

## АЛГОРИТМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВКИ НА УСТАНОВКЕ «КОВШ-ПЕЧЬ»

Дегтяренко И.В., Костецкий Ю.В., Омельченко А.А.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,  
кафедра АТ, кафедра ЭКПС, кафедра АСУ.

E-mail: div@fcita.dn.ua

### Abstract

*Degtyarenko I., Kostetskiy U., Omelchenko A. Algorithm of ladle-furnace technological parameters control by vibroacoustical monitoring. Algorithm of ladle-furnace technological parameters control by analyzing vibroacoustical activity of ladle is described. Selection of controlling frequency diapasons are grounded. Results of vibroacoustical monitoring algorithm experimental examination are shown.*

В настоящее время металлургическая промышленность Украины переживает период технологического перевооружения. Стимулируется создание и внедрение новых автоматизированных технологий производства стали, которые должны решать задачи повышения качества производимой продукции, снижения производственных затрат, повышения надежности технологического оборудования и т.д. Решение этих задач требует сбора полной и объективной информации о состоянии многих технологических параметров. Однако далеко не все технологические параметры могут быть оценены путем прямых измерений. Часть из них может быть определена лишь косвенным путем. Это обусловлено трудностью или даже невозможностью установки датчиков для производства прямых измерений.

Одним из ключевых элементов технологии обработки стали на установках «ковш-печь», является продувка металла инертным газом. Вдувание газа в объем металла, как правило, осуществляют через продувочные пробки, установленные в днище сталеразливочного ковша. От эффективности этого процесса в значительной степени зависят многие показатели технологии. Для контроля и поддержания нужного расхода газа обычно используют приборы, измеряющие давление в аргонопроводе, обратное давление и расход. При этом по разным причинам расход газа в аргонопроводе и в самом объеме металла в ковше могут не всегда совпадать по величине (износ продувочных устройств, утечки в аргонопроводе и т.д.). Кроме того, вследствие неожиданного выхода из строя продувочных устройств могут возникнуть нештатные ситуации, ведущие к нарушению нормального хода технологического процесса.

Как свидетельствуют современные публикации [1,2] одним из наиболее перспективных подходов к косвенной оценке технологических параметров механического и металлургического оборудования, является анализ виброакустической активности его элементов. Так, например, на заводе Hilton Works компании Stelco Inc. (Канада) были проведены исследования в области контроля параметров технологического процесса на установке «ковш-печь» по виброакустическим характеристикам сталеразливочного ковша [1]. Однако результаты этих исследований не могут быть непосредственно использованы при создании аналогичных систем контроля на других металлургических предприятиях.

В данной работе представлены результаты исследований по созданию алгоритма косвенного контроля расхода инертного газа и работы продувочных устройств по виброакустическим характеристикам кожуха сталеразливочного ковша. Еще одним технологическим параметром установки «ковш-печь», о котором можно судить по виброакустическим характеристикам является режим горения электрических дуг. Неблагоприятные режимы горения электрических дуг (горение на открытый металл,

недостаточное количество шлака, наличие твердой фазы в шлаке и т.д.) могут быть идентифицированы по характерным изменениям вибрации поверхности ковша.

Теоретические исследования источников вибрации печи-ковша, а так же анализ временных реализаций вибросигналов, записанных в ходе плавки, показали, что процессы, являющиеся причиной вибрации печи-ковша, имеют явно выраженный нестационарный характер. Нестационарность, прежде всего, связана со сложностью объекта контроля, а так же со множеством изменений технологических параметров, которые имеют место в ходе плавки: включением/выключением электрических дуг, присадкой добавок, оборотом проб, наличием источников внешних возмущений и т.д.

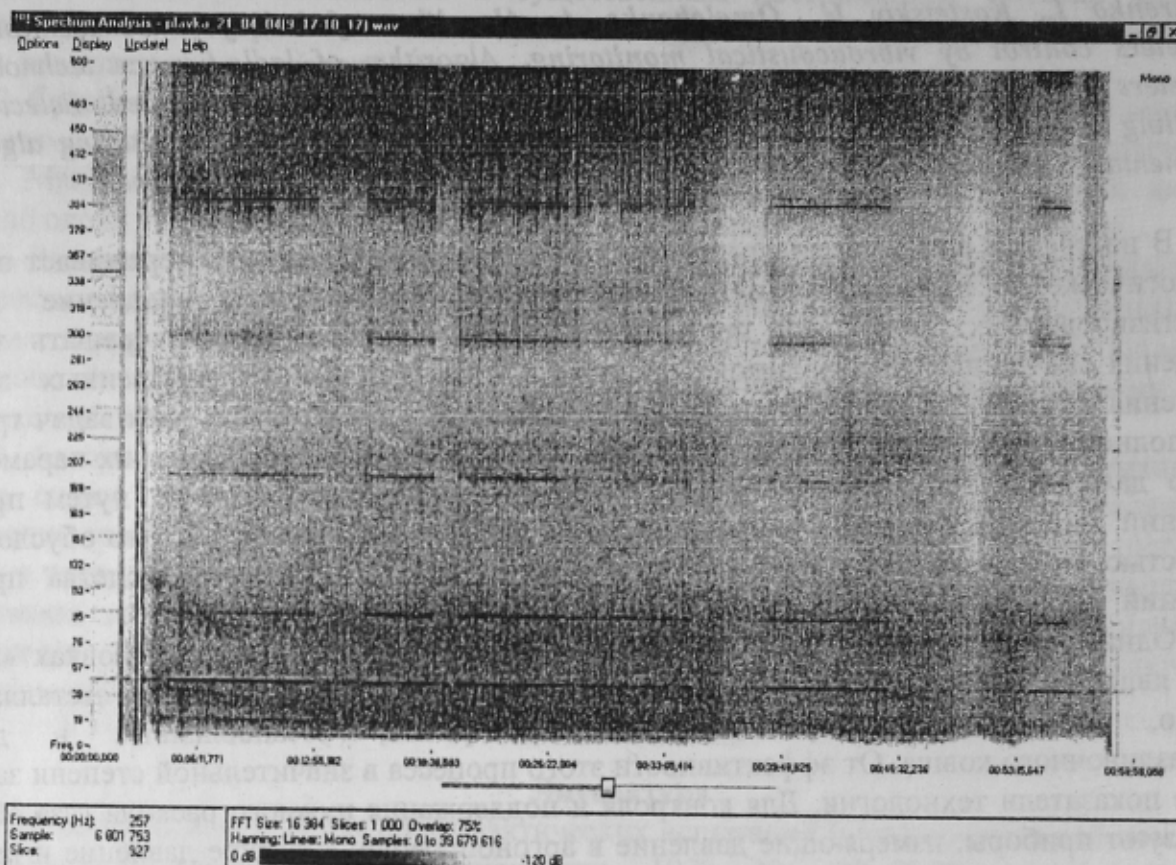


Рисунок 1 – Спектрограмма реализации вибросигнала, записанного в ходе плавки на установке «ковш-печь» (частотный диапазон 0-500 Гц)

Анализ источников [1,2] показал, что гармоники сигнала связанные с продувкой газом лежат в низкочастотном диапазоне (до 1 кГц). Однако отдельных ярко выраженных гармоник в спектре вибросигналов связанных с параметрами расхода аргона при анализе спектрограмм и спектров выявить не удалось (см. рис. 1). Зато, экспериментальные исследования на реальном объекте показали, что энергия вибросигнала в частотном диапазоне 15÷95 Гц имеет хорошую корреляцию с параметрами режима продувки аргоном. В этот частотный диапазон попадает гармоника 50 Гц, которая может быть связана с различными производственными помехами (горение электрической дуги, работа внешнего оборудования и т.д.). Исходя из этого, было решено исключить из рассмотрения частоты в области 45÷55 Гц при контроле расхода аргона. Таким образом, частотные диапазоны 15÷45 Гц и 55÷95 Гц были выбраны в качестве информативных для контроля режима продувки металла аргоном.

Основная частота электрических дуг при нормальном режиме плавки составляет 100 Гц. Исходя из этого, контроль режима горения электрических дуг может быть



осуществлен по контролю уровня вибросигнала в областях гармоник кратных 100 Гц. Кроме того, при горении электрической дуги на открытое зеркало металла (дуга не закрыта шлаком) возникает гармоника 50 Гц. Отсюда следует, что при контроле режима горения электрических дуг должны быть учтены частотные компоненты в области 50 Гц, а также в областях частот кратных 100 Гц.

Основной характеристикой используемой в вибродиагностике для определения уровня сигнала является его среднеквадратическое значение (СКЗ) [3]. Квадрат СКЗ можно интерпретировать как среднюю мощность сигнала. Формула для определения СКЗ всего сигнала имеет вид:

$$СКЗ_{общ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s(t_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^K s(f_i)^2},$$

где  $s(t)$  - временная реализация сигнала;  $N$  - количество отсчетов во временной реализации сигнала;  $s(f)$  - спектр сигнала;  $K$  - общее количество спектральных линий в спектре сигнала.

Так как контроль состояния различных технологических параметров плавки должен вестись в различных частотных диапазонах вибросигнала, то для решения данной задачи наиболее целесообразно использовать СКЗ определенной полосы частот. В этом случае формула для расчета СКЗ имеет вид:

$$СКЗ_j = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=K_j}^{K_{j+1}} s(f_i)^2},$$

где  $K_j, K_{j+1}$  - номера первой и последней спектральной линии в спектре сигнала, определяющие  $j$ -тую полосу частот.

Основываясь на изложенном можно сформулировать основную задачу обработки и анализа вибросигналов как отслеживание изменения СКЗ различных частотных диапазонов в ходе процесса плавки.

Длительность процесса плавки в среднем колеблется в пределах от 30 до 80 минут. Первичная частота дискретизации вибросигналов равна 11025 Гц. Т.е. запись вибросигнала по одному из каналов имеет размер в пределах от 20 до 50 миллионов отсчетов. Обработка данных такого объема затруднительна даже на современных высокопроизводительных вычислительных средствах. Поэтому было принято решение при обработке производить сегментирование обрабатываемого сигнала на отрезки, обработка которых не вызывает затруднений, и в пределах которых сигнал условно можно считать стационарным.

При определении изменения СКЗ определенной полосы частот вибросигнала в ходе плавки было принято решение выбрать размер сегментов сигнала длиной в 5 секунд. Это связано с тем, что на таком промежутке времени процессы, происходящие в печи-ковше, можно считать стационарными, и, кроме того, такой сегмент позволяет получить хорошее разрешение по времени и по частоте. Сегмент длиной в 5 секунд, записанный с частотой дискретизации 11025 Гц, имеет 55125 отсчетов, что позволяет при спектральном анализе получить разрешение по частоте менее 0,2 Гц. Такой разрешающей способности достаточно для точного определения СКЗ в узких полосах частот (на полосу в 10 Гц приходится более 50 точек вычисления частоты).

Основываясь на описанных выше принципах анализа вибросигналов, было решено всю рассматриваемую область частот (от 5 до 1000 Гц) разбить на смежные полосы шириной 10 Гц (5-15 Гц, 15-25 Гц ... 985-995 Гц) и вычисления СКЗ проводить в рамках этих полос.

Этот прием дает возможность синтезировать различные частотные диапазоны, которые могут быть использованы при анализе тонкой структуры вибросигналов. СКЗ для широкой информативной области частот формируется путем вычисления квадратного корня из суммы квадратов СКЗ вычисленных в рамках полос частот составляющих данную информативную область.

Для реализации описанного алгоритма было разработано специальное программное обеспечение на пакете MATLAB 6.3 состоящего из процедуры расчета изменения СКЗ в отдельных полосах частот и процедуры визуализации изменения СКЗ в выбранных информативных областях.

Экспериментальные исследования разработанного алгоритма проводили на установке «ковш-печь» в кислородно-конвертерном цехе Енакиевского металлургического завода. Регистрация вибрации ковша производилась с помощью специального комплекта регистрирующей аппаратуры, включающего вибродатчики с интегрированными усилителями, устанавливаемые непосредственно на кожухе ковша (в районе верхнего и нижнего фланца), приемники сигнала и персональный компьютер. Схема экспериментов, была следующей (см. рис. 2) – вибрация поверхности кожуха сталеразливочного ковша регистрировалась датчиками, а полученный сигнал после предварительного усиления по линии связи передавался на удаленный пункт регистрации в приемники аппаратуры. Поступающая информация сохранялась на НЖМД персонального компьютера для последующей обработки и анализа.

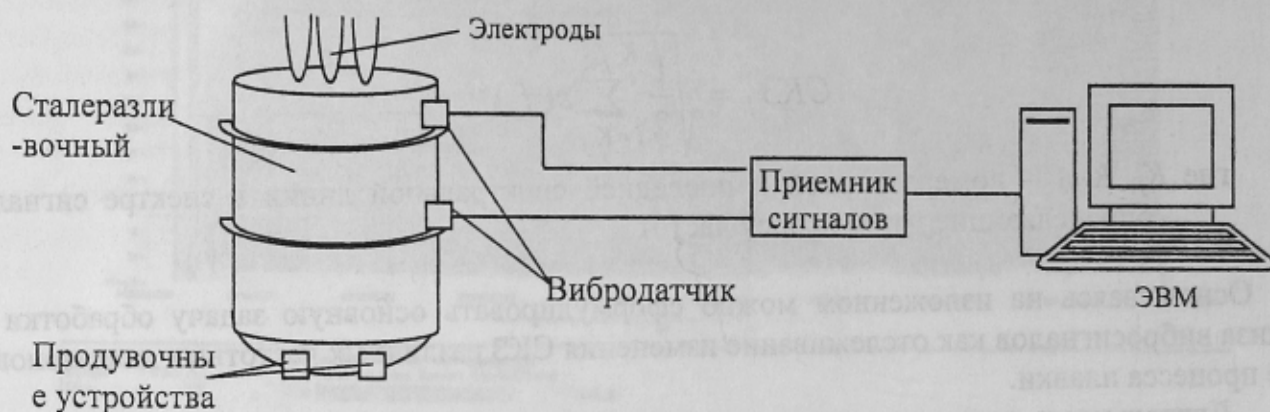


Рисунок 2 - Структурная схема аппаратной части системы контроля

На протяжении всего технологического цикла обработки стали велась запись вибросигнала. Полученные таким образом данные обрабатывались согласно разработанному алгоритму. Анализ данных показал, что датчики, расположенные на фланцах кожуха ковша позволяют успешно регистрировать полезный сигнал. Было установлено, что изменение уровня СКЗ вибросигнала в выбранном диапазоне частот прямо пропорционально изменению расхода аргона в процессе внепечной обработки стали (см. рис. 3). На рисунке 3а представлены графики изменения СКЗ вибросигналов в выделенном частотном диапазоне, регистрируемые датчиками установленными на верхнем и нижнем фланцах сталеразливочного ковша. На рисунке 3б представлен график изменения расхода аргона в ходе плавки. Эти графики иллюстрируют четкую связь между изменениями уровня СКЗ для обоих датчиков и расходом аргона во времени. Причем более точное совпадение наблюдалось для сигнала, зарегистрированного датчиком, установленным на нижнем фланце ковша, т.е. ближе к источнику полезного сигнала.

Кроме того, обработка полученных данных показала, что изменение уровня СКЗ, на частотах кратных 100 Гц позволяет четко отслеживать периоды включения электрических



дуг и в определенной степени судить об условиях их горения. Однако данных полученных в рамках проведенных экспериментов оказалась недостаточно для установления однозначных зависимостей между уровнем СКЗ и условиями горения электрических дуг.

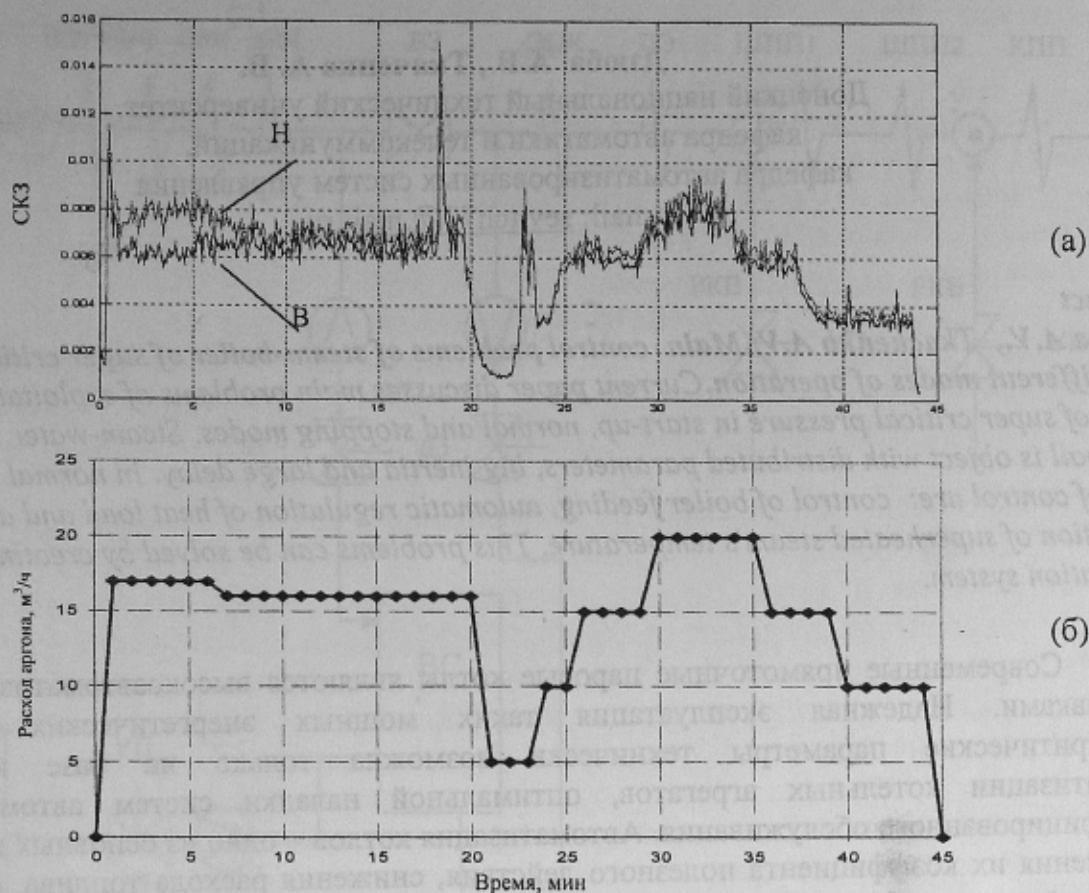


Рисунок 3 - Изменение во времени СКЗ вибросигнала (а) и расхода аргона (б) (буквы у кривых: Н – верхний фланец; В – верхний фланец)

**Выводы:**

1. Разработан алгоритм виброакустического контроля технологических параметров установки «ковш-печь» (расход аргона, режим горения электрических дуг).
2. Обоснован выбор информативных частотных диапазонов, использующихся при анализе вибросигналов зарегистрированных на кожухе сталеразливочного ковша для косвенного контроля технологических параметров установки «ковш-печь».
3. Проведена экспериментальная проверка работоспособности разработанного алгоритма, которая показала возможность получения адекватной информации о работе продувочных устройств на основе анализа вибросигналов зарегистрированных на кожухе сталеразливочного ковша.

**Литература**

1. Improved Ladle Stirring Using Vibration Technology at Stelco Hilton Works/ R.I.Minion, C.F.Leckie, K.J.Legard, B.D.Richardson // Iron and Steelmaker. – Vol. 25. – No.7. – 1998. – P.25-31.
2. Process for Controlling the Stirring Energy Delivered by Gas Flowing Through a Liquid /F.L.Kemeny, D.I.Walker, J.A.Jones // U.S. Patent No. 6264716, Jul. 24, 2001.
3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. –М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.