

УДК 539.215.2.08:004

Р. Р. Кулуев

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СОСТАВА И СВОЙСТВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье сформулированы концептуальные основы интеллектуальной поддержки измерителей состава и свойств твердых сыпучих материалов. Рассмотрено взаимодействие средств интеллектуальной поддержки в технологиях автоматизированного контроля качества твердых сыпучих материалов. Предложена иерархическая структура взаимодействий элементов и узлов интеллектуальных измерительных преобразователей качественных параметров сыпучих материалов. Сформулирована задача статистического синтеза оптимальных алгоритмов обработки измерительной информации с учетом «старения» данных и динамики изменения модели измерительного преобразователя применительно к случаям геометрического и арифметического сглаживания. Показано, что в случае априорно заданных линейных математических моделей технологических процессов и систем контроля и управления эффективным с точки зрения прогнозных оценок является оптимальный адаптивный фильтр калмановского типа.

In the paper the conceptual foundations of intelligent support for measuring gauges of the composition and properties of solid bulk materials are formulated. The interaction of intellectual support tools in automated quality control technologies for solid bulk materials is considered. A hierarchical structure of interactions between elements and nodes of intelligent measuring transducers for quality parameters of bulk materials is proposed. The problem of statistical synthesis of optimal algorithms for processing measurement information is formulated taking into account the "aging" of data and the dynamics of changes in the model of the measuring transducer in relation to cases of geometric and arithmetic smoothing has been formulated. It was shown that in the case of a priori given linear mathematical models of technological processes and systems of testing and management, the optimal adaptive Kalman filter is effective in terms of forecast estimates.

В современных условиях эффективность управления производством в значительной степени определяется методами и техническими средствами контроля и управления качеством продукции на всех стадиях технологических процессов. Задачи контроля и управления качеством промышленной продукции, оптимизации технологических процессов решаются на базе комплексной автоматизации производства, широкого внедрения систем и средств автоматизации. Одно из основных условий успешного решения задачи автоматизации производства – обеспечение систем автоматического управления средствами оперативного автоматического контроля параметров, характеризующих технологические процессы: физических, химических и других величин, информация о которых необходима для обеспечения оптимального управления тем или иным технологическим процессом.

Конкуренентоспособность и покупательский спрос веществ, материалов и изделий обеспечивает их качество, которое определяется совокупностью основных параметров. На этапе проектирования эти параметры обеспечиваются правильным выбором сырья, полуфабрикатов, базы комплектующих изделий и материалов, режимов осуществления технологических процессов. На этапе же

технической подготовки производства упомянутые переменные обеспечиваются проектированием современных эффективных технологий, исключающих или минимизирующих случаи возникновения брака в процессе промышленного производства. Наконец, в процессе собственно промышленного производства параметры качества обеспечиваются путем соблюдения предписаний технологии, осуществления входного контроля параметров сырья, полуфабрикатов и выходным контролем качества конечной продукции.

На каждом из вышеупомянутых этапов реализуются локальные функциональные подсистемы контроля и управления качеством конечных материалов, веществ и изделий. В современных условиях актуальна увязка этих разрозненных подсистем в единую интегрированную систему. Без этого невозможно проведение сквозного контроля качества.

Реализация принципа интеграции позволит значительно повысить оперативность и эффективность управления качеством. В ряду подобных мероприятий необходимо особо выделить целесообразность включения в данные подсистемы и в единую интегрированную систему средств интеллектуальной поддержки, что способствует исключению или минимизации субъективизма при

принятии управленческих решений. Таким образом, проблема интеллектуализации технологий распределенного автоматизированного контроля и управления качеством промышленной продукции может рассматриваться как одна из злободневных задач научно-технического прогресса. Искусственный интеллект – один из наиболее эффективных методов и средств, используемых для решения сложных производственных задач.

В современных автоматизированных системах управления технологическими процессами (далее – АСУТП) к управлению процессами предъявляются качественно новые требования. Если на ранних этапах реализации АСУТП преобладали информационные (технологические и технико-экономические) параметры и критерии, в основном реализующие принципы наблюдения за состоянием оборудования и протекания технологических процессов, то в настоящее время важнейшие функции АСУТП состоят не только в анализе качества протекания технологических процессов, но и в управлении ходом их выполнения, т.е. в формировании управленческих решений и планов. Если до последнего времени удовлетворялись простой фиксацией отклонений от заданных норм и доведением фактической информации до оперативного персонала систем управления, то сегодня управление технологическими процессами должно осуществляться на основе оптимизационных процедур, базирующихся на использовании современных математических методов. Это, в свою очередь, требует наличия в составе АСУТП быстродействующих точных датчиков, достоверных и оперативных систем распределенного контроля и средств локальной полевой автоматики.

Анализ протекания большинства реальных технологических процессов свидетельствует о существовании предпосылок для возникновения отклонений от планируемых показателей качества материалов, веществ и промышленных изделий. В связи с этим в настоящее время предпринимаются попытки повысить качество теоретических моделей, используемых при управлении технологическими процессами промышленных производств. Совершенствование теоретических моделей происходит в следующих основных направлениях [1]:

- использование таких математических моделей, в которых учитывается случайный характер свойств перерабатываемого сырья, вспомогательных материалов и полуфабрикатов, а также дрейф характеристик технологического оборудования;
- использование стохастических адаптивных моделей прогнозирования химического состава компонентов сырья, вспомогательных материалов и полуфабрикатов и методов расчета их оптимального состава на основе выполненных прогнозов; расчет оптимальных настроек регуляторов и

стабилизация расходов материальных и энергетических потоков;

- разработка теории группового управления цепочкой стохастических технологических объектов с глобальным критерием, чаще всего в виде линейной свертки локальных целевых функций с неизвестными коэффициентами.

Создание теоретических моделей позволит осуществить переход к методам решения задач адаптивного управления, основанным на теории стохастического управления, методах векторной оптимизации и теории искусственного интеллекта.

Отклонения технологических параметров от регламентированных заданных норм, обусловленные различными дестабилизирующими факторами реального производства, требуют корректировки состава исходного сырья, промежуточных продуктов. На практике такая корректировка происходит с определенным запаздыванием, если сравнивать с моментом принятия управленческого решения о необходимости корректировки. Длительность такого чистого запаздывания определяется конкретной технологией промышленного производства. В этой связи целесообразно отметить, что выполненная сравнительная оценка трех известных способов регулирования процессов с чистым запаздыванием (классического метода регулирования, метода линейного программирования и самонастраивающегося регулятора) свидетельствуют о том, что наиболее точное управление обеспечивается при использовании самонастраивающихся регуляторов.

Известны два подхода к решению производственных задач; один из них основан на человеческом опыте и знаниях, другой – на применении техники оптимизации. Первый подход более приемлем для задач, сложных по их математическому описанию и решению методами оптимизации; второй более удобен для задач, которые можно сформулировать в терминах и категориях математического программирования. Заметим, что ни тот, ни другой подход не является универсальным. В этой связи поиск альтернативных путей решения проблемы продолжается, и на этих путях были разработаны так называемые специализированные экспертные системы. Обычно экспертная система, базирующаяся на человеческом опыте и знаниях, обеспечивает решение той конкретной задачи, для которой она создана. Другой подход связан с построением так называемой тандемной системы, состоящей из двух различных по своим режимам работы подсистем, первая из которых – экспертная система, а вторая включает в себя модель с алгоритмом. Экспертной системой оценивается частное решение задачи, генерируемое алгоритмом. Как следствие такой оценки, экспертная система может модифицировать огра-

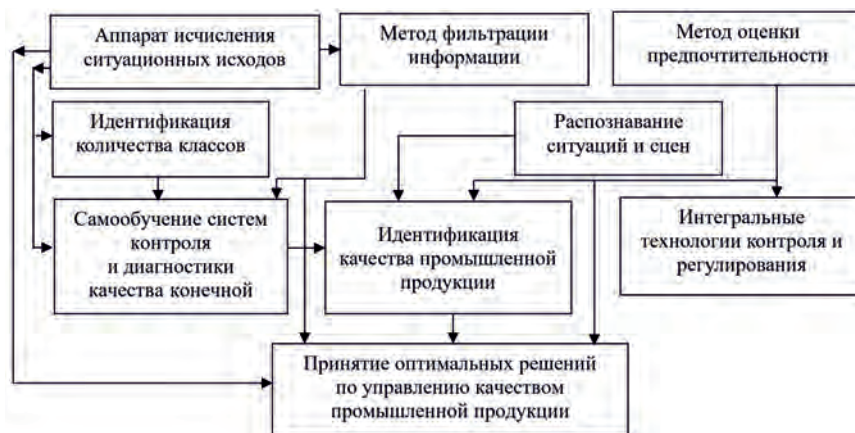


Рис. 1. Взаимодействие средств интеллектуальной поддержки в технологиях автоматизированного контроля и управления качеством промышленной продукции

ничения модели, генерировать новый набор параметров и т.д. При этом модель должна быть простой, чтобы решение можно было легко получить алгоритмическим путем. Ту часть задачи, которую трудно сформулировать математически, рассматривает экспертная система.

Повышение интеллектуального уровня АСУТП промышленных производств идет в направлении реализации функции оптимального управления. Как правило, задача решается с помощью математической модели технологического процесса с привлечением аппарата принципа максимума. Параметры математической модели рассчитываются по статистическим экспериментальным данным. В процессе эксплуатации системы математическая модель подстраивается под технологический процесс путем периодической адаптации ее параметров.

Важным направлением повышения интеллектуального уровня систем управления является использование элементов искусственного интеллекта и моделирования. База знаний системы включает в себя сведения о причинах возникновения дефектов и отклонений на основе сравнения удачных и неудачных технологических решений, синтезирует закономерности между технологическими параметрами и причинами отклонений.

Перспективно создание локальных вычислительных систем сетевой архитектуры, реализации современных децентрализованных распределенных в прямом смысле слова систем управления, снабженных работоспособными средствами комплексирования в локальные сети программируемых контроллеров и управляющих машин реального времени. Важнейшим направлением дальнейшего совершенствования систем автоматизации технологических процессов промышленных производств, в том числе и систем контроля и управления качеством продукции, является создание таких

программно-технических комплексов, которые на основе протоколов связи позволяют объединить средства вычислительной и управляющей техники различных линий и модификаций.

Следует отметить, что в настоящее время одним из магистральных путей повышения эффективности функционирования систем контроля и диагностики является разработка концептуальных основ и их практическая реализация в ходе построения гибких, адаптивных систем, способных к обучению и самообучению, самонастройке и оперативной

перестройке, принимающих управленческие решения и оценивающих их достоверность, т.е. систем, обладающих элементами искусственного интеллекта.

Появившееся в последнее время понятие «интеллектуальный датчик» (англ. smart sensor) определяет измерительные системы, имеющие сложную пятиуровневую структуру.

На первом уровне иерархии происходит преобразование физического явления в электрический сигнал. Такую возможность обеспечивают датчики всех типов, причем в отдельных случаях используется сложная технология преобразования.

На втором уровне иерархии осуществляется компенсация воздействия внешней среды (например, температурная коррекция, устранение электромагнитного воздействия). Сюда также относится защита датчика от разрушения вследствие внешних воздействий.

На третьем уровне осуществляется цифровая связь датчика с системой сбора данных или управления, причем эта связь может быть двухсторонней.

На четвертом уровне решаются вопросы, связанные с автоматической диагностикой датчика.

Пятый уровень относится к управлению: датчик, снабженный переключающими устройствами, вырабатывает управляющие воздействия.

В процессе автоматизации производства возникает необходимость измерять такие субъективные показатели качества, как вкус, запах, маслянистость и др. Для этих целей разрабатываются новые типы датчиков, обладающих «шестым чувством» благодаря использованию возможностей искусственного интеллекта.

Создается сеть, объединяющая несколько датчиков, позволяющих измерять отдельные физические и химические параметры, а также экспертную систему, в которой хранятся сведения,

соответствующие чувственным ощущениям человека.

Первый этап создания таких сетей – сбор данных, что является наиболее трудоемким процессом. Например, в пищевой промышленности для оценки вкусовых качеств продукции необходимо собрать многочисленные образцы с различным вкусом и измерить обычными датчиками параметры каждого образца: pH, химический состав, влажность, цвет и др. Затем группа экспертов точно определяет вкусовые качества каждого образца.

Второй этап состоит в обучении процессора сети с искусственным интеллектом способам обработки накопленной на первом этапе информации. В результате обучения процессор должен уметь определять взаимосвязь измеряемых параметров и вкусовые качества продукта.

На третьем этапе проводятся испытания и оценка сети, при этом должны апробироваться новые образцы.

Подобная сеть датчиков с искусственным интеллектом может с успехом применяться для управления качеством продукции промышленного производства.

Управление качеством промышленной продукции осуществляется посредством сбора и анализа информации и принятия решений по устранению причин, вызывающих снижение показателей качества конечной продукции. Эффективность систем контроля и управления качеством в большинстве случаев определяется степенью интеграции с подсистемами автоматизированного контроля качества.

Наиболее ответственными этапами управления качеством являются оценка текущих ситуаций и процесс принятия управленческих решений. На этих этапах на адекватность решений применительно к ситуациям значительное влияние оказывает субъективизм лиц, принимающих решение. Исключить или значительно снизить погрешность субъективных решений позволяет подход, основанный на интеллектуализации интегрированных систем управления качеством.

На рисунке 1 приведена структурная схема использования элементов и алгоритмов интеллектуальной поддержки при автоматизации технологий контроля и управления качеством [2].

Оценка качества промышленной продукции предполагает наличие следующей последовательности действий:

- 1) измерение технологических параметров (выявление исходной ситуации);
- 2) анализ полученных данных с целью принятия решений о качестве объекта контроля;

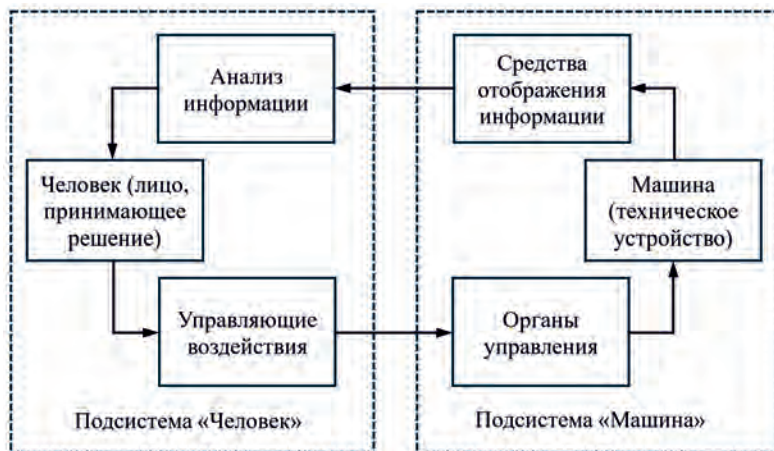


Рис. 2. Наглядное представление эргатической системы (она же система «человек – машина»)

3) формирование заключения (прогнозирование исхода).

В процессе управления качеством продукции последовательность действий аналогична: анализ текущей ситуации, оценка возможных событий и исходов. В общем случае имеется ряд отображений следующего вида: ситуация ⇒ событие ⇒ исход. Приведенная цепь отображений не является законченной, поскольку достигнутый исход может создать свою ситуацию, предшествующую новому событию, приведшему к новому исходу (и т.д.).

Из сказанного следует наличие причинно-следственной связи «ситуация – исход» в технологиях контроля и управления качеством промышленной продукции. Использование аппарата ситуационных исходов для создания систем контроля, диагностики, прогнозирования надежности и управления качеством позволяет формировать свойства искусственного интеллекта в исчислении исходов контроля и испытания и оценки ситуаций по результатам полученных данных.

Важнейшим свойством искусственного интеллекта является возможность проведения целенаправленного отбора информации с целью обеспечения ее достоверности для адекватной оценки ситуации и принятия оптимального решения. Основными причинами существования факта недостоверности информации при контроле и управлении качеством промышленной продукции являются [3]:

- отсутствие возможности обеспечения объективности оценок;
- «зашумленность» измерительной информации;
- погрешность из-за неправильного выбора методов измерения или средств их реализации;
- случайные помехи и искажения и т.д.

При этом для минимизации вероятности использования недостоверной информации при анализе

ситуаций и принятии решений необходим ее предварительный отбор (или фильтрация). Это особенно актуально в системах искусственного интеллекта (далее – СИИ).

Как уже отмечалось выше, зачастую подобный отбор в эргатических системах осуществляется лицом, принимающим решение на нечетком логическом или интуитивном уровне без использования строгих формализмов (см. рисунок 2). Данные обстоятельства затрудняют простую имитацию поведения лица, принимающего решение, при решении задач построения информационных фильтров в СИИ, что требует эффективных принципов и приемов разработки методов фильтрации измерительной информации.

Контроль работы промышленного производства предполагает сбор необходимой информации о технологических процессах от датчиков, ее переработку и передачу оперативному персоналу [4]. При решении задач контроля осуществляется ряд последовательно выполняемых операций по переработке измеряемой информации [5]:

- аналитической градуировки датчика;
- экстра- и интерполяции дискретно измеряемых величин;
- фильтрации от помех;
- интегрирования и усреднения измеряемых величин;
- введения поправок по температуре, давлению и расходу материально-энергетических потоков;
- проверки достоверности измеряемых величин и т.д.

Алгоритмы информационной части системы управления предназначены для сбора информации от датчиков аналоговых, числоимпульсных дискретных и кодируемых по времени сигналов с заданным периодом опроса, от датчиков дискретных и числоимпульсных инициативных сигналов, для обработки введенной информации, связи технолога-оператора с системой и ввода оперативных сообщений о ходе технологического процесса.

Информационная подсистема выполняет стандартную обработку измеряемых параметров [6]:

- масштабирование и линеаризацию измеренных значений;
- контроль на достоверность;
- введение поправок по давлению и температуре для расходов технологических потоков;
- экспоненциальное сглаживание (фильтрация);
- контроль измеренных значений на соответствие заданным регламентным и аварийным границам;
- усреднение результатов измерений.

Выходы первичных измерительных преобразователей последовательно опрашиваются коммутатором и измеряемые сигналы поступают далее на аналого-цифровой преобразователь (далее

– АЦП). Частота равномерного опроса одного сигнала при стационарном случайном процессе определяется верхней граничной частотой спектра полезного сигнала, допустимой погрешностью измерения, среднеквадратичной ошибкой измерительного канала и дисперсией самого случайного процесса.

Преобразование измеряемой величины Y в машинный код управляющего комплекса происходит в соответствии со следующим выражением:

$$Y = f_1 \{ f_2 [f_3 (X)] \}, \quad (1)$$

где X – измеряемая величина;

f_1 – линейная функция преобразования кода АЦП в машинный код;

f_2 – линейная функция преобразования входных сигналов в код АЦП;

f_3 – зависимость электрического сигнала первичного измерительного преобразователя от X .

Операция фильтрации электрического сигнала, поступающего с первичного измерительного преобразователя, позволяет определить случайную составляющую погрешности измерений. Для этого необходимо знать частотные характеристики сигнала и помехи.

Для фильтрации часто используется простой в реализации алгоритм экспоненциального сглаживания:

$$Y_n = \alpha X_n + (1-\alpha)Y_{n-1}, \quad (2)$$

где Y_n – значение, сглаженное на текущем шаге; α – коэффициент сглаживания (постоянная фильтра);

X_n – измеренная линеаризованное значение параметра;

Y_{n-1} – значение, сглаженное на предыдущем шаге.

При первом шаге сглаживания ($n = 1$) значение Y_1 устанавливается равным X_1 . Систематическая составляющая погрешности измерений в некоторых случаях может быть скомпенсирована с помощью алгоритмов коррекции показаний датчиков.

Коэффициент поправки K^1 при отклонении температуры T и давления P от их расчетных значений T_0 и P_0 определяется следующим выражением:

$$K^1 = \sqrt{\frac{P+0,1}{T+273}} K, \quad (3)$$

где K – параметр, вычисляемый по формуле

$$K = \frac{T_0}{P_0}, \quad (4)$$

где T_0 – расчетное значение абсолютной температуры газа, °К;

P_0 – расчетное значение давления, МПа.

Расчет с поправкой, определяемой по выражению (3), вычисляется по формуле

$$Y = K^1 Y_L, \quad (5)$$

где Y_L – измеренное линеаризованное значение расхода газа.

Изменение характеристик датчиков или измерительных каналов приводит к появлению дополнительных погрешностей измерений, которые невозможно установить описанными приемами первичной обработки информации. В АСУТП при решении задач управления используются результаты измерений многих параметров одновременно. По этой причине вероятность получения неверного результата при отказе отдельных измерительных каналов резко возрастает. В связи с этим контроль достоверности исходной измерительной информации является одной из важнейших функций АСУТП [7].

В простейшем случае контроль достоверности информации осуществляется по технологически возможным границам изменения измеряемой величины. Нарушение этих границ обычно свидетельствует о неисправности функционирования датчика или канала измерения:

$$X_{НВГ} \leq X_i \leq X_{ВВГ}, \quad (6)$$

где $X_{НВГ}$ ($X_{ВВГ}$) – нижняя (верхняя) граница возможного изменения измеряемой величины – переменной X ;

X_i – текущее значение переменной X в i -м цикле опроса.

При обнаружении невыполнения неравенства (6) на пульт принимающего решение лица (технолога-оператора) выдается сообщение. Дальнейшая обработка измеряемой величины (переменной X) осуществляется с использованием ее последнего достоверного значения.

Контроль за протеканием технологического процесса осуществляется по нижней (верхней) регламентной границе, нижней (верхней) аварийной границе, допускаемой скорости ΔX изменения параметров в следующих пределах:

$$X_{НАГ} \leq X_i \leq X_{ВАГ}, \quad (7)$$

где $X_{НАГ}$ ($X_{ВАГ}$) – нижняя (верхняя) аварийная граница измеряемой технологической переменной X ;

$$X_{НРГ} \leq X_i \leq X_{ВРГ}, \quad (8)$$

где $X_{НРГ}$ ($X_{ВРГ}$) – нижняя (верхняя) регламентная граница переменной X ;

$$\Delta X = |X_i - X_{i-1}| \leq \delta X_{\max}, \quad (9)$$

где δX_{\max} – наибольшее допустимое приращение переменной X за цикл опроса.

Для учета анализа и работы технологического оборудования, а также технологической стадии в целом необходимо определить усредненные значения расходов, используемых в производстве сырья, реагентов, энергии и т.д. Усреднение измеренных значений параметров производится по формуле

$$Y_{Ci} = \frac{1}{n} X_i + \left(1 - \frac{1}{n}\right) Y_{Ci-1}, \quad (10)$$

где X_i – i -е измеренное линеаризованное значение параметра X ;

n – число опросов параметра X на заданном интервале усреднения.

В практике создания АСУТП встречается необходимость в масштабировании и линеаризации измеряемых величин.

Для датчиков с линейным характером шкалы значений расчет значения X производится по формуле

$$X = B + (A - B) N / L_i, \quad (11)$$

где B (A) – истинное значение начала (конца) шкалы датчика;

N – код АЦП;

$L_i = 1000$ – максимальное значение кода АЦП.

Для датчиков с квадратичным характером шкалы используется формула

$$X = \sqrt{(A^2 - B^2) N / L + B^2}. \quad (12)$$

Для эффективного управления процессом оперативному персоналу необходимо располагать информацией о текущих значениях измеряемых величин, косвенно измеряемых величин, технико-экономических показателей работы агрегатов и участков производства.

Традиционные модели обработки информации с целью повышения ее достоверности основаны на допущении о неизменности математической модели объекта исследования как на стадии получения информации, так и на стадии прогнозирования. Очевидно, более предпочтителен вариант, когда алгоритм обработки информации способен автоматически распознавать модели и приспосабливаться к ним.

С учетом «старения» информации и динамики изменения модели задачу статистического синтеза оптимальных алгоритмов обработки измерительной информации можно сформулировать следующим образом:

- исходя из теоретических соображений или накопленного опыта, выбирается аналитическое выражение для алгоритма обработки информации, которое зависит от неизвестных параметров;
- задаются ограничения на неизвестные коэффициенты;
- выбирается или определяется форма критерия оптимальности метода обработки результатов измерений;

- решается задача отыскания условного экстремума критерия оптимальности J при заданных ограничениях μ путем варьирования значений неизвестных коэффициентов C_i ;

- определяются метод и алгоритм обработки информации.

Теперь рассмотрим сформулированную задачу применительно к случаям геометрического и арифметического сглаживания.

Пусть имеется простая случайная выборка независимых и равнозначных измерений одной и той же величины $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, дисперсии которых одинаковы и равны δ^2 . Требуется по результатам первичных измерений найти оценку, удовлетворяющую свойству несмещенности.

Оценку \bar{X} ищем в виде линейной комбинации измерений:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n C_i X_i, \quad (13)$$

где C_i – некоторые постоянные коэффициенты, которые следует определить.

Решение задачи дает следующие выражения для дисперсии оценки:

$$D(\bar{X}) = \delta^2 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha^2} \right)^2 \frac{1-\alpha^{2n}}{1-\alpha^2} = \delta^2 \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^n}, \quad (14)$$

$$\tilde{D}_{r.c.} = \frac{D(\bar{X})}{\delta^2} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^n}, \quad (15)$$

где α – постоянная сглаживания.

Видно, что при $\alpha = 1$ выражение (15) принимает следующий вид:

Таким образом, метод геометрического сглаживания, являющийся конечномерным аналогом экспоненциального сглаживания, применяется для выборки ограниченного объема, а условие несмещенности выполняется для любых объемов выборки.

Выбор значения постоянной сглаживания α (или числа измерений M в скользящей средней) предполагает достижение компромисса между скоростью реагирования на изменение модели (увеличение и уменьшение M), а также качеством фильтрации случайных помех. Поскольку диапазон изменения постоянной сглаживания очень большой (обычно от 0,01 до 0,3, а объем выборки в скользящей средней – от 6 до 200), задача заключается в нахождении способа выбора в каждом конкретном случае.

Если предположить, что «возраст» текущего измерения равен нулю, предыдущего измерения – единице и что в дальнейшем «возраст» предыдущих измерений увеличивается на единицу, то средний «возраст» в скользящей средней равен среднему арифметическому «возрастов» всех отдельных измерений, взятых с весами, равными для этих отдельных измерений:

$$\min \frac{D(\bar{X})}{\delta} = \frac{1}{n}, \quad (16)$$

При геометрическом сглаживании средний «возраст» измерений определяется в следующем виде:

$$\rho_{c.c.} = \frac{1}{M}(0+1+2+\dots+M-1) = \quad (17)$$

$$= \frac{M(M-1)}{2} \cdot \frac{1}{M} = \frac{M-1}{2}. \quad (18)$$

$$\rho_{r.c.} = \left\{ \sum (n-k) \alpha^{n-k} \right\} \frac{1-\alpha}{1-\alpha^n} \cdot \frac{1-\alpha^{n-1}}{1-\alpha^n} - (n-1) \frac{\alpha^n}{1-\alpha^n},$$

$$\lim \rho_{r.c.} = \frac{n-1}{2}, \quad (19)$$

$$\lim \rho_{r.c.} = \frac{1}{1-\alpha}, \quad (20)$$

$\alpha \rightarrow \infty.$

📖 Список использованных источников

1. Юсупбеков, Н. Р. Системы управления технологическими процессами / Н. Р. Юсупбеков, Б. И. Мухамедов, Ш. М. Гулямов. – Ташкент : Узбекистан, 1997.
2. Взаимодействие средств интеллектуальной поддержки в системах автоматизированного контроля и управления / Н. Р. Юсупбеков, У. Т. Мухамедханов, П. М. Матякубова, Б. И. Ешматова // Математические методы в технике и технологиях – ММТ-2000 : сб. трудов Междунар. научн. конф., 2000 г. – С.-Петербург, 2000. – Т. 6.
3. Алиев, Р. А. Управление производством при нечеткой исходной информации / Р. А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. Э. Мамедова. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
4. Юсупбеков, Н. Р. Контроль технологических параметров промышленных производств / Н. Р. Юсупбеков, Ш. М. Гулямов, П. М. Матякубова // Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления (Автоматизация-99) : сб. научн. докл. II Междунар. конф., 1999 г. – Ташкент, 1999.
5. Петров, И. К. Приборы автоматизации для пищевой промышленности / И. К. Петров, М. М. Солошенко, В. А. Царьков. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981.
6. Петров, И. К. Контроль достоверности первичной информации АСУТП бродильных производств / И. К. Петров, В. В. Письменный, А. Г. Милькин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – Вып. 3.
7. Ли, Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление / Р. Ли. – М.: Наука, 1966.

Руслан Раисович КУЛУЕВ,

доцент кафедры «Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация» Ташкентского государственного технического университета им. И. А. Каримова, кандидат технических наук.

Дата поступления 29.09.2025