



# УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Л. А. Кузнецов

*Липецкий государственный технический университет*

Изложена методология управления качеством в сложных технологических процессах. Для оценки состояния технологии и качества продукции, характеризующихся измеренными значениями технологических факторов и показателей качества, которые описываются случайными величинами, предложено использовать энтропию, а для выявления взаимосвязи между технологией и качеством — количество информации. Рассмотрены две технологии: локальная, связанная с единицей продукции, и глобальная, регламентирующая производство продукции одного вида. При управлении качеством оптимизируется локальная технология, а глобальная ограничивает область ее определения. Разработана самообучающаяся система управления качеством.

## ВВЕДЕНИЕ

Руководством по разработке и внедрению современной методологии управления качеством на предприятиях служат международные стандарты сер. ISO 9000. Сертификат об их внедрении на предприятии выступает в роли гаранта высокого и стабильного качества его продукции. Это во многом объясняется идеологией данных стандартов, опирающейся на предположение о соответствии между качеством продукции и технологией производства.

Основу статистических методов контроля качества составляют семь так называемых японских инструментов: диаграмма Парето, причинно-следственная диаграмма Исикавы, контрольные карты Шухарта, гистограммы, метод расслоения, графики и диаграммы разброса [1]. Дополняют эти инструменты методы выборочного контроля, которые представляют собой статистически обоснованный механизм для определения доли продукции, подлежащей проверке [2].

Проблема управления качеством включает в себя несколько важных задач, среди которых:

- 1) контроль качества и констатация факта его соответствия требованиям;
- 2) контроль технологии и констатация факта ее соблюдения или нарушения;
- 3) установление взаимосвязи между технологией и качеством продукции;
- 4) определение технологии, обеспечивающей производство качественной продукции;
- 5) управление технологией в процессе производства с целью возможного повышения качества продукции

или снижения затрат на технологию по отношению к их средним значениям.

Существующие статистические методы позволяют представить данные контроля в форме, облегчающей исследователю (технологу, специалисту по качеству и др.) определить отклонения качества и возможные нарушения технологического процесса, т. е. они могут быть применены для решения двух первых задач. Формальных инструментов для анализа и механизмов выявления возможных причин возникновения отклонений качества они не содержат, отсутствуют теоретические основы для формирования скалярных характеристик состояния технологии и качества по множеству измеренных значений векторных показателей качества и технологических факторов. Это не позволяет упорядочивать состояние технологии и качества, что необходимо для мониторинга технологии и управления качеством продукции.

В настоящей статье предлагается возможная основа формализации названных задач управления качеством и мониторинга технологии, пригодная для автоматизации их решений. Рассматривается абстрактный многошаговый (многооперационный) технологический процесс получения продукции из набора исходных ингредиентов (сырья), в котором исходные ингредиенты смешиваются в определенных пропорциях и на полученную смесь в следующих одна за другой операциях воздействуют энергетическими полями различного вида с целью придания ей требуемых свойств.

Примерами могут служить технологические процессы пищевой, химической, металлургической и ряда других отраслей промышленности. Для решения задач уп-

равления качеством вводится системное представление сложного технологического процесса в виде объекта управления.

Теоретические основы решения перечисленных задач управления качеством базируются на предположениях:

— теоретические знания о существе физических и химических явлений, лежащих в основе технологических процессов, в виде и объеме, достаточных для получения строгих моделей отображения технологии производства в качестве продукции, отсутствуют;

— между значениями технологических факторов и значениями характеристик качества продукции существуют причинно-следственные связи;

— в соответствии с требованиями стандартов осуществляется тотальный контроль технологических факторов и показателей качества, измеренные значения которых хранятся в базе данных;

— цель управления состоит в обеспечении заданного качества продукции при возможной экономии ресурсов.

Технологический процесс описывается в виде объекта управления, в котором отдельные операции представляются шагами многошагового процесса управления, технологические факторы выступают в роли управлений, показатели качества готового продукта — выходными управляемыми величинами, колебания характеристик сырья и условий осуществления технологии — возмущениями. Все одноименные величины объединяются в векторы, через которые определяется состояние системы. Модель объекта инвариантна по отношению к содержательному существу технологического процесса. Адаптация абстрактной модели к реальному процессу осуществляется приписыванием соответствующего смысла компонентам векторов.

## 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Перечисленные задачи управления качеством решаются на основе технологической информации, характеризующей процесс изготовления продукции и достигнутый результат, — измеренных значений технологических факторов и показателей качества. Вся совокупность измеряемых величин может быть представлена в виде единого вектора  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m, z_{m+1}, \dots, z_{m+n}) = (\mathbf{u}, \mathbf{y})$ , где  $\mathbf{u}$  —  $m$ -мерный вектор технологических факторов, а  $\mathbf{y}$  —  $n$ -мерный вектор показателей качества. Измеренные значения векторов обозначим соответственно  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m, \xi_{m+1}, \dots, \xi_{m+n}) = (\tau, \sigma)$ .

Для повышения степени детализации возможного анализа, измеренные значения могут снабжаться идентификаторами времени измерения, вида продукции, типа технологии, к которым они относятся, и т. п. С использованием идентификаторов векторы измеренных значений могут быть собраны в кластеры, соответствующие целям исследований. Например, измерения, относящиеся к одному виду продукции и к одному интер-

валу времени, могут быть представлены одним кластером (массивом):

$$L^j(t) = \{\xi_q(i), q = 1, 2, \dots, Q^j(i)\} = \{[\tau_q(i), \sigma_q(i)], q = 1, 2, \dots, Q^j(i)\}, \quad (1)$$

где  $j \in [1, J]$  — тип технологии (вид продукции),  $i \leftrightarrow \Delta t_i$  — номер интервала времени,  $Q^j(i)$  — число измерений (записей), содержащихся в кластере.

Из общих кластеров могут быть выделены кластеры измерений технологических факторов и показателей качества. Ниже это разделение производится при необходимости учета их различной роли в задачах идентификации и управления. Без необходимости индексы вида продукции, времени и других признаков не указываются.

## 2. ПРОСТРАНСТВО КАЧЕСТВА

Качество продукции конкретизируется набором показателей качества, которые в рамках данной статьи предполагаются метрическими физическими величинами. Возможность объективного упорядочения продукции по качеству имеет принципиальное значение для ее сравнения, продвижения на рынке, рекламы, назначения стоимости, анализа недостатков и поиска путей совершенствования технологии.

Из-за отсутствия четких моделей и множества помех нельзя получить значения показателей качества, точно равными наперед заданным значениям. Поэтому в стандартах они задаются интервалами разрешенных значений, что обеспечивает некоторый запас на ошибки, обусловленные приближенностью знаний о содержательном существе процессов. Формально интервальное задание требований к качеству продукции может быть представлено следующим образом.

Обозначим через  $y_j, j = 1, 2, \dots, n$ , произвольный показатель качества продукции,  $n$  — число регламентируемых показателей качества продукции. Требования к показателям качества продукции оговариваются в технических условиях или стандартах в виде:

$$Y_{j\min} \leq y_j \leq Y_{j\max}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $Y_{j\min}, Y_{j\max}$  — минимальное и максимальное допустимые значения показателя качества.

Для метрических показателей качества может быть построено  $n$ -мерное евклидово пространство качества  $Y^n$ , в котором набор измеренных значений  $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$  характеристик качества  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$  представляется точкой. Неравенства (2) разделяют пространство качества  $Y^n$  на два подпространства  $Y_+^n$  и  $Y_-^n$  такие, что  $Y_+^n \cup Y_-^n$  и  $Y_+^n \cap Y_-^n = \emptyset$ . В прямоугольной системе координат подпространство  $Y_+^n$  представляет собой  $n$ -мерный прямоугольный параллелепипед, все точки которого соответствуют качественной продукции (рис. 1).

Задание требований к качеству в форме (2) предполагает взаимную независимость показателей качества,

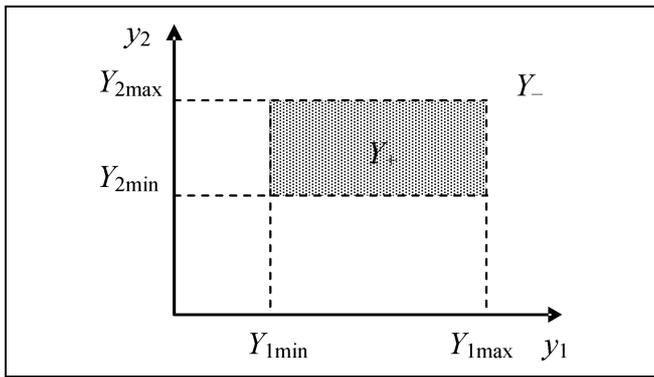


Рис. 1. Графическая интерпретация пространства качества для случая  $n = 2$

что не всегда выполняется в реальности. Факт качественной продукции может быть записан в виде:

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \in Y_+^n \quad (3)$$

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

Для производителя продукции условия (2) и (3) являются заданными внешними требованиями. Его задача состоит в определении для каждого вида продукции технологии, следование которой обеспечивает получение продукции, соответствующей заданным требованиям (2). Технология разрабатывается производителем продукции и регламентируется его внутренними документами: технологическими инструкциями, технологическими картами и т. п., в которых определена последовательность выполнения технологических операций и интервалы разрешаемых значений технологических факторов, влияющих на качество продукции.

В технологических инструкциях технология определяется заданием интервалов

$$U_{imin} \leq u_i \leq U_{imax}, \quad (4)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$  — номер технологической величины. Разрешенные значения  $U_{imax}$  и  $U_{imin}$  разработчик технологии должен определить некоторым рациональным образом для каждого вида продукции или для каждой технологии.

Обычно технологические факторы исходно предполагаются независимыми, поэтому в ортогональной системе координат  $(u_1, u_2, \dots, u_m)$  можно построить  $m$ -мерное технологическое пространство  $U^m$ . Неравенства (4) делят это пространство на два подпространства  $U_+^m$  и  $U_-^m$  такие, что  $U_+^m \cup U_-^m = U^m$  и  $U_+^m \cap U_-^m = \emptyset$ . Подпространство  $U_+^m$  содержит допустимые технологии производства определенного вида продукции, технологии  $u^m \notin U_+^m$  недопустимые.

Для графической иллюстрации технологии в  $N$ -мерном пространстве можно воспользоваться его «разверт-

кой» на плоскости. Масштабным преобразованием все величины можно нормировать, например, к отрезку  $[0, 1]$ . Тогда, располагая оси параллельно, технологию, задаваемую неравенствами (4), можно изобразить, как показано на рис. 2.

При производстве конкретной единицы продукции технологические величины принимают фиксированные значения, регистрируемые контрольно-измерительными приборами. Эти измеренные значения  $\tau_i, i = 1, 2, \dots, m$ , технологических величин  $u_i, i = 1, 2, \dots, m$ , связанные с конкретной единицей продукции, на рис. 2 помечены светлыми кружками, если  $\tau \in [U_{min}, U_{max}]$ , или темными, в случае  $\tau \notin [U_{min}, U_{max}]$ . Технология полностью соблюдена, если  $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \in U_+^m$ .

Из определения (4) технологии для вида продукции и рис. 2 видно, что она допускает некоторую вариацию значений технологических факторов при производстве конкретной единицы продукции. Поэтому понятие технологии неоднозначно. Имеется технология для вида продукции, определяемая интервалами (жирные отрезки осей), и технология производства единицы (партии) продукции, определяемая измеренными значениями технологических факторов (точки на осях, см. рис. 2).

Для определенности технологию для вида продукции назовем *глобальной*. Она оставляет определенную свободу выбора значений технологических величин при обработке конкретных единиц продукции внутри разрешенных пределов. Технологию производства конкретной единицы продукции (далее под единицей продукции понимается любая ее партия, произведенная по одной локальной технологии) назовем *локальной* [3]. Она может определяться с учетом особенностей сырья, состояния оборудования и других факторов, влияющих на качество продукции, и корректироваться для каждой следующей технологической операции с учетом результатов, полученных на предыдущих операциях.

В проблеме управления качеством можно выделить две составляющие (задачи 4 и 5 из указанных во Введении): первая состоит в определении и соблюдении гло-

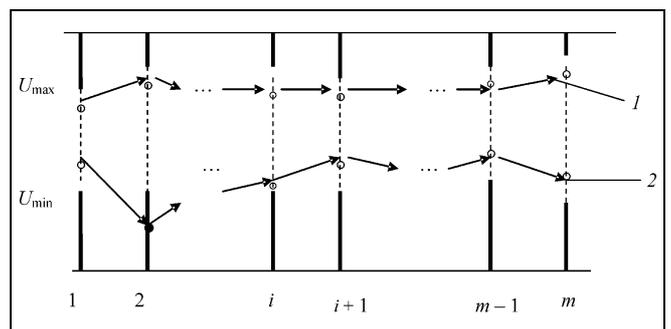


Рис. 2. Пример изображения  $m$ -мерной технологии на плоскости: штриховыми линиями показаны пределы разрешенных значений технологических факторов; кружками — значения факторов, измеренные при реализации процесса; 1 — технология без нарушений; 2 — технология с нарушениями ( $\tau_2 \notin [U_{2min}, U_{2max}]$ )

бальной технологии для вида продукции, вторая — в выборе локальной технологии для каждой единицы продукции, приближающей ее качество к заданному.

#### 4. СКАЛЯРНАЯ МЕРА НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И КАЧЕСТВА

Измеренные значения технологических факторов и показателей качества естественно считать случайными величинами. Состояние технологии производства и качества продукции может оцениваться по множествам измеренных значений этих величин. Важнейшей характеристикой состояния является нестабильность или неопределенность технологии и качества. Желательно иметь скалярные меры оценки неопределенности векторных величин типа (1).

Число технологических факторов  $m$  и показателей качества  $n$  может быть достаточно большим. Например, в металлургии число технологических факторов — десятки, а метрических показателей качества — около десятка. Для анализа отдельных компонент векторов  $\sigma$  и  $\tau$  могут быть использованы гистограммы и моменты, дающие наглядное представление. Характеристикой взаимодействия и изменения его во времени или от партии к партии в предположении нормальности распределения компонент вектора  $\xi$  может служить ковариационная матрица

$$R_{\xi} = M\{[\xi - \mu_{\xi}][\xi - \mu_{\xi}]^T\}, \quad (5)$$

где  $\xi$  и  $\mu_{\xi}$  — векторы измеренных и средних значений величин,  $M$  — знак математического ожидания.

Ковариационная матрица (5) позволяет оценить отклонение от средних значений, т. е. разброс технологических факторов или показателей качества. Однако сопоставление состояний технологии в различные периоды или для различных видов продукции при значительной размерности матрицы (5) представляет сложную задачу. При мониторинге технологического процесса желательно иметь некоторую скалярную меру, позволяющую оценивать состояния и тенденции их изменения.

Для определения количества информации К. Шеннон ввел [4] энтропию, определяемую как

$$H_{\xi} = -\sum_{\xi} p(\xi) \ln p(\xi),$$

где  $\xi$  — случайная величина,  $p(\xi)$  — плотность распределения ее вероятностей.

Естественно, что случайная величина может быть векторной. В работах А. Н. Колмогорова [5] приводится оценка энтропии случайного нормально распределенного векторного процесса, которая в используемых здесь обозначениях может быть записана в виде:

$$H_{\xi} = -\frac{1}{2} \ln \det R_{\xi}. \quad (6)$$

Для нормального распределения величина  $\sqrt{\det R_{\xi}}$  пропорциональна объему доверительной области в ве-

роятностном пространстве, базис которого определяется компонентами вектора  $\xi$  [6]. Поэтому энтропия растет пропорционально логарифму объема доверительной области. Из формулы (6) следует, что скалярная величина энтропия может использоваться в качестве меры неопределенности (разброса) значений вектора  $\xi$ .

Понятно, что энтропию можно определить для любой части компонент вектора  $\xi$ . Энтропия, вычисленная по значениям вектора показателей качества, характеризует нестабильность качества, а энтропия, определенная по значениям вектора технологических факторов, является характеристикой нестабильности технологии. Для масштабирования значений энтропии могут быть использованы кластеры данных либо ковариационные матрицы с известными характеристиками.

В § 1 отмечалось, что измерения технологических факторов и показателей качества могут быть собраны в кластеры типа (1) по различным временным или производственным признакам. Для этих кластеров могут быть построены ковариационные матрицы, а по ним определены значения энтропии, позволяющие просто сопоставить степень нестабильности данных, составляющих отдельные кластеры. Можно сказать, что энтропия является мощным инструментом анализа эволюции при мониторинге многосвязных процессов. Энтропия может использоваться для контроля «движения» технологии или качества в нужном направлении. Действительно, в матрице (5) вектор средних значений  $\mu_{\xi}$  может быть заменен вектором предпочтительных значений  $\xi^*$ . Ясно, матрица может быть построена для любой, представляющей интерес части компонент вектора  $\xi$ . Она будет иметь вид:

$$R_{\xi}^* = M\{[\xi - \xi^*][\xi - \xi^*]^T\}, \quad (7)$$

где вектор  $\xi^*$  может быть и комбинацией средних и предпочтительных значений для разных компонент.

Энтропия, определяемая по матрице (7), характеризует общее отклонение от заданных, оптимальных в некотором смысле значений для технологии и качества. Сравнение ее значений для различных кластеров данных позволит отслеживать процесс приближения в среднем к заданным значениям или, наоборот, ухода от них, например, вследствие самопроизвольного дрейфа. Значения энтропии могут быть использованы в автоматизированных системах мониторинга технологии и качества для формирования информационно-управляющих сигналов, инициирующих запуск отдельных подсистем и организационно-технологических мероприятий.

#### 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КОРРЕКЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Задача определения глобальной технологии для вида продукции состоит в следующем: на множестве измеренных значений  $\tau$  и  $\sigma$  технологических факторов  $u$  и показателей качества  $y$

$$\{(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m) \leftrightarrow (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)\}_q, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad (8)$$



по заданному в пространстве качества  $Y$  подпространству качественной продукции  $Y_+^m \subseteq Y$  определить в технологическом пространстве  $U$  подпространство допустимых технологий  $U_+^m \subseteq U$  такое, что из факта  $\tau^m \in U_+^m$  с максимальной вероятностью следует факт  $\sigma^m \in Y_+^m$ . Другими словами, по заданным ограничениям (2):  $Y_{p\min}^m, Y_{p\max}^m, p = 1, 2, \dots, n$ , следует определить ограничения (4):  $U_{i\min}^m, U_{i\max}^m, i = 1, 2, \dots, m$ .

Определение глобальной технологии может быть формализовано в виде задачи идентификации вероятностной модели [7]. Вероятностная модель определяется множеством элементарных событий  $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ , которое образует пространство элементарных событий или исходов  $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ . На множестве элементарных событий определяется алгебра  $\mathfrak{N} = (A_i | A_i \subseteq \Omega)$  — система событий, составленная из элементарных событий ( $\omega_q$ ) или исходов, принадлежащих множеству элементарных событий ( $\omega_q \in \Omega$ ), включая достоверное и невозможное события. Для каждого из событий  $A_i$ , образующих алгебру, определяется вероятность по вероятностям элементарных исходов. Тогда вероятностная модель (или вероятностное пространство эксперимента с конечным пространством исходов  $\Omega$  и алгеброй событий  $\mathfrak{N}$ ) может быть представлена в виде:  $M_\Omega = \{\Omega, \mathfrak{N}, P(A)\}$ , где  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ ,  $\mathfrak{N} = (A_i | A_i \subseteq \Omega)$ ,  $P = (p(A) | A \in \mathfrak{N})$ .

В задаче определения глобальной технологии имеются два пространства  $Y$  и  $U$ . С каждым из них связаны множества элементарных исходов (измеренных значений технологических факторов и показателей качества):  $\tau_q \in U, \sigma_q \in Y, q = 1, 2, \dots, Q$ . В пространстве качества неравенствами (2) задается алгебра  $\mathfrak{N}_Y = \{Y_+, Y_-, Y, \emptyset\}$ , с которой через относительные частоты соотносятся вероятности. Таким образом, вероятностная модель пространства качества полностью определена:

$$M_Y = (\Omega_Y, \mathfrak{N}_Y, P(Y)), \text{ где } \Omega_Y = \{\sigma_q, q = 1, 2, \dots, Q\}, \\ \mathfrak{N}_Y = \{Y, Y_+, Y_-, \emptyset\}, \quad P(Y) = \{P(Y_+), P(Y_-)\}.$$

Вероятностная модель технологического пространства имеет вид:  $M_U = (\Omega_U, ?, ?)$ . В ней имеется множество элементарных исходов  $\Omega_U = \{\tau_q, q = 1, 2, \dots, Q\}$ , а алгебра  $\mathfrak{N}_U = \{U_+, U_-, U, \emptyset\} = ?$  и соответствующие ей вероятности  $P(U_+), P(U_-) = ?$  неизвестны и требуют своего определения. Фактически необходимо определить положение гиперплоскостей, выделяющих подпространство  $U_+$  в технологическом пространстве  $U$ .

Критерий определения значений  $U_{\min}, U_{\max}$ , определяющих  $U_+$ , можно получить на основании предположения о наличии информационного соответствия между вероятностными моделями технологии  $M_U$  и качества  $M_Y$ . В качестве количественной меры соответствия между вероятностными моделями может выступать их взаимная информация. В содержательных терминах пред-

метной области — количество информации о технологии, содержащееся в свойствах, или наоборот.

Взаимная информация может быть определена [5] через энтропии моделей технологии и качества в виде:

$$I_{UY} = H(M_U) + H(M_Y) - H(M_U, M_Y), \quad (9)$$

где энтропии (7) определяются по вероятностям соответствующих алгебр.

Алгебра технологии не задана, ее можно варьировать, изменяя пространство  $U_+$ , в результате чего будут изменяться вероятности  $P(U) = \{P(U_+), P(U_-)\}$ ,  $P(UY) = \{P(U_+Y_+), P(U_+Y_-), P(U_-Y_+), P(U_-Y_-)\}$ . Так как энтропии определяются через вероятности, то количество взаимной информации (9) может быть записано непосредственно через них:

$$I_{UY} = H(P(U)) + H(P(Y)) - H(P(UY)),$$

где величина  $H(P(Y))$  определяется заданными требованиями к качеству продукции, она фиксирована. Значения  $P(U)$  и  $P(UY)$  зависят от выбора подпространства  $U_+$ , т. е. от глобальной технологии, определяемой интервалами (4), и изменяются при ее вариации. Поэтому мерой соответствия глобальной технологии (вероятностной модели  $M_U$ ) требованиям качества может служить количество взаимной информации (9), максимальное значение которого соответствует наилучшей технологии, определенной на всем множестве измеренных значений (8).

Оптимальной алгеброй  $\mathfrak{N}_U = \{U_+^*, U_-^*, U, \emptyset\}$ , определяющей наилучшее в смысле критерия (9) разбиение технологического пространства  $U = (U_+^*, U_-^*)$ , может быть признана такая, что

$$I_{UY} = H(P(Y)) + H\{P(U_+^*, U_-^*)\} - \\ - H\{P(Y_+U_+^*, Y_+U_-^*, Y_-U_+^*, Y_-U_-^*)\} = \max_{U_+} \forall U_+ \subseteq U.$$

Для отыскания решения (положения и конфигурации подпространства  $U_+^*$ ) может быть применен метод, подобный градиентному методу решения задачи условной оптимизации функции многих переменных. Аналогом производной, характеризующей скорость изменения функционала, выступает отношение конечных приращений количества информации и объема подпространства  $U_+$ , представляющего собой  $m$ -мерный параллелепипед.

Объем и его приращения могут быть вычислены с помощью определителя Грама. Если все измеренные значения технологических факторов и показателей качества нормировать к отрезку  $[0, 1]$ , то объем  $V$  пространства  $U$  будет  $V(U) = 1$ , объем подпространства  $U_+$  будет  $V(U_+) \leq 1$ . В этом случае приращения  $\Delta V(U_+)$  объема подпространства  $U_+$ , представляющие собой также  $m$ -мерные параллелепипеды, будут пропорциональны их «высотам»:  $\pm \Delta U_{i\min}, \pm \Delta U_{i\max}, i = 1, 2, \dots, m$ , и отношения конечных приращений будут иметь вид:  $\pm \Delta I_{UY} / \Delta U_{i\min}, \pm \Delta I_{UY} / \Delta U_{i\max}, i = 1, 2, \dots, m$ . С учетом нормировки приращения  $\pm \Delta U_{i\min}, \pm \Delta U_{i\max}$ , определяющие шаг сдвига ги-

перпоскостей, ограничивающих подпространство  $U_+$ , могут быть приняты равными для всех координат, т. е.  $\pm \Delta U_{i\min} = \pm \Delta U_{i\max} = \Delta U$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ .

Итерационный алгоритм, опирающийся на изложенные кратко соображения, позволяет за конечное число шагов определить положение и конфигурацию подпространства  $U_+^*$ , т. е. технологию, оптимальную в смысле количества взаимной информации. Технология в виде разрешенных диапазонов значений (4) может постоянно уточняться (идентифицироваться) на массивах новых измерений. При этом предшествующая технология выступает в качестве начального приближения.

Изложенный подход позволяет автоматизировать и синтезировать самообучающуюся систему идентификации глобальной технологии, задаваемой интервалами разрешенных значений технологических факторов. Такая система позволяет автоматически настраивать технологию на изменяющиеся требования к качеству продукции, что может отражаться заданием новых граничных значений в требованиях (2) и (3). При ступенчатом изменении значений  $Y_{i\min}, Y_{i\max}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , ограничения на диапазоны значений технологических факторов будут изменяться по мере накопления измерений, асимптотически приближаясь к значениям, соответствующим новой технологии. Традиционно задача определения диапазонов для технологических факторов решается методом проб и ошибок с существенными затратами материальных ресурсов и времени.

## 6. УПРАВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Глобальная технология задает ограничения на возможные значения технологических факторов. Выбор их конкретных значений (локальной технологии) для каждой отдельной единицы продукции не определен. В общем случае технологический процесс может состоять из нескольких шагов, этапов, операций, которые выполняются последовательно для каждой единицы продукции. Свойства продукции зависят от технологии на всех этапах, которую можно назвать сквозной. Для формализации задачи управления сквозной технологией ее удобно структурировать, выделив отдельные этапы процесса. Обозначим через  $k = 1, 2, \dots, K$  номер технологического этапа, шага. Полный вектор технологических факторов можно представить в виде совокупности  $K$  векторов, каждый из которых объединяет факторы, регламентирующие технологию на соответствующей операции:  $\mathbf{u} = ((u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1, m_1}), (u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2, m_2}), \dots, (u_{K1}, u_{K2}, \dots, u_{K, m_K})) = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K)$ , где  $m_1 + m_2 + \dots + m_K = m$ .

По мере осуществления технологического процесса содержание вектора изменяется — технологические факторы для реализованных этапов принимают измеренные значения, и перед  $k$ -м шагом его можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}'(k) &= (\tau_1(k), \tau_2(k), \dots, \tau_{k-1}(k), \mathbf{u}_k(k), \dots, \\ &\dots, \mathbf{u}_K(k)) = (\tau(k), \mathbf{u}(k)), \quad k = 1, 2, \dots, K-1. \end{aligned}$$

Задача определения локальной технологии перед каждой операцией  $k = 1, 2, \dots, K-1$  сводится к отыс-

канию значений технологических факторов, входящих в вектор  $\mathbf{u}(k) = (\mathbf{u}_k(k), \dots, \mathbf{u}_K(k))$ . Поскольку все значения технологических факторов в пределах ограничений (4) являются допустимыми, их выбор может быть подчинен некоторым дополнительным условиям. Например, выбор значений технологических факторов можно подчинить условию приближения качества продукции к некоторому идеалу  $\mathbf{y}^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*)$  или условию снижения затрат ресурсов на обеспечение технологического процесса. Такая трактовка придает технологическим факторам смысл управлений технологическим процессом и качеством продукции.

Формальное представление влияния технологических величин на показатели качества при отсутствии физических моделей отображения технологии в качество может быть получено посредством извлечения необходимых сведений из технологической информации (см. § 1), контроль которой регламентирован стандартом. На основании массивов данных могут быть построены регрессионные или нейросетевые модели [8] прогноза значений показателей качества по значениям технологических факторов.

Структура моделей такого типа для различных показателей качества  $j = 1, 2, \dots, n$  имеет вид:

$$y_j(k) = f_j(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{u}(k)), \quad (10)$$

где  $\mathbf{u}(k)$  — вектор технологических факторов,  $\boldsymbol{\alpha}$  — вектор параметров модели.

Поскольку диапазоны возможного изменения технологических факторов ограничены достаточно узкими пределами (3), структура моделей (10) может быть достаточно простой.

Показатели качества могут быть свернуты в комплексный критерий. Весовыми коэффициентами  $\beta_j$  могут быть ценовые соответствия между различными показателями качества<sup>1</sup>. Тогда критерий оптимальности в задаче выбора локальной технологии может быть приведен к виду:

$$F(\mathbf{u}(k)) = \sum_{j \in [1, n]} \beta_j g\{y_j^* - f_j[\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{u}(k)]\} \rightarrow \min, \quad (11)$$

где  $g(\cdot)$  — некоторая функция невязки между заданным значением  $y_j^*$  и прогнозом  $f_j[\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{u}(k)]$  показателя качества  $y_j$ .

При использовании моделей (10) могут быть наложены ограничения (2) на значения показателей качества в виде:

$$Y_{j\min} \leq f_j(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{u}(k)) \leq Y_{j\max}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Область определения технологии задается ограничениями (4):

$$\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{U}_{\max}. \quad (13)$$

<sup>1</sup> В критерии минимизации затрат на производство весовыми коэффициентами будут ценовые соответствия на технологические факторы, выражающиеся через ресурсы различного вида (материальные, энергетические, трудовые и т. п.).



Здесь предполагается одинаковый порядок следования компонент в векторах и ограничения понимаются покомпонентно.

Для решения задачи с критерием (11) и ограничениями (12) и (13) существует достаточно большой набор методов. Для упрощения во всех случаях, когда возможна оценка ошибки, возникающей в результате линеаризации граничных условий, ограничения на значения технологических факторов и показателей качества целесообразно линеаризовать. В результате область определения становится выпуклой и проблемы с множеством экстремумов не возникают. Для повышения точности определения экстремума можно воспользоваться процедурой последовательных приближений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная методология позволяет синтезировать автоматизированные самонастраивающиеся системы управления качеством продукции, производимой в технологических процессах определенного во Введении вида. Система, используя информацию, получаемую при осуществлении технологического процесса в штатном режиме, идентифицирует модели (10), по которым осуществляется прогноз значений показателей качества в зависимости от значений технологических факторов. На основании тех же измеренных значений технологических факторов и показателей качества осуществляется идентификация глобальной технологии, т. е. допустимых диапазонов значений технологических факторов  $U_{i\max}, U_{i\min}, i = 1, 2, \dots, m$  (4), которые в задаче (11)—(13) определения оптимальной технологии для каждой конкретной единицы продукции играют роль ограничений (13) на область определения задачи. Таким образом, в системе проектирования оптимальной технологии адаптируются и критерий качества, и ограничения.

Изложенный подход к управлению качеством (и мониторингу технологии) реализован в системе [3], разра-

ботанной под руководством автора. Система содержит в своем составе программные инструменты, позволяющие достаточно просто «подключить» ее к реальному производственному процессу рассматриваемого типа, а также развитый пользовательский интерфейс, обеспечивающий доступ к ее ресурсам без глубокой подготовки в области используемых математических дисциплин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Огвоздин В. Ю.* Управление качеством: Основы теории и практики. Учебное пособие. — М.: Дело и Сервис, 2002. — 160 с.
2. *Статистический контроль качества продукции на основе принципа распределения приоритетов / В. А. Липидус, М. И. Розно, А. В. Глазунов и др.* — М.: Финансы и статистика, 1991. — 224 с.
3. *Кузнецов Л. А., Алексеев В. А.* Система поддержки управления качеством продукции / Датчики и системы. — 2003. — № 8. — С. 53—61.
4. *Шеннон К.* Математическая теория связи. — В кн.: К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: ИЛ, 1963.
5. *Колмогоров А. Н.* Теория информации и теория алгоритмов. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
6. *Бард Й.* Нелинейное оценивание параметров. — М.: Статистика, 1979. — 349 с.
7. *Kuznetsov L.* Probability model identification // Proc. IMACS Symposium on Mathematical Modelling. — Vienna, Austria, 1997. — P. 319—321.
8. *Кузнецов Л. А., Домашнев П. А.* Нейросетевые модели для описания сложных технологических процессов // Проблемы управления. — 2004. — № 1. — С. 25—31.

☎ (4742) 32-80-44, e-mail: [Kuznetsov@stu.Lipetsk.Ru](mailto:Kuznetsov@stu.Lipetsk.Ru)

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. С. Манделем. □



**В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ AIS'07 (см. стр. 46)  
БУДУТ ПРОХОДИТЬ  
XXII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ САПР-2007»  
И МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ,  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
(CAD—2007)**

#### Тематика конференции

- автоматизация проектирования;
- бионика;
- генетические алгоритмы, эволюционное моделирование;
- искусственный интеллект и нечеткие системы;
- перспективные информационные технологии;
- проблемы образования;
- нейрокомпьютеры, квантовые и молекулярные компьютеры;
- международное сотрудничество.

**В рамках конференции проводится Выставка-ярмарка программных средств для интеллектуальных систем**

**Более подробную информацию можно найти на сайте конференции <http://icai.tsure.ru>**