Г.С. Вересников, Л.А. Панкова, В.А. Пронина

Неопределенное многокритериальное программирование в проектировании летательных аппаратов

Аннотация. В статье представлены основные положения теории неопределенности и модели неопределенного программирования. Предлагается постановка задачи расчета весовой сводки летательных аппаратов как задачи многокритериального неопределенного программирования. Для решения поставленной задачи применяется многокритериальный генетический алгоритм.

Ключевые слова: неопределенная переменная, неопределенное программирование, проектирование, многокритериальный генетический алгоритм.

Введение

Реальные решения обычно принимаются в условиях неопределенности, когда некоторые необходимые данные не могут быть точно определены в момент принятия решения и не доступна статистика. В этом случае единственная возможность − пригласить экспертов по данной области для оценки этих данных.

Для моделирования такого типа неопределенности был предложен ряд теорий, среди которых наиболее популярной стала теория нечетких множеств Заде [1]. Однако теория нечетких множеств не является концептуально замкнутой и допускает неоднозначность ряда математических операций внутри себя. Неполнота теории нечетких множеств породила целый ряд альтернативных вариантов этой теории, свободных от тех или иных недостатков аксиоматизации, предложенной Л.А. Заде [2-8].

Новейшая разработка — теория неопределенности китайского математика Баодина Лю [9-12]. В настоящее время теория неопределенности стала ветвью аксиоматической математики для моделирования неопределенности. Математически неопределенность — это все, что удовлетворяет аксиомам теории неопределенности. Практически неопределенность — это все, что описывается степенью уверенности эксперта. С помощью теории неопределенности был решен ряд практических задач [13-16].

В статье рассматривается задача предварительного аэродинамического проектирования летательных аппаратов. Процессу проектирования присущ неизбежный шум и неопределенности, что приводит к необходимости использования моделей неопределенности. Предлагается постановка задачи расчета весовой сводки летательных аппаратов как задачи многокритериального неопределенного программирования. Для решения поставленной задачи применяется многокритериальный генетический алгоритм.

1. Из теории неопределенности [9-12]

1.2. Неопределенная переменная

Пусть U — непустое универсальное множество, A — σ-алгебра[1] на U. Каждое $\Lambda \in A$ называется событием. Каждому событию Λ ставится в соответствие число $M\{\Lambda\}$, определяющее меру

[1] σ-алгебра − алгебра множеств, замкнутая относительно операции счётного объединения, (U, A) − измеримое пространство, $\Lambda \in A$ − измеримое множество.

неопределенности этого события, удовлетворяющее трем аксиомам.

Аксиома нормальности: $M\{U\} = 1$.

Аксиома дуальности: $M\{\Lambda\}+M\{\Lambda^c\}=1$ ($\Lambda^c = U \setminus \Lambda$).

Например, если суждение истинно со степенью уверенности 0.6, то суждение неверно со степенью уверенности 0.4. Аксиома дуальности согласуется с законом исключенного третьего (из двух взаимоисключающих суждений одно обязательно является истинным) и законом противоречия (два взаимоисключающих суждения не могут быть одновременно истинными). В теории Заде аксиома дуальности не выполняется.

Аксиома субаддитивности: для каждой счетной последовательности событий

$$M\{\bigcup_{i=1}^{\infty}\Lambda_i\} \le \sum_{i=1}^{\infty} M\{\Lambda_i\}$$

Наблюдения свидетельствуют о том, что степень уверенности объединения событий не является ни суммой степеней уверенности отдельных событий (как в вероятностной мере), ни максимумом (как в возможностной мере Заде). Таким образом, нет никакой явной связи между степенью уверенности объединения событий и степенями уверенности отдельных событий, за исключением аксиомы субаддитивности.

Определение 1. Пусть U — непустое универсальное множество, A — σ-алгебра на U, M − мера неопределенности. Тогда триплет (U, A, M) называется измеримым **пространством неопределенности.**

Определение 2. Неопределенная переменная есть измеримая[2] функция ξ на пространстве неопределенности (U, A, M) в множество действительных чисел, т.е. для любого борелевского множества[3] B действительных чисел, множество $\{\xi \in B\} = \{u \in U \mid \xi(u) \in B\}$ есть событие.

Для определения меры неопределенности составного события вводится мера неопределенности произведения с помощью аксиомы произведения.

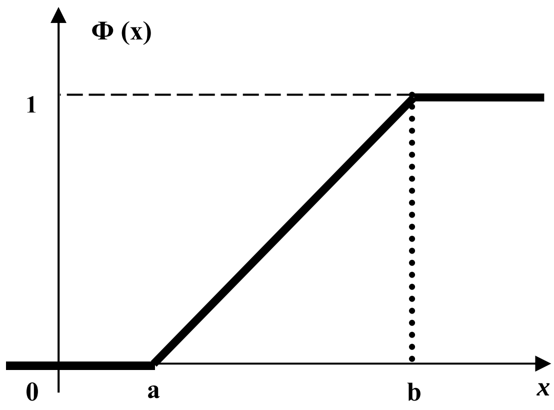

Рис.1. Линейная функция распределения неопределенности

Аксиома произведения: пусть (U_k, A_k, M_k) — пространства неопределенности для $k = 1, 2, \ldots$, тогда мера неопределенности на произведении σ-алгебр $A_1 \times A_2 \times \ldots$ удовлетворяет равенству[4]

$$M\{\prod_{k=1}^{\infty}\Lambda_k\} = \bigwedge_{k=1}^{\infty} M\{\Lambda_k\}.$$

Определение 3. Распределение неопределенности неопределенной переменной ξ есть функция Φ: $R \to [0,1]$, определяемая так:

$$\Phi(x) = M\{\xi \le x\}.$$

Распределение неопределенности является носителем информации о неопределенной переменной. Значение функции распределения неопределенности $\Phi(x)$ определяет степень уверенности в том, что неопределенная переменная ξ не больше x. $\Phi(x)$ − неубывающая функция, т.к. $M(\xi \le x_1) \le M(\xi \le x_2)$ при любых $x_1 \le x_2$.

Например, простейшая так называемая линейная функция распределения неопределенности имеет вид (Рис. 1):

$$\Phi(x) = \begin{Bmatrix} 0, \text{если } x \le a \\ (x-a)/(b-a), \text{если } a \le x \le b \\ 1, \text{если } x \ge b \end{Bmatrix}.$$

Неопределенная переменная, имеющая линейную функцию распределения, называется линейной и обозначается *L(a,b).* Могут использоваться и другие типы функций распределения неопределенной переменной − зигзагообразная, нормальная, логнормальная и т.д.

---

[2] Измеримая функция − функция на измеримом пространстве в множество действительных чисел такая, что: $f^{-1}(B) = \{u \in U \mid f(u) \in B\} \in A$ для любого борелевского множества B.

[3] Борелевская сигма-алгебра — это минимальная сигма-алгебра, содержащая все открытые подмножества топологического пространства (также она содержит и все замкнутые). Эти подмножества также называются борелевскими.

[4] $\wedge \overset{def}{=} inf, \vee \overset{def}{=} sup$

Определение 4. Пусть ξ − неопределенная переменная с регулярной функцией распределения $\Phi(x)$. Тогда обратная функция $\Phi^{-1}(\alpha)$ называется обратным распределением ξ.

Функция, обратная линейной функции распределения неопределенности, имеет вид (Рис. 2):

$$\Phi^{-1}(\alpha) = (1-\alpha)a + \alpha b .$$

Определение 5. Ожидаемое значение неопределенной переменной определяется как среднее значение неопределенной переменной в смысле неопределенной меры:

$$E[\xi] = \int_0^{+\infty} M\{\xi \ge r\}dr - \int_{-\infty}^{0} M\{\xi \le r\}dr .$$

Теорема 1. Пусть ξ − неопределенная переменная с регулярной[5] функцией распределения Ф. Тогда:

$$E[\xi] = \int_0^1 \Phi^{-1}(\alpha)d\alpha .$$

Определение 7. Неопределенные переменные $\xi_1, \xi_2,..., \xi_n$ называются **независимыми**, если

$$M\{\bigcap_{i=1}^{n}(\xi_i \in B_i)\} = \bigwedge_{k=1}^{n} M(\xi_i \in B_i)$$

для любых борелевских множеств $B_1, B_2,...,B_n$.

Неопределенные переменные независимы, если они определены на разных пространствах неопределенности.

Теорема 2. Пусть $\xi_1, \xi_2,..., \xi_n$ − неопределенные переменные, f − вещественная измеримая функция. Тогда $f(\xi_1, \xi_2,..., \xi_n)$ является неопределенной переменной.

Теорема 3. Пусть $\xi_1, \xi_2,..., \xi_n$ − независимые неопределенные переменные с регулярными распределениями неопределенности $\Phi_1, \Phi_2,\dots, \Phi_n$, соответственно. Если функция $f(x_1, x_2,..., x_n)$ − строго возрастающая по $x_1, x_2,..., x_m$ и строго убывающая по $x_{m+1}, x_{m+2},..., x_n$, тогда $\xi = f(\xi_1, \xi_2,..., \xi_n)$ является неопределенной переменной с обратным распределением неопределенности

$$\Psi^{-1} = f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha),..., \Phi_m^{-1}(\alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \Phi_{m+2}^{-1}(1-\alpha),..., \Phi_n^{-1}(1-\alpha))$$

и имеет ожидаемое значение меры неопределенности

$$E[\xi] = \int_0^1 f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha),..., \Phi_m^{-1}(\alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \Phi_{m+2}^{-1}(1-\alpha),..., \Phi_n^{-1}(1-\alpha))d\alpha .$$

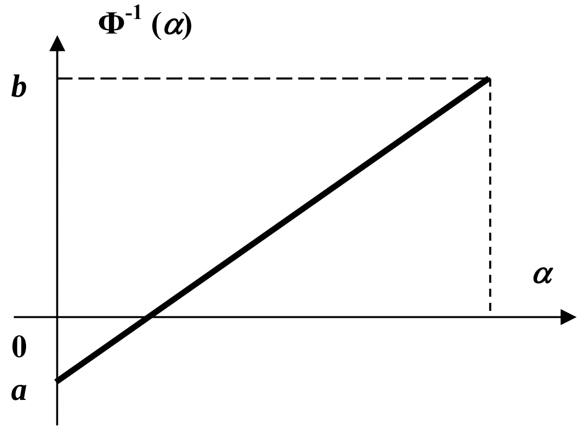

Рис.2. Обратная линейная функция распределения неопределенности

1.2. Неопределенное программирование

Неопределенное программирование является математическим программированием с неопределенными переменными: целевая функция и ограничения включают неопределенные переменные.

Пусть $\bar{x}$ − вектор решения, $\bar{\xi}$ − неопределенный вектор, $f(\bar{x}, \bar{\xi})$ − целевая функция, $g_j(\bar{x}, \bar{\xi}) \le 0, j = 1,2,...p$, − функции ограничений. Целевая функция является неопределенной переменной и не может быть минимизирована, минимизируется ее ожидаемое значение $E[f(\bar{x}, \bar{\xi})]$. Так как неопределенные ограничения $g_j(\bar{x}, \bar{\xi}) \le 0, j = 1,2,...p$, не определяют точное допустимое множество, экспертом задаются доверительные уровни выполнения ограничений $\alpha_1, \alpha_2,..., \alpha_p$:

$$M\{g_j(\bar{x}, \bar{\xi}) \le 0\} \ge \alpha_j, j = 1,2,...p .$$

Таким образом, задача неопределенного программирования сводится к точной (*crisp*) постановке, когда целевая функция и ограничения функций монотонны относительно неопределенных параметров.

Теорема 4. Пусть функция $f(\bar{x}, \xi_1, \xi_2,...,\xi_n)$ − строго возрастающая по $\xi_1, \xi_2,...,\xi_m$ и строго убывающая по $\xi_{m+1}, \xi_{m+2},..., \xi_n$ и $g_i(\bar{x}, \xi_1, \xi_2,...,\xi_n)$ − строго возрастающая по $\xi_1, \xi_2,...,\xi_k$ и строго

[5] Распределение неопределенности $\Phi(x)$ называется регулярным, если $\Phi(x)$ непрерывна и строго возрастающая функция по x, $0 < \Phi(x) < 1$, и $\lim_{x\to-\infty}\Phi(x) = 0, \lim_{x\to+\infty}\Phi(x) = 1$.

убывающая по $\xi_{k+1}, \xi_{k+2,\dots}, \xi_n$, $j=1, 2, \dots,p$. Если $\xi_1, \xi_2,\dots, \xi_n$ − независимые неопределенные переменные с регулярными распределениями неопределенности $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, соответственно. Тогда задача **неопределенного программирования**:

$$\min_x E[f(\bar{x},\bar{\xi})]$$

при условии

$$M\{g_j(\bar{x},\bar{\xi}) \le 0\} \ge \alpha_j,\ j=1,2,\dots p$$

сводится к задаче математического программирования:

$$\min_{\bar{x}} \int_0^1 f(\bar{x},\Phi_1^{-1}(\alpha),\Phi_2^{-1}(\alpha),\dots,\Phi_m^{-1}(\alpha),\Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha),$$
$$\Phi_{m+2}^{-1}(1-\alpha),\dots,\Phi_n^{-1}(1-\alpha))d\alpha$$

при условии

$$g_j(\bar{x},\Phi_1^{-1}(\alpha_j),\Phi_2^{-1}(\alpha_j),\dots,\Phi_k^{-1}(\alpha_j),\Phi_{k+1}^{-1}(1-\alpha_j),$$
$$\Phi_{k+2}^{-1}(1-\alpha_j),\dots,\Phi_n^{-1}(1-\alpha_j)) \le 0\ j=1,2,\dots,p.$$

Определение 6. Вектор $\bar{x}$ называется допустимым решением в неопределенном программировании, если $M\{g_j(\bar{x},\bar{\xi}) \le 0\} \ge \alpha_j$, $j=1,2,\dots p$.

Задача **многокритериального неопределенного программирования** имеет вид:

$$\min_x [E[f_1(\bar{x},\bar{\xi})],E[f_2(\bar{x},\bar{\xi})],\dots,E[f_m(\bar{x},\bar{\xi})]]$$

при условии

$$M\{g_j(\bar{x},\bar{\xi}) \le 0\} \ge \alpha_j,\ j=1,2,\dots p.$$

Если цели конфликтующие, нет оптимального решения, которое одновременно минимизирует все целевые функции. В этом случае используется Парето-решение, означающее невозможность улучшения любой цели без ухудшения других.

Определение 7. Допустимое решение $\bar{x}^*$ называется Парето-решением в неопределенном многокритериальном программировании, если нет допустимого решения $\bar{x}$, такого что:

$$E[f_i(\bar{x},\bar{\xi})] \le E[f_i(\bar{x}^*,\bar{\xi})]\ \ i=1,2,\dots,m$$

и $E[f_j(\bar{x},\bar{\xi})] < E[f_j(\bar{x}^*,\bar{\xi})]$ по крайней мере для одного j.

2. Применение модели неопределенного программирования к проектированию летательных аппаратов

2.1. Постановка задачи

Поставим задачу расчета весовой сводки летательных аппаратов как задачу многокритериального неопределенного программирования на базе экспертных оценок входных неопределенных параметров, используя расчетные формулы из [17]. В Табл. 1 представлены проектируемые параметры, в Табл. 2 ─ входные неопределенные параметры, в Табл. 3 ─ целевые функции.

Целевые функции имеют вид [17]:

$$f_1=(0.05\xi_3+\xi_1\xi_3-0.05)Qx_1+x_6+x_2x_3,$$

$$f_2=(0.3\xi_2+0.05\xi_3+\xi_1\xi_3+0.95)Qx_1+$$
$$+\frac{4}{3}x_7x_8+x_4-x_5-x_6,$$

$$f_3=(\xi_3+\xi_1\xi_3)Qx_1,$$

$$f_4=-0.3\xi_2Qx_1-Qx_1+x_2x_3-\frac{4}{3}x_7x_8-x_4+x_6,$$

$$Q=13.5+(6.5+\log_{10}x_2)\log_{10}x_2.$$

Будем считать, что неопределенные входные параметры ξ_1, ξ_2, ξ_3 имеют линейные функции распределения неопределенности $L(a,b)$ и соответствующие им обратные функции распределения (Рис. 1, Рис. 2), причем a_i, b_i, $i = 1, 2, 3$, задаются экспертами: $L(-0.12,-0.08)$, $L(0.5,0.9)$, $L(0.7,1.3)$.

Взлетный вес f_1, масса пустого самолета f_2 и масса корпуса f_3 должны быть минимизированы, а масса топлива f_4 − максимизирована. Для единообразия постановки введем функцию $f_4^{'}=-f_4$.

Постановка задачи расчета весовой сводки летательных аппаратов как задачи многокритериального неопределенного программирования имеет вид:

$$\min_x [E[f_1(\bar{x},\bar{\xi})],E[f_2(\bar{x},\bar{\xi})],E[f_3(\bar{x},\bar{\xi})],E[f_4^{'}(\bar{x},\bar{\xi})]]$$

при условии

$$259 \le x_1 \le 319,$$

$$55 \le x_2 \le 95,$$

$$380 \le x_3 \le 580,$$

Табл. 1. Вектор решений $\overline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_8)$

x_1	S [m2]	Площадь омываемой поверхности
x_2	V [m3]	Объем самолета
x_3	γ [kg/m3]	Средняя плотность
x_4	M_{01} [kg]	Масса авионики-экипажа-доп. оборудования
x_5	M_{02} [kg]	Масса экипажа
x_6	M_v [kg]	Масса доп. оборудования
x_7	P [kg]	Форсажная тяга на H = 0, M = 0
x_8	γ_2(Vc)	Относительный вес

Табл. 2. Вектор неопределенных параметров $\overline{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$

ξ_1	K_m	Коэффициент использования композитов
ξ_2	K_{eq}	Коэффициент технологии
ξ_3	K_f	Коэффициент фирмы

Табл. 3. Целевые функции

f_1	M_{toff}[kg]	Взлетный вес
f_2	M_{emp} [kg]	Масса пустого самолета
f_3	M_k [kg]	Масса корпуса
f_4	M_t [kg]	Масса топлива

$$3000 \le x_4 \le 5000,$$
$$550 \le x_5 \le 850,$$
$$1000 \le x_6 \le 1800,$$
$$30400 \le x_7 \le 42400,$$
$$0.07 \le x_8 \le 0.13.$$

Так как функции $f_1, f_2, f_3, f_4^{'}$ — строго возрастающие по ξ_1, ξ_2, ξ_3, то по теореме 4 имеем:

$$E[f_1(\overline{x},\overline{\xi})] = \int_0^1 ((0.05((1-\alpha)a_3+\alpha b_3)+((1-\alpha)a_1+\alpha b_1) \times((1-\alpha)a_3+\alpha b_3)-0.05)Qx_1+x_6+x_2x_3)d\alpha,$$

$$E[f_2(\overline{x},\overline{\xi})] = \int_0^1 ((0.3((1-\alpha)a_2+\alpha b_2)+ +0.05((1-\alpha)a_3+\alpha b_3)+((1-\alpha)a_1+\alpha b_1)\times ((1-\alpha)a_3+\alpha b_3)+0.95)Qx_1++\frac{4}{3}x_7x_8+x_4-x_5-x_6)d\alpha,$$

$$E[f_3(\overline{x},\overline{\xi})] == \int_0^1 (((1-\alpha)a_3+\alpha b_3+ +((1-\alpha)a_1+\alpha b_1)((1-\alpha)a_3+\alpha b_3))Qx_1)d\alpha,$$

$$E[f_4^{'}(\overline{x},\overline{\xi})] == \int_0^1 (0.3Qx_1((1-\alpha)a_2+\alpha b_2)+ +Qx_1-x_2x_3+\frac{4}{3}x_8x_7+x_4-x_6)d\alpha,$$

$$Q = 13.5+(6.5+\log_{10}x_2)\log_{10}x_2.$$

2.2. Решение задачи расчета весовой сводки

Для решения поставленной задачи используем многокритериальный генетический алгоритм пакета Матлаб 2012 (solver Multiobjective optimization using Genetic Algorithm). На Рис.3 представлен скриншот окна «Optimization tools». Задаем ссылку на оптимизируемые функции (так называемые фитнес-функции), граничные условия вектора решений, шаг на границе Парето. На выходе получаем подмножество множества Парето (фрагмент дан в Табл. 4) и соответствующие им Парето-решения (Табл. 5).

Заключение

В статье излагаются основные положения теории неопределенности и даются модели неопределенного программирования [9-12]. Предлагается постановка задачи предварительного аэродинамического проектирования летательных аппаратов как задачи многокритериального неопределенного программирования, сведенной к четкой постановке. Решается задача весовой сводки летательных аппаратов с использованием многокритериального генетического алгоритма.

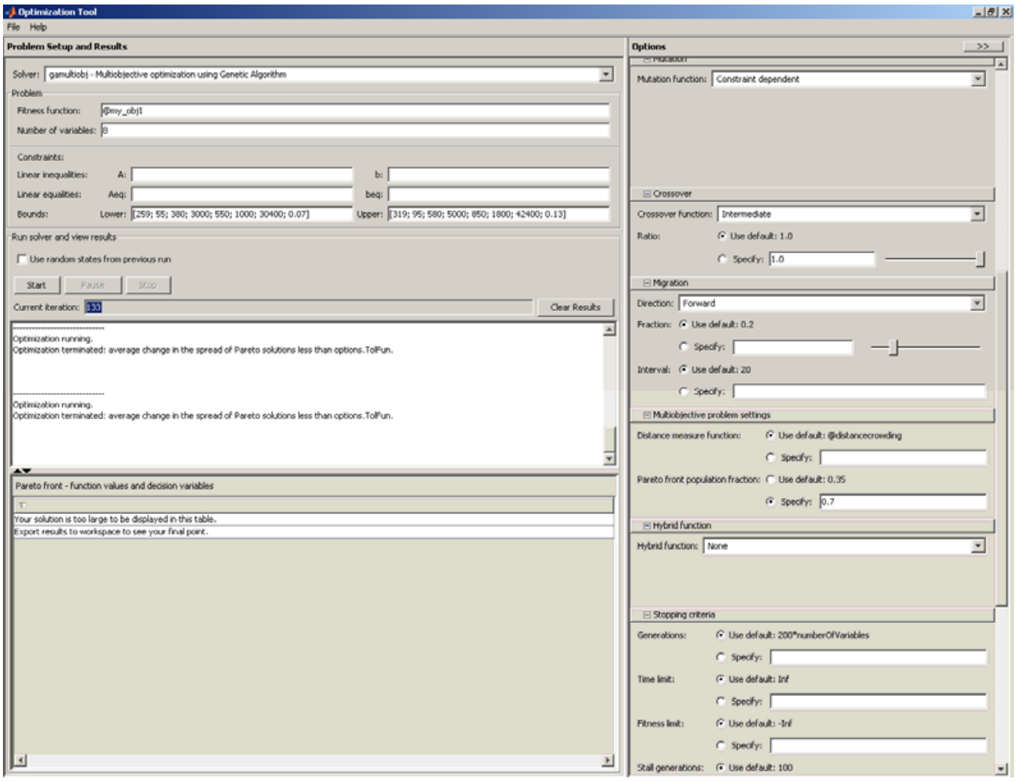

Рис.3. Скриншот окна «Optimization tools»

Табл. 4. Множество Парето (фрагмент)

	$E[f_1]$	$E[f_2]$	$E[f_3]$	$\lvert E[f_4^{'}]\rvert$
1	21193.41	12305.90	6504.28	7337.51
2	21902.98	11967.42	6525.38	8004.99
3	47429.98	13275.65	7058.01	32346.96
4	50942.89	13224.75	7106.33	35701.56
5	51087.27	13215.89	7101.43	35852.36
6	22611.83	12231.82	6533.04	8550.87
7	50604.15	13269.40	7091.79	35383.40
8	47702.01	12872.97	7026.57	32949.60
9	45964.45	13022.60	7038.52	31089.37
10	37673.08	12621.31	6796.86	23208.05
11	21191.37	12346.26	6523.10	7295.12
12	21191.36	12338.32	6523.13	7303.03
13	50190.03	13136.70	7064.02	35059.13
14	38608.81	12901.18	6821.59	23875.36
15	45056.36	12880.97	7000.84	30317.45
16	32021.09	12364.44	6658.63	17864.75

Табл. 5. Парето-решения

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
1	259.000	55.000	380.000	3000.000	550.001	1000.000	30400.000	0.070
2	259.807	55.045	386.297	3001.423	582.577	1348.001	30530.383	0.070
3	260.923	89.349	525.924	3267.102	601.322	1206.049	31518.637	0.074
4	261.831	91.357	550.982	3343.366	637.886	1378.704	31618.523	0.074
5	261.618	91.432	552.092	3341.716	638.950	1380.078	31644.121	0.074
6	259.874	55.369	398.743	3109.963	585.601	1243.534	30566.443	0.071
7	261.573	90.714	551.845	3340.713	636.868	1314.483	31618.936	0.074
8	261.008	86.553	545.281	3123.509	610.054	1269.381	31003.163	0.072
9	261.532	86.380	526.274	3188.715	582.716	1269.761	30994.788	0.073
10	261.014	69.552	534.161	3080.158	584.337	1259.381	31206.278	0.072
11	259.749	55.000	380.000	3000.000	550.002	1000.000	30400.000	0.070
12	259.750	55.000	380.000	3000.000	550.001	1000.000	30400.000	0.070
13	260.881	89.949	551.394	3290.859	634.055	1360.139	31637.999	0.074
14	261.308	70.700	538.646	3215.373	564.713	1267.555	31483.745	0.074
15	261.062	84.363	528.090	3125.757	592.125	1265.802	30928.846	0.072
16	259.938	62.510	504.772	3051.744	600.682	1191.215	30535.823	0.071

Литература

1. Zadeh LA, Fuzzy sets, Information and Control, Vol.8, 338-353, 1965.
2. Hisdal E. Generalized fuzzy set systems and particularization // Fuzzy Sets and Systems. 1980. Vol. 4. № 3. P. 275 – 291.
3. Jumarie G. Relativistic fuzzy sets. Toward a new approach to subjectivity in human systems // Math. et. Sci. Hum. 1980. Vol. 18. № 71. P. 39 – 75.
4. Morgan C., Pelletier F. Some notes concerning fuzzy logic's // Linquist. And Rhil. 1977. Vol. 1. № 1. P. 79 – 97.
5. Nahmios S. Fuzzy variables // Fuzzy Sets and Systems. 1978. Vol. 1. № 2. P. 97– 110.
6. Pawlak Z. Rough relations // Pr. IPI PAN. 1981. № 435. P. 10. 311 Watanabe S. A generalized fuzzy set theory // IEEE Trans. Syst., Man. and Cybern. 1978. Vol. 8. № 10. P. 756 – 763.
7. Weidner A. Fuzzy sets and Boolean - valued universes // Fuzzy Sets and Systems. 1981. Vol. 6. № 1. P. 61 – 72.
8. Wicar-Whilan P.J. Fuzzy logic an alternative approach // Proc. 9th Int. Symp. Multiple-Valued Log. 1979. New York. 1979. P. 152 – 158
9. Liu B, Uncertainty Theory, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 2007.
10. Liu B, Theory and Practice of Uncertain Programming, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 2009.
11. Liu B, Why is there a need for uncertainty theory? Journal of Uncertain Systems, Vol.6, No.1, 3-10, 2012.
12. Liu B., Uncertainty Theory: A Branch of Mathematics for Modeling Human Uncertainty, Springer-Verlag, 2011.
13. Lixia Rong, Two New Uncertainty Programming Models of Inventory with Uncertain Costs, Journal of Information & Computational Science, Vol.8, No.2, 280–288, 2011.
14. Rupak Bhattacharyya, Amitava Chatterjee, Samarjit Kar, Uncertainty Theory Based Novel Multi-Objective Optimization Technique Using Embedding Theorem with Application to R & D Project Portfolio Selection, Applied Mathematics, Vol.1, 189-199, 2010.
15. Jian Zhou, Zhen Li, Ke Wang, A Multi-Objective Model for Fire Station Location under Uncertainty, Advances in Information Sciences and Service Sciences, Vol.5, No.7, 1184-1191, 2013.
16. Sibo Ding, A New Uncertain Programming Model for Grain Supply Chain Design, Information: An International Interdisciplinary Journal, Vol.16, No.2(A), 1069-1076, 2013.
17. Колоколова Л.Г. Метод обобщенных моделей свойств самолета для этапа раннего проектирования. ТВФ. № 5-6, 1995.

Вересников Георгий Сергеевич. Старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Окончил Южно-Российский государственный технический университет (Волгодонский филиал) в 2004 году. Кандидат технических наук. Автор более 30 печатных работ. Область научных интересов: методы интеллектуального анализа данных, нейронные сети, теория нечетких множеств. E-mail: veresnikov@mail.ru.

Панкова Людмила Александровна. Старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Окончила Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1969 году. Кандидат технических наук. Автор более 80 печатных работ. Область научных интересов: искусственный интеллект, инженерия знаний, интеллектуальные технологии, мягкие вычисления. E-mail: ludmila_pankova@bk.ru

Пронина Валерия Александровна. Старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН). Окончила Московский энергетический институт в 1965 году и Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1971 году. Кандидат технических наук. Автор более 70 печатных работ. Область научных интересов: искусственный интеллект, инженерия знаний, интеллектуальные технологии, мягкие вычисления. E-mail: pron@ipu.ru