

Модель выбора конструкции по количественным критериям в системе обеспечения технологичности изделий

Г.Х. Ирзаев

Дагестанский государственный технический университет, ул. И. Шамиля 70, Махачкала, Россия

irzajev@mail.ru

Статья получена 21.03.2014, принята 20.05.2014

Описана система обеспечения производственной технологичности изделий, направленная на создание и освоение новых изделий с низкими эксплуатационными затратами, совершенствование конструкций выпускаемых изделий путем внесения в них изменений, повышающих их технический уровень, технологичность и качество. При решении задач обеспечения технологичности изделий часто возникает необходимость применения методов многокритериальной оптимизации, например, при выборе наиболее предпочтительного по критерию технологичности варианта конструкции, выделении аналога из альтернатив для использования в качестве базового эталона. Рассмотрена реализуемая в составе системы модель прикладной задачи оптимизации конструкций изделий по количественным критериям технологичности в условиях проектно-производственной среды. Сформированы решающие правила при реализации многошагового процесса ранжирования вариантов конструкции по критериям технологичности с построением кортежа Парето. Практическое применение модели показано на примере выбора оптимального, с точки зрения технологичности, варианта конструкции осциллографа на приборостроительном предприятии.

Ключевые слова: система обеспечения технологичности, оптимизация конструкции, количественные критерии, матрица сравнения, коэффициент весомости, кортеж Парето.

Structural optimization on workability with the use of quantitative criteria

G. Kh. Irzaev

Dagestan State Technical University, 70 I. Shamilya St., Makhachkala, Russia

irzajev@mail.ru

Received 21.03.2014, accepted 20.05.2014

The system providing workability of products has been described. It is concentrated on producing and developing new products with low operational costs. It is also concentrated on improving structure of the products by introducing changes, which increase their technical level, workability and quality. When solving problems to ensure workability of products, it is often necessary to apply methods of multicriteria optimization, for example, when selecting the most preferred variant of structure according to its workability, or when sorting out an analogue from the alternatives as a prototype. The article also describes an applied model of product structural optimization, implemented in the system, on quantitative workability criteria in terms of structural and production environment. The key rules of realization of multistage ranging of structural variants on quantitative criteria of workability with Pareto tuple constructed have been formed. Practical application of a model has been illustrated by the example of how to select an optimal from of oscilloscope structure according to its workability on instrument making enterprise.

Keywords: workability control system, structural optimization, quantitative criteria, comparison matrix, weightiness coefficient, Pareto tuple.

Введение. Технологичность конструкций является существенной характеристикой ресурсоемкости и совершенства изделий, так как она в значительной мере определяет уровень технико-экономических показателей производства. В системе обеспечения технологичности (СОТ) изделий промышленных предприятий уделяется большое внимание инженерному анализу и оптимизации проектных решений. Задача сравнительной оценки технических вариантов конструкций для осуществления выбора наиболее оптимального относится к классу многокритериальных задач и реализуется в проектно-производственной среде в условиях неопределенности, неполноты информации и недостатка времени.

Целью СОТ изделий является придание их конструкции такого комплекса свойств, при котором достигаются оптимальные затраты всех видов ресурсов на этапах жизненного цикла для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Для реализации этой цели СОТ, структура которой показана на рис. 1, должна предусматривать решение следующих взаимосвязанных вопросов [1]:

- планирование программ обеспечения технологичности изделий и доведение их до заданного уровня;
- учет достигнутого уровня технологичности с помощью системы показателей, установленных в виде

нормативно-технической документации для данной отрасли;

– контроль технологичности конструкции путем количественной и качественной оценок изделия и технологического контроля конструкторской

документации;

– регулирование хода выполнения мероприятий по обеспечению технологичности изделия и недопущение постановки на производство нетехнологичных конструкций.

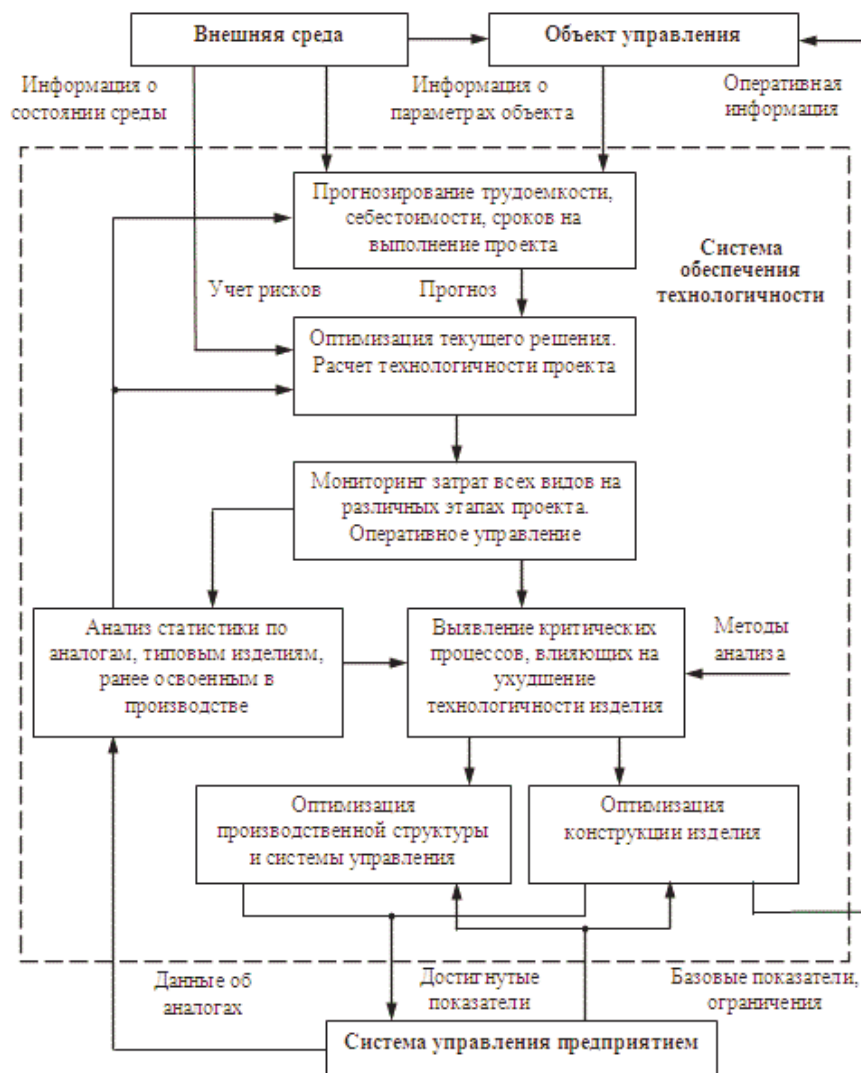


Рис. 1. Структура системы обеспечения технологичности изделий в обобщенном цикле управления

При реализации и функционировании СОР конструкций изделий на промышленных предприятиях возникает целый ряд проблем научно-методологического и практического характера. Данные, накопленные за периоды наблюдения за аналогами изделий определенного класса и обобщаемые для формирования управленческих воздействий на конструкции, крайне неоднородны, часто противоречивы. Для контроля свойства технологичности изделий используются как количественные, так и качественные оценки, что затрудняет получение интегрального результата контроля. Имеет место слабая структурированность системы, характеризующаяся неполнотой и неопределенностью информационной модели вследствие как недостоверности, так и

недостаточности информационных потоков о технологичности изделий.

Проводимые измерения конструкторских и технологических характеристик и расчеты показателей технологичности несут в себе суммарный эффект воздействия в проектно-производственной системе нескольких процессов, причем часто находящихся на разных стадиях развития. Объекты контроля и управления претерпевают существенные изменения в ходе протекания их жизненного цикла (изменения в элементной базе, технологических режимах, условиях эксплуатации), и СОР неспособна в полной мере отразить объективную картину приспособленности изделия к экономичному изготовлению.

Организационная структура СОР должна иметь многоуровневое построение, степень развитости которой зависит от масштабов предприятия, объема

выпуска продукции, количества осваиваемых в год изделий, сложности и новизны конструкций и технологий, уровня технических требований к создаваемой технике [2]. Управлению подвергаются проектно-производственные работы, направленные на создание и освоение новых изделий с низкими эксплуатационными затратами и высокой технологичностью, совершенствование конструкций выпускаемых изделий путем внесения в них конструктивно-технологических изменений, повышающих их технический уровень, технологичность и качество, разработка новых ресурсосберегающих и высокопроизводительных технологических процессов, новых материалов.

СОТ находится в составе системы управления предприятием и тесно взаимодействует с ней через потоки плановой, оперативной и директивной информации. Комплексность при создании СОТ изделий заключается не просто в определении большого количества различных показателей технологичности с использованием разнообразных методов, а в многокритериальной оптимизации системы при наличии неоднородных исходных данных о динамическом объекте, выявлении его целостного образа с точки зрения производственной технологичности.

Основным источником неопределенности во многих процессах обработки изделий на технологичность является нечеткость или расплывчатость данных, характеризующих это свойство конструкции. При решении задач обеспечения технологичности изделий часто возникает необходимость применения методов многокритериальной оптимизации, например, при выборе наиболее предпочтительного по критерию технологичности варианта конструкции, выделении аналога из многокритериальных альтернатив для использования в качестве базового эталона. При оценке технологичности вновь проектируемых конструкций правильный выбор аналога, базового эталона может существенно повлиять на уровень затрат всех видов ресурсов и конкурентоспособность изделия.

Постановка задачи. Очевидно, что оптимальное с точки зрения технологичности конструкции изделие следует искать среди множества их технологичных решений. Однако из-за большого количества таких решений было бы желательно иметь сведения о расположении высокотехнологичных конструкций в порядке убывания приоритета. Это устанавливается с помощью решающих правил выбора альтернатив конструкций [3, 4, 5].

Допустим, что рассматривается множество возможных альтернатив конструкций $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$, где n – число вариантов реализаций конструкций, оцениваемых на технологичность по количественным критериям. Известны аналитические выражения для расчета частных количественных критериев технологичности $K_j(S_\alpha), j = \overline{1, r}$, где r – число частных критериев технологичности конструкций, и векторных критериев

$K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\}$ и $K(S) = \{K(S_1), K(S_2), \dots, K(S_n)\}$, характеризующих отдельные альтернативы и все множество конструкций соответственно. Известны также множество коэффициентов весомости критериев $B = \{b_j, j = \overline{1, r}\}$, где b_j – коэффициент весомости j -критерия при условии, что:

$$\sum_{j=1}^r b_j = 1,$$

множество значений констант ограничений $D_0 = \{D_1^0, D_2^0, \dots, D_m^0\}$ и множество ограничений, вызванных особенностями конструкции, $D(S_\alpha) = \{D_1(S_\alpha), D_2(S_\alpha), \dots, D_m(S_\alpha)\}$. При синтезе сложных конструкций требуется выполнение условия:

$$D_\gamma(S_\alpha) \leq D_\gamma^0, \gamma = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Требуется найти подмножество эффективных упорядоченных конструкций (кортеж Парето) P_R , для отдельных элементов которого справедливо выражение:

$$K(S_p^0) = \min_{S_\alpha \in S} K(S_\alpha), S_p^0 \in P_R$$

при выполнении условия (1).

Оптимизация конструкции по количественным критериям технологичности. Пусть известны множества $S, K(S_\alpha), B$. Формирование множества коэффициентов весомости $B = \{b_j, j = \overline{1, r}\}$ критериев приводится в [6] и в этой работе не рассматривается. Необходимо выбрать технологичные конструкции, т. е. построить кортеж Парето.

Для решения задачи сначала построим матрицу сравнения $\|C_{kl}\| (k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l)$, куда будем заносить полученные на основе парного сравнения конструкций $S_k, S_l (k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l)$ оценки, однозначно определяющие соотношение между k -й и l -й конструкциями. Значения элементов C_{kl} матрицы сравнения будем подбирать так, чтобы отсеять нетехнологичные варианты конструкций.

У эквивалентных систем S_k, S_l все соответствующие количественные критерии равны, поэтому $C_{kl} = C_{lk} = 1$. К нетехнологичным вариантам конструкций отнесем те, у которых все значения критериев k -й конструкции хуже, чем у l -й конструкции ($C_{kl} = N_2 \gg 1$), либо значения $m(m < r)$ критериев k -й конструкции хуже соответствующих значений критериев l -й конструкции при равных соответствующих значениях остальных количественных критериев этих конструкций ($C_{kl} = N_3, 1 << N_3 < N_2$).

Обозначим подмножества индексов лучших, худших и равных критериев соответственно $Q_{kl}^+, Q_{kl}^-, Q_{kl}^-$ для каждой пары вариантов конструкций

$S_k, S_l (k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l)$. Тогда соответствие значениям подмножеств индексов лучших, худших и равных количественных критериев значениям элементов матрицы сравнения будет следующим:

если $Q_{kl}^+ = \emptyset, Q_{kl}^- = \emptyset, Q_{kl}^{\bar{}} = \{1, r\}$, то

$$C_{kl} = 1, C_{lk} = 1; \tag{2}$$

если $Q_{kl}^+ = \{1, r\}, Q_{kl}^- = \emptyset, Q_{kl}^{\bar{}} = \emptyset$, то

$$C_{kl} = N_2, C_{lk} = 0, N_2 \gg 1; \tag{3}$$

если $Q_{kl}^+ = \emptyset, Q_{kl}^- = \{1, r\}, Q_{kl}^{\bar{}} = \emptyset$, то

$$C_{kl} = 0, C_{lk} = N_2; \tag{4}$$

если $Q_{kl}^+ \neq \emptyset, Q_{kl}^- = \emptyset, Q_{kl}^{\bar{}} \neq \emptyset$, то

$$C_{kl} = N_3, C_{lk} = 0, 1 \ll N_3 < N_2; \tag{5}$$

если $Q_{kl}^+ = \emptyset, Q_{kl}^- \neq \emptyset, Q_{kl}^{\bar{}} \neq \emptyset$, то

$$C_{kl} = 0, C_{lk} = N_3; \tag{6}$$

если $Q_{kl}^+ \neq \emptyset, Q_{kl}^- \neq \emptyset, |Q_{kl}^{\bar{}}| \geq 0$, то согласно [7] определим:

$$C_{kl} = \sum_{j \in Q_{kl}^+} b_j (\sum_{j \in Q_{kl}^-} b_j)^{-1}, C_{lk} = C_{kl}^{-1}. \tag{7}$$

Если в l -м ($l \in \{1, n\}$) столбце матрицы сравнения максимальный элемент больше или равен значению N_2 , то l -й вариант конструкции не принадлежит множеству эффективных решений по критерию технологичности, его следует удалить из дальнейшего рассмотрения.

Далее введем характеристики, показывающие: число элементов в l -м столбце матрицы сравнения, значение которых больше единицы – H_1 ; число элементов в l -м столбце матрицы сравнения, значение которых меньше единицы – M_1 ; максимальное значение в l -м столбце матрицы сравнения – $C_{kl\max}$. H_1 показывает, сколько конструкций из всего множества рассматриваемых превышают по технологичности некоторую l -ю конструкцию. Характеристика M_1 показывает, над сколькими вариантами конструкций доминирует по технологичности l -й вариант. Характеристика $C_{kl\max}$ определяет, сколько раз k -я конструкция преобладает (доминирует) по технологичности над l -й конструкцией.

Метод оптимизации конструкций изделий по технологичности с использованием количественных критериев реализуется многошагово и представлен обобщенно в виде алгоритма на рис. 2.

На каждом шаге $t (t = 1, 2, \dots, n-1)$ для матрицы сравнения $\|C_{kl}\|$, построенной с учетом условий (2) – (7), находим характеристики $H_l^{(t)}, M_l^{(t)}, C_{kl\max}^{(t)}$,

определяем лучшую конструкцию S_j с минимальным значением $H_l^{(t)}$ и $C_{lj} \geq 1 \forall l \in \{1, n\}, l \neq j$. Номер лучшей по технологичности конструкции, выделенной на этом шаге, включаем в кортеж Парето P , вычеркиваем из матрицы сравнения $\|C_{kl}\|$ j -ю строку и j -й столбец в целях исключения влияния конструкции S_j на выбор лучшей системы на следующем шаге $(t+1)$.

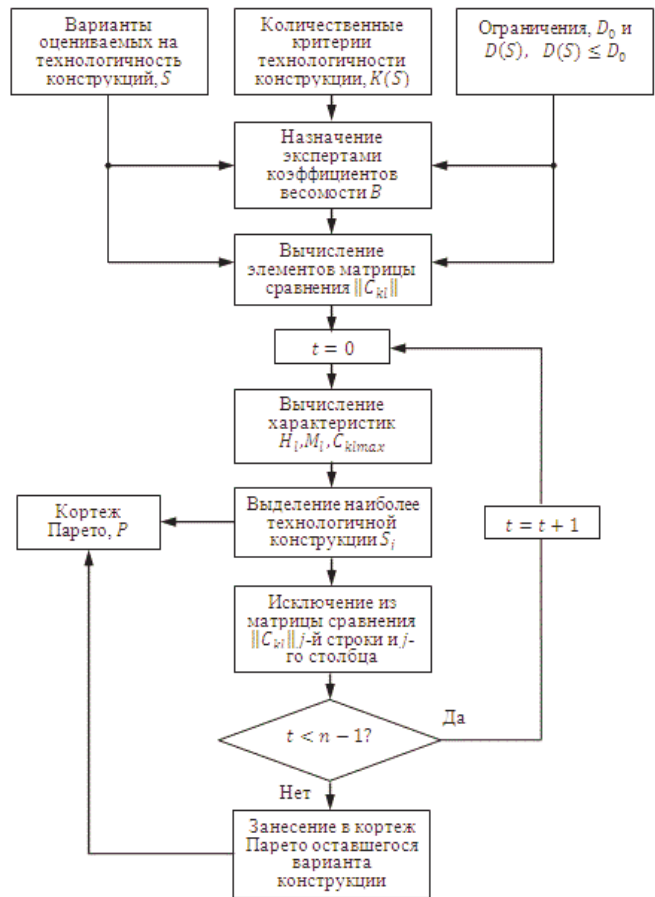


Рис. 2. Алгоритм оптимизации конструкций изделий по технологичности с использованием количественных критериев

Если конструкции с номерами $l_j \in L_k(t) = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_k(t)\}$ имеют одинаковые минимальные значения $H_{l_j}^{(t)}$, то лучшей является конструкция S_{l_j} с максимальным значением $M_{l_j}^{(t)} = \max_{l_j \in L_k(t)} M_{l_j}^{(t)}$. Если конструкции с номерами $l_j \in L_k(t) = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_k(t)\}$ имеют соответственно одинаковые значения $H_{l_j}^{(t)}, M_{l_j}^{(t)}$, то из матрицы сравнения надо выделить подматрицу с номерами столбцов и строк и провести ранжирование ее элементов.

Эквивалентные конструкции следует упорядочить на основе анализа характеристик $H_l^{(1)}, M_l^{(1)}, C_{kl\max}^{(1)}$, полученных на первом шаге.

Пример практической реализации. На приборостроительном предприятии требовалось выбрать наиболее оптимальный с точки зрения технологичности вариант конструкции осциллографа. Значения количественных критериев технологичности для пяти осциллографов одного класса приведены в табл. 1.

Коэффициенты весомости критериев были назначены экспертами предприятия из числа опытных конструкторов и технологов и приведены в табл. 2. Матрица сравнения 1-го уровня приведена в табл. 3.

Значения элементов матрицы сравнения рассчитаны в соответствии с формулами (2) – (7). В табл. 4. приведены характеристики конструкций приборов.

Таблица 1

Критерии технологичности	Типы осциллографов				
	C1-120	C1-122/1	C1-125	C1-126	C1-127
Технологическая себестоимость $K_1(S_a)$, тыс. руб.	6,11	5,78	7,34	7,65	9,23
Проектная трудоемкость $K_2(S_a)$, нормо-час	867	769	924	967	1028
Число микросхем и микросборок $K_3(S_a)$, шт.	7	12	11	13	11
Коэффициент повторяемости составных частей $K_4(S_a)$	0,56	0,58	0,34	0,65	0,67

Таблица 2

Критерии $K_j(S_a)$	Коэффициенты весомости, b_j
$K_1(S_a)$	$b_1 = 0,5$
$K_2(S_a)$	$b_2 = 0,25$
$K_3(S_a)$	$b_3 = 0,1$
$K_4(S_a)$	$b_4 = 0,15$

Таблица 3

Тип осциллографа	Тип осциллографа				
	C1-120	C1-122/1	C1-125	C1-126	C1-127
C1-120	–	0	9	3	3
C1-122/1	N_2	–	N_2	3	5,67
C1-125	0,111	0	–	3	5
C1-126	0,333	0,333	0,333	–	5,67
C1-127	0,333	0,176	0,2	0,176	–

Таблица 4

Характеристики	Тип осциллографа				
	C1-120	C1-122/1	C1-125	C1-126	C1-127
$H_l^{(1)}$	1	0	2	3	4
$M_l^{(1)}$	3	4	2	1	0
$C_{kl \max}^{(1)}$	N_2	0,333	N_2	3	5,67

$H_l^{(1)}, M_l^{(1)}, C_{kl \max}^{(1)}$, полученные на первом шаге анализа. Из табл. 4 видно, что в двух столбцах матрицы сравнения максимальный элемент равен N_2 . Следовательно, конструкции осциллографов C1-120 и C1-125 являются неэффективными по критерию технологичности, поэтому из матрицы удаляем первый и третий столбцы и строки.

На следующем шаге для скорректированной матрицы сравнения 2-го уровня (табл. 5) найдены

характеристики $H_l^{(2)}, M_l^{(2)}, C_{kl \max}^{(2)}$, которые представлены в табл. 6.

Лучшей конструкцией по технологичности признается осциллограф C1-122/1, так как его характеристика $H_l^{(2)} = 0$. Его заносим в кортеж Парето. Далее на третьем шаге строим матрицу сравнения 3-го уровня (табл. 7), удаляя из матрицы предыдущего уровня первую строку и столбец, и таблицу характеристик (табл. 8) для оставшихся конструкций приборов.

Лучшей по технологичности на шаге три оказывается конструкция осциллографа С1-126, включаем ее в кортеж Парето. В итоге кортеж Парето имеет вид:

$$P = \langle C1-122/1, C1-126, C1-127 \rangle.$$

Таблица 5

Тип осциллографа	Тип осциллографа		
	C1-122/1	C1-126	C1-127
C1-122/1	–	3	5,67
C1-126	0,333	–	5,67
C1-127	0,176	0,176	–

Таблица 6

Характеристики	Тип осциллографа		
	C1-122/1	C1-126	C1-127
$H_l^{(2)}$	0	1	2
$M_l^{(2)}$	2	1	0
$C_{kl \max}^{(2)}$	0,333	3	5,67

Таблица 7

Тип осциллографа	Тип осциллографа	
	C1-126	C1-127
C1-126	–	5,67
C1-127	0,176	–

Таблица 8

Характеристики	Тип осциллографа	
	C1-126	C1-127
$H_l^{(3)}$	0	1
$M_l^{(3)}$	1	0
$C_{kl \max}^{(3)}$	0,176	5,67

Заключение

Поставлена и решена важная в прикладном плане задача оптимизации конструкции сложных технических изделий по свойству технологичности в проектно-производственных условиях, которая сведена к задаче построения упорядоченного множества технологичных вариантов конструкции (множество Парето). Задача решена для случая, когда критерии заданы в формализованном количественном виде. Метод может быть использован при отработке конструкций изделий на технологичность в ходе проектирования и технологической подготовки производства, при выборе наилучших по критерию технологичности и качества альтернатив технических изделий.

Литература

1. Ирзаев Г.Х. Экспертные методы управления технологичностью промышленных изделий. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 192 с.
2. Ирзаев Г.Х. Разработка функциональной и организационной структур комплексной системы управления технологичностью промышленных изделий // Автоматизация процессов управления. 2011. № 4 (26). С. 66-75.
3. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 256 с.
4. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. М.: Радио и связь, 1984. 288 с.
5. Сафронов В.В. Гипервекторное ранжирование сложных систем // Информационные технологии. 2003. № 5. С. 23-26.
6. Ирзаев Г.Х. Экспертный выбор предпочтительного по технологичности варианта изделия методом аналитической иерархии // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2007. Т. 29, № 1. С. 126-130.
7. Руа Б. Проблемы и методы решений в задачах с многими целевыми функциями // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 20-58.

References

1. Irzaev G.Kh. Expert management methods of industrial product manufacturability. M.: Infra-Inzheneriya, 2010. 192 p.
2. Irzaev G.Kh. A development of operational and organizational structures of complex control system of industrial product manufacturability // Avtomatizatsiya protsessov upravleniya. 2011. № 4 (26). P. 66-75.
3. Podinovskii V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal solutions of multiobjective problems. M. FIZMATLIT, 2007. 256 p.
4. Brahman T.R. Multicriteria choice and alternatives in engineering. M.: Radio i svyaz, 1984. 288 p.
5. Safronov V.V. Ranking hyper-vector of complex systems // Informatsionnye tekhnologii. 2003. № 5. P. 23-26.
6. Irzaev G. Kh. Expert selection of the preferred option for manufacturability of products by analytical hierarchy // Vestn. Irkut. gos. tekhn. un-ta. 2007. Vol. 29. № 1. P. 126-130.
7. Roy B. Problems and methods of solutions in the tasks with multiobjective functions // Voprosy analiza i procedury prinjatija reshenij. M.:Mir, 1976. P. 20-58.