

УДК 669.046:62-503.5

А.Е. Кошелев, Л.И. Криволапова, О.А. Кравцова

Подсистема диагностики состояния элементов конструкций металлургических агрегатов в составе АСУ ТП

Рассмотрен подход к совершенствованию систем диагностики технического состояния элементов конструкции металлургических агрегатов. Предложена обобщенная структура системы технической диагностики, в основе которой имеется блок структурного анализа измерительных сигналов. Предложенный подход конкретизирован к системе диагностики остаточной толщины футеровки горна доменной печи и к системе обнаружения дефектов продувочной фурмы на установке внепечной обработки стали.

Ключевые слова: техническая диагностика, структурный анализ, вейвлет-анализ, показатель сложности, горн, доменная печь, продувочная фурма, установка продувки стали инертным газом.

1. Актуальность темы

Анализ отечественных и зарубежных публикаций по системам диагностики элементов конструкций металлургических агрегатов [1–2] показал, что развитие рассматриваемых систем осуществляется по следующим направлениям: использование математических моделей нестационарного теплообмена; ультразвуковой контроль диагностируемых элементов конструкции.

Совершенствование рассматриваемых систем возможно посредством включения в их состав нового алгоритмического модуля, задачами которого являются: обнаружение локальных структурных изменений в измерительных сигналах, характеризующих состояние диагностируемых объектов; оценивание текущего и будущего технического состояния конструктивных элементов объекта управления. Обобщенная структура развиваемой системы технической диагностики элементов конструкций металлургических агрегатов представлена на рис. 1.

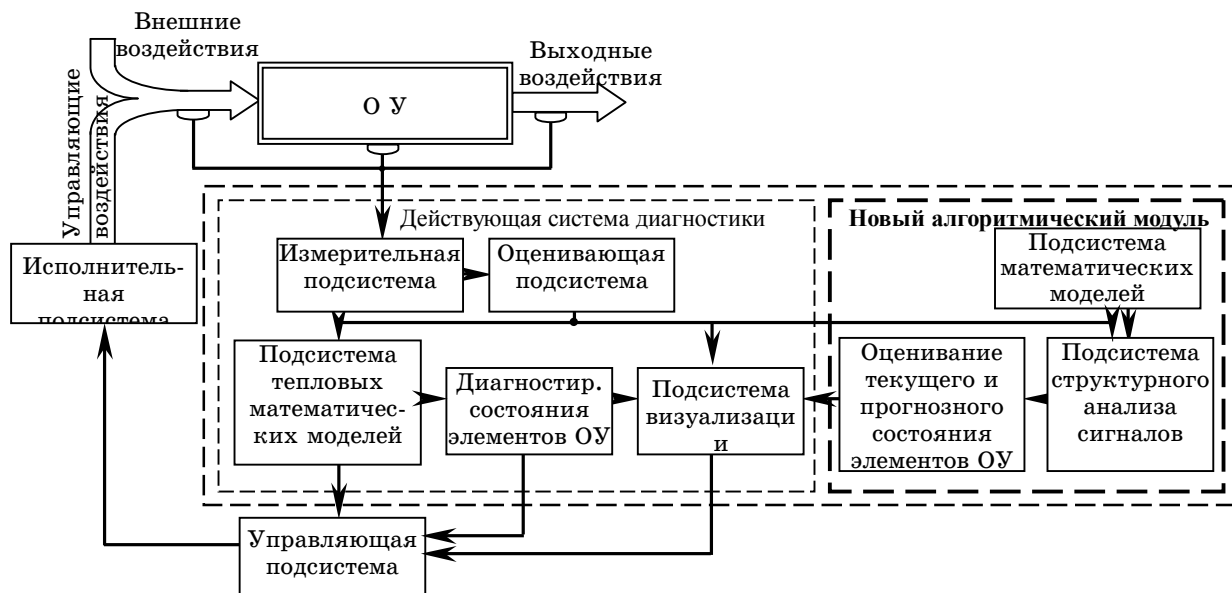


Рис. 1. Обобщенная структура системы технической диагностики элементов конструкций металлургических агрегатов

Основной задачей проведенного исследования являлась разработка методики и алгоритмов диагностирования технического состояния отдельных элементов конструкций металлургических агрегатов с применением современных методов структурного анализа сигналов.

Часто применяемые в системах контроля и управления спектральный и структурный анализы измерительных сигналов, осуществляемые традиционными методами, оказы-

ваются недостаточно эффективными в задаче оперативной диагностики состояния объектов управления. С целью выбора метода структурного анализа был проведен сравнительный анализ эффективности методов обнаружения изменения структуры измерительных сигналов: локальный анализ временных рядов данных [3]; вейвлет-анализ временных рядов данных [4].

2. Анализ базовых методов структурирования измерительных сигналов

Исследование проводилось на модельных данных с различной степенью зашумленности и показало следующее:

- для варианта анализируемых временных последовательностей данных, характеризующихся отсутствием измерительной помехи, выявлено:
 - методы локального анализа временных рядов данных позволяют обнаруживать только существенные структурные изменения сигналов, при этом отмечено наличие запаздывания в обнаружении момента локальных изменений в сигнале;
 - вейвлет-анализ характеризуется стабильностью выявления моментов изменения структурных свойств рассматриваемых временных последовательностей и отсутствием запаздывания;
- для варианта с измерительной помехой в анализируемых последовательностях данных характерно:
 - количество обнаруженных локальных особенностей уменьшается с ростом дисперсии измерительной помехи;
 - вейвлет-анализ выявляет без запаздывания все моменты локальных особенностей помехоискаженных измерительных сигналов.

Полученные результаты проведенного исследования подтверждают целесообразность использования метода вейвлет-анализа с целью *оперативного* обнаружения структурных изменений анализируемых временных рядов данных. Однако для его применения в системах оперативной диагностики технического состояния элементов конструкций металлургических объектов необходимо увеличить быстродействие используемых алгоритмов вейвлет-преобразования.

3. Совершенствование базового алгоритма вейвлет-анализа

Повышение быстродействия алгоритма вейвлет-анализа достигается разработкой рекуррентной формы расчета вейвлет-свертки и разработкой распараллеленной структуры алгоритма построения вейвлет-спектрограммы.

Традиционно для вычисления значений вейвлет-свертки используется следующее математическое выражение: $W_{\Psi}(l, a, b) = |a|^{-1/2} \sum_{n_a=1}^{N_a} \psi\left(\frac{l-b}{a}\right) x(l)$, где $W_{\Psi}(l, a, b)$ – значения

вейвлет-свертки (коэффициенты вейвлет-преобразования); $x(l)$ – исследуемая реализация; $l = 1, 2, \dots, L$ – дискретные моменты времени; $n_a = 1 \dots N_a$ – число весовых коэффициентов вейвлет-базиса на выбранном уровне детализации сигнала. В ходе исследования была получена рекуррентная форма расчета значений вейвлет-свертки:

$$W(l, a, b) = W(l-1, a, b) + |a|^{-1/2} \sum_{\rho=l-N_a+1}^{N_a} b_{n_a \rho} \Delta x(\rho),$$

которую предлагается использовать в системах оперативной диагностики технического состояния элементов конструкций металлургических агрегатов.

В качестве показателя эффективности того или иного способа расчета вейвлет-свертки приняты временные затраты на получение значений вейвлет-свертки. Применение алгоритма рекуррентной формы расчета значений вейвлет-свертки позволяет снизить временные затраты по сравнению с традиционным вариантом на 19–23%.

Возможность распараллеливать вычислительные операции алгоритма построения вейвлет-спектрограммы содержится в предпосылке вейвлет-анализа, а именно: детализация сигнала на конечное число анализируемых уровней.

Многоканальная структура разработанного алгоритма построения вейвлет-спектрограмм представлена на рис. 2, в которой каждый канал обработки исследуемой временной последовательности данных соответствует конкретному уровню детализации анализируемой последовательности данных. Одновременность получения значений вейвлет-свертки по всем заданным уровням детализации сигнала позволяет анализировать в *оперативном* режиме вейвлет-спектрограмму оцифрованного измерительного сигнала и тем

самым сокращает временные затраты на обнаружение локальных изменений в структуре анализируемой последовательности как минимум в два раза.



Рис. 2. Многоканальная структура распараллеленного алгоритма вейвлет-анализа измерительных сигналов: $x(l)$ – фактические значения анализируемого сигнала в l – текущий момент времени; ψ – тип вейвлет-базиса; $W(l, a, b)$ – значения вейвлет-свертки; a_1, a_2, \dots, a_M – уровни детализации сигнала; M – заданное число уровней детализации сигнала; b – параметр смещения по оси времени

4. Вариант решения задачи прогнозирования в системах диагностики

Наиболее сложной задачей диагностики является задача оценивания возможного будущего состояния диагностируемого объекта. В данной работе эта задача решена с опорой на вейвлет-анализ измерительных сигналов с целью определения структурно-однородных участков в нестационарном контролируемом сигнале. За структурно-однородный принимается участок, включающий в себя численные значения исследуемого ряда данных между двумя соседними «особыми» точками, которые соотносятся с моментами структурных изменений анализируемого сигнала. Последующее прогнозирование тенденции анализируемого сигнала осуществляется посредством экстраполяции показателей сложности выявленных структурно-однородных участков в сигнале [5].

Показатель сложности есть индивидуальная характеристика конкретной рассматриваемой временной последовательности данных, а не некоторого их множества. Также необходимо отметить, что рассматриваемый показатель никак не связан с возможными механизмами порождения временной последовательности данных, например, с тем, является ли анализируемый временной ряд данных частью реализации какого-то случайного процесса или траекторией какой-то динамической системы. Предлагаемая мера сложности «настроена» на восприятие пользователя, т.е. прямо учитывает, легко или нет работать с дискретными данными рассматриваемой временной последовательности.

При проверке работоспособности предлагаемого подхода к решению задачи оценивания возможного будущего состояния диагностируемого объекта были использованы натурные данные о температуре футеровки на горизонтах №1–2, 3 и 5 горна доменной печи №5 ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» (ОАО «НКМК2») за сентябрь 2004 г. Некоторые из реализаций натуральных данных представлены на рис. 3.

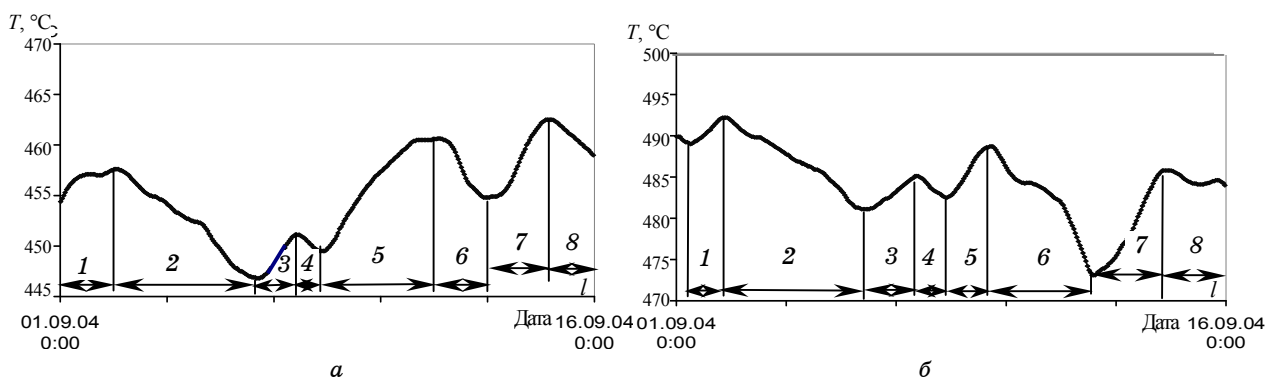


Рис. 3. Реализации фактической температуры ($T^{\circ}\text{C}$) футеровки горна доменной печи от различных термодатчиков: *a* – горизонт №3, сечение №2, *б* – горизонт №3 сечение, №4; 1–8 – номера структурно-однородных участков анализируемых реализаций

В состав алгоритма решения рассматриваемой задачи входят следующие функциональные блоки:

- накопления начального объема анализируемых данных: x_0, \dots, x_n (n – выбирается в зависимости от типа и скоротечности исследуемого технологического процесса) и определения начальных условий: набор методов аппроксимации, заданная ошибка восстановления анализируемой временной реализации; требуемая степень уравнивания аппроксимации (завышение степени аппроксимирующего уравнения нецелесообразно в связи с увеличением объема вычислений);

- формирования эффективного объема выборки;

- проведения вейвлет-анализа с целью выявления «особых» точек, отождествляемых с моментами изменения в структуре временного ряда данных и формирования структурно-однородных участков, (см. рис. 3);

- определения показателя сложности каждого выделенного структурно-однородного участка в исследуемой последовательности. Итерационный алгоритм расчета показателя сложности состоит из следующих операций: последовательное исключение некоторого количества данных из исходной реализации; полиномиальная аппроксимация оставшихся данных; восстановление значения исходного анализируемого сигнала на основе полученной аналитической зависимости. Величина максимально допустимого значения ошибки последующего восстановления исходного структурно-однородного участка определяет момент прекращения исключения данных из выборки. Количество оставшихся исходных данных анализируемого участка учитывается при определении показателя сложности по формуле

$$S = \frac{1 - 1/n^*}{1 - 1/n},$$

где n^* – число данных, оставшихся в усеченном ряде; n – число данных в исходной реализации. Тем самым формируется последовательность показателей сложности выделенных структурно-однородных участков: S_1, S_2, \dots, S_j – показатели сложности, соответствующие первому, второму и j структурно-однородным участкам;

- полиномиальной аппроксимации и экстраполяции последовательности показателей сложности выделенных структурно-однородных участков. Полученные аппроксимирующие уравнения каждого участка сохраняются в базе данных. Результат аппроксимации и экстраполяции показателей сложности структурно-однородных участков натурной последовательности данных приведен на рис. 4;

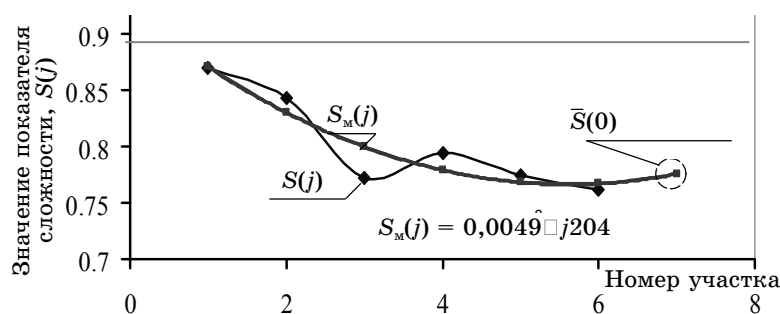


Рис. 4. Фактические – $S(j)$, модельные – $S_m(j)$ и экстраполируемые – $\bar{S}(j+1)$ значения показателей сложности для анализируемого ряда данных ($T^{\circ}\text{C}$) (горизонт №3, сечение №4)

- оценивания возможного будущего технического состояния диагностируемого элемента, которое осуществляется следующим образом: из базы данных выбираются структурно-однородные участки, показатели сложности которых равны значению экстраполированного показателя сложности (рис. 5), по соответствующим аппроксимирующим уравнениям определяются варианты прогнозные тенденции анализируемого сигнала. Выбор конкретного прогнозного решения осуществляется по близости вариантной траектории к начальным фактическим данным прогнозируемого участка.

Так, например, по данным, приведенным на рис. 3, б, было получено экстраполированное значение для будущего технического состояния $\bar{S}(j+1)=0,775$. Из имеющегося множества структурно-однородных участков выявили два вариантных решения: $\bar{T}^I(l)$ и $\bar{T}^{II}(l)$, наиболее приемлемым из которых является $\bar{T}^{II}(l)$. По используемым натурным данным ошибка прогнозирования тенденции контролируемого параметра не превысила максимально допустимую погрешность измерения в ± 3 °С.

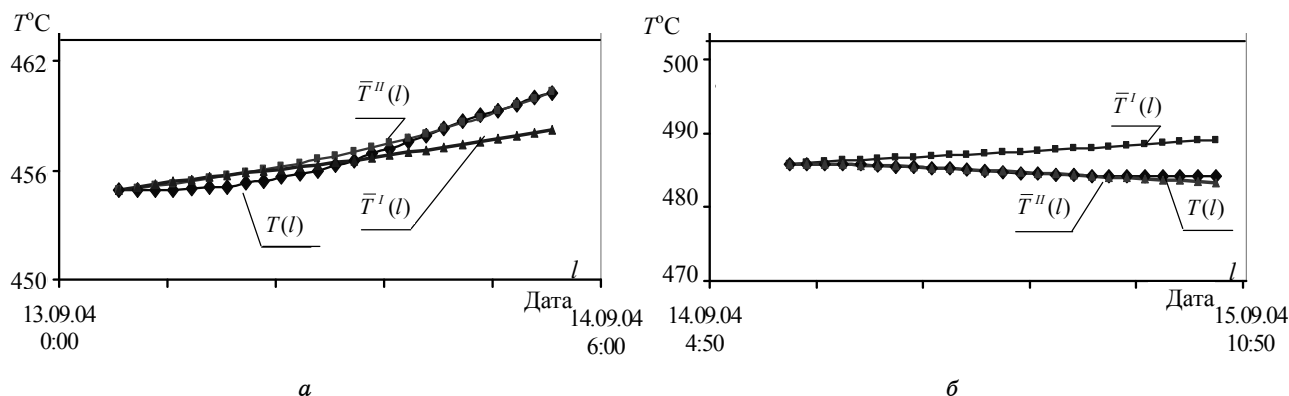


Рис. 5. Фактические и вариантные экстраполированные траектории динамики температуры футеровки горна доменной печи: а – участок №7 (горизонт №3, сечение №4); б – участок №8 (горизонт №3, сечение №4); $\bar{T}^I(l)$, $\bar{T}^{II}(l)$ – варианты прогнозируемых рядов данных с одинаковыми показателями сложности

5. Модернизация систем диагностики. Разработанный вариант вейвлет-анализа и метод прогнозирования нестационарных измерительных сигналов с использованием показателя сложности их структурно-однородных участков положены в основу дополнительного алгоритмического модуля действующей системы диагностики технического состояния футеровки горна доменной печи [6].

В качестве прототипа выбрана система контроля разгара горна доменной печи №5 «Футеровка» ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» (НКМК). В данной системе измерение температур в футеровке производят при помощи датчиков температуры, месторасположение которых определяется номерами поясов (n), радиусов (r), на которые условно разбита футеровка металлоприемника печи, и номером (m) установки термодатчика по направлению r -го радиуса.

Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является то, что информация с каждого функционирующего термодатчика подвергается проверке на устойчивость считывания и на достоверность, из достоверных данных формируются эффективные временные последовательности, которые затем подвергают структурному анализу с целью выявления локальных изменений с последующим запоминанием их координат. Далее проводится анализ приращений температуры за текущие сутки по m_i датчику $\Delta_c(l) = x(l) - x(l-23)$, величина которого не должна превышать порог в 2 °С, и за текущую неделю по m_i датчику:

$$\Delta_n(l) = \sum_{l=1}^7 \Delta_c(l),$$
 максимальное изменение которого не должно

превышать 15 °С (пороговые величины в 2 и 15 °С приняты из расчета максимально допустимого изменения температуры футеровки горна доменной печи на 50 °С за месяц), по результатам которого осуществляется представление информации технологическому персоналу о текущем изменении температурного поля футеровки горна доменной печи с выделением областей футеровки горна, в которых отмечены резкие структурные изменения сигналов термодатчиков. Затем в алгоритме осуществляется оценивание возможного будущего состояния огнеупорной кладки горна доменной печи. Визуализация обобщенного таким образом изменения температурного поля футеровки горна доменной печи (рис. 6) укажет на начинающийся разгар огнеупорной футеровки.

Разработанный алгоритмический модуль позволяет своевременно обнаруживать локальные изменения рабочего пространства (разгар футеровки, «зарастание» горна) металлоприемника доменной печи на ранней стадии и представлять информацию об изменении

ях в температурном режиме горна в динамике [6]. Так, по данным о температуре футеровки горна доменной печи №5 ОАО «НКМК» за август 2006 г. начинающийся интенсивный разгар огнеупорной кладки обнаружен разработанным алгоритмом на 7–10 дней раньше, чем фактически зафиксированный разгар.

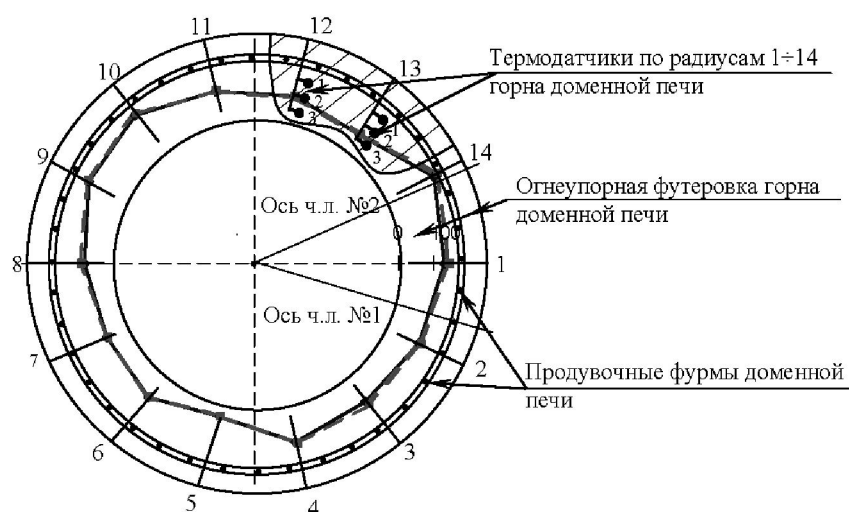


Рис. 6. Отображение изменения температурного поля футеровки горна доменной печи:
 —◆— Текущее изменение температурного поля футеровки горна доменной печи.
 —■— Прогнозируемое изменение температурного поля футеровки горна доменной печи.

Другим объектом исследования является установка продувки стали газом, применительно к которой совершенствуется алгоритм системы диагностики состояния продувочной фурмы [7]. В действующей системе, функционирующей на ОАО «НКМК», способ оперативной оценки состояния фурмы при продувке расплава в ковше включает измерение величины давления перед фурмой. Недостатком действующей системы диагностики состояния продувочной фурмы является то, что результаты регистрации величины давления газа перед фурмой выводятся на устройство отображения информации на текущий момент времени, а для принятия решения о продолжении продувки или ее остановке обслуживающему персоналу необходимо иметь показания данной величины с момента начала продувки.

В основу разработанной системы контроля состояния продувочной фурмы на установке продувки стали инертным газом (УПСА) положена следующая схема: на начальном этапе производится измерение контролируемых величин процесса продувки (давление и расход газа, положение продувочной фурмы); далее осуществляется нормирование исследуемых временных рядов данных по максимальному значению в каждой анализируемой временной последовательности, данную операцию проводят для получения возможности анализировать разномасштабные данные в одном диапазоне; обработка полученных данных с использованием вейвлет-преобразования, процедура которой аналогична описанной выше. *Отличительной особенностью* данной системы диагностики является совместный анализ взаимосвязанных контролируемых технологических характеристик: давление и расход газа, положение продувочной фурмы. О появлении дефекта продувочной фурмы свидетельствует обнаружение изменений структуры одного или двух любых учитываемых сигналов.

Предлагаемый метод позволяет выявлять дефекты в автоматическом режиме, а также фиксировать в протоколе продувки наличие дефекта фурмы, выдать «тревожную» информацию технологическому персоналу или даже аварийно остановить продувку.

Литература

1. Серов Ю.В. Новые информационные технологии контроля работы горна доменных печей / Ю.В. Серов, В.Г. Макиенко, В.Н. Бражко и др. // Сталь. — 1997. — № 10. — С. 4–9.

2. Кудинов Г.А. Компьютерная диагностика разгара огнеупорной кладки горна и лежачи доменных печей / Г.А. Кудинов, В.А. Кришталь, Е.Е. Лысенко // Сталь. – 1997. – №10. – С. 10–12.
3. Структурный анализ сигналов при алгоритмизации технологических процессов: учеб. пособие / В.П. Авдеев, П.Г. Белоусов, Я.Г. Парпаров и др. – Новокузнецк: СМИ, 1991. – 78 с.
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
5. Дарховский Б.С. О подходе к оценке сложности кривых / Б.С. Дарховский, А.Я. Каплан, С.Л. Шишкин // Автоматика и телемеханика. – 2002. – №3. – С. 134–140.
6. Патент РФ №2299910 С2. МПК С 21 В 7/24. Способ контроля состояния футеровки горна доменной печи / А.Е. Кошелев, Л.И. Криволапова, О.А. Кравцова. – Опубл. 27.05.2007. Бюл. изобр. – №15. – С. 554–555.
7. Патент РФ №2299914 С2. МПК С 21 С 7/072, С 21 С 5/30 Способ контроля состояния фурмы при продувке расплава в ковше / А.Е. Кошелев, Л.И. Криволапова, О.А. Кравцова. – Опубл. 27.05.2007. Бюл. изобр. – №15. – С. 557.

Кошелев Александр Евдокимович

Д-р. техн. наук, проф., декан технологического факультета
ГОУ ВПО «Кузбасская государственная педагогическая академия» (КузГПА)
Тел.: (3843) 74-72-71
Эл. почта: Koshelev@Kuzspa.ru

Криволапова Людмила Ивановна

Канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и информационных систем
ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ)
Тел.: (3843) 74-88-06

Кравцова Ольга Александровна

Аспирант кафедры автоматизации производственных процессов
ГОУ ВПО «Кузбасская государственная педагогическая академия» (КузГПА),
препод. ГОУ СПО «Кузнецкий металлургический техникум» (КМТ)
Эл. почта: Kravtsov@kuz.ru

А.Е. Koshelev, L.I. Krivolapova, O.A. Kravtsova

Sub-system for diagnostics of construction elements state of metallurgical sets as a part of ACS of manufacturing processes

An approach to improvement of systems for diagnostics of the technical state of construction elements of metallurgical sets is considered. A generalized structure of the technical diagnostics system, which includes a unit of structure analysis of the measured signals, is suggested.

The given approach is considered in details for the diagnostic system of brick-lining residual thickness of blast-furnace and for flaw detection system of blowoff tuyere of out-of-furnace steel processing set.

Key words: the technical diagnostic, the analysis of the measuring signals, wavelet-analyses, the index of the complexity, the furnace, the blast-furnace, the installation of the blowing of the steel by means of the inert gases.