

МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗАЦИИ ЕДИНИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ДЛЯ ДВУХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ.

Ч. I. ЕДИНИЧНЫЕ КРИТЕРИИ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ КАЧЕСТВА

Г. Т. ПИПИЯ, Л. В. ЧЕРНЕНЬКАЯ

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

Представлены результаты разработки методики количественной идентификации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели его оценивания. Рассмотрены вопросы оценки качества, предложены целевые функции качества, установлены области определения для каждого уровня оптимизации.

Ключевые слова: модель оценивания качества, двухуровневая оптимизация, приборостроение, целевые функции

Введение. Развитие приборостроительной техники в соответствии с концепцией Индустрии 4.0 требует от производителей перехода на автоматизированное производство и одновременной его синхронизации как с внутренней, так и с внешней средой. Индустрии 4.0 посвящено достаточное количество работ, однако для определения основных требований к методике измерения и оценке показателей качества продукции с учетом особенностей Индустрии 4.0 целесообразно воспользоваться работами [1, 2], анализ которых позволяет выделить следующие моменты:

- необходимо адаптировать методику измерения и оценки показателей качества к информационной платформе предприятия;
- информационная платформа предприятия должна обеспечивать выполнение требований Индустрии 4.0;
- производственный этап должен охватывать все процессы, начиная от снабжения и заканчивая реализацией (включая транспортировку).

При этом многоуровневая иерархия показателей качества продукции в соответствии с концепцией модели его мониторинга [3] должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) измерение показателей нижнего уровня должно ограничиваться допустимой областью определения функций верхнего уровня;
- 2) функция качества (главный уровень) не должна содержать показатели, направленные на обеспечение качества (подуровни);
- 3) показатели качества должны удовлетворять требованиям нормированности, сопоставимости, репрезентативности, чувствительности.

Обзор существующих методов оценивания качества продукции. В настоящее время существует множество инструментов для оценки и улучшения качества продукции, которые

могут быть классифицированы по математическим моделям, в соответствии с типом информации и конкретными факторами.

С учетом классификации математических моделей инструменты оценки и улучшения качества можно разделить на статистические, аналитические, экспертно-аналитические и экспертные статистические.

К основным статистическим инструментам можно отнести корреляционный анализ, многомерные контрольные диаграммы, кластерный анализ и регрессионный анализ. Обзор современных инструментов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Наименование инструмента	Пример применения
Корреляционный анализ	Расчет надежности с негауссовыми структурами зависимостей [4]
	Прогнозирование механизмов разрушения в листах мелкозернистого алюминиевого сплава [5]
Регрессионный анализ	Анализ отказов продукта [6]
	Промышленное проектирование [7]
	Использование современных инструментов для оценки и анализа надежности [8]
Кластерный анализ	Анализ и группировка операций технического обслуживания на участках добычи газа [9]
	Анализ надежности критических систем [10]
Многомерные контрольные карты	Анализ результирующего тренда [11]
	Тестирование износа инструмента [12]

Основной недостаток инструментов статистического анализа — проблема обработки малого объема выборки. Если наряду с инструментами статистического анализа используются другие методы, то увеличивается время, затрачиваемое производителем на принятие решения по качеству выпускаемой продукции. Единственный метод решения указанных проблем — включение методики экспертной оценки в статистическую модель оценки качества. Применение экспертных статистических методов, с одной стороны, позволяет практически решить проблему, с другой — добавляет определенную степень субъективности, что опять же влияет на процесс принятия решений.

При решении задач оценки и улучшения качества продукции относительно новыми являются методы оптимизации, вопросы их применения и совершенствования рассмотрены в работах [13—15].

Математическая модель оценки качества продукции. Оценка качества производится в соответствии со следующим теоретико-множественным определением модели:

$$\langle Q, X, F_i, Y_i \rangle,$$

где Q — функция качества (главный уровень), X — область определения численных значений функции качества, F_i — i -е целевые функции (подуровни), Y_i — область определения i -х значений целевой функции.

Функция качества Q определяется непрерывной последовательностью чисел $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; x_1, x_2, \dots, x_i, i = 1, 2, \dots, m$. При этом $a_j : 0 \leq a_j \leq 1$ (при фиксированном i -м значении x) и $x_i : 0 \leq \sum_{i=1}^m x_i \leq 1$. Иерархия показателей качества задает дополнительные ограничения на область определения Q , следовательно, функция качества примет вид [16]

$$Q(X, F_i(Y_i)), \quad (1)$$

где $x \in X : Ax \leq d, |a_{ij}| = A$, а подуровни $y \in Y : B_i y \leq d, |b_{ij}| = B_i, 0 \leq b_j^k \leq 1$ (при фиксированном i -м значении y) и $0 \leq \sum_{i=1}^m y_i \leq 1$.

Поиск оптимального значения функции (1) осуществляется снизу вверх, сначала определяется оптимальное значение подуровней $F_i(Y_i)$, после чего найденные значения y подставляются в (1) и осуществляется поиск значения функции для главного уровня. Задача оптимизации для верхнего уровня с учетом наличия ограничений, накладываемых подуровнями, характеризуется следующим выражением [16]:

$$\min_x \{Q(y(x), x) : G(y(x), x) \leq 0, H(y(x), x) = 0, y(x) \in \psi(x)\},$$

где $y(x) = F_i, F_i : y(x) \in \psi(x); \psi(x)$ — многогранник, область его ограничений такая, что $Q : R^n \times R^m \rightarrow R, G : R^n \times R^m \rightarrow R^k, H : R^n \times R^m \rightarrow R^l$ (по k -м индексам существуют ограничения со знаком “ \leq ”, а по l -м индексам — со знаком “ $=$ ”).

Задача оптимизации для нижнего уровня представляется как

$$\min_y \{f(x, y) : g(x, y) \leq 0, h(x, y) = 0\}.$$

Описание проблемной области. Для решения проблемы оценки качества продукции приборостроения, с учетом указанных во введении требований, необходимо разработать методику идентификации критериев качества для производственной системы изготовления приборов. Система производства продукции на примере изготовления дефектоскопа представлена на рисунке.

Как видно из рисунка, информация в модуль „оценка качества“ поступает из двух источников: первый источник — это процесс производства дефектоскопа, второй источник — модуль мониторинга показателей качества.

Единичные критерии качества для двухуровневой модели. Решение задачи идентификации единичных показателей позволяет облегчить оценку качества продукции на всех уровнях жизненного цикла. Для идентификации единичных критериев необходимо определить целевые функции верхнего и нижнего уровней.

Исходя из требований к модели мониторинга показателей качества, определим целевые функции для задачи децентрализации следующим образом: $Q(x, y_{1,2})$ — функция качества, $F_1(x, y_{1,2})$ — функция затрат на обеспечение качества, $F_2(x, y_{1,2})$ — функция управления поставщиками, x — переменные, такие что $x \in X \subset R^n$. Функция качества такая, что $Q : X \times Y_1 \times Y_2 \rightarrow R$, где y — критерии качества, такие что $y_i \in Y_i \subset R^{m_i}$, при этом $F_i : X \times Y_i \rightarrow R$. Математическая модель двухуровневой оптимизации может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \min_{x \in X} Q(x, y_1 = y, y_2 = z) &= cx - d_1 y + d_2 z, Ax + B_1 y_1 + B_2 y_2 \leq b_1; \\ \min_{y_i \in Y} F_1(x, y) &= cx + d_1 y, Ax + B_1 y \leq b'; \\ \min_{z_i \in Z} F_2(x, z) &= cx + d_2 z, Ax + B_2 z \leq b''. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Состояние двухуровневой модели линейной оптимизации выражается выходными параметрами (частными критериями), представленными в табл. 2.

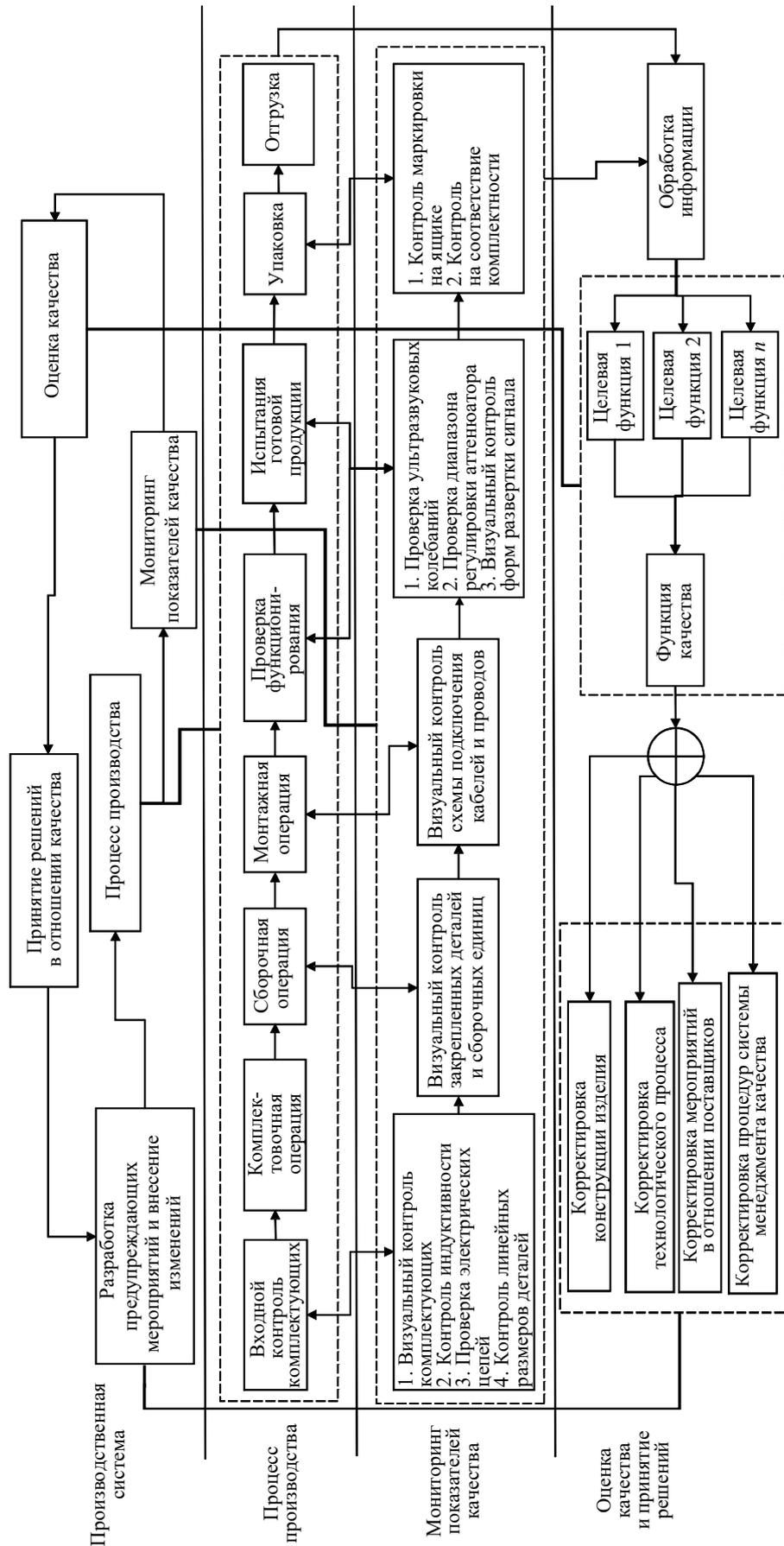


Таблица 2

Уровень	Целевая функция	Частный критерий
1	Функция качества	Уровень выхода годной продукции
		Степень результативности выработанных предупреждающих мероприятий (за предыдущий период)
		Степень эффективности новых внедренных технологий и методик
2.1	Функция затрат на обеспечение качества	Затраты на оценку качества
		Затраты на предупреждение несоответствий
		Затраты на устранение внутренних несоответствий
2.2	Функция управления поставщиками	Своевременность доставки
		Своевременность устранения замечаний к качеству изделий
		Результативность обращений к поставщику по возникающим вопросам

Для функции $Q(x, y_{1,2})$ при фиксированном значении $y_{1,2}$ в i -й строке матрицы указываются частные критерии качества, перечисленные в табл. 2, а в j -м столбце — составные части или функциональные блоки изделия. Соответственно необходимо определить показатели качества по каждому функциональному блоку. Для функции $F_1(x, y_{1,2})$ при фиксированных значениях x и $y_{1,2}$ учитываются элементы матрицы, соответствующие следующим затратам: на проведение операционного контроля — b'_1 ; на испытание продукции — b'_2 ; на анализ несоответствий — b'_3 ; на устранение брака — b'_4 ; на возникновения брака по причине поставщика — b'_5 ; на обеспечение качества поставок — b'_6 .

Допустимая область для функции $F_1(x, y_1)$ описывается следующей матрицей:

$$\begin{vmatrix} b'_{11} & & & & & \\ & b'_{22} & & & & \\ & & b'_{32} & & & \\ & & & b'_{43} & & \\ & & & & b'_{53} & \\ b'_{61} & b'_{62} & & & & \end{vmatrix}.$$

Для расчета единичных критериев функции $F_2(x, y_2)$ применяется подход, основанный на модели сравнительных издержек (Cost-Ratio Model), описанной в работе [17]. Размерность области определения B_2z для функции $F_2(x, z)$ равна количеству поставщиков, задействованных в процессе производства дефектоскопов.

Заключение. Применение рассмотренных инструментов оценки качества продукции не ограничивается приведенными в работе примерами. Использование современных методов и моделей теории оптимизации в задачах разработки модели оценки качества продукции позволяет найти новые пути сокращения производственных издержек при изготовлении изделий приборостроения, что, в свою очередь, позволит повысить качество продукции. Предложенная модель оценки качества продукции позволяет учитывать требования Индустрии 4.0 за счет охвата специфики рынка и системы производства.

Во второй части статьи будет произведена формализация единичных критериев качества для функций верхнего и нижнего уровней и предложена методика оценки степени значимости источников информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстых Т. О., Гамидуллаева Л. А., Шкарупета Е. В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях индустрии 4.0 // Экономика в промышленности. 2018. Т. 11, № 1. С. 11—19.
2. Velikorossov V. V., Rechinskiy A. V., Chernenkaya L. V., Filin S. A., Chernenkii A. V. Digital economy as a tool for reducing of uncertainty in strategic managerial decisions // Proc. of the XI Intern. Scientific Conf. "Communicative Strategies of the Information Society" (CSIS'19), St. Petersburg, Oct. 2019, Art. N 14. P. 1—6.
3. Пупия Г. Т. Модель мониторинга показателей в многокритериальной среде // Стандарты и качество. 2019. № 3. С. 108—108.
4. Wang Fan, Heng Li. System reliability under prescribed marginals and correlations: Are we correct about the effect of correlations? // Reliability Engineering & System Safety. 2018. N 173. P. 94—104.
5. Farahani B. V. et al. A digital image correlation analysis on a sheet AA6061-T6 bi-failure specimen to predict static failure // Engineering Failure Analysis. 2018. N 90. P. 179—196.
6. Jeasu J., So Young Sohn. Product failure pattern analysis from warranty data using association rule and Weibull regression analysis: A case study // Reliability Engineering & System Safety. 2015. N 133. P. 176—183.
7. Perry D. A. et al. Evaluating the systems engineering problem management process for industrial manufacturing problems // Systems Engineering. 2016. Vol. 19, N 2. P. 133—145.
8. Piña-Monarez M. R., Ortiz-Yanez J. F. Weibull and lognormal Taguchi analysis using multiple linear regression // Reliability Engineering & System Safety. 2015. N 144. P. 244—253.
9. de Jonge Br. et al. Reducing costs by clustering maintenance activities for multiple critical units // Reliability Engineering & System Safety. 2016. N 145. P. 93—103.
10. Ferrario E., Pedroni N., Zio E. Evaluation of the robustness of critical infrastructures by Hierarchical Graph representation, clustering and Monte Carlo simulation // Reliability Engineering & System Safety. 2016. N 155. P. 78—96.
11. Epprecht E. K., Aparisi F., Ruiz O. Optimum variable-dimension EWMA chart for multivariate statistical process control // Quality Engineering. 2018. Vol. 30, iss. 2. P. 268—282.
12. Keith H. et al. A multivariate control chart for autocorrelated tool wear processes // Quality and Reliability Engineering International. 2016. Vol. 33, iss. 6. P. 2093—2106.
13. Coit D. W., Zio E. The evolution of system reliability optimization // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Sept.
14. Aktar D., Ayva O., Buruk Y. A case study in mixture design: Multi response optimization of glaze formulation // Quality Engineering. 2015. Vol. 27, iss. 2. P. 186—195.
15. Basak A.-O., Koksal G., Weber G. W. Nonconvex optimization of desirability functions // Quality Engineering. 2018. Vol. 30, iss. 2. P. 293—310.
16. Zhang G., Lu J., Gao Y. Multi-Level Decision Making. Berlin/Heidelberg: Springer, 2015.
17. Климова Г. В. Общие принципы построения модели оценки поставщика // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Экономика и право. 2013. № 3.

Сведения об авторах**Георгий Гензисович Пупия**

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

Людмила Васильевна Черненькая

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

Поступила в редакцию
06.03.2020 г.

Ссылка для цитирования: Пупия Г. Т., Черненькая Л. В. Методика формализации единичных критериев качества продукции приборостроения для двухуровневой модели. Ч. 1. Единичные критерии целевых функций качества // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 650—656.

**METHOD FOR FORMALIZATION OF SINGLE QUALITY CRITERIA
FOR INSTRUMENTATION PRODUCTS IN A TWO-LEVEL MODEL.
PART I. SINGLE CRITERIA FOR TARGET QUALITY FUNCTIONS**

Pipiya G. T., Chernenkaya L.V.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: gogpipiy@ya.ru*

A method for quantitative identification of single criteria of instrument-making products quality for a two-level model of the products assessment is developed. Problems of quality assessment are considered, target quality functions are proposed, areas of definition for each level of optimization are established.

Keywords: quality assessment model, two-level optimization, instrument making, target functions

REFERENCES

1. Tolstyh T.O., Gamidullaeva L.A., Shkarupeta E.V. *Ekonomika v promyshlennosti*, 2018, no. 1(11), pp. 11–19. (in Russ.)
2. Velikorossov V.V., Rechinskiy A.V., Chernenkaya L.V., Filin S.A., Chernenkii A.V. *Proc. of the XI International Scientific Conference "Communicative Strategies of the Information Society" (CSIS'19)*, October 2019, art. no. 14, pp. 1–6.
3. Pipiya G.T. *Standarty i kachestvo*, 2019, no. 3, pp. 108–108 (In Russ.)
4. Wang Fan and Heng Li. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, no. 173, pp. 94–104.
5. Farahani B.V. et al. *Engineering Failure Analysis*, 2018, no. 90, pp. 179–196.
6. Jeon J. and Sohn S.Y. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, no. 133, pp. 176–183.
7. Perry III D.A. et al. *Systems Engineering*, 2016, no. 2(19), pp. 133–145.
8. Piña-Monarez M.R., and Ortiz-Yanez J.F. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, no. 144, pp. 244–253.
9. de Jonge B. et al. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, no. 145, pp. 93–103.
10. Ferrario E., Pedroni N., and Zio E. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, no. 155, pp. 78–96.
11. Epprecht E.K., Aparisi F., and Ruiz O. *Quality Engineering*, 2018, no. 2(30), pp. 268–282.
12. Harris K. et al. *Quality and Reliability Engineering International*, 2016, no. 6(32), pp. 2093–2106.
13. Coit D.W., and Zio E. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018.
14. Ezgi D.A., Ayva O., and Buruk Y. *Quality Engineering*, 2015, no. 2(27), pp. 186–195.
15. Basak A.-O., Koksal G., and Weber G.W. *Quality Engineering*, 2018, no. 2(30), pp. 293–310.
16. Zhang G., Lu J., Gao Y. *Multi-Level Decision Making*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015.
17. Klimova G.V. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya "Jekonomika i Pravo"*, 2013, no. 3. (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: gogpipiy@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: gogpipiy@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 I. Single criteria for target quality functions. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 7. P. 650–656 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-650-656