

# УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СИЛИКОМАРГАНЦА

<sup>1</sup>В.П. Кондрашов, <sup>2</sup>М.Я. Погребиский, <sup>1</sup>А.Г. Лыков, <sup>3</sup>В.Л. Рабинович, <sup>2</sup>А.С. Булгаков

<sup>1</sup>ООО «Элтертехникс», Москва, Россия, [eltermtechniks@yandex.ru](mailto:eltermtechniks@yandex.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, [PogrebisskiyMY@mpei.ru](mailto:PogrebisskiyMY@mpei.ru)

<sup>3</sup>ООО «Научно-производственный центр «Энерготехнология», Москва, Россия, [npfenergo@yandex.ru](mailto:npfenergo@yandex.ru)

*Аннотация – Анализируются пути улучшения технико-экономических показателей рудно-термических печей (РТП), используемых в производстве силикомарганца. Рассматриваются вопросы сбора и обработки данных электрического, теплового и технологического режимов функционирования РТП для их использования в работе усовершенствованной системы управления печью, обеспечивающей повышение энергетической и экономической эффективности технологического процесса и его адаптацию к изменяющемуся качеству шихты.*

*Ключевые слова – рудно-термическая электропечь, технико-экономические показатели, эффективность, электрические и тепловые измерения, обработка данных, система управления, электротехнологический режим, электрические характеристики.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

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

Необходимость исследований в данной области связана с тем, что сложившиеся на практике режимы эксплуатации 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 токоподводе и повышение электрического КПД;
- уменьшение тепловых потерь через футеровку и с отходящими газами и повышение теплового КПД;
- приведение электрических режимов работы печей в соответствие изменяющимся технологическим условиям и повышение технологической эффективности.

Использованные подходы применимы не только к печам для выплавки силикомарганца, но и к рудно-термическим печам для получения других материалов.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПЕЧИ

Для определения возможностей улучшения технико-экономических показателей проводятся экспериментальные исследования на действующей печи, задачами которых являются:

- Измерение всех электрических параметров (по каждой фазе отдельно) на сторонах высокого и низкого напряжения, определение активных и реактивных сопротивлений токоподвода и ванны печи в различные периоды технологического процесса плавки, расчет электрических характеристик печи на основе полученных данных.
- Измерение температурного поля кожуха печи тепловизором, определение тепловых потерь с кожуха по результатам измерений.
- Измерение температуры и скорости воздушного потока в каждом из каналов охлаждения подины с целью оценки эффективности охлаждения.
- Измерение температуры токоведущих шин в разных точках от выводов трансформатора до гибкой части в рабочем режиме для оценки условий функционирования токоподвода.
- Измерение температуры отходящих газов и выпускаемого из печи расплава.
- Анализ спектра тока и напряжения для оценки качества электроэнергии.
- Получение массива электротехнологических параметров функционирования печи (за месячный срок), его математическая обработка и анализ для определения рационального режима плавки.

Перед проведением экспериментальных исследований на печи проводится теоретический расчет активных и реактивных сопротивлений всех участков печного контура с построением электрических характеристик печи для рабочих ступеней напряжения трансформатора по методике [1]. Такой расчет необходим для предварительного выбора параметров электрического режима печи (ток, напряжение) по  $\cos\varphi$  и электрическому КПД.

Электрический КПД определяется как

$$\eta_э = \frac{R_B}{R_B + R_{ТП}} \quad (1)$$

где  $R_B$  – активное сопротивление ванны печи;

$R_{ТП}$  – активное сопротивление токоподвода. Для рассматриваемой печи расчетное значение электрического КПД составляет 0,92.

По результатам измерений на печи получают зависимость индуктивного сопротивления печного контура  $X_k$ , мОм, от тока  $I$ , кА. Для рассматриваемой печи эта зависимость аппроксимирована степенной функцией

$$X_k = 2.263I^{-0.17} \quad (2)$$

С учетом этой зависимости в дальнейшем построены электрические характеристики печи.

Действующий электрический режим рассматриваемой печи характеризуется следующими параметрами: вторичное напряжение трансформатора 139,5 В, ток 33,0 кА, полная мощность печи 8 МВА в среднем, средний  $\cos\varphi$  0,885. Этот режим практически соответствует параметрам, выбранным по  $\cos\varphi$  и электрическому КПД, но достигается только за счет 12-процентной перегрузки используемого трансформатора (ток 33,0 кА при номинальном токе 29,4 кА).

Колебания напряжения на первичной стороне трансформатора (6 кВ) по результатам измерений на действующей печи невелики и находятся в пределах 2%, что соответствует предъявляемым требованиям.

При анализе спектра тока выявлено наличие значимых гармонических составляющих с номерами 2, 3, 5, 7, 23, 25, 35, 37, 47 и 49, при этом значения 23-й и 25-й гармонических составляющих (1,7% и 1,3% соответственно) превышают допустимые в соответствии с российскими государственными стандартами качества электроэнергии. Эти гармонические составляющие могут оказывать негативное влияние на конденсаторные установки, установленные в распределительных устройствах 6 кВ, и на кабельные линии 6 кВ, снижая надежность их работы.

Тепловые измерения на кожухе электропечи выполнялись с целью оценки мощности потерь через боковую футеровку, а также распределения этих потерь по площади кожуха. Исследования проведены с использованием тепловизора *Testo 880*. Были измерены температуры по секторам, на которые поверхность кожуха разделяется вертикальными ребрами и горизонтальными поясами жесткости.

Кроме того, измерены температура и скорости воздушного потока в каналах принудительного воздушного охлаждения подины. По данным этих измерений и тепловизионных измерений на кожухе рассчитаны тепловые потери через футеровку печи (для рассматриваемой печи они составили 384 кВт: 166 кВт через боковую поверхность и 218 кВт через подину).

### III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО СТУПЕНЯМ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Под электрическими характеристиками понимают зависимости полной и активной мощности, потребляемой печью, а также полезной мощности (мощности, выделяющейся в ванне), от тока для каждой ступени напряжения печного трансформатора. Примеры электрических характеристик представлены на рис. 1, 2.

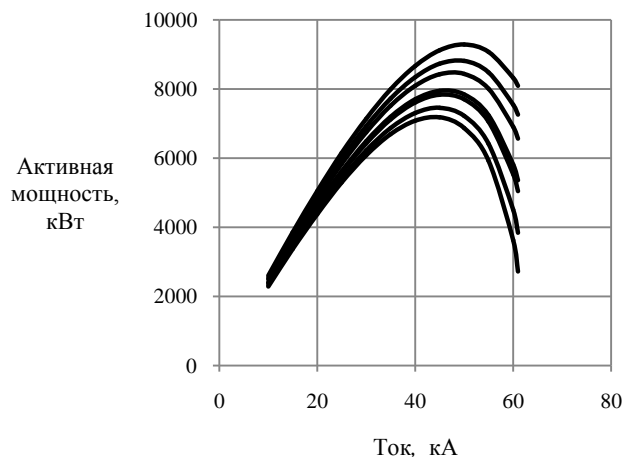


Рис. 1. Электрические характеристики рудно-термической печи (активная мощность).

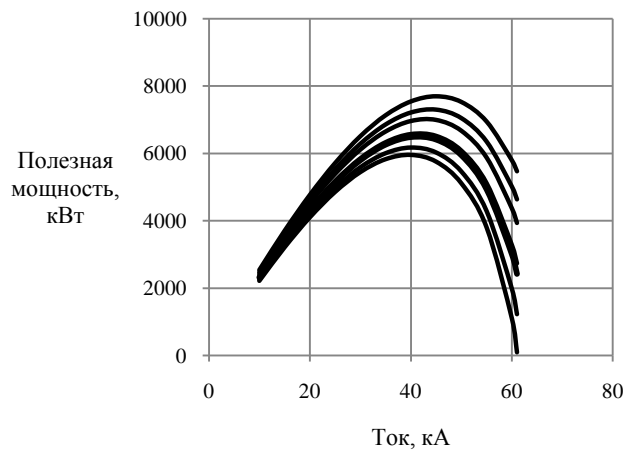


Рис. 2. Электрические характеристики рудно-термической печи (полезная мощность).

Электрические характеристики строятся с учетом измеренного значения активного сопротивления токоподвода и зависимости индуктивного сопротивления печного контура от тока (2).

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

Из электрических характеристик рассматриваемой печи на 11-й, 13-й, 15-й и 17-й ступенях напряжения следует, что максимум полезной мощности на этих ступенях достигается при значениях тока 52, 49, 46,5 и 43,5 кА (полезная мощность соответственно 8330, 7550, 6930 и 6310 кВт), однако возможность достижения таких мощностей ограничивается допустимым током трансформатора 28 кА, поэтому реальные значения максимума полезной мощности на этих ступенях напряжения составляют 6200, 5840, 5540 и 5220 кВт.

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.

#### IV. МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ

Высокие технико-экономические показатели работы печи могут быть обеспечены только правильно подобранным энерготехнологическим режимом ее эксплуатации. Выбор рационального электротехнологического режима работы рудно-термической 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, размер фракции, влажность по каждому из компонентов), электрический режим, включая заглубливание 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.

Усовершенствованная система управления РТП, использующая такую математическую модель, может работать как в режиме советчика оператора, так и в супервизорном режиме.

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

- Получение исходного массива параметров электрического режима печи с 5-минутным интервалом регистрации данных за период от начала до конца каждой плавки, объединение этого массива с данными по анализу и расходу сырья (вводимыми в ручном режиме), суточными и оперативными картами электропечи. При этом источниками информации являются данные системы управления, данные регистрации электрических параметров в реальном времени программируемым анализатором энергопотребления серии AR-5, а также документация, которая постоянно ведется на печи цеховым персоналом.

- 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  $\text{ctg}\varphi$  от 4 до 5,5, где  $\varphi$  – фазовый угол между напряжением и током. Значение  $\text{ctg}\varphi$  прямо связано с величиной заглубливания электродов в ванну, с составом загружаемой шихты, с технико-экономическими показателями работы печи, и т.д.

Примеры исходных и сглаженных (путем фильтрации и усреднения) зависимостей электрических параметров (активной мощности и тока) от времени в течение плавки представлены на рис. 3, 4.

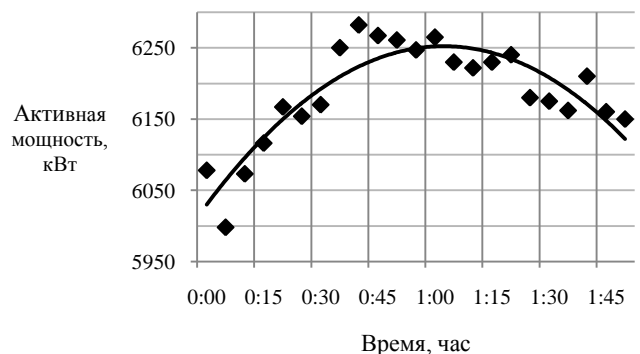


Рис. 3. Изменение активной мощности, потребляемой печью, в ходе плавки.

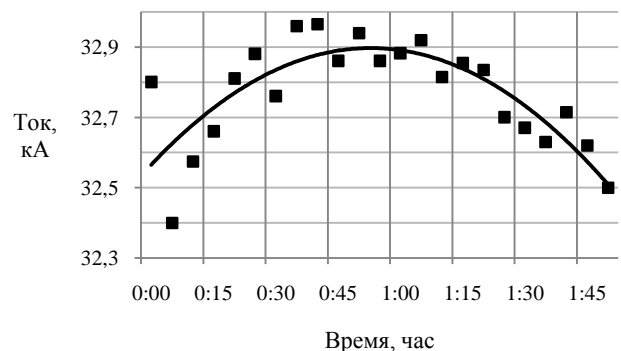


Рис. 4. Изменение тока (среднего по фазам значения) в ходе плавки.

В первом приближении каждую плавку можно разбить на три временных интервала. Первые 30–40 минут после выпуска расплава происходит 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 постепенного 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 печной 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 периодичностью в одну плавку обрабатывается с помощью специально разработанной программы регрессионного анализа. Результатом обработки является получение уравнения регрессии, связывающего значения каждого из выходных показателей  $y$  с факторами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Уравнение регрессии строится в виде квадратичного полинома

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{1,2}x_1x_2 + \dots + b_{n-1,n}x_{n-1}x_n + b_{1,1}x_1^2 + b_{2,2}x_2^2 + \dots + b_{n,n}x_n^2 \quad (3)$$

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

$$ИЕ = k_1y_1 + k_2y_2 + \dots + k_my_m \quad (4)$$

Использование программы регрессионного анализа требует установки на печи регистрирующих измерительных приборов (для регистрации электрических и энергетических параметров) и записи входных технологических и выходных производственных показателей по согласованной заранее форме (ручной ввод) для дальнейшей автоматической обработки массива данных.

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

1. Определяются коэффициенты уравнения регрессии (3) для интегрального технико-экономического показателя.

2. Исключаются малозначимые факторы.

3. Отыскивается экстремум поверхности отклика, описываемой уравнением (3), 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 управления 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. / Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов, Н.Н. Митрофанов, В.Л. Розенберг, И.М. Черенкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Справ. изд. – М.: Металлургия, 2007. – 320 с.
- [2] Kondrashov V.P. Rational operating conditions for ore-heating electrofurnaces / 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. [Сталь, № 2, 2010, с. 32-38].
- [3] Kondrashov, V.P. Development of ways of increase of ore-heating electric furnaces for production of ferroalloys efficiency / V.P. Kondrashov, M.Ya. Pogrebisskiy, E.F. Salmanova // *AMTEE'15 – Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering: Proceedings*. – University of West Bohemia, Pilsen, 2015, p. I-5.