

Гибридная экспертная система идентификации качества продукции и технологических процессов

А. Я. Дмитриев, Т. А. Митрошкина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34

e-mail: t.mitroshkina@gmail.com

Аннотация. Рассмотренная модель идентификации качества обладает усовершенствованным математическим аппаратом и позволяет использовать различную дополнительную информацию. Предлагаемый устойчивый матричный метод MTQFD (Matrix Technique QFD) позволяет определять не только приоритеты, но и оценки целевых значений характеристик продукции и параметров технологических процессов, при этом возможно использование информации об отрицательных взаимосвязях. Разработанные онтологическая модель, метод и проект экспертной системы универсальны и могут быть использованы для идентификации качества услуг.

Ключевые слова: менеджмент качества, проектирование качества, развертывание функции качества, онтология проектирования, экспертная система.

1. Введение

Эффективное проектирование качества продукции на основе онтологического подхода, выполнения требований стандартов, применения баз знаний, предметных онтологий и методов менеджмента качества является важнейшим направлением повышения конкурентоспособности продукции [1].

Проектирование качества продукции — это разработка продукции на основе ожиданий потребителей, знаний и параметрической идентификации характеристик качества.

Задача идентификации качества (определения приоритетов и целевых значений характеристик) на основе ожиданий потребителей и знаний разработчика является ключевой задачей [2–4]. Трудности при идентификации качества новой и сложной продукции возникают в связи с тем, что задача параметрической идентификации, по сути, является обратной. Необходимо определить характеристики проектируемой продукции или услуги (причину) по выявленной удовлетворенности (следствие). Задача параметрической идентификации качества продукции и услуг, как и большинство обратных задач, является некорректной. Некорректность также про-

является в высокой изменчивости требований во времени, неоднозначности невысказанных ожиданий и т. д.

Целью работы является повышение качества и конкурентоспособности продукции за счет проектирования и модернизации продукции и технологических процессов на основе широкого использования различного рода информации (знаний) и идентификации целевых значений характеристик продукции и параметров процессов при эффективном применении развертывания (структурирования) функции качества QFD [5, 6].

2. Системный онтологический подход и QFD

Современные международные стандарты на системы менеджмента, включая стандарт на систему менеджмента качества ISO 9001, разрабатываются с использованием единого подхода и требуют управления базами знаний организаций [7]. Так, новая версия стандарта ISO 9001 (ISO 9001:2015) разработана в соответствии с приложением к директиве ISO Annex SL (ISO/IEC Directives, Part 1 Consolidated ISO Supplement — Procedures specific to ISO). Директива устанавливает новый, единый стандарт для систем управления (на основе ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001, ISO 22000, ISO/IEC 27001 и др.), в соответствии с которым все стандарты систем управления будут приведены к единой структуре.

Пункт 7.1.6 ISO 9001:2015 «Знания организации» содержит требования по управлению ее знаниями [7]:

- организация должна определить знания, необходимые для функционирования ее процессов и для достижения соответствия продукции и услуг;
- знания должны поддерживаться и быть доступными в необходимом объеме;
- при рассмотрении изменяющихся нужд и тенденций организация должна оценивать текущий уровень знаний и определять, каким образом получить или обеспечить доступ к дополнительным знаниям и их необходимым обновлениям.

Интеграция в ISO 9001 требований в области управления знаниями и внедрение риск-менеджмента являются основными направлениями обновления стандарта и приведения его к современному уровню развития управленческой науки.

Онтологический инжиниринг как основа концепции менеджмента знаний является на настоящий момент наиболее перспективным подходом к управлению сложными «информационно наполненными» системами. Разработка систем менеджмента знаний включает несколько этапов: накопление, извлечение, структурирование, формализация и программная реализация, обслуживание.

Основная задача онтологического подхода — упорядочение знаний путем их систематизации, создания единой иерархии понятий, унификации терминов и правил интерпретации - отвечает общей цели повышения эффективности проектирования продукции в соответствии с требованиями и ожиданиями потребителя. Методология онтологического инжиниринга позволит оптимизировать процесс проектирования продукции с учетом не только требований и ожиданий потребителей, но и накопленной базы знаний разработчика.

Ключевой задачей обеспечения качества является определение (идентификация) характеристик качества продукции. От решения этой задачи зависят дальнейшие этапы жизненного цикла продукции и, в конечном итоге, конкурентоспособность организации. В теории управления под идентификацией системы понимают определение структуры системы и ее параметров путем анализа входных и выходных данных системы [2–4, 8].

Рассмотрим структурную и параметрическую идентификацию товарной продукции с использованием современных методов управления качеством.

Современным методом трансформации требований потребителя в непосредственные характеристики новой (или модернизируемой) продукции и идентификации качества является метод QFD. Целью применения метода является преобразование запроса потребителя (требований и ожиданий) в технические характеристики продукции и рабочие инструкции, визуализация, документирование и планирование качества продукции. Основным элементом QFD является именно *развертывание* требований потребителя в производстве и достижение соответствующих технических характеристик, отвечающих ожиданиям потребителя. Другими словами, речь в данном случае идет о подготовке производства к выпуску нового изделия.

В развернутом виде процесс реализации QFD включает четыре уровня, и на каждом из них строится свой Дом качества (House of Quality, HoQ). На I уровне потребительские характеристики преобразуются в технические. Затем последние преобразуются в характеристики компонентов (II уровень), далее – в параметры процессов (III уровень), а затем в требования к исполнению операций (IV уровень).

Результатом применения QFD является определение приоритетов и выявление характеристик продукции, характеристик компонентов, параметров технологического процесса и вспомогательных операций, в наибольшей степени влияющих на выполнение требований потребителя.

Так, абсолютное значение приоритета j -ой обобщенной характеристики продукции на I уровне QFD рассчитывается по формуле:

$$q1_j = \sum_{i=1}^n (p1_i \cdot h1_{ij}) = p1_1 h1_{1j} + p1_2 h1_{2j} + \dots + p1_n h1_{nj}, \quad (1)$$

где h_{1j} — коэффициент взаимосвязи j -й обобщенной характеристики продукции и i -го требования; p_{1i} — относительное значение важности i -го требования для потребителя; n — количество требований потребителя.

Методы идентификации качества эволюционируют одновременно с развитием самого понятия «качество». При этом значительную роль в развитии QFD играют математические подходы, которые используются как в вычислительной части (матричное исчисление, решение обратной задачи), так и в части интеграции с другими методами, такими как таблица голоса потребителя (VOCT) [4, 5, 9], теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) [10], анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA), проекты улучшения «Шесть сигма» и другими [11, 12].

Для эффективного применения метода предлагается структуризация знаний и использование онтологического подхода. Традиционный подход к проектированию продукции подразумевает выбор концепции и определение технических характеристик продукции. При этом зачастую автором технического задания на проектирование является сам разработчик. Учитывается база знаний в части класса «Концепция продукции» и атрибутов «Характеристики продукции». Онтологическая модель проектирования качества продукции на основе метода QFD, в отличие от традиционного подхода к проектированию, в первую очередь учитывает класс «Требования потребителя».

Требования потребителей определяются на основе анализа голоса потребителей и описываются *перечнем требований* (в соответствии с моделью Н. Кано [9] состоят из базовых требований, контрактных требований и ожиданий потребителей), важностью требований (например, по 10-балльной шкале) и оценкой конкурентоспособности продукции/удовлетворенности потребителя (с учетом данных бенчмаркинга).

Онтологическая модель проектирования качества продукции на основе метода QFD реализована с использованием инструмента Protégé. Структура онтологии аналогична иерархической структуре каталога.

3. Устойчивый матричный метод MTQFD и реализация онтологической модели проектирования качества

Предлагается использовать метод устойчивого приближенного решения следующего матричного уравнения (далее — линейная математическая модель, ЛММ):

$$H \cdot \delta\Theta = \delta P, \quad (2)$$

где $\delta\Theta$ — n -мерный вектор относительных отклонений параметров состояния (оценок целевых значений характеристик продукции для I уровня QFD); δP — k -мерный вектор относительных отклонений признаков состояния (важности тре-

бований и ожиданий потребителей (для I уровня QFD); H — матрица размером $(k \times n)$ коэффициентов взаимосвязи требований и характеристик (для I уровня QFD).

Разработанный алгоритм матричного метода MTQFD включает в себя как общепринятый расчет векторов приоритетов, так и параметрическую идентификацию характеристик продукции/компонентов (на I, II уровнях QFD) и параметров технологических процессов и вспомогательных операций (на III, IV уровнях QFD), широко применяемую в технических науках.

Используя матричные преобразования и известный метод наименьших квадратов (МНК) по формуле (3) получим не только принятые в QFD оценки приоритетов изменения технических характеристик, но и другие оценки направлений дальнейшего совершенствования:

$$\delta \hat{\Theta} = (H^T P H)^{-1} H^T P \delta P, \quad (3)$$

где P — весовая матрица погрешностей требований и ожиданий.

Кроме того, в условиях существования реальной возможности грубых ошибок в измерениях признаков состояния (для первого уровня QFD погрешность маркетинговых данных может составлять 10..50% при малых выборках) применение МНК требует использования специальных методов предварительной отбраковки исходных данных [13].

Предлагается использовать МНК в ограниченных случаях, только если количество требований больше, чем количество характеристик/параметров, задействованных в модели.

В случаях, когда количество характеристик превышает количество требований, целесообразно использовать алгоритм устойчивой параметрической идентификации математической модели с учетом информации о погрешности модели (матрицы взаимосвязи требований и характеристик) и признаков состояния (требований и ожиданий), а также дополнительной информации о возможных значениях относительных изменений параметров состояния (характеристик) с учетом рисков, корреляционных взаимосвязей характеристик («крыша» НоQ).

Все устойчивые схемы оценивания для линейных моделей строятся на основе функций влияния и устойчивого оценивания. Особое внимание уделяется устойчивой оценке Хьюбера. Для нахождения устойчивой оценки Хьюбера используется итерационная процедура, сходящаяся к устойчивой оценке за конечное число итераций [13].

Решение задачи в такой постановке позволяет получить оценки параметров состояния (величины относительных изменений характеристик), согласованные как с результатами маркетинговых и бенчмаркинговых исследований, так и с дополни-

тельной информацией и знаниях о погрешностях данных и возможностях разработчика.

Предлагается параметрическую идентификацию проводить на основе теории регуляризации, позволяющей обоснованно учитывать широкий круг различной дополнительной информации. При получении регуляризованных оценок, наилучшим образом учитывающих экспериментальную и дополнительную информацию, выбор параметра регуляризации α осуществляется с учетом погрешности измерений и погрешности коэффициентов (матрицы H) ЛММ [1].

В разработанном методе MTQFD регуляризованное решение задачи параметрической идентификации математической модели определяется следующим образом:

$$\delta\hat{\Theta}^\alpha = \arg \min_{\delta\Theta} M^\alpha [\delta\Theta], \quad (4)$$

где

$$M^\alpha [\delta\Theta] = \sum_{i=1}^k F_1(c_i, \Delta_i, p_i) + \alpha \sum_{j=1}^n F_2(c_2, \delta\Theta_j - \delta\Theta_j^0, q_i),$$

F_1 и F_2 — функции специального вида [1, 13]; Δ — невязка; p — вес невязки; c — параметр Хьюбера.

В случае использования квадратичной нормы равенство (4) принимает следующий вид:

$$M_1^\alpha [\delta\Theta] = \|H\delta\Theta - \delta P\|_p^2 + \alpha \|\delta\Theta - \delta\Theta^0\|_q^2,$$

где $\|\cdot\|_p = (\cdot)^T P (\cdot)$ — квадратичная норма с весами.

Видно, что решение, с одной стороны, зависит от бенчмаркинговой информации и используемой ЛММ, заключенных в первом слагаемом $\|H\delta\Theta - \delta P\|_p^2$ сглаживающего функционала M_1^α , а с другой стороны — от информации о возможных величинах параметров состояния, заключенной во втором слагаемом $\|\delta\Theta - \delta\Theta^0\|_q^2$. Соотношение между значимостью бенчмаркинговой и дополнительной информации определяется параметром регуляризации α .

Выбор шага итерации, на котором определяются искомые величины относительных отклонений параметров состояния и соответствующего параметра регуляризации α , осуществляется при значении функции регуляризации $f(\alpha)$ наиболее близком к нулю:

$$f(\alpha) = \|H\delta\hat{\Theta} - \delta P\|_p^2 - \alpha \left(\delta + h \|\delta\hat{\Theta}^\alpha - \delta\Theta^0\|_q \right)^2, \quad (5)$$

здесь $\|\delta P - \delta \bar{P}\|_p \leq \delta$; $\|H - \bar{H}\| \leq h$; $\|\delta \hat{\Theta}^\alpha - \delta \Theta^0\|_q$ определяются различным образом для каждой задачи.

Для реализации представленного метода MTQFD разработан программный модуль в системе Mathcad. Для упрощения реализации метода при разработке программного модуля предусмотрено использование исходных данных в виде стандартных таблиц MS Excel, что позволяет исследователям и экспертам не затрачивать ресурсы на техническую подготовку данных и сосредоточиться на вопросах «качества» исходных данных и дополнительной информации.

Целью создания экспертной системы проектирования качества продукции на основе метода MTQFD является повышение качества продукции за счет: автоматизированного хранения способов повышения конкурентоспособности продукции и удовлетворенности потребителей; разработки математической модели процесса идентификации качества продукции; формализации представления знаний экспертов; создания режимов консультации, обучения и приобретения новых знаний.

Проект экспертной системы имеет стандартную структуру базы знаний (описание проблемной области, процедурные знания, декларативные знания, атрибуты и исходные данные консультации) и обеспечивает учет опыта экспертов при проектировании продукции и разработке технологических и производственных процессов. База знаний кроме конкретной информации о требованиях потребителей и характеристиках продукции содержит модели проблемной области для компонентов, технологических и производственных процессов, включающие собственно описание этой области и знания о порядке решения задач (сценарий консультации). Экспертная система обеспечивает решение задач на основе базы знаний, включающей знания из различных классификаторов, а также опыт экспертов при проектировании продукции и разработке технологических процессов. Экспертная система ориентирована на идентификацию качества продукции на этапах разработки продукции, компонентов, технологических и производственных процессов (все 4 уровня QFD).

4. Заключение

Предложенная предметная онтология проектирования качества продукции опирается на онтологический подход, развиваемый в системах менеджмента и закрепленный в международных стандартах, которые, по сути, образуют мета-онтологию. Разработанная онтология метода MTQFD позволяет существенно облегчить конструкторам, технологам и экспертам решение практической задачи идентификации и дальнейшего планирования качества, а также повысить достоверность и устойчивость результатов к погрешностям исходных данных. Онтология

реализована на примере задачи проектирования автопровода с учетом дополнительной информации, в том числе о результатах анализа рисков конструкции и процесса FMEA [14]. Применение онтологического подхода и метода MTQFD позволило сократить сроки проектирования, повысить качество и конкурентоспособность автопровода за счет расчета новых приоритетов, уточнения технических характеристик продукции и параметров технологических и производственных процессов.

Перспективное понимание онтологической парадигмы и проектирование качества продукции на основе параметрической идентификации моделей, требований потребителей, знаний может обеспечить достижение повышения качества продукции и повышения конкурентоспособности в различных отраслях промышленности.

Литература

- [1] *Дмитриев А. Я., Митрошкина Т. А.* Проектирование качества продукции на основе параметрической идентификации моделей, требований потребителей, знаний: онтологическая парадигма // *Онтология проектирования*. 2015. Т. 5, № 3(17). С. 313–327.
- [2] *Astrom K. J., Eykhoff P.* System identification — A survey // *Automatica*. 1971. Vol. 7. P. 123–162.
- [3] *Ljung L.* System identification. Theory for the User, — 2 ed. — N.J. : PTR Prentice Hall, 1999.
- [4] *Никульчев Е. В.* Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов. — М. : МГУП, 2010.
- [5] *Akao Y., Mazur G. H.* The leading edge in QFD: past, present and future // *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2003. Vol. 20, No. 1. P. 20–35.
- [6] *Mazur G.* QFD 2000: Integrating QFD and Other Quality Methods to Improve the New Product Development Process // *12th Symposium on QFD/6th International Symposium on QFD2000*. 2002. P. 305–317.
- [7] ISO 9001:2015 Quality management systems. Requirements. — International Organization for Standardization, 2015 (http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=62085)
- [8] *Rogachev G.N.* Production method of describing automated controllers in the analysis of continuous-discrete control systems // *Automatic control and computer sciences*. 2014. Vol. 48, No. 5. P. 249–256.
- [9] *Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S.* Attractive quality and must-be quality // *Journal of Japanese Society for Quality Control*. 1984. Vol. 14. P. 39–48.

- [10] Yamashina H., Ito T., Kawada H. Innovative product development process by integrating QFD and TRIZ // *International Journal of Production Research*. 2002. Vol. 40, No. 5. P. 1031–1050.
- [11] Родионов В. Н., Попова Т. В., Дмитриев А. Я., Митрошкина Т. А. Инновационное преобразование рабочих мест на основе интеграции методов QFD и FMEA // *Методы менеджмента качества*. 2011. № 8. С. 30–35.
- [12] Fehlmann T.M. The impact of linear algebra on QFD // *Int. J. of Quality & Reliability Management*. 2005. Vol. 22, No. 1. P. 83–96.
- [13] Huber P. Robust Statistics. — Wiley, 1981.
- [14] Dmitriev A., Mitroshkina T. The ontological model and the hybrid expert system for products and processes quality identification involving the approach based on system analysis and quality function deployment // *ITM Web of Conferences*. 2016. Vol. 6. P. 02005.

Авторы:

Александр Яковлевич Дмитриев — кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет); заведующий кафедрой управления качеством, Самарская государственная областная академия (Наяновой)

Митрошкина Татьяна Анатольевна — ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет)

Hybrid Expert System for Products and Processes Quality Identification Involving

A. Ya. Dmitriev, T. A. Mitroshkina

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

34, Moskovskoye Shosse, Samara, Russia, 443086

e-mail: t.mitroshkina@gmail.com

Abstract. Discussed model of quality of identification has improved mathematical tools and allows you to use a variety of additional information. The proposed robust method is a matrix MTQFD (Matrix Technique Quality Function Deployment) allows you to determine not only the priorities but also the assessment of the target values of the product characteristics and process parameters, with the possible use of the information on the negative relationship. Designed ontological model, method and model of expert system versatile and can be used to identify the quality of services.

Keyword: quality management, design of quality, quality function deployment, ontology of designing, expert system

References

- [1] Dmitriev A. Ya., Mitroshkina T. (2015) *Ontology of designing*, **5**(17):313–327. [In Rus]
- [2] Astrom K. J., Eykhoff P. (1971) *Automatica*, **7**:123–162.
- [3] Ljung L. (1999) *System identification. Theory for the User*; 2 ed. PTR Prentice Hall.
- [4] Nikulchev E. V. (2010) *Identifikacija dinameskih sistem na osnove simmetrij rekonstruirovannyh attraktorov*. Moscow. [In Rus]
- [5] Akao Y., Mazur G. H. (2003) *International Journal of Quality & Reliability Management*, **20**(1):20–35.
- [6] Mazur G. (2000) *Proceedings of 12th Symposium on QFD/6th International Symposium on QFD2000*, pp. 305-317.
- [7] ISO 9001:2015 *Quality management systems. Requirements*.
- [8] Rogachev G.N. (2014) *Automatic control and computer sciences*, **48**(5):249–256.
- [9] Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. A (1984) *Journal of Japanese Society for Quality Control*, **14**:39–48.
- [10] Yamashina H., Ito T., Kawada H. (2002) *International Journal of Production Research*, **40**(5):1031–1050.
- [11] Rodionov V. N., Popova T. V., Dmitriev A. Ya., Mitroshkina T. A. (2011) *Metody menedzhmenta kachestva*, 8:30–35. [In Rus]
- [12] Fehlmann T.M. (2005) *Int. J. of Quality & Reliability Management*, **22**(1):83–96.
- [13] Huber P. (1981) *Robust Statistics*. Wiley.
- [14] Dmitriev A., Mitroshkina T. (2006) *ITM Web of Conferences*, **6**:02005.