

МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗАЦИИ ЕДИНИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ДВУХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ. Ч. II. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЕДИНИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО УРОВНЕЙ

Г. Т. ПИПИЯ, Л. В. ЧЕРНЕНЬКАЯ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: gogpipiy@ya.ru*

Представлена методика нечеткого вывода единичных критериев качества на основе дополнительных данных с применением модели определения значимости источников информации, удовлетворяющих двухуровневой модели оценки качества приборостроительной продукции. Рассмотрены вопросы оценки уровня качества, предложены целевые функции качества, установлены области определения для каждого уровня оптимизации, разработана методика количественной идентификации единичных критериев качества и предложены пути улучшения разработанной методики.

Ключевые слова: модель оценки качества, двухуровневая оптимизация, приборостроение, единичные критерии, лингвистическая переменная

Введение. В первой части работы были определены единичные критерии целевых функций модели оценки качества и рассмотрена модель двухуровневой оптимизации качества продукции [1]. На основании полученных результатов в настоящей статье предложена методика формализации единичных критериев качества с применением теории нечетких множеств и методики определения относительных коэффициентов значимости критериев; приведен расчет уровня качества продукции с применением модели двухуровневой оптимизации.

Формализация единичных критериев верхнего уровня. В соответствии с табл. 1 работы [1] при определении единичного критерия качества „уровень выхода годной продукции“ необходимо учитывать специфику производства продукции приборостроения [2—4], а именно:

- структурную сложность изделия — X_1 ;
- долю комплектующих при наличии разрешений на отклонение их параметров от номинальных — X_2 ;
- долю комплектующих при наличии актов о браке — X_3 ;
- долю комплектующих при наличии актов о несоответствии — X_4 ;
- долю покупных элементов, входящих в изделие, — X_5 .

Структурная сложность изделия x_1 определяется как

$$x_1 = C_p / C_f = (m_p / n_p(n-1)) \cdot (n_f(n-1) / m_f), \quad (1)$$

где C_p и C_f — сложность изделия на определенной операции и на выходе соответственно; m_p и n_p — число элементов и число связей в изделии на i -й технологической операции; m_f и n_f — число элементов и число связей в изделии на выходе.

Для расчета единичного критерия „степень результативности выработанных предупреждающих мероприятий (за предыдущий период)“ [1] необходимо учитывать долю к общему количеству изменений следующих составляющих:

- откорректированных (простых) технологических операций — Y_1 ;
- изменений, внесенных в особо ответственные технологические операции, — Y_2 ;
- откорректированных документов системы менеджмента качества — Y_3 ;
- изменений, внесенных в критические блоки изделия, — Y_4 ;
- изменений, внесенных в (не) критические блоки изделия, — Y_5 ;
- откорректированных (не заметных для потребителя) функций изделия — Y_5 .

Единичный критерий „степень эффективности новых внедренных технологий“ [1] должен учитывать долю к общим затратам следующих составляющих:

- затраты на разработку технологической операции — Z_1 ;
- затраты на разработку документации системы качества — Z_2 ;
- затраты на смену поставщика — Z_3 ;
- затраты на корректировку конструкции — Z_4 ;
- затраты на модификацию продукции — Z_5 .

Определение лингвистических переменных для единичных критериев верхнего уровня. Для определения уровня выхода годной продукции зададим лингвистическую переменную, которая определяется следующим образом:

$$\langle X_i, T(X_i), U, G, M \rangle,$$

где X_i — название переменной, $T(X_i)$ — терм-множество переменной X_i , U — универсальное множество, G — синтаксическое правило, M — сематическое правило.

Терм-множество $T(X_i)$ для лингвистических переменных единичных критериев функций верхнего уровня представлено в табл. 1.

Таблица 1

Входной терм	Интервал	Выходной терм	Интервал
Низкое значение	$x < 0,4$	Низкое значение	$x \leq 0,25$
Среднее значение	$0,4 \leq x < 0,8$	Не среднее значение	$0,25 < x < 0,45$
Высокое значение	$0,7 \leq x$	Среднее значение	$0,45 \leq x < 0,6$
		Не высокое значение	$0,6 \leq x < 0,75$
		Высокое значение	$0,75 \leq x < 0,85$
		Очень высокое значение	$0,85 \leq x$

Для входной информации используются Z -образная функция принадлежности для $x < 0,4$, треугольная функция принадлежности для $0,4 \leq x < 0,8$ и S -образная функция принадлежности для $0,7 \leq x$.

Для получения численного выражения частного критерия необходимо определить относительные степени (коэффициенты) значимости (ОКЗ) для каждого критерия.

Методика определения относительных коэффициентов значимости. Для определения ОКЗ используем предложенную в работе [5] формальную методику определения количе-

ственной значимости на основе построения N -модели для каждого критерия в заданном векторе критериев. Математическая модель определения ОКЗ описывается следующим образом:

$$\langle f_{\Omega}, K(X, Y, Z)_1^1, \dots, K(X, Y, Z)_1^{n_1}, \dots, K(X, Y, Z)_m^1, \dots, K(X, Y, Z)_m^{n_m}, R_N \rangle,$$

где f_{Ω} — область определения выходных значений ОКЗ; $K(X, Y, Z)_{1, \dots, m}^{1, \dots, n_m} = \langle K(X)_{1, \dots, m}^{1, \dots, n_m}, K(Y)_{1, \dots, m}^{1, \dots, n_m}, K(Z)_{1, \dots, m}^{1, \dots, n_m} \rangle$ — критерии, такие что каждому K_i соответствует набор n_i (количество откликов) равнозначимых критериев $K_i^1, \dots, K_i^{n_i}$; отношение нестрогого предпочтения R_N определяется на множестве $y(x) = \langle X_1, \dots, X_5, Y_1, \dots, Y_5, Z_1, \dots, Z_5 \rangle$ и включает отношение строгого предпочтения P и отношение безразличия I .

Информация о количественной значимости характеризуется показателем ϑ , включенным в функцию $y(x)$, и содержит данные о степени превосходства i -го критерия над j -м критерием: $i > h < j$, где h означает, во сколько раз один критерий важнее другого.

Расчет ОКЗ произведен с использованием пяти источников информации для X_1 , трех источников информации для X_2, X_3, X_4 и четырех источников информации для X_5 .

Пример расчета.

$$X_1 = 5, X_{2,3,4} = 3 \text{ и } X_5 = 4.$$

Зададим ОКЗ:

$$\vartheta(X_1) = X_1 \succ^{5/12} X_{2,3,4,5}, \vartheta(X_{2,3,4}) = X_{2,3,4} \succ^{3/12} X_{1,5}, \vartheta(X_5) = X_5 \succ^{4/12} X_{1,2,3,4},$$

отсюда $h_{12345} = 0,42$, $h_{23415} = h_{32415} = h_{42315} = 0,25/3$, $h_{51234} = 0,33$.

Численная формализация единичных критериев верхнего уровня. Для реализации процесса численной формализации используем операцию импликации с применением Z -образной функции принадлежности при $a = 0, b = 1$, S -образной функции принадлежности при $a = 0, b = 1$ и треугольной функции принадлежности при $a = 0, b = 0,5, c = 1$.

После вычисления нечетких значений функций будет определена истинность высказывания по функции Заде. Примеры входных значений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Индекс	Переменные X	ОКЗ	Переменные Y	ОКЗ	Переменные Z	ОКЗ
1	0,4	0,42	0,23	0,2	0,19	0,4
2	0,3	0,08	0,17	0,1	0,44	0,1
3	0,6	0,08	0,48	0,2	0,81	0,1
4	0,25	0,09	0,50	0,3	0,7	0,3
5	0,15	0,33	0,4	0,2	0,1	0,1

Истинность высказывания „уровень выхода годной продукции“ соответствует 0,12, истинность высказывания „степень результативности выработанных предупреждающих мероприятий“ соответствует 0,03, а истинность высказывания „степень эффективности новых внедренных технологий“ — 0,093. Подставив в функцию Заде численные значения, получим следующие константы: $c_1 = 0,12$, $c_2 = 0,03$, $c_3 = 0,093$. Отсюда целевая функция верхнего уровня примет следующий вид:

$$\min_{x \in X} Q(x, y, z) = 0,12x_1 + 0,03x_2 + 0,093x_3 - d_1y + d_2z.$$

Формализация единичных критериев нижнего уровня. Для более точного выражения трех частных критериев функции „затраты на обеспечение качества“ [1, табл. 2] необходимо определить их основное содержание. Для решения данной задачи определим затраты на функции продукции, видимые для конечного потребителя и не видимые для конечного потребителя, неустранимые и устранимые затраты, переменные и постоянные затраты [6]. Наиболее приемлемая модель характеризуется выражением [7]

$$PR = \sum_{i=1}^n P_i Q_i - \left(\sum_{i=1}^n v c_i Q_i + FC \right), \quad (2)$$

где PR — прибыль, n — число видов продукции, P — цена продукции i -го вида, Q_i — количество продукции i -го вида, $v c_i$ — переменные затраты на единицу продукции i -го вида ($v c = U_{VC} P_{uVC}$, где U_{VC} — удельный расход ресурса, а P_{uVC} — цена единицы ресурса, формирующего переменные затраты), FC — общие постоянные затраты

Для применения модели (2) необходимо учитывать долю к общим затратам следующих затрат:

- на критические функции, видимые для потребителя, — X'_1 ;
- на некритические функции, видимые для потребителя, — X'_2 ;
- на некритические функции, не видимые для потребителя, — X'_3 .

Затраты на предупреждение несоответствий должны учитывать долю к общим затратам на данную категорию затрат, аналогичных предыдущим, т.е. затрат на критические функции и некритические функции, видимые для потребителя, — Y'_1 , Y'_2 , а также на некритические функции, не видимые для потребителя, — Y'_3 .

Долю к общим затратам на устранение внутренних несоответствий (ВН) составляют следующие затраты:

- на устранение ВН за счет поставщика — Z'_1 ;
- на устранение ВН на счет производства — Z'_2 .

Единичные критерии для функции управления поставщиками определяются по следующим долям к общему количеству поставщиков:

- критически важные поставщики — X''_1 , Y''_1 , Z''_1 ;
- аутсорсинг — X''_2 , Y''_2 , Z''_2 ;
- поставщики импортной продукции — X''_3 , Y''_3 , Z''_3 ;
- поставщики, чей объем закупок составляет 15 %, — X''_4 , Y''_4 , Z''_4 .

Своевременность доставки определяется по формуле

$$b''_{i1} z_1(X''_{1,..,4}, Y''_{1,..,4}, Z''_{1,..,4}) = \left[\left(\sum_{i=1}^n z_i(t)_i \right) / m \right] \cdot \frac{1}{z(t)_6} \cdot 1^{1-d_1}, \quad (3)$$

где $z_1(t)_i$ — время поставки комплектующих i -м поставщиком (начиная с даты заключения контракта), m — количество запланированных поставок, $z(t)_6$ — время поставки комплектующих i -м поставщиком (по контракту), d_1 — отношение суммарной стоимости комплектующих и их применения к себестоимости изделия.

Своевременность устранения замечаний по качеству изделий определяется как

$$b''_{i2} z_2(X''_{1,..,4}, Y''_{1,..,4}, Z''_{1,..,4}) = \left[\left(\sum_{i=1}^n z_2(t)_i \right) / n \right] \cdot \frac{1}{z(t)_6} \cdot 1^{1-d_2}, \quad (4)$$

где $z_2(t)_i$ — время выполнения требований потребителя, n — количество обращений, $z_2(t)_6$ — время выполнения требований потребителя по контракту, d_2 — отношение суммарной стоимости комплектующих и их применения по назначению к себестоимости изделия.

Результативность обращений к поставщику определяется по формуле

$$b''_{i3} z_3(X''_{1,..,4}, Y''_{1,..,4}, Z''_{1,..,4}) = z_3, \quad (5)$$

где z_3 — отношение решенных вопросов к общему количеству вопросов.

Определение лингвистических переменных для единичных критериев нижнего уровня. Терм-множество $T(X_i)$ для лингвистических переменных единичных критериев функций нижнего уровня представлено в табл. 3.

Таблица 3

Входной терм	Интервал	Выходной терм	Интервал
Низкое значение	$x < 0,6$	Низкое значение	$x \leq 0,75$
Среднее значение	$0,6 \leq x < 0,2$	Не среднее значение	$0,75 < x < 0,55$
Высокое значение	$0,3 \leq x$	Среднее значение	$0,55 \leq x < 0,4$
		Не высокое значение	$0,4 \leq x < 0,25$
		Высокое значение	$0,25 \leq x < 0,15$
		Очень высокое значение	$0,15 \leq x$

Для входной информации используются функции принадлежности, аналогичные функциям верхнего уровня.

Входные и выходные интервалы для лингвистической переменной „управление поставщиком“ аналогичны и для единичных критериев верхнего уровня. Правило вывода численных значений единичных критериев „затраты на обеспечение качества“ и „управление поставщиком“ аналогично правилу вывода для критериев верхнего уровня.

Оценка качества продукции. Оптимизация двухуровневой модели с двумя функциями нижнего уровня осуществляется с использованием метода Куна — Такера и симплекс-метода [8]. Ограничения для систем линейных уравнений определяются следующим образом.

Если среднее значение частных параметров i -го уравнения меньше единицы, то найденное значение не должно превышать среднее значение частных параметров. В случае если среднее значение частных параметров i -го уравнения равно единице, то найденное значение должно быть не больше единицы [9].

Аналитическую модель задачи оптимизации представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \min Q(x, y, z) &= Cx + d_1y + d_2z; \\ Ax + B'y + B''z &\leq b, \quad Ax + C_iy_i \leq b_i; \\ u_iB' - s_i &= -e_i, \quad u_i(b_i - Ax - B'y) + s_iy = 0; \\ v_iB'' - s_i &= -e_i, \quad v_i(b_i - Ax - B''z) + s_iz = 0; \\ l_iB'' - s_i &= -e_i, \quad l_i(b_i - Ax - B''w) + s_iw = 0; \\ (x, y, z, w) &\geq 0, \quad u_i \geq 0, \quad v_i \geq 0, \quad l_i \geq 0, \quad s_i \geq 0. \end{aligned}$$

Пример решения задачи представлен в табл. 4, где N — число ограничений.

Таблица 4

N	Q	x_1	$x_2(y_2)$	z_2	y_3	z_3	b
1	E1	0,8	0,3	0,1	0,8	0,8	$\geq 0,68$
2	E2	0,3	0,1	0,6	0,9	1	$\geq 0,63$
3	E3	0,7	0,9	1	0,7	1	$\geq 0,84$
4	E4	0,1	0,9	1	1	0,5	$\geq 0,68$
5	E5	1	1	1	1	1	$\leq 1,00$
6	F_1	x_1	$x_2(y_2)$	z_2	y_3	z_3	b'
7	E1	0,1		—		—	$\leq 0,1$
8	E2		0,5	—		—	$\leq 0,5$
9	E3		1	—		—	$\leq 1,0$
10	E4			—	1	—	$\leq 1,0$
11	E5			—	0,9	—	$\leq 0,9$
12	E6	0,9	0,7	—		—	$\geq 0,8$
13	F_2	x_1	$x_2(y_2)$	z_2	y_3	z_3	b''
14	E1	0,3	—	0,5	—	0,8	$\geq 0,53$
15	E2	1	—	1	—	1	≤ 1

Оценка качества дефектоскопа [1] на стадии производства равна $Q(x, y, z) = 0,67$. Значения переменных представлены в табл. 5.

Таблица 5

Целевая функция	Единичный критерий		
	x_1	x_2	x_3
$Q(x, y, z)$	0,3333333	0,7142857	0
$F_1(x, y)$	y_1	y_2	y_3
	0	0,6666667	0
$F_2(x, z)$	z_1	z_2	z_3
	0,00	0,00	0,00

Таким образом, для повышения качества продукции необходимо заменить поставщиков и сократить расходы на профилактические меры (или изменить их).

Заключение. Представленная методика формализации единичных критериев качества позволяет объединять разнородную информацию и использовать ее для решения задачи численной оптимизации двухуровневой модели оценки качества приборостроительной продукции. Решенная задача, помимо вывода численной оценки, также указывает на критические моменты (точки), которые существенно влияют на качество продукции и охватывают такие элементы производства, как технология изготовления, конструкция изделия, комплектующие и т.д. Улучшение того или иного единичного критерия (точки) позволит гибко регулировать и качество самой продукции, и элементов производственного процесса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пипия Г. Т., Черненькая Л. В. Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. I. Единичные критерии целевых функций качества // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 650—656.
2. Микаева А. С., Микаева С. А., Польшаева А. И. Российское приборостроение // Новая наука: финансово-экономические основы. 2017. № 3. С. 154—156.
3. Воронина В. Н. Современное приборостроение России // Вестн. научных конференций. 2017. № 2—3. С. 30—38.
4. Подплетенная А. А. Выход российской продукции приборостроения на рынки развивающихся стран: возможности в условиях санкций // Управление экономическими системами: электронный науч. журн. 2015. № 9 (81).
5. Подиновский В. В. Количественная важность критериев и аддитивные функции ценности // Журн. вычислительной математики и математической физики. 2013. Т. 53, № 1. С. 133—133.
6. Zimmer K., Fröhling M., Schultmann F. Sustainable supplier management — a review of models supporting sustainable supplier selection, monitoring and development // Intern. Journal of Production Research. 2016. Vol. 54, N 5. P. 1412—1442.
7. Karsak E. E., Dursun M. An integrated fuzzy MCDM approach for supplier evaluation and selection // Computers & Industrial Engineering. 2015. Vol. 82. P. 82—93.
8. Zhang G., Lu J., Gao Y. Multi-Level Decision Making. Berlin/Heidelberg: Springer, 2015.
9. Пипия Г. Т. Оценка уровня качества многопараметрической продукции с помощью методов условной оптимизации // Контроль. Диагностика. 2018. № 5. С. 20—25.

Сведения об авторах

Георгий Тенгизович Пипия

— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа киберфизических систем и управления; E-mail: gogpiy@ya.ru

Людмила Васильевна Черненкокая — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа киберфизических систем и управления; E-mail: gogpiy@ya.ru

Поступила в редакцию
06.03.2020 г.

Ссылка для цитирования: *Пипия Г. Т., Черненкокая Л. В.* Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. II. Формализация единичных критериев верхнего и нижнего уровней // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 749—755.

**METHOD FOR FORMALIZATION OF SINGLE QUALITY CRITERIA
FOR INSTRUMENTATION PRODUCTS IN A TWO-LEVEL MODEL.
PART II. FORMALIZATION OF SINGLE UPPER- AND LOWER-LEVEL CRITERIA**

G. T. Pipiya, L.V. Chernenkaya

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 194021, St. Petersburg, Russia
E-mail: gogpiy@ya.ru*

A technique of fuzzy inference of single quality criteria is presented. The technique is based on additional data and is using a model for determining the significance of information sources that satisfy a two-level model for assessing the quality of instrument-making products. The issues of assessing the quality level are considered, target functions of quality are proposed, areas of definition for each level of optimization are established, and a method for quantitative identification of single quality criteria is developed. Several ways to improve the developed method are proposed.

Keywords: quality assessment model, two-level optimization, instrument engineering, single criteria, linguistic variable

REFERENCES

1. Pipiy G.T., Chernenkaya L.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 7(63), pp. 650–656. (in Russ.)
2. Mikayeva A.S., Mikayeva S.A., Pol'dyayeva A.I. *Novaya nauka: finansovo-ekonomicheskiye osnovy*, 2017, no. 3, pp. 154–156. (in Russ.)
3. Voronina V.N. *Bulletin of Scientific Conferences*, 2017, no. 2–3, pp. 30–38. (in Russ.)
4. Podpletennaya A.A. *Upravleniye ekonomicheskimi sistemami*, 2015, no. 9(81).
5. Podinovskiy V.V. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, 2013, no. 1(53), pp. 133–142. (in Russ.)
6. Zimmer K., Fröhling M., Schultmann F. *International Journal of Production Research*, 2016, no. 5(54), pp. 1412–1442.
7. Karsak E.E., Dursun M. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, vol. 82, pp. 82–93.
8. Zhang G., Lu J., Gao Y. *Multi-Level Decision Making*, Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, 2015.
9. Pipiy G.T. *Kontrol'. Diagnostika* (Testing. Diagnostics), 2018, no. 5, pp. 20–25. (in Russ.)

Data on authors

- Georgy T. Pipiya** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Cyber Physical Systems and Control; E-mail: gogpiy@ya.ru
- Ludmila V. Chernenkaya** — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Cyber Physical Systems and Control; E-mail: gogpiy@ya.ru

For citation: Pipiya G. T., Chernenkaya L.V. Method for formalization of single quality criteria for instrumentation products in a two-level model. Part II. Formalization of single upper- and lower-level criteria. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 8. P. 749—755 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-749-755