2. Расчёт себестоимости перевозки пассажира на авиалинии $(a_1 a_2)^*$ ВС i -го типа.

4.3. Повторение пп. 4.1, 4.2 для всех I типов ВС. Выбор типа ВС, обеспечивающего минимум себестоимости перевозки пассажира на авиалинии $(a_1 a_2)^*$.

4.4. Повторение пп. 4.1 – 4.3 для всех авиалиний. Расчёт средней себестоимости перевозки пассажира c .

5. Модификация совокупности подмножеств R_h , состоящая в том, что некоторый периферийный аэропорт r , относящийся к области тяготения хаба h ($r \in R_h$), исключается из этой области и включается в область тяготения хаба $h+1$ (в этом случае $r \in R_{h+1}$). Осуществляется переход к п.3 – расчёт пассажиропотоков и средней себестоимости перевозки пассажира повторяется. Производится сравнение полученной в результате текущей итерации величины средней себестоимости перевозки пассажира c' с величиной c , найденной ранее. Меньшая из этих двух величин принимается в качестве минимального значения. Описанная для r -го периферийного аэропорта операция выбора области тяготения $h+1$ -го хаба проводится для всех остальных хабов. По её окончании подобный «перебор» хабов выполняется для следующего периферийного аэропорта и т.д. Цикл завершается, когда определённое

число итераций не приводит к улучшению критерия. Найденная таким образом величина c считается минимальной, а обеспечивающая её совокупность подмножеств $R_h, h \in H$ - распределением аэропортов, задающим оптимальную для данного множества хабов сеть авиалиний.

6. Изменение состава множества хабов H с последующим переходом к п.2 алгоритма. Выход из алгоритма выполняется после завершения перебора всех возможных сочетаний хабов.

Реализация приведённого алгоритма предполагает необходимость многократного вычисления величин себестоимости перевозок и пассажиропотоков.

Себестоимость выполнения рейса на авиалинии $(a_1 a_2)^*$ ВС i -го типа вычисляется по формуле:

$$C_{a_1 a_2 i} = c_{ЛЧ}^{BC} T_{лi} + P_{AT} + P_T,$$

где $T_{лi}$ - лётное время рейса самолёта i -го типа, определяемое по имеющимся методикам [1], P_{AT} - авиатранспортные (аэропортовые и аэронавигационные) расходы, P_T - расходы на авиатопливо.

Расчёт пассажиропотоков производится с учётом того, что одни авиалинии соединяют узловые аэропорты, а другие - периферийный и узловой аэропорты.

Пассажиропоток $p_{h_1 h_2}^*$ между хабами h_1 и h_2 с областями тяготения - R_{h_1} и R_{h_2} , соответственно, формируется из следующих четырёх слагаемых:

- 1) поток пассажиров, следующих из h_1 в h_2 ;
- 2) поток пассажиров, следующих из h_1 в один из периферийных аэропортов r , относящихся к области тяготения h_2 ($r \in R_{h_2}$), с пересадкой в h_2 ;
- 3) поток пассажиров, следующих из периферийного аэропорта r ($r \in R_{h_1}$) в h_2 с пересадкой в h_1 ;
- 4) поток пассажиров, следующих из периферийного аэропорта r_1 ($r_1 \in R_{h_1}$) в периферийный аэропорт r_2 ($r_2 \in R_{h_2}$) с

пересадками как в h_1 , так и в h_2 .

Таким образом, суммарный пассажиропоток из h_1 в h_2 определяется как:

$$p_{h_1 h_2}^* = p_{h_1 h_2} + \sum_{r \in R_{h_2}} p_{h_1 r} + \sum_{r \in R_{h_1}} p_{r h_2} + \sum_{\substack{r_1 \in R_{h_1} \\ r_2 \in R_{h_2}}} p_{r_1 r_2}.$$

Пассажиропоток между периферийным аэропортом r_1 и узловым аэропортом h_1 также включает четыре слагаемых:

- 1) поток пассажиров, следующих из r_1 ($r_1 \in R_{h_1}$) в h_1 ;
- 2) поток пассажиров, следующих из r_1 ($r_1 \in R_{h_1}$) в периферийный аэропорт r , относящийся к области тяготения узлового аэропорта h_1 ($r \in R_{h_1}$), с пересадкой в h_1 ;
- 3) поток пассажиров, следующих из r_1 ($r_1 \in R_{h_1}$) в один из узловых аэропортов за исключением h_1 с пересадкой в h_1 .

4) поток пассажиров, следующих из r_1 в периферийный аэропорт r , относящийся к области тяготения одного из узловых аэропортов кроме h_1 , с двумя пересадками.

Суммарный пассажиропоток из периферийного в узловой аэропорт определяется по формуле:

$$p_{r_1 h_1}^* = p_{r_1 h_1} + \sum_{r \in R_{h_1}} p_{r_1 r} + \sum_{h \in H \setminus \{h_1\}} p_{r_1 h} + \sum_{r \in R \setminus R_{h_1}} p_{r_1 r},$$

где фигурные скобки обозначают элемент соответствующего множества.

Исходными данными для реализации описанного алгоритма являются расстояния между аэропортами, позволяющие сформировать матрицу протяжённостей авиалиний L ; величины аэропортовых и аэронавигационных тарифов и сборов; стоимость авиатоплива в аэропортах; лётно-технические и коммерческие характеристики наиболее характерных для отечественных авиакомпаний типов ВС; технические возможности аэропортов по приёму ВС; величины пассажиропотока на авиасвязях. Источником данных об уровнях пассажиропотоков послужила информация Транспортной клиринговой палаты об объёмах внутренних перевозок между более чем 200 аэропортами РФ за 2000-2007 гг.

Пассажиропоток на большинстве

авиасвязей в течение указанного периода характеризовался широким разбросом зафиксированных значений с тенденцией к росту. Неопределённость уровня пассажиропотока и сложности с его прогнозированием привели к необходимости решения задачи оптимизации сети авиалиний в нечёткой постановке. Было предложено рассматривать в качестве нечёткого числа пассажиров на каждой авиасвязи.

Понятие нечёткого числа тесно связано с понятием нечёткого множества. Нечётким множеством \tilde{A} на некотором универсальном множестве X называется совокупность пар вида $\{x, \mu_{\tilde{A}}(x)\}$, где x – элемент множества X ($x \in X$), $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – функция от x , принимающая значения от 0 до 1 и называемая функцией принадлежности нечёткому множеству \tilde{A} . Значение функции $\mu_{\tilde{A}}(x)$ для конкретного элемента x называется уровнем принадлежности этого элемента нечёткому множеству \tilde{A} . Элемент x_1 , для которого $\mu_{\tilde{A}}(x_1)=1$, однозначно принадлежит множеству \tilde{A} . Элемент x_2 , для которого $\mu_{\tilde{A}}(x_2)=0$, также однозначно не принадлежит множеству \tilde{A} . О принадлежности множеству \tilde{A} элементов, для которых $0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1$, сделать однозначного вывода нельзя.носителем нечёткого множества \tilde{A} называется область определения нечёткого множества, для элементов которой выполняется неравенство: $\mu_{\tilde{A}}(x) > 0$. Та часть носителя, для которой степень принадлежности данному нечёткому множеству не меньше α , называется множеством α -уровня.

Нечётким числом \tilde{A} называется выпуклое нечёткое множество, определённое на множестве действительных чисел с унимодальной функцией принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$. Каждое нечёткое число может быть представлено его α -уровнями.

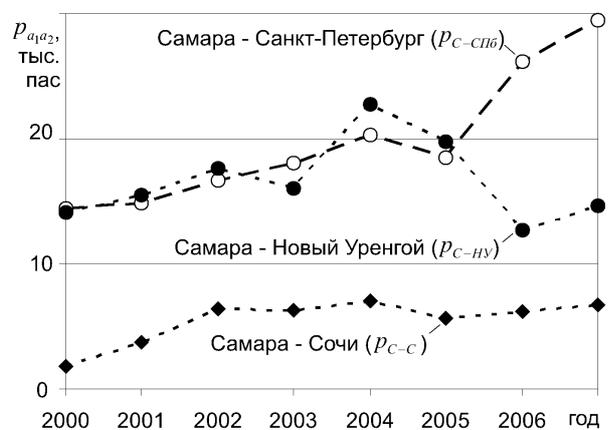
Пассажиропоток $\tilde{p}_{a_1 a_2}$ на авиасвязи

$(a_1 a_2)$ считается нечётким числом с простой и широко применяемой – треугольной – функцией принадлежности, для задания которого достаточно использовать множество α -уровней, состоящее всего из двух компонентов: $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = 1$. Нечёткое число $\tilde{p}_{a_1 a_2}$ может быть представлено в виде $\tilde{p}_{a_1 a_2} = (p_{a_1 a_2}^L, p_{a_1 a_2}^M, p_{a_1 a_2}^R)$, где $p_{a_1 a_2}^M$ – наиболее возможная величина – величина, имеющая наибольший уровень принадлежности ($\mu_{\tilde{p}}(p_{a_1 a_2}^M) = 1$); $p_{a_1 a_2}^L$ и $p_{a_1 a_2}^R$ – соответственно наименьшая из возможных и наибольшая из возможных величин ($\mu_{\tilde{p}}(p_{a_1 a_2}^L) = \mu_{\tilde{p}}(p_{a_1 a_2}^R) = 0$). Величины $p_{a_1 a_2}^L$, $p_{a_1 a_2}^M$ и $p_{a_1 a_2}^R$ принимаются соответственно равными наименьшему, среднему и наибольшему значениям пассажиропотока, определённым по статистике 2000-2007 гг. Примеры временных зависимостей пассажиропотоков на выбранных авиасвязях и функции принадлежности, соответствующих им нечётких чисел, представлены на рис.2.

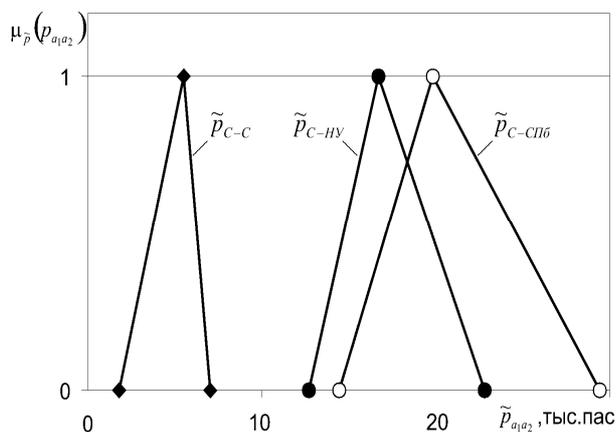
Использование нечётких исходных данных приводит к нечёткости целевой функции. Определение оптимальной нечёткой целевой функции в соответствии с принципом обобщения Заде [2], требующее решения многокритериальной задачи, весьма трудоёмко. Поэтому, чтобы упростить решение, было введено предположение о том, что средняя себестоимость перевозки пассажира также является нечётким треугольным числом вида: $\tilde{c} = (c^L, c^M, c^R)$, где c^L, c^M, c^R – наименьшее, среднее и наибольшее значения c , соответственно. Учитывалась обратная зависимость себестоимости перевозки от уровня пассажиропотока на авиалинии.

Перечисленные допущения позволили свести процедуру определения нечёткого числа \tilde{c} к последовательному решению трёх оптимизационных задач. Первая из задач предполагала поиск оптимальной величины c^L для набора $p_{a_1 a_2}^R$ ($a_1, a_2 \in A$), вторая – поиск оптимальной величины c^M для $p_{a_1 a_2}^M$ и третья – поиск оптимальной величины c^R для $p_{a_1 a_2}^L$. Для

сравнения получаемых в ходе оптимизации решений использовалось преобразование нечёткого числа в чёткое - дефаззификация по методу центра тяжести.



а)



б)

Рис. 2. Пассажиропотоки на выбранных авиасвязях: а) временные зависимости; б) нечёткие числа

Как показали результаты решения оптимизационной задачи, глобальный минимум дефаззифицированной средней себестоимости перевозки одного пассажира (c_{δ}) обеспечивает система пяти хабов, включающая аэропорты Москвы (Московский аэроузел рассматривается как единый хаб), Екатеринбурга, Красноярска, Новосибирска и Хабаровска.

В ходе оптимизации, помимо глобального, определялись также локальные минимумы целевой функции, соответствующие фиксированному числу

хабов (от 2 до 10). Результаты решения данных задач сведены в табл. 1, где представлены значения целевой функции, отнесённые к дефаззифицированной величине глобального минимума c_{δ}^{min} .

Таблица 1. Результаты оптимизации «*» - аэропорт – элемент множества H

Число хабов	Аэропорты								Относительные значения целевой функции					
	Москва	Екатеринбург	Краснодар	Красноярск	Новосибирск	Самара	Сочи	С.-Петербург	Уфа	Хабаровск	$\frac{c^L}{c_{\delta}^{min}}$	$\frac{c^M}{c_{\delta}^{min}}$	$\frac{c^R}{c_{\delta}^{min}}$	$\frac{c_{\delta}}{c_{\delta}^{min}}$
2	*			*							1.03	1.10	1.19	1.10
3	*				*					*	0.98	1.03	1.09	1.03
4	*			*	*					*	0.95	1.01	1.07	1.01
5	*	*		*	*					*	0.95	1.00	1.07	1.00
6	*	*		*	*	*				*	0.95	1.00	1.08	1.01
7	*	*		*	*	*			*	*	0.94	1.00	1.08	1.01
8	*	*	*	*	*	*			*	*	0.97	1.05	1.15	1.05
9	*	*	*	*	*	*		*	*	*	0.97	1.05	1.17	1.06
10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.98	1.09	1.22	1.09

Как следует из таблицы, в случае невозможности или нецелесообразности формирования системы хабов, состоящей из пяти перечисленных выше аэропортов, число хабов в системе может быть уменьшено до 4, либо увеличено до 6 или 7 без значительного ухудшения критерия. Следует отметить, что аэропорт Самара следует включать в сеть, формируемую не менее чем из шести хабов.

На рис.3 приведены графики функций принадлежности нечётких относительных значений $\tilde{c}/c_{\delta}^{min}$ для четырёх систем, включающих от 4 до 7 хабов. Анализ нечётких результатов свидетельствует о том, что система пяти хабов обеспечивает оптимальное решение только при значениях функции принадлежности, близких к единице. При значениях функции принадлежности менее 0.3-0.5 вблизи c^L/c_{δ}^{min} лучшие результаты даёт использование систем, состоящих из 7 либо 6 хабов.

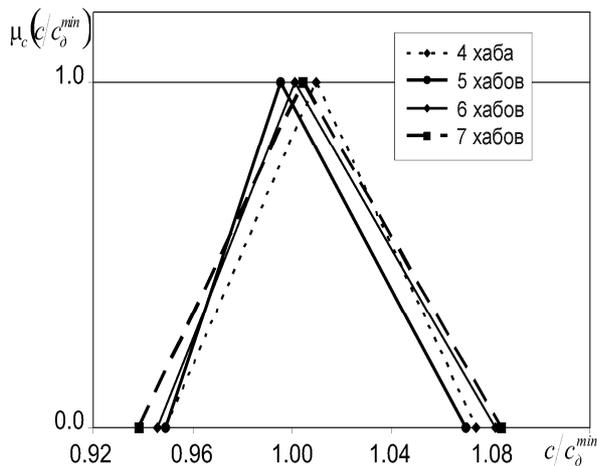


Рис. 3. Результаты оптимизации

Принимая во внимание выявленную обратную зависимость себестоимости перевозки пассажира от уровня пассажиропотока, можно считать, что нечёткие результаты оптимизации подтверждают интуитивно понятный вывод

FUZZY OPTIMIZATION OF THE PASSENGER AIRLINES NETWORK BASED ON THE HUBS AIRPORTS SYSTEM

© 2012 V. A. Romanenko

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

The problem of search of optimum structure of the in-Russian airlines network formed based on hub airports system is considered. Criterion of optimality is the passenger transportation cost price minimum. Fuzzy numbers sets the volume of passenger traffic between pairs the airports. The structure of the hub airports set is certain.

Fuzzy numbers, optimization, airlines network, hub airport.

Информация об авторе

Романенко Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры организации и управления перевозками на транспорте, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vla_rom@mail.ru. Область научных интересов: оптимизация и моделирование системы обслуживания перевозок узлового аэропорта.

Romanenko Vladimir Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, the senior lecturer, the person working for doctor's degree of the organization and management of transportations on transport department in Samara State Aerospace University named after academician S.P.Korolyov (National Research University). E-mail: vla_rom@mail.ru. Area of research: optimization and simulation of the hub airport transportations service system.

о необходимости увеличения числа хабов при общем росте уровня пассажиропотока. Учитывая наблюдающееся в течение последних лет увеличение объёмов внутрироссийских пассажирских авиаперевозок, следует считать, что оптимальная система должна включать не менее шести хабов.

Библиографический список

1. Блохин, В.И. Аэропорты и воздушные трассы [Текст] / В.И. Блохин, И.А. Белинский, И.В. Циприанович, Г.Н. Гелетуха. – М.: Транспорт, 1984. – 160 с.
2. Зайченко, Ю.П. Исследование операций: Нечёткая оптимизация [Текст] / Ю.П. Зайченко. - Киев.: Выща шк., 1991. – 191 с.