



УДК 669.187

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

А. А. Троянский, Р. В. Синяков

Разработана схема получения в реальном масштабе времени информации о напряжении на дуге и о состоянии технологического процесса. На основе вейвлет-анализа разработан алгоритм цифровой обработки сигнала, с помощью которого можно производить его шумоподавление и сжатие. Разработан алгоритм идентификации технологических событий, позволяющий определять их на ранней стадии возникновения. Разработан комплекс программ, дающий возможность записывать сигнал о напряжении на дуге, фиксировать события, соответствующие определенным моментам съема сигнала, выполнять цифровую обработку (шумоподавление и сжатие) и формировать образ технологического события.

Scheme has been developed for obtaining the real-time information about arc voltage and condition of the technological process. Using the wavelet-analysis, the algorithm of digital processing of signal was developed, making its noise suppression and compression. Algorithm of identification of technological events was developed, allowing their determining at the earlier stage of occurrence. Complex of programs was developed, providing feasibility to record a signal about arc voltage, to record events corresponding to definite moments of signal removal, to make the digital processing (noise suppression and compression) and to form a technological event image.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь; дуга; напряжение; сигнал; вейвлет-анализ; образ; идентификация

В основе управления любым технологическим процессом лежит первичная информация, позволяющая контролировать этот процесс. Трудности в получении такой информации заключаются в отсутствии надежно работающих первичных датчиков или в огромных затратах на бесперебойную организацию их работы.

В связи с этим предложены различные методы контроля по косвенным параметрам технологического процесса [1–9]: использование информации о гармоническом составе тока или напряжения на дуге [1–5], о значениях эксплуатационного индуктивного сопротивления [7], об изменениях постоянной составляющей напряжения фазы [8, 9] и т. д.

Созданные на этой основе методы распознавания состояний технологического процесса плавки основаны на неизменности стадии процесса в течение определенного времени и четкой последовательности их возникновения [3].

Для эффективного управления современной дуговой сталеплавильной печью (ДСП) с форсированным технологическим процессом возникает необходимость распознавания не только глобальных стадий, определяющих структуру технологического

процесса, но и событий (вскипание ванны, сход шлака, ровный ход технологического процесса, дуга «открыта» и т. д.), существование которых определяется секундами, а сменяют друг друга они в произвольной последовательности. Поэтому актуальной становится задача разработки алгоритма представления событий на основе информации о сигнале напряжения на дуге в надежном и достаточном виде для дальнейшей идентификации.

Непосредственное получение сигнала о мгновенном напряжении на дуге ДСП достаточно проблематично из-за ряда технических причин, прежде всего высокого напряжения, которое колеблется в диапазоне 0... 1000 В. Поэтому в качестве источника сигнала использовали вольтметр, измеряющий мгновенное напряжение дуги, а аналогово-цифрового преобразователя — звуковую карту персонального компьютера с частотой дискретизации 22 кГц. Обработанный сигнал о напряжении на дуге записывали на жесткий диск и передавали для визуализации. Параллельно оператор (технолог) на основании визуальной и звуковой информации фиксировал состояние технологического процесса, также записываемое на жесткий диск.

Анализ получаемого сигнала показал наличие связи его формы с наступившими событиями в печи (рис. 1). С учетом этого последующая задача сво-



дилась к разработке получения формализованного алгоритма выделения образа соответствующего технологического события.

Традиционным математическим аппаратом, используемым при анализе сигнала о напряжении или токе на дуге, является преобразование Фурье. В работах [2–5] показано, что по так называемым информативным признакам (отношение амплитуд гармоник, среднего значения амплитуд гармоник, дисперсии тока и амплитуд гармоник) можно контролировать период проплавки колющих, определять окончание периода расплавления шихты окислительного периода. Выполненный авторами анализ полученного сигнала с использованием Фурье-анализа (рис. 2) подтверждает представленные выше выводы о возможности распознавания глобальных стадий (событий) технологического процесса. Вместе с тем отсутствует явная зависимость представленных выше признаков для событий, связанных, например, с поведением шлака. Эти события возникают в свободной последовательности и скоротечны. Более того, подобные события необходимо идентифицировать уже на этапе зарождения, т. е. оценивать динамику каждого события. При этом образ должен нести информацию о сигнале за интервал времени.

Установлено [10], что преобразование Фурье оказывается недостаточно эффективным при анализе сигналов быстропротекающих нестационарных процессов. Фурье-анализ дает возможность определить факт присутствия в сигнале любой частоты и интервал ее присутствия, однако не позволяет установить факт наличия определенной частоты в сигнале в конкретный момент времени [11], что зачастую является решающим при идентификации возникновения, развития и исчезновения определенного события технологического процесса. По этой причине при анализе нестационарных сигналов все большее распространение получает подход, в котором для различных диапазонов частот используют временные окна различной длительности. Оконные функции получают в результате растяжения-сжатия и смещения по времени базисных функций, названных вейвлетами [12].

С учетом изложенного в качестве основного инструмента для обработки данных предложен вейвлет-анализ.

Для каждого фиксируемого события выделяли предшествующий ему за одну секунду сигнал. Далее для более детального анализа и создания эффекта развития события исходный сигнал разбивали на равные периоды, длина которых кратна степени двойки или равна 2048 отсчетам. В результате получали для каждого образа 10 подобразов. Но и в таком виде использовать информацию о форме сиг-

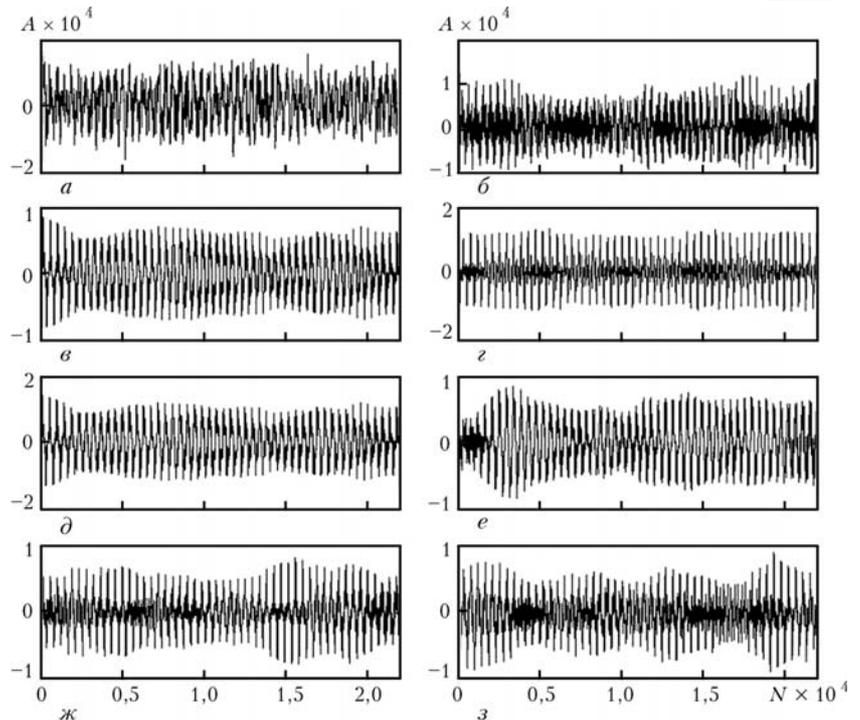


Рис. 1. Вид сигнала при разных состояниях технологического процесса (за одну секунду — 22050 отсчетов): а — проплавление колющих; б — окончание плавания шихты из первой корзины; в — равномерный ход процесса; г — окончание проплавания шихты из второй корзины; д — дуга «открыта»; е — медленный сход шлака; ж — шлак на уровне порога; з — сильный сход шлака; А — амплитуда сигнала; N — количество отсчетов сигнала

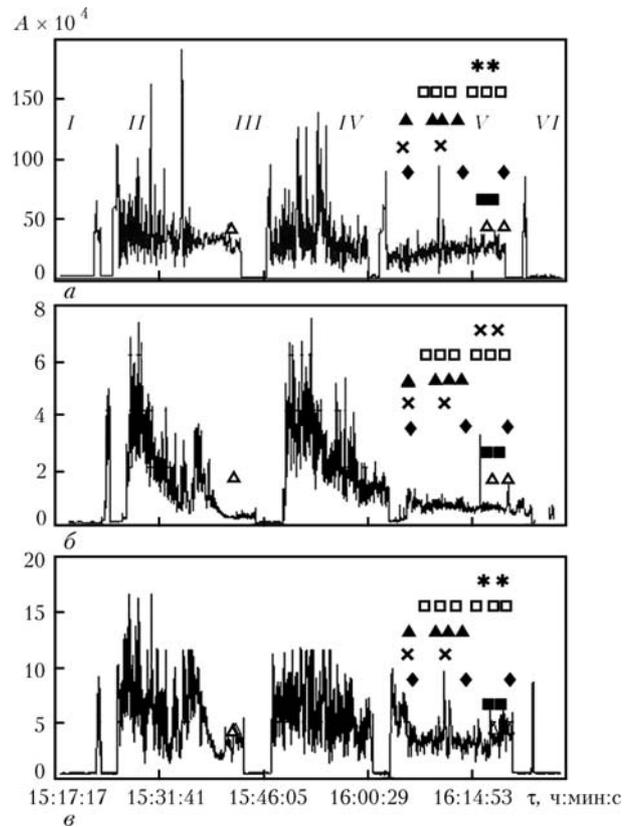


Рис. 2. Вид первых трех гармоник сигнала о напряжении на дуге в процессе плавки в ДСП: I — завалка; II — плавление; III — подвалка; IV — плавление шихты из второй корзины; V — окислительный период; VI — выпуск; Δ — печь работает ровно; ■ — трещит; ◆ — шлак пошел слабо; X — шлак пошел средне; ▲ — шлак пошел сильно; □ — шлак на уровне порога; + — шлак ниже порога



нала в качестве образа события затруднительно. Необходимо очистить сигнал от шумов и снизить его размерность.

Использовали типовой метод подавления шумов — удаление высокочастотных составляющих из спектра сигнала. Применительно к вейвлетным разложениям это может быть реализовано непосредственно удалением детализирующих коэффици-

ентов высокочастотных уровней. Среди существующих в настоящее время парадигм шумоподавления наибольшее распространение получила парадигма Донохо-Джонстона [13]. Она является довольно простой для реализации, экономичной в вычислительном отношении, поскольку подразумевает использование лишь быстрых алгоритмов вейвлет-преобразования и содержит три шага, которые в

случае последовательного применения к исходному сигналу создают эффект шумоподавления. Таким образом, анализируемый сигнал подвергают дискретному вейвлет-преобразованию до седьмого уровня (рис. 3).

В роли анализирующего выбрали вейвлет Добеши десятого порядка [12], характеризующийся свойствами, необходимыми для дискретного вейвлет-преобразования. Затем определили пороговое значение шумовой добавки как максимальную амплитуду кривой, отражающей коэффициенты детализации первого уровня разложения. После этого обратили в нуль коэффициенты детализации всех уровней, абсолютное значение которых меньше заданного порога, и выполнили обратное вейвлет-преобразование (рис. 4).

Схема сжатия сигнала аналогична приведенному процессу шумоподавления. Ключевым моментом является выполнение пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. При сжатии неизбежно появление систематических ошибок. Получающиеся погрешности пропорциональны значению отброшенных коэффициентов.

Существует несколько критериев выбора порога. Рекомендуется использовать «жесткую» пороговую фильтрацию. При этом коэффициенты, абсолютные значения которых не превышают порогового, обнуляются, а все остальные остаются без изменения. Такой метод фильтрации позволяет более точно восстановить резкие изменения сигнала (скачки, узкие пики и т. п.) и сохранить большее количество энергии при реконструкции сигнала. Например, можно использовать критерий баланса между количеством нулевых коэффициентов и остаточной энергией сигнала. Суть этого метода заключается в том, что коэффициенты детализации с абсолютным значением, близким к нулю, содержат лишь небольшую часть энергии сигнала. Обнуление этих коэффициентов приводит к незначительным потерям энергии. Оптимальным является такое значение порога, при котором процент обнуляемых коэффициентов детализации будет приблизительно равен проценту остаточной энергии сигнала после пороговой фильтрации.

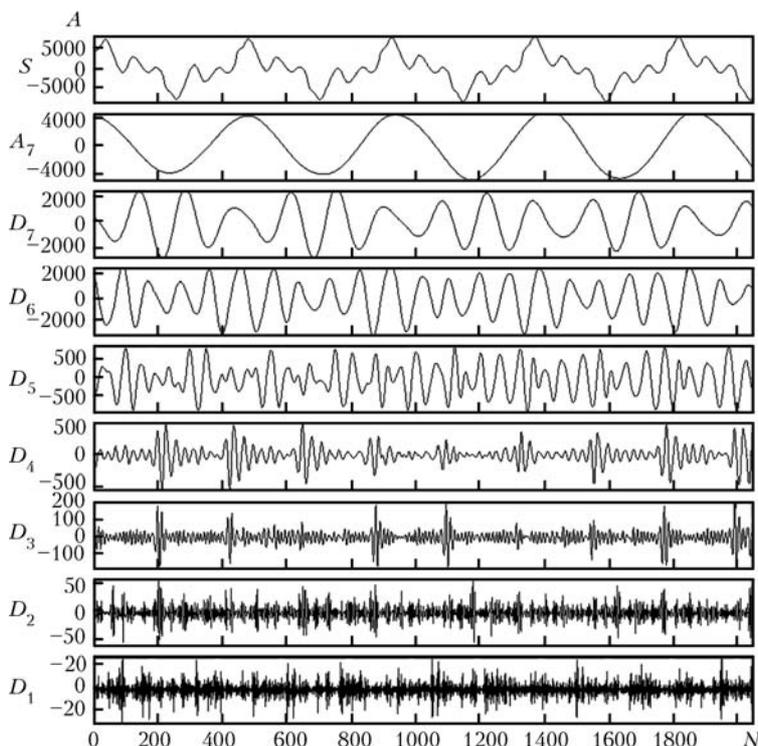


Рис. 3. Многоуровневое дискретное вейвлет-разложение сигнала: S — исходный сигнал; A_i , D_i — коэффициенты соответственно аппроксимации и детализации

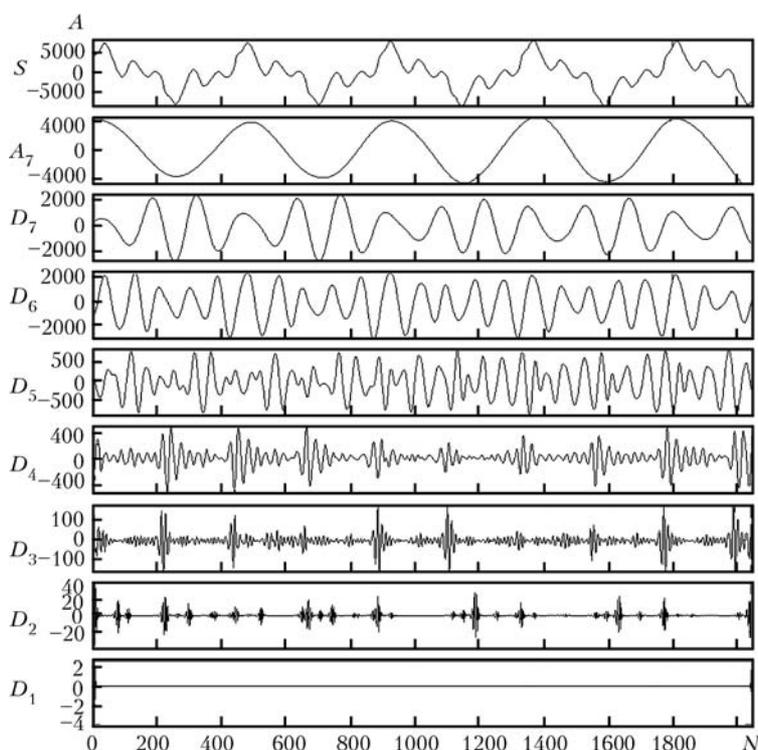


Рис. 4. Восстановленный сигнал

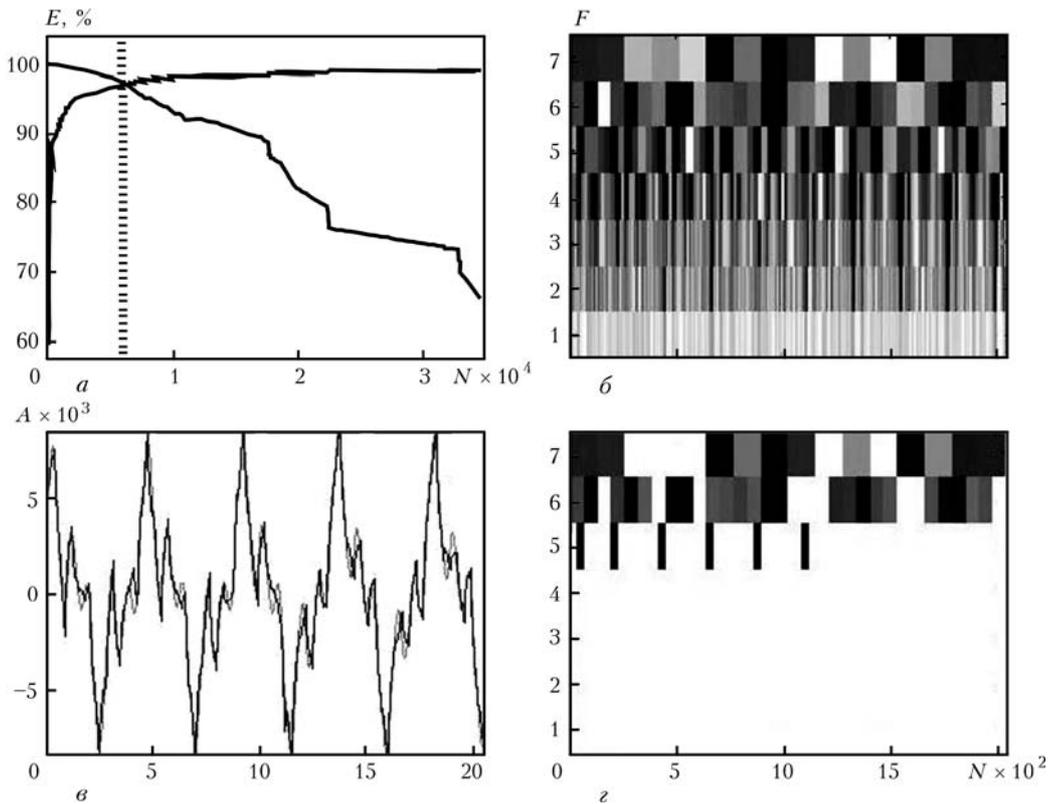


Рис. 5. Сжатие сигнала с использованием общей энергии: *a* — критерий сжатия — баланс E между количеством нулевых коэффициентов (серая линия) и остаточной энергией сигнала (темная линия); *б* — сравнение исходного сигнала и восстановленного; *в*, *г* — коэффициенты уровней детализации F соответственно до и после сжатия

С целью опробования данного метода выполнили дискретное вейвлет-разложение сигнала до седьмого уровня, для чего использовали базисную функцию вейвлет Добеши второго порядка [12]. Оптимальное сжатие достигнуто при 97 % общей энергии коэффициентов (рис. 5). При этом общее количество коэффициентов осталось достаточно большим для использования в качестве образа события.

По этой причине использовали метод селективного отбора значащих коэффициентов вейвлет-разложения. Основную информативную нагрузку несут коэффициенты детализации шестого и седьмого уровней (рис. 5, *г*). При визуальном оценивании степени восстановления сигнала (рис. 6) оставили 18 значений коэффициентов аппроксимации седьмого уровня и по десять коэффициентов шестого и седьмого уровней, имеющих абсолютное максимальное значение, что обеспечивает необходимое сжатие сигнала и достаточную информацию об исходном сигнале (рис. 6, *к*).

Далее полученные коэффициенты вейвлет-разложения ор-

ганизовали в вектор свойств (образ), имеющий 38 коэффициентов и представляющий собой массив коэффициентов, последовательно соединенных из

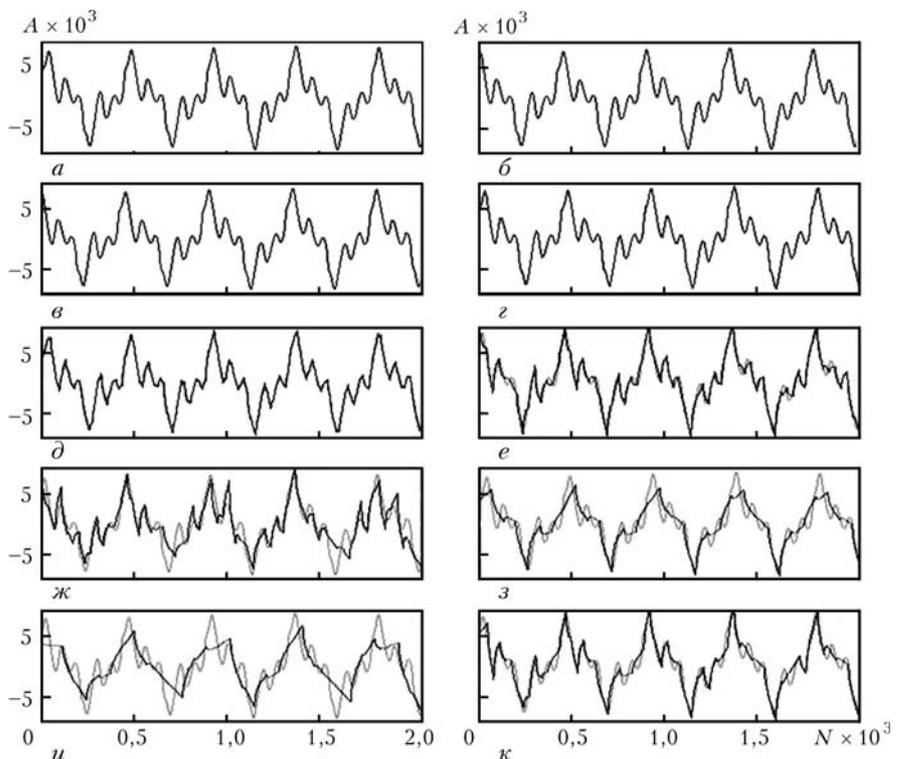


Рис. 6. Сравнение результатов восстановления сигнала при разной степени сжатия (серая линия исходный сигнал, темная — восстановленный): *a* — восстановление по 2048 коэффициентам; *б* — 1038; *в* — 524; *г* — 266; *д* — 136; *е* — 70; *ж* — 52; *з* — 36; *и* — 18; *к* — 38 (селективный выбор)



Рис. 7. Образ сигнала

коэффициентов аппроксимации седьмого уровня (18 значений), коэффициентов детализации седьмого уровня (10 значений) и коэффициентов детализации шестого уровня (10 значений). Для каждого события получили свой образ сигнала в виде набора коэффициентов (штрих-код на рис. 7).

Поскольку использовали сигнал длительностью в 1 с, а образ события равен 0,1 с, получили 10 образов, характеризующих конкретное событие. Это позволяет повысить степень вероятности распознавания событий.

По представленному алгоритму создания образов технологических событий записаны сигналы и обработаны данные по 20 плавкам в ДСП-1 Белорусского металлургического завода. Визуально и статистически оценены полученные данные по каждому событию для разных плавков. С вероятностью 67 % образы аналогичных событий разных плавков совпадали, а примерно 15 % образов находились в области доверительного интервала совпадения. Остальные 18 % образов имели отклонения от среднестатистических показателей для каждого события. Поэтому для дальнейшего развития представленного алгоритма идентификации событий технологического процесса необходимо использовать более мощные и гибкие методы классификации представленных образов (рис. 7), например нейронные сети.

Таким образом, разработанные методика и алгоритм формирования образов событий технологического процесса в ДСП на основе информации о форме сигнала напряжения дуги, обработанного с использованием вейвлет-анализа, позволили получать образы, характеризующие динамику развития событий.

1. *Зацепин Е. П., Ладанов А. С., Захаров К. Д.* Информационно-измерительный комплекс для дуговых сталеплавильных печей // *Сталь*. — 2004. — № 3. — С. 23–26.
2. *Хусид Ф. Б., Эдемский В. М., Подвальный Б. А.* Получение информации о ходе технологического процесса электроплавки стали косвенным методом // *Бюл. ин-та «Черметинформация»*. — 1974. — № 5. — С. 47–48.
3. *Метод определения технологических стадий процесса плавки и прогнозирования моментов их окончания в дуговой печи* / Б. Д. Денис, О. Ю. Лозинский, Л. Д. Костинюк, В. Я. Первознюк // *Электротехника*. — 1985. — № 2. — С. 8–10.
4. *Ситуаційне керування в дугових печах: Монографія* / Л. Д. Костинюк, А. О. Лозинський, О. Ю. Лозинський та інші. — Львів: Львівська політехніка, 2004. — 382 с.
5. *Волкодав С. Н., Евсеева Н. В., Токовой О. К.* Метод расчета энерготехнологического режима плавки в высокоомной дуговой печи // *Сталь*. — 2000. — № 2. — С. 24–27.
6. *Рис М., Зессельман Р.* Оптимизация управления электродуговой пещью с использованием нейронной сети // *Тр. третьего конгресса сталеплавателей*. — М.: ОАО «Черметинформация». — 1996. — С. 158–163.
7. *Повышение эффективности работы электропечи при использовании лома низкой насыпной плотности* / В. А. Рулев, Н. Т. Никокошев, В. Ф. Плуготоренко, В. Я. Мищенко // *Сталь*. — 1978. — № 3. — С. 26–28.
8. *Рыженков А. Н., Дрогин, В. И. Троянский А. А.* Эффективная система управления энергетическим режимом высокоомной дуговой печи // *Тр. четвертого конгресса сталеплавателей*. — М., 1997. — С. 178–182.
9. *Использование устройства непрерывного контроля окисленности шлака при выплавке электростали* / С. Б. Свиридов, С. Л. Черепанов, В. В. Рябов и др. // *Сталь*. — 1997. — № 10. — С. 32–33.
10. *Карпенко С. В.* Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новокузнецк, 2006. — 22 с.
11. *Астафьева Н. М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. — 1996. — 166, № 11. — С. 1145–1170.
12. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 464 с.
13. *Donoho D. L., Johnstone I. M.* Neo-classical minimax problems, thresholding, and adaptation // *Bernoulli*. — 1996. — № 1. — P. 39–62.

Донецкий нац. техн. ун-т

Поступила 05. 06. 2008