УДК 621.365.61

**УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСПЛАВОВ**

**Кондрашов В.П., Лыков А.Г**

*Российская Федерация, г. Москва, ООО «Элтертехникс»*

**Погребисский М.Я., Булгаков, А.С.**

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

*Рассматриваются пути улучшения показателей эффективности рудно-термических печей (РТП), используемых для выплавки ферросплавов. Предложена усовершенствованная система управления РТП, позволяющая повысить технико-экономические показатели плавки и обеспечивающая адаптацию технологического процесса к изменению качества шихтовых материалов.*

*Ключевые слова: рудно-термические электропечи, выплавка ферросплавов, эффективность, технико-экономические показатели, автоматическое управление, электрический режим, электрические характеристики, регрессионные модели.*

В докладе рассматриваются вопросы улучшения технико-экономических показателей рудно-термических электрических печей, используемых для получения ферросплавов. В основу доклада положены результаты теоретических исследований и практических работ, выполненных с целью улучшения технико-экономических показателей на одной из печей для получения ферросиликомарганца (мощностью 9 МВА) компании «Кузнецкие ферросплавы» (г. Новокузнецк).

Необходимость исследований в данной области связана с тем, что сложившиеся на практике режимы эксплуатации ферросплавных печей часто не являются оптимальными с точки зрения технико-экономических показателей, особенно при изменяющемся качестве шихтовых материалов (руды).

Имеются следующие резервы улучшения технико-экономических показателей рудно-термических печей:

* уменьшение электрических потерь в токоподводах и повышение электрического КПД;
* уменьшение тепловых потерь через футеровку и с отходящими газами и повышение теплового КПД;
* приведение в соответствие электрических режимов печей изменяющимся технологическим условиям и повышение выхода ведущего элемента.

Для определения возможностей улучшения технико-экономических показателей на действующей печи проведены экспериментальные исследования с измерениями величин, характеризующих электрические и тепловые процессы в печи.

Тепловые измерения на кожухе печи с использованием тепловизора выполнялись с целью оценки мощности потерь через боковую футеровку, а также распределения этих потерь по площади кожуха. Кроме того, измерены температура и скорости воздушного потока в каналах принудительного воздушного охлаждения подины. По данным тепловых измерений рассчитаны тепловые потери через футеровку печи.

По результатам электрических измерений построены электрические характеристики печи, представляющие собой зависимости полной и активной мощности, потребляемой печью, а также полезной мощности (мощности, выделяющейся в ванне), от тока для каждой ступени напряжения печного трансформатора.

Анализ электрических характеристик показывает, что максимумы активной *Р*а и полезной *Р*пол мощностей не совпадают (максимум полезной мощности наступает при меньшем значении тока), а так как ход про­цессов в ванне печи определяется полезной мощностью, то именно ее максимум надо поддерживать при регулировании электрического режима.

Из электрических характеристик рассматриваемой печи на рабочих ступенях напряжения следует, что возможность достижения максимума полезной мощностей ограничивается допустимым током трансформатора, поэтому реальные значения максимума полезной мощности составляют, в зависимости от ступени напряжения, 74-82% от расчетного максимума полезной мощности.

Можно сделать вывод, что имеющийся печной трансформатор не соответствует параметрам данной печи и ее токоподвода, не обеспечивает подвод необхо­димой мощности с нужным соотношением напряжения и тока и требует замены на более мощный трансформатор с расчетными параметрами.

Высокие технико-экономические показатели работы печи могут быть обеспе­чены только правильно подобранным энерготехнологическим режимом ее эксплу­атации. Выбор рационального электротехнологического режима работы рудно­термической электропечи, в отличие от электрического режима без связи с техно­логией, представляет собой многофакторную задачу, в которой выходные показа­тели (производительность печи, удельный расход электроэнергии, извлечение ве­дущего элемента и др.) зависят от большого количества влияющих факторов, к ко­торым относятся характеристика загружаемой в печь шихты (хими­ческий состав шихты, размер фракции, влажность по каждому из компонентов шихты), электрический режим, включая заглубление электродов в ванну печи. При этом даже опытный плавильщик не в состоянии постоянно вручную поддерживать оп­тимальный электротехнологический режим, особенно при частых изменениях усло­вий по ходу плавки.

Поддержание оптимального электротехнологического режима возможно только с использованием математической модели, устанавлива­ющей связь между входными и выходными параметрами электротехнологического процесса в РТП.

Построить такую модель аналитическими методами практически невоз­можно из-за многофакторности задачи математического описания процесса и ве­роятностного характера многих факторов. Поэтому связь между входными и вы­ходными параметрами может быть установлена наиболее достоверно путем сбора информации непосредственно на работающей печи и последующей ее математической обработки (регрессионный анализ) с использованием специальных программных средств.

Формирование массива исходных данных для построения регрессионной модели состоит из нескольких этапов:

* Получение первоначального массива параметров электрического режима печи с 5-минутным интервалом регистрации данных за период от начала до конца каждой плавки, объединение массива с данными по анализу и расходу сырья, суточными и оперативными картами электропечи. При этом источниками информации являются данные системы управления, данные регистрации электрических параметров в реальном времени специально установленным анализатором энергопотребления, а также документа­ция, которая постоянно ведется на печи цеховым персоналом (ручной ввод).
* Исключение из массива (отбраковка) данных, являющихся промахами.
* Усреднение электрических параметров по необходимым временным интервалам с целью проследить и установить закономерности их изменения по ходу плавки.
* Усреднение энерготехнологических параметров по временным интервалам длительностью в одну плавку с целью определения рациональных режимов ведения процесса.

Обработка экспериментальных данных основана на инженерных алгоритмах.

В результате обработки и анализа массива полученных данных определяются плавки с наиболее рациональными электрическими и технико-экономическими по­казателями. Отобранные плавки группируются в диапазоне изменения величины ctgφ от 4 до 5,5 (здесь φ – фазовый угол между напряжением и током). Значение ctgφ удобно для восприятия изменения энерготехнологи­ческих параметров ванны, поскольку оно прямо связано с глубиной посадки электродов, с харак­теристикой состава загружаемой шихты, с технико-экономическими показателями работы печи и др.

В пер­вом приближении каждую плавку можно разбить на три временных интервала. Первые 30 минут после выпуска расплава идет плавный набор мощности до максимального значения, при этом растет активное и падает реактивное сопротив­ление ванны. Второй период плавки длительностью 45-60 минут характерен стабилизацией режима. Следующие 30 минут плавка проходит в режиме плавного снижения токовой нагрузки и мощности перед выпуском расплава. Электрические характеристики по 30-минуткам (в динамике по ходу плавки) позволяют получить оптимальный расчетный режим ее ведения и сопоставить его с фактическим режимом данной плавки.

Выбор оптимального режима в случае «плавающего» характера качества шихты и технологии плавки требует непрерывной обработки поступающей с печи информации в реальном времени с обновлением массива данных.

Полученный на действующей установке массив данных представляется в виде матрицы, в строках которой содержатся значения входных параметров-факторов (обычно 8–12 наиболее технологически значимых) и выходных показателей (обычно 3–4). Этот массив с временным интервалом в одну плавку обрабатывается с помощью специально разработанной программы регрессионного анализа. Результатом обра­ботки является получение уравнения регрессии, связывающего значения каждого из выходных показателей *уj* с факторами *х*1, *х*2, ..., *хп*. Уравнение регрессии строится в виде квадратичного полинома

(1)

Примерами факторов *xi* могут служить содержание руды, восстановителя (угля), доломита и шлака в шихте, активная мощность, рабочее напряжение, ток электрода, примерами выходных показателей *yj* – производительность печи, т/ч, и удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т. При выборе рационального электротехнологического режима удобно использовать интегральный показатель эффективности процесса, учитывающий (с различными весовыми коэффициентами, получаемыми путем экспертной оценки) различные выходные технико-экономические показатели.

Обработка подготовленного массива экспериментальных данных, полученных на исследуемой печи, с использованием программы регрессионного анализа осуществля­ется в следующем порядке:

1. Определяются коэффициенты уравнения регрессии (1) для интегрального технико-экономического показателя.

2. Исключаются малозначимые входные параметры.

3. Отыскивается экстремум поверхности отклика, описываемой (1), то есть сочетание значений факторов, при котором достигается наилучшее значение технико-экономического показателя. Соответствующее значение тока (при известном составе шихты) используется в качестве задания регулятора тока печи, значение активной мощности – для выбора ступени напряжения (по электрическим характеристикам). Также на основании экстремума поверхности отклика можно осуществлять коррекцию состава шихты для достижения лучших технико-экономических показателей.

Программа обработки данных интегрируется в усовершенствованную систему управления печью, массив исходных данных формируется в автоматическом режиме. Рассчитанные значения тока, мощности, параметров шихты, соответствующие оптимальному электротехнологическому режиму, могут выдаваться программой в виде совета оператору. На последующих этапах внедрения и освоения усовершенствованной системы возможен переход к работе в супервизорном режиме с автоматическим изменением заданий тока и напряжения в соответствии с рассчитанным оптимальным режимом.

Список литературы

1. Данцис Я.Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. [Текст] / Данцис Я.Б. и др. // М: Металлургия, 1987. – 320 с.
2. Кондрашов В.П. **Определение рациональных режимов эксплуатации рудно-термических электропечей. [Текст] /** Колыванов С.Ю., Лыков А.Г., Погребисский М.Я., Сапрыкин А.И., Савалык Н.А. **// Сталь, № 2, 2010, с. 32-38.**
3. Kondrashov V. Development of ways of increase of ore-heating electric furnaces for production of ferroalloys efficiency. [Text] / V. Kondrashov, M.Ya. Pogrebisskiy, E. Salmanova // AMTEE’15 – Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering: Proceedings. – University of West Bohemia, Pilsen, 2015, p. I-5.

**Кондрашов Владимир Петрович**, канд.техн.наук, старший научный сотрудник, ООО «Элтертехникс», генеральный директор, 109052, Российская Федерация, г. Москва, Нижегородская ул., д. 70, корп. 2, [eltertechniks@yandex.ru](mailto:eltertechniks@yandex.ru), +7(916)0767851.

**Лыков Анатолий Георгиевич**, канд.техн.наук, старший научный сотрудник, ООО «Элтертехникс», ведущий инженер, 109052, Российская Федерация, г. Москва, Нижегородская ул., д. 70, корп. 2, [eltertechniks@yandex.ru](mailto:eltertechniks@yandex.ru), +7(916)0767851.

**Погребисский Михаил Яковлевич**, канд.техн.наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент, 111250, Российская Федерация, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, [PogrebisskiyMY@mpei.ru](mailto:PogrebisskiyMY@mpei.ru), +7(916)0146367.

**Булгаков Андрей Сергеевич**, Национальный исследовательский университет «МЭИ», студент магистратуры, 111250, Российская Федерация, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, [BulgakovAnS@mpei.ru](mailto:BulgakovAnS@mpei.ru), +7(985)9946046.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**IMPROVEMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF ELECTRIC FURNACES FOR SMELTING OF FERROALLOYS**

**Kondrashov V.P. , Lykov A.G.**

*Russian Federation, Moscow, Eltertechniks, Ltd.*

**Pogrebisskiy M.Ya. , Bulgakov A.S.**

*National Research University “MPEI”*

*Ways of increase of ore-heating electric furnaces, used for production of ferroalloys, efficiency are considered. The advanced system of automatic control of the ore-heating furnace providing improvement of technical and economic indicators of technological process and adaptability to quality of burden stocks is offered.*

Ore-heating electric furnace, efficiency, technical and economic indicators, automatic control, electric mode, electric characteristics, regression models.

Bibliography

1. Dantsis Ya.B. Korotkie seti i elektricheskie parametry dugovyh elektropechey. [Text] / Dantsis Ya.B. // Мoskva: Metallurgiya, 1987. – 320 s.
2. Kondrashov V.P. Rational operating conditions for ore-heating electrofurnaces. [Text] / V.P. Kondrashov, S.Yu. Kolyvanov, A.G. Lykov, M.Ya. Pogrebisskiy, A.I. Saprykin, N.A. Savalyk. // Steel in Translation, February 2010, Volume 40, Issue 2, pp 145-152.
3. Kondrashov V. Development of ways of increase of ore-heating electric furnaces for production of ferroalloys efficiency. [Text] / V. Kondrashov, M.Ya. Pogrebisskiy, E. Salmanova. // AMTEE’15 – Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering: Proceedings. – University of West Bohemia, Pilsen, 2015, p. I-5.

**Kondrashov Vladimir Petrovich**, Candidate of Technical Sciences, senior research associate, Eltertechniks, Ltd., CEO, 109052, Russian Federation, Moscow, Niznegorodskaya St., 70-2, [eltertechniks@yandex.ru](mailto:eltertechniks@yandex.ru), +79160767851.

**Lykov Anatoliy Georgievich**, Candidate of Technical Sciences, senior research associate, Eltertechniks, Ltd  management engineer, 109052, Russian Federation, Moscow, Niznegorodskaya St., 70-2, [eltertechniks@yandex.ru](mailto:eltertechniks@yandex.ru), +79160767851.

**Pogrebisskiy Mikhail Yakovlevich**, Candidate of Technical Sciences,  associate professor, National Research University “MPEI”, 111250, Russian Federation, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, [PogrebisskiyMY@mpei.ru](mailto:PogrebisskiyMY@mpei.ru), +79160146367.

**Bulgakov Andrey Sergeevich**, National Research University “MPEI”, student of magistracy, 111250, 111250, Russian Federation, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14,, [BulgakovAnS@mpei.ru](mailto:BulgakovAnS@mpei.ru), +7985946046.