

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА АНАЛИЗА СИГНАЛА ВИБРОУСКОРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАННЕГО РАСПОЗНАВАНИЯ ШЛАКА ПРИ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Д.А. Полещенко

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСИС»
Россия, 309516, Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42
E-mail: po-dima@yandex.ru

А.В. Корнев

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСИС»
Россия, 309516, Старый Оскол, мкр. Макаренко, д. 42
E-mail: korenev01@mail.ru

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, сингулярный спектральный анализ, огибающая спектра мощности, вибрационный метод, гибридный метод.

Аннотация: В статье рассмотрена проблема раннего распознавания шлака сталеразливочного ковша машины непрерывного литья заготовок при разливке стали. В данной работе был исследован вибрационный метод распознавания шлака, так как он является наиболее информативным. Для своевременной отсечки шлака и предотвращения его попадания в промежуточный ковш был опробован гибридный метод анализа сигнала виброускорения манипулятора защитной трубы. Он основан на последовательном применении сингулярного спектрального анализа исходного сигнала и вычисления спектральной плотности мощности несущей компоненты сингулярного разложения, на основании которой был определен момент начала попадания шлака в промежуточный ковш. Анализ результатов тестирования данного метода показал, что он позволил исключить влияние помех, создаваемых движением шиберного затвора, на качество работы критериев отсечки шлака.

1. Введение

Разливка стали является важной стадией сталеплавильного производства. Существует три способа разливки: сверху в изложницы, сифоном и на устройстве непрерывной разливки стали. Самым распространенным является способ непрерывной разливки стали, при котором жидкому металлу придается форма прямоугольника или квадрата, либо сортовая заготовка для последующей обработки на прокатных станах.

Одной из важных технологических операций при непрерывной разливке стали является процесс слива металла из сталеразливочного ковша. При его переливе важным и сложным этапом служит определение момента начала поступления шлака в промежуточный ковш [1].

Решение данной проблемы очень важно, так как, во-первых, унос шлака из стальковша вызывает ухудшение качества стали.

Вторым следствием уноса шлака является сокращение срока службы промежуточного ковша. Шлак очень вреден для огнеупорного материала

промежуточного ковша. Даже если его стенки хорошо покрыты высокопрочными материалами, шлак будет растворять их из-за своего состава, температуры и объема. Другими словами, из-за эрозии огнеупорной футеровки промковша необходимо остановить разливку, чтобы устранить риск безопасности процесса [2].

С другой стороны, преждевременное закрытие шиберов создает ситуацию, когда вместе со шлаком большое количество годного металла бракуется [3].

Все это приводит к потерям металлургических предприятий.

2. Цель исследований

В данной работе рассмотрен вибрационный метод контроля за процессом начала поступления шлака в промковш, так как он наиболее информативен [4]. Исследования проводились на сигналах, снятых с реального промышленного объекта. Акселерометры были установлены на манипулятор защитной трубы МНЛЗ.

Вибрация создается за счет удара стали по шиберу, который дросселирует ее поток из сталковша в промежуточный ковш [5]. Исходя из того, что плотность жидкой стали составляет в среднем $6,9 \text{ т/м}^3$, а плотность шлака - $2,5 \text{ т/м}^3$, возникла гипотеза о том, что уровень сигнала вибрации должен уменьшаться при начале поступления шлака в промежуточный ковш. К таким же выводам пришли авторы в работах [6,7].

Это, в свою очередь, означает, что возникнет уменьшение мощности сигнала вибрации, которое можно будет зафиксировать и своевременно закрыть шибер для предотвращения попадания шлака в промковш.

Таким образом, целью исследований является разработка такого алгоритма обработки сигнала виброускорения, который позволит своевременно (при начале поступления шлака) обнаружить снижение его амплитуды.

3. Предлагаемый метод

В работе [8] были представлены критерии отсечки шлака, основанные на анализе спектра мощности сигнала виброускорения, позволившие зафиксировать момент начала поступления шлака в промковш. Недостатком данного метода является то, что он чувствителен к помехам, оказываемым движением шиберов.

В данной работе предлагается гибридный подход, позволяющий подавлять помехи от шиберов. Он состоит из двух основных методов: сингулярного спектрального анализа и вычисления спектра мощности.

Сингулярный спектральный анализ (ССА) позволяет разложить исходный сигнал на ряд аддитивных составляющих, тем самым можно выделить несущие компоненты и убрать ненужные шумы [9].

Таким образом, в данной работе на основании ССА из исходного сигнала была выбрана первая (несущая) компонента. Ширина окна для построения траекторной матрицы была выбрана равной 100, количество групп - 50.

Для демонстрации эффективности работы этого метода на рис. 1-3 представлены результаты его работы по сравнению с фильтром скользящего среднего.

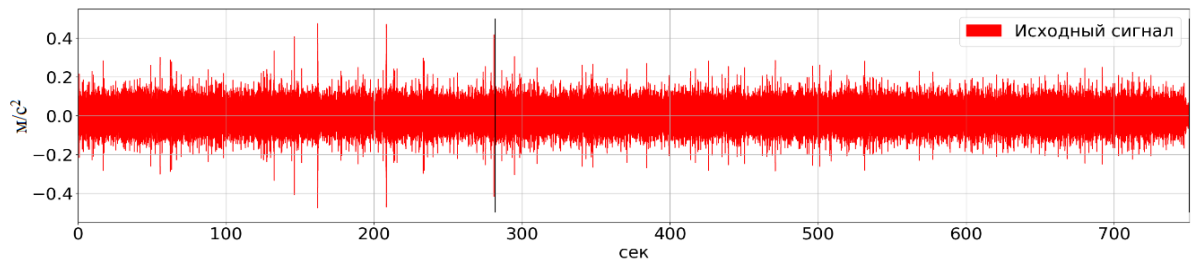


Рис. 1. Исходный сигнал.

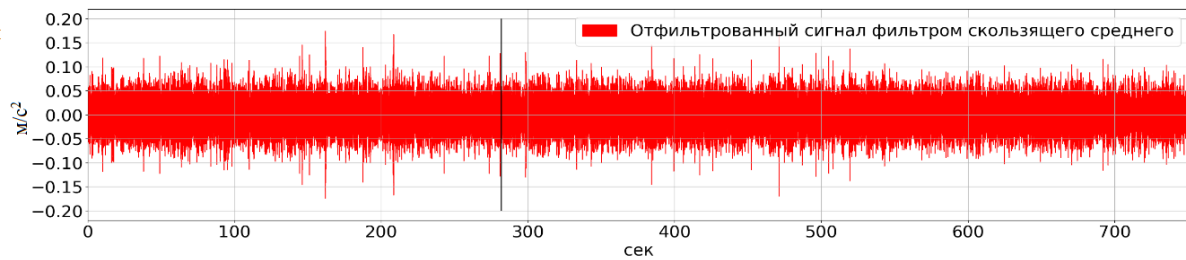


Рис. 2. Отфильтрованный сигнал фильтром скользящего среднего.

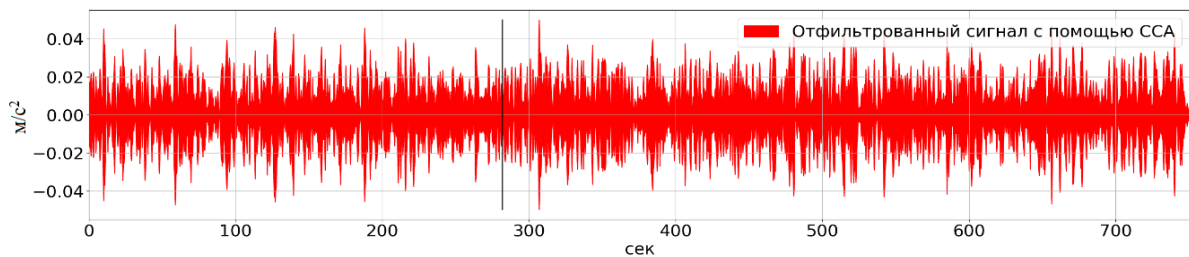


Рис. 3. Отфильтрованный сигнал фильтром с помощью ССА.

На рисунках черная черта обозначает момент отключения автоматического регулирования шибера. На графике исходного сигнала резкие одиночные всплески его амплитуды возникают в результате движения шибера. Как можно заметить, фильтр скользящего среднего несколько их сгладил, однако они все еще остались заметными. После применения ССА амплитудные скачки исчезли. Таким образом, можно сделать вывод, что ССА по сравнению с методом скользящего среднего обеспечивает более качественную фильтрацию сигнала.

Следующим шагом стало применение метода вычисления спектра мощности к полученному отфильтрованному сигналу с помощью ССА. Спектральная плотность мощности показывает, как мощность сигнала распределяется по частотам [10] (см. формулу (1)):

$$(1) \quad S_{xx}(f) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{(\Delta t)^2}{T} \left| \sum_{n=1}^N x_n e^{-i2\pi f n \Delta t} \right|^2,$$

где: T – период времени; N – длина сигнала x ; Δt – интервал выборки в секундах.

Для более наглядного представления спектральная плотность мощности может быть вычислена по формуле (2):

$$(2) \quad S_{xx}(f) = 10 \lg \left(\frac{(\Delta t)^2}{T} \left| \sum_{n=1}^N x_n e^{-i2\pi f n \Delta t} \right|^2 \right)$$

Построение спектров мощности производилось для частотных диапазонов 0-100 Гц. Их анализ показал, что для несущих компонент сигналов наблюдается снижение мощности в этом частотном диапазоне.

Следующим этапом стало построение графиков среднего значения мощности за одну секунду в частотном диапазоне 0-100 Гц для несущей составляющей сигнала виброускорения с момента начала записи сигнала и до закрытия шибера оператором (см. формулу 3):

$$(3) \quad P_{xx}^q(k) = \frac{\sum_{i=0}^{f_{\max}} S_{xx}^k(i)}{f_{\max}},$$

где: $k = \overline{1, K^q}$ – номер такта (1 такт равен одной секунде и содержит 200 значений); K^q – номер такта, на котором оператор закрыл шибер; $q = \overline{1, 15}$ – число экспериментов; f_{\max} – верхняя граница частоты, равная 100 Гц.

Эта кривая была названа огибающей спектра мощности. Анализ всех графиков огибающей спектра мощности показал, что наблюдается ниспадающий тренд перед закрытием шибера оператором, то есть при начале поступления шлака в промковш.

Для анализа эффективности предлагаемого метода было произведено сравнение работоспособности критериев отсечки шлака, представленных в [8], путем построения ОСМ исходного сигнала и ОСМ его несущей компоненты, полученной в результате ССА (см. рис. 4, 5).

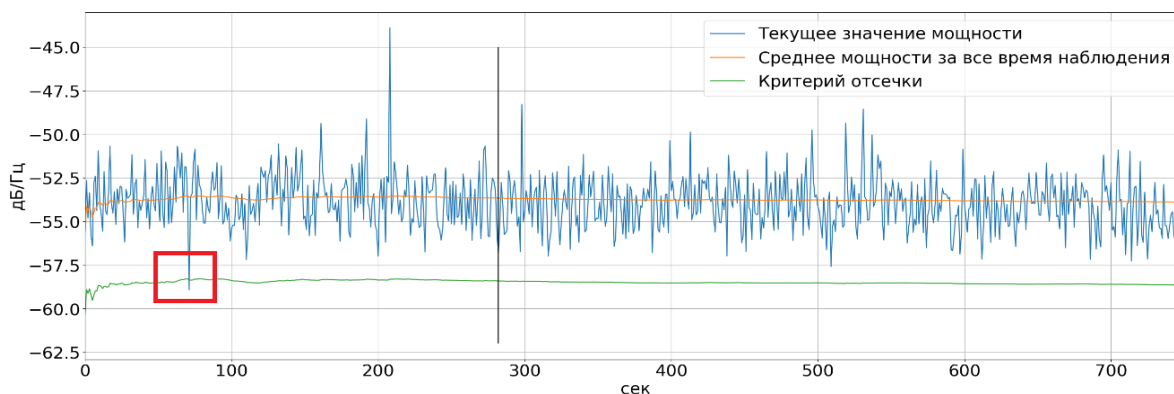


Рис. 4. Тренд отработки критерия на ОСМ исходного сигнала.

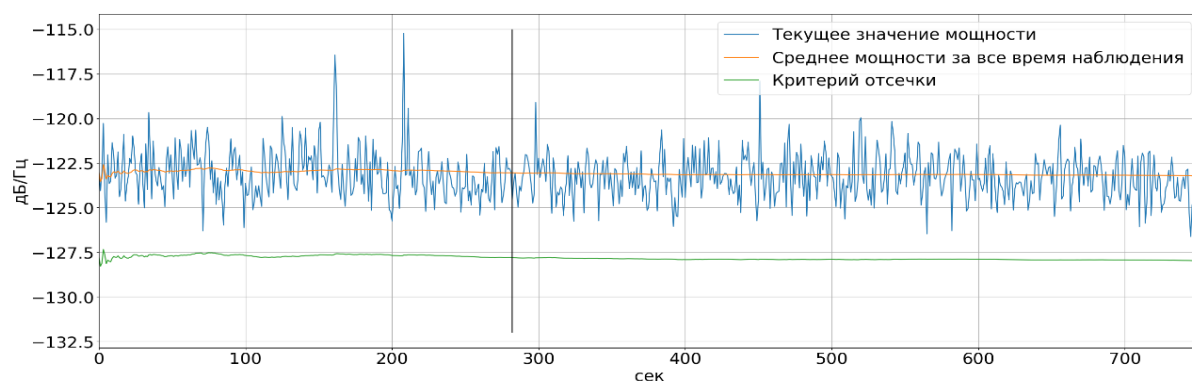


Рис. 5. Тренд отработки критерия 1 на ОСМ несущей компоненты.

На рис. 5 видно, что критерий отсечки сработал непосредственно перед закрытием шибера оператором. Однако на рис. 4 можно увидеть ложное срабатывание, выделенное красной рамкой. Оно связано с помехами, вносимыми движением шибера. Аналогичные результаты были получены для всех опытов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что предлагаемый метод является нечувствительным к движению шиберного затвора.

4. Заключение

Таким образом, использование сингулярного спектрального анализа для выделения несущей составляющей сигнала и построение огибающей спектра мощности для нее позволило полностью исключить влияние движения шиберного затвора на качество работы предлагаемого метода. Данный подход может быть впоследствии опробован в реальных производственных условиях.

Список литературы

1. Chakraborty A., Ghose J., Chakraborty S., Chakraborty B. Vision-based detection system of slag flow from ladle to tundish with the help of the detection of undulation of slag layer of the tundish using an image analysis technique // *Ironmaking & Steelmaking*. 2022. Vol. 49, No. 1. P. 10-15.
2. Kapusuz H., Güvenç M. A., Mistikoğlu S. A review study on ladle slag detection technologies in continuous casting process // *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 2019. Vol. 3, No. 3. P. 144-149.
3. Кривонос В.А., Митин А.С. Повышение точности оценки уровней металла в сталковше и промковше МНЛЗ с использованием нелинейного наблюдателя состояния // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2010. Т. 6, № 4. С. 41-45.
4. Tan D.P., Ji S.M., Li P.Y., Pan X.H. Development of vibration style ladle slag detection methods and the key technologies // *Science China. Technological Sciences*. 2010. Vol. 53, No. 9. P. 2378-2387.
5. Guvenc M.A., Kapusuz H., Mistikoglu S. Experimental study on accelerometer-based ladle slag detection in continuous casting process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. P. 2983-2993.
6. Семенов М.В., Красильников С.С., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С. Вибродетектирование шлака при сливе стали из сталковша в промежуточный ковш // *Автоматизированные технологии и производства*. 2015. № 2. С. 40-42.
7. Tan D.P., Li P.Y., Ji Y.X., Wen D.H., Li C. SA-ANN-based slag carry-over detection method and the embedded WME platform // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2012. Vol. IE-60. No. 10. P. 4702-4713.
8. Tsygankov Y.A., Kovriznich Y.A., Sergeychik M.S., Korenev A.V. Development of a Neural Network Method for Identification of the Method to Detect Slag Flow in a Metallurgical Unit" Steel Ladle-Intermediate Ladle" // *2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. IEEE. 2023. P. 320-324.
9. Александров Ф.И. Выделение аддитивных компонент временного ряда при пакетной обработке методом «Гусеница»-SSA // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2006. № 2. С. 71-74.
10. Youngworth R.N., Gallagher B.B., Stamper B.L. An overview of power spectral density (PSD) calculations // *Optical manufacturing and testing VI*. 2005. Vol. 5869. P. 206-216.