

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 621.7-52

© Воротникова З.Е.<sup>1</sup>, Новосельцев М.А.<sup>2</sup>

### СИСТЕМА ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЧУГУНА В ПРОЦЕССЕ ПЛАВКИ

*В статье изложены сведения о существующих способах контроля качества чугуна и качества управления технологическим процессом, о разработанной авторами системе контроля качества чугуна в реальном времени на базе статистической обработки контролируемых параметров.*

**Ключевые слова:** контроль качества чугуна, качество управления технологическим процессом, критерий качества чугуна, статистические характеристики контролируемых параметров, аддитивная линейная свертка критериев.

**Воротникова З.Е., Новосельцев М.А. Система операційного контролю якості чавуну в процесі плавки.** У статті викладені зведення про існуючі способи прогнозування якості чавуну та якості керування технологічним процесом та про розроблену авторами систему контролю якості чавуну у реальному часі на базі статистичної обробки параметрів технологічного процесу, що контролюються.

**Ключові слова:** контроль якості чавуну, якість керування технологічним процесом, критерій якості чавуну, статистичні характеристики параметрів, що контролюються, адитивна лінійна згортка критеріїв.

**Z.J. Vorotnikova, M.A. Novoselzev. Cast iron fusion quality control functional monitoring.** Information on the existing methods of a cast iron quality control and industrial processing control quality and on the developed by authors real-time quality system based on a statistical manipulation of the industrial processing controlled variables from the standpoint of a management quality control are stated in this article.

**Keywords:** cast iron quality control, industrial processing control quality, cast iron performance criterion, controlled variable statistics, additive linear convolution of criteria.

**Постановка проблемы.** Контроль качества продукции является необходимым элементом конкурентной стратегии любого современного предприятия. Внедрение и совершенствование систем оперативного мониторинга качества управления технологическим процессом в свою очередь существенно снижает затраты предприятий, связанные с колебаниями качества продукции. Постоянный и достоверный контроль технологических параметров чрезвычайно важен, как с точки зрения соблюдения оптимальности режима плавки, так и с точки зрения безопасной работы металлургического агрегата.

Доменный процесс является наиболее сложным с точки зрения текущей диагностики, в металлургическом цикле, поэтому повышение информативности и качества его контроля является актуальной задачей.

Закрытость процесса, высокие температуры, отсутствие адекватных математических моделей и необходимость постоянного контроля текущего состояния доменного процесса, вынуждает технологов использовать косвенные методы диагностики. Следствием этого является оснащение доменной печи целым комплексом метрологического оборудования (число контролируемых параметров составляет несколько сотен). Полученные данные передаются на пульт управления в виде графиков изменения значений контролируемых параметров и состояния системы сигнализации. На основании этой информации технолог в реальном времени должен оце-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> студент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

нить состояние технологического процесса и принять решение о способе управления. Возможности человека по адекватному восприятию и оценке информации весьма ограничены, по этому разработка методов автоматической обработки и визуализации полученной с датчиков информации, остается актуальной задачей.

Этим и объясняется стремление разработчиков использовать любую возможность получения дополнительной информации, для обеспечения эффективности и безопасности технологии.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Контроль технологических процессов и контроль качества готовой продукции в доменном цехе выполняется в соответствии с критическими точками. Для обеспечения установленных показателей качества выпускаемой продукции на всех стадиях технологического процесса осуществляется сравнение заданных и фактических значений, для чего используются результаты измерений (замеров), контроля и проверок. Контроль показателей качества и сравнение их с заданными условиями осуществляется на всех важных стадиях изготовления продукции и показан в контрольных точках производства чугуна.

Отбор проб для определения химического состава производится в соответствии с требованиями технологической инструкции [1]. Проба чугуна отправляется для определения химического состава в лабораторию. Результаты анализа работниками лаборатории заносятся в информационную сеть, где результаты одновременно может видеть как производитель, так и потребитель продукции.

На практике широко используются хорошо разработанные технологии статистического приемочного контроля качества изделий [2]. Сложнее обстоит дело с методами операционного контроля, когда контроль качества нужно осуществлять в процессе производства изделия и применять методы коррекции технологического процесса.

Система контроля основных параметров доменного процесса представляет сложный комплекс датчиков, преобразователей и вторичных приборов. В настоящее время на мощных доменных печах устанавливают системы централизованного контроля (SCADA), а показатели основных параметров процесса, выносятся на мнемонические схемы в виде цифровой индикации. В некоторых SCADA -системах предусмотрена предварительная обработка данных: сглаживание, усреднение, расчет комплексных показателей, что облегчает анализ информации.

На доменных печах Японии, Европы, Северной Америки и России с успехом эксплуатируются системы, построенные на базе искусственного интеллекта, в частности экспертных технологий [3] и нейронных сетей [4]. Однако такие системы дороги и требуют адаптации и обучения для каждой конкретной домны. Более того для их ведения необходим квалифицированный персонал не только в области металлургии, но и в области информационных технологий. В связи с этим в условиях кризисной экономики в Украине предпочтение отдается малобюджетным внутренним разработкам.

Статистические методы контроля качества продукции в настоящее время приобретают все большее признание и распространение в промышленности в виду их простоты и эффективности. Однако, в связи с закрытостью, непрерывностью, пространственной распределенностью доменного процесса, а также временным запаздыванием, приемочный контроль не позволяет формировать своевременные управляющие воздействия, направленные на улучшение качества чугуна, что приводит к существенным колебаниям качества чугуна на выпуске.

Для соблюдения оптимальности режима плавки, и обеспечения безопасной работы металлургического агрегата используется контроль технологических параметров доменного процесса. Такой контроль осуществляют современные SCADA-системы, позволяющие отслеживать более сотни технологических параметров, в некоторых SCADA системах предусмотрена предварительная обработка данных и расчет основных статистических характеристик [5].

Статистический контроль поведения контролируемых параметров использует измерение параметров и их распределение. Изменчивость поведения контролируемого параметра бывает двух видов. Первый вид – когда значения его составляют совокупность случайных величин, образующихся в нормальных условиях; второй – когда совокупность его случайных величин образуется в условиях, отличных от нормальных под действием определенных причин.

Персонал, осуществляющий управление процессом, в котором формируется контролируемый параметр, должен по его значениям установить: во-первых, в каких условиях они получены (нормальных или отличных от них); и если они получены в условиях, отличных от нор-

мальных, то каковы причины нарушения нормальных условий процесса. Затем принимается управляющее воздействие по устранению этих причин [6].

В соответствии с принятой классификацией доменная печь относится к разряду уникальных технических объектов, обладающих сложной многоэлементной структурой [7]. Таким образом, контроль должен выполняться отдельно по каждому нормируемому параметру, причем величины норм зависят как от выбранного оптимального режима, так и от особенностей конкретной доменной печи.

Наблюдение и корректировка режима доменной плавки осуществляется как визуальным наблюдением, так и с помощью системы отображения информации. При распознавании того или иного вида отклонения информация должна оцениваться по совокупности признаков и сопоставляться. В противном случае не исключается возможность принятия ошибочных решений. Этот весьма существенный объем информации предназначен для восприятия человеком в реальном времени, что требует опыта и большой концентрации внимания.

**Цель статьи.** Разработка системы сбора и анализа данных о контролируемых параметрах доменного процесса, с целью оперативного контроля качества чугуна в реальном времени при нормальном ходе печи.

**Изложение основного материала.** Задача разрабатываемой системы контроля качества чугуна состоит в сборе, структуризации и систематизации данных, снятых с контроллеров; визуализации информации о протекании технологического процесса; обнаружении отклонения технологических параметров от запланированных значений и оценка на основании этих данных качества регулирования технологического процесса; установление статистической связи между качеством регулирования и качеством чугуна на основании полученных данных и мониторинг изменение качества чугуна для текущего процесса в реальном времени.

На первом этапе исследований рассматривались контролируемые параметры состояния технологического процесса при нормальном ходе печи. Данные могут быть получены с помощью датчиков контроля технологических параметров установленных на доменной печи или взяты с сервера, если установлена SCADA.

В системе контролируются следующие параметры:

- 1) температуры холодного и горячего дутья, колошниковога газа в газоотводах и по радиусу колошника, огнеупорной кладки печи и ее фундамента, поступающей и отходящей из охладительной арматуры воды и воздуха, охлаждающего лещады, купола воздухонагревателя и продуктов горения, отходящих из воздухонагревателя;
- 2) давление холодного и горячего дутья, перепады давления газа в нижней, средней и верхней части шахты, природного газа, воды, поступающей в охладительную арматуру, пара в межконусном пространстве и пара, подаваемого под большой конус;
- 3) расход дутья, природного газа, кислорода, подаваемого в печь, расход дутья и природного газа, подаваемого на каждую фурму, влажность дутья;
- 4) состав колошниковога газа, продуктов горения воздухонагревателей, содержание в дутье кислорода и влажность дутья;
- 5) уровень шихтовых материалов в печи;
- 6) число подач, загруженных в печь, число скипов в подаче, угол поворота ВРШ;
- 7) масса агломерата, кокса и добавок к каждой подаче.

Эти данные достаточно полно характеризуют текущее состояние системы, которое зависит от предыдущего состояния и управляющих воздействий, которые в свою очередь складываются из качества и способа загрузки шихтовых материалов, состава и режима дутья, времени слива чугуна и шлака.

Система спроектирована для условий ДП №2 ПАО «МК «Азовсталь» г. Мариуполь, для исследований использовались данные полученные с контроллеров и сервера АСУТП за 20 суток нормальной работы печи при выплавке передельного чугуна.

Спроектированная система реализована на языке программирования Java, в качестве источника данных для анализа и статистической обработки служит СУБД Oracle для работы с базами данных был выбран каркас Hibernate. Система может быть интегрирована в контур имеющейся SCADA или функционировать, получая данные с сервера.

Для мониторинга технологического процесса были отобраны 26 параметров, представленные в таблице.

Таблица

Контролируемые параметры

Tag Name	Tag Description
DUT\TGDPV	Температура горячего дутья
KG\G_T1	Температура колошникового газа в газоотводах .Точка1
KG\G_T2	Температура колошникового газа в газоотводах .Точка2
KG\G_T3	Температура колошникового газа в газоотводах .Точка3
KG\G_T4	Температура колошникового газа в газоотводах .Точка4
PRG\TMAIN	Температура природного газа на печь
DP\P_MEJKONUS	Давление в межконусном пространстве
DP\PDN	Перепад давления нижний
DP\PDO	Перепад давления общий
DP\PDV	Перепад давления верхний
DUT\VDGD	Давление горячего дутья
KG\DKGHI	Давление колошникового газа высокое 1
KG\DKGHI2	Давление колошникового газа высокое 2
PRG\DMAIN	Давление природного газа на печь
PAR\RDUT	Расход пара в дутье
PRG\RMAIN	Расход природного газа на печь с коррекцией
DUT\RHD_BF_SNORT1	Расход холодного дутья перед ШОПТ1
DUT\RHD_BF_SNORT2	Расход холодного дутья перед ШОПТ2
DUT\VIHD_BF_SNORT1	Влажность холодного дутья перед ШОПТ1
DUT\VIHD_BF_SNORT2	Влажность холодного дутья перед ШОПТ2
DUT\O2	Содержание O <sub>2</sub> в дутье
KG\SCO	Содержание CO в колошниковом газе
KG\SCO2	Содержание CO <sub>2</sub> в колошниковом газе
KG\SH2	Содержание водорода в колошниковом газе
DP\URZF1	Уровень засыпи зонда 1
DP\URZF2	Уровень засыпи зонда 2

Данные поступают на сервер с контроллеров каждые 3 секунды и сглаживаются с помощью экспоненциального алгоритма с выбором оптимального параметра [8]. Соответствующий видеокадр включает возможности выбора технологического параметра, параметров сглаживания (расчетное значение предлагается по умолчанию) и визуализацию временного ряда в исходном и сглаженном виде в одной системе координат.

Данные для настройки сглаживания хранятся на диске в исходном виде, в виде файлов данных, за последние 2-3 часа (промежуток времени и участок памяти может настраиваться).

Сглаженные данные хранятся на диске в виде файлов данных за последние 24 часа (промежуток времени и участок памяти может настраиваться).

Технологические значения математического ожидания и допустимых диапазонов изменения вводятся в базу данных для каждого контролируемого параметра в зависимости от режима плавки.

Оценка качества регулирования в системе проводится при помощи динамического расчета статистических характеристик контролируемых параметров за сутки, а также предусмотрена возможность задания диапазона наблюдения в пределах суток.

Система позволяет рассчитывать следующие статистические характеристики : 1) среднеквадратичное отклонение контролируемых параметров от их математического ожидания; 2) смещение математического ожидания от нормативного значения; 3) вероятности отклонения контролируемой величины в определенный момент времени от ее математического ожидания

на нормативное значение; 4) относительное число отклонений контролируемой величины, находящейся в фиксированной области или соответствующее время; 5) максимальное непрерывное время нахождения значений в некоторой области; 6) суммарное непрерывное время нахождения контролируемого параметра в некоторой области дольше заданного порога.

Выбор того или другого критерия, участвующего в свертке, для каждого контролируемого параметра должен осуществляться экспертом исходя из накопленного опыта в диалоговом режиме. На рисунке показана экранная форма для выбора критерия. При проведении экспериментов с системой были использованы нормативные данные из технологической инструкции и рекомендации обслуживающего персонала домны №2 МК «Азовсталь» г. Мариуполя. В зависимости от нормативного характера поведения конкретного контролируемого параметра или группы параметров, частный критерий качества регулирования строится как взвешенная аддитивная свертка, включающая один или несколько видов статистических характеристик.

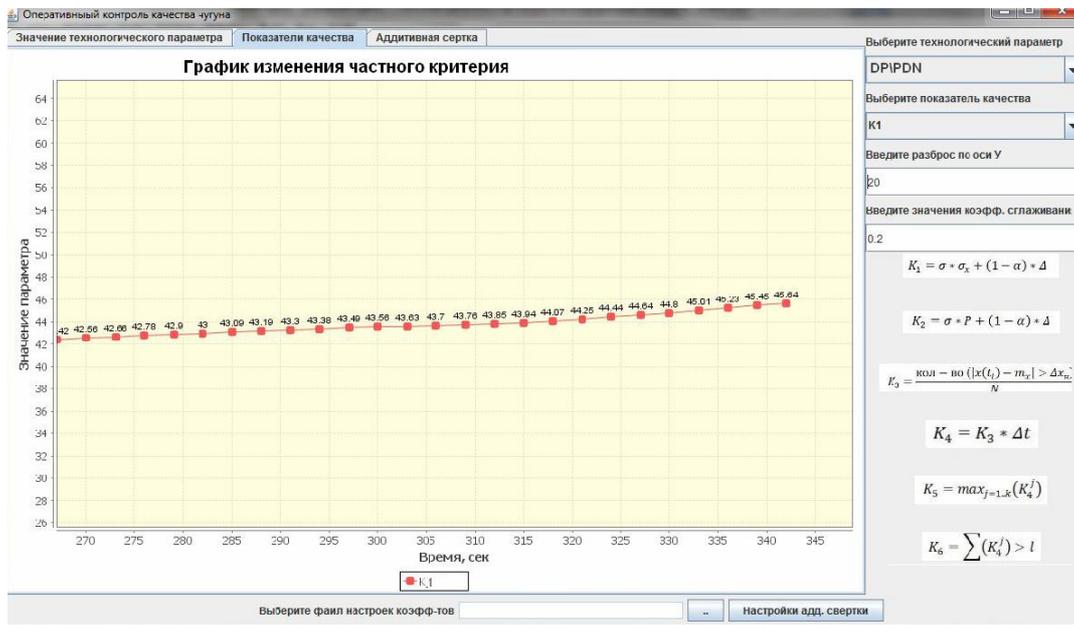


Рисунок – График поведения частного критерия качества регулирования для параметра «Перепад давления нижний»

Например: для параметров давления критерий может быть равен сумме взвешенных смещения математического ожидания от нормативного значения и вероятности  $P$  отклонения контролируемой величины  $X(t)$  в определенный момент времени  $t_k$  от ее математического ожидания  $m_x^*$  на нормативное значение  $\Delta x_n$  :

$$m_x^* = \frac{\sum_{i=1}^N x(t_i)}{N}, \tag{1}$$

$$D_x^* = \frac{\sum [x(t_i) - m_x^*]^2}{N-1}, \tag{2}$$

$$\sigma_x^* = \sqrt{D_x^*}, \tag{3}$$

$$P[|X(t_k) - m_x^*| \leq \Delta x_n] \leq \frac{D_x^*}{\Delta x_n^2}, \tag{4}$$

$$\Delta = g - m_x^*, \tag{5}$$

$$K = \alpha * P + (1 - \alpha) * \Delta, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – задаваемый технологом-экспертом параметр свертки;  
 $g$  – технологическая норма математического ожидания.

Весы для свертки в системе задаются на основании опыта экспертов для каждого частного критерия. Соответствующий видеокадр включает возможности выбора технологического параметра; параметров свертки; временного интервала (максимум 24 часа) и кривую изменения значения соответствующего частного критерия в заданном диапазоне, его текущее и суточное значение.

Расчет статистических характеристик ведется динамически по мере получения сглаженных данных. Значения частных критериев для каждой плавки записываются в базу данных, предусмотрено формирование суточного отчета в формате XLS.

Так как в качестве критериев выступают величины, показывающие степень отклонения контролируемого параметра от желаемого, следовательно, чем меньше значения частных критериев, тем лучше реализовано управление технологическим процессом и тем ближе характеристики получаемого чугуна к норме.

Суммарный критерий качества регулирования технологического процесса вычисляется как взвешенная аддитивная свертка нормированных значений частных критериев. Начальные значения параметров свертки задаются экспертами и в дальнейшем могут уточняются, на основании информации о качестве чугуна, полученной из лаборатории.

Для расчета качества чугуна также вводится критерий, как кратчайшее расстояние от точки, образованной нормированными значениями химического состава и температуры чугуна в пространстве контролируемых параметров чугуна, до поверхности, образованной диапазонами норм для чугуна необходимого качества.

Вычисляется в процентах после каждой пробы. Так как все контролируемые параметры качества чугуна задаются в виде диапазонов норм, критерий будет иметь вид:

$$L_i = \begin{cases} x_i - b_i, & \text{при } x_i \geq b_i \\ a_i - x_i, & \text{при } x_i \leq a_i \\ 0, & \text{при } a_i < x_i < b_i \end{cases}, \quad (7)$$

где  $a_i$  – нижняя граница диапазона нормы  $i$ -го параметра;  
 $b_i$  – верхняя граница.

В результате за 24 часа мы имеем 10-12 значений критериев качества полученного чугуна (в зависимости от количества сливов чугуна) и соответствующие значения критериев качества регулирования технологического процесса с неизвестными значениями параметров свертки.

Значения параметров свертки уточняются на основании статистической информации в результате решения следующей задачи линейной множественной регрессии [9]:

$$\tilde{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_N x_N \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^M (Y_k - \tilde{Y}_k)^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

минимизируется сумма квадратов отклонений реально наблюдаемых  $Y$  от их оценок  $\tilde{Y}$ , где  $X$  – частные критерии качества управления,  $\tilde{Y}$  – свертка частных критериев,  $Y$  – значения критерия качества чугуна на выпуске,  $M$  – количество сливов за сутки,  $N$  – количество контролируемых параметров.

Полученные параметры свертки, используются для расчета суммарного критерия качества регулирования технологического процесса для следующего периода плавки, что обеспечивает его существенную корреляцию с качеством получаемого чугуна. На основании визуализации и анализа динамики изменения суммарного критерия качества регулирования технологического процесса, можно судить о динамике изменения качества чугуна.

Предложенная система нуждается в верификации и исследовании на наборе данных большего объема. Недостатком системы является использование большого количества априорной информации в виде задания для контролируемых параметров видов частных критериев и

соответствующих сверток на основании опыта экспертов. Также нуждается в исследовании зависимость степени корреляции суммарного критерия качества управления технологического процесса и качества чугуна на выпуске от видов частных критериев и выбора соответствующих весов.

### **Выводы**

Проделанный анализ существующих систем контроля качества показал, что в настоящее время не существует систем, которые можно было бы использовать для оперативного контроля динамики качества чугуна в процессе плавки в реальном времени.

Спроектированная система, позволяет на основе мониторинга контролируемых параметров технологического процесса производства чугуна оценивать изменение качества выплавляемого чугуна во время плавки.

### **Список использованных источников:**

1. Технологическая инструкция. Производство чугуна: ТИ 232-1-2007 / ОАО «МК «Азов-сталь» . – Мариуполь, 2007. – 73 с.
2. Статистические методы контроля качества продукции: пер. с англ. / Л. Ноулер [и др.] – 2-е русск. изд. М.: Издательство стандартов, 1989. – 96 с.
3. Информационные системы в металлургии: учебник для вузов / Н.А. Спиринов [и др.]. – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2001. – 617 с.
4. Назаров А.В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов. – СПб.: Наука и Техника, 2003. – 384 с.
5. SCADA – системы: взгляд изнутри [Электронный ресурс] (<http://www.scada.ru/ru/>).
6. Реймаров Г.А. Первичная переработка информации в АСУ ТП / Г.А. Реймаров. – М.: Цинниатоминформ, 1980. – 95 с.
7. Металлургия чугуна: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2004. – 774 с.
8. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учебное пособие / Ю.П. Лукашин. - М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
9. Прикладной линейный регрессионный анализ: пер. с болг. / И.Вучков [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 239 с.

### **Bibliography:**

1. Process message. Ironmaking: ТИ 232-1-2007 / Open Joint Stock Company “Iron & Steel Works “Azovsteel”. – Mariupol, 2007. – 73 p. (Rus.)
2. Statistical technology of product quality control: translation from English / L. Nawler [& oths.] – 2-nd Russian edition. Moscow: Primary standards publishing house, 1989. –96 p. (Rus.)
3. Information system on metallurgy: textbook for a higher education establishment / N. A. Spirin [& oths.]. – Ekaterinburg: Ural State Technical University – UPTI, 2001. – 617 p. (Rus.)
4. Nazarov A. V. Connectionist algorithms on projection & optimization of any systems / A. V. Nazarov, A. I. Loskutov. – SPb.: Science & Engineering, 2003. – 384 p. (Rus.)
5. SCADA – Systems: look from within. [Electronic resource] (<http://www.scada.ru/ru/>).
6. Reimarov G. A. Primary information organization at Automatic Control System of the industrial processing / G. A. Reimarov. – Moscow: “CSPIAtominform”, 1980. – 95 p. (Rus.)
7. Ironmaking: textbook for a higher education establishment. 3-d revised and enlarged edition / edited by Y. S. Yusfin. – Moscow: “Akademkniga”, 2004. – 774 p. (Rus.)
8. Lukashin Y. P. Adaptive methods of the temporal series short-term forecasting: tutorial aid / Y. P. Lukashin. – Moscow: Finances & Statistician, 2003. – 416 p. (Rus.)
9. Application Study, Linear & Regression Analysis: translation from Bulgarian / I.Vuchkov [& oths.]. – Moscow: Finances & Statistician, 1987. – 239 p. (Rus.)

Рецензент В.П. Гранкин  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 29.04.2013