

ВЕСТНИК МЭИ



В НОМЕРЕ:

О возможности применения гидроксида лития на различных этапах жизненного цикла парогенераторов АЭС с ВВЭР

Моделирование процессов в теплообменниках с конденсацией водяного пара в горизонтальных трубах

Методы поиска решения на основе прецедентов в распределенных системах поддержки принятия решений

2

0

1

1

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЭИ

2

Анализ гармонического состава формы кривой фазного тока для оценки теплового режима в рудно-термической печи с закрытой дугой

В. П. Рубцов*, В. А. Елизаров

Проанализирована возможность контроля распределения мощности и теплового режима рудно-термической печи (РТП) с закрытой дугой по гармоническому составу кривой фазного тока. Приведена структурная схема модели фазы РТП и ее реализация в среде Simulink. Проверена адекватность разработанной модели при чисто дуговом режиме работы печи. На основании исследований доказана возможность оценки составляющих полной мощности, выделяемых в дуге и шихте, по гармоническому составу фазного тока печи.

Ключевые слова: рудно-термическая печь с закрытой дугой, гармонический состав тока, оценка теплового режима, распределение мощностей в тигле, модель электрического режима.

Введение

Рудно-термические и рудовосстановительные (РВП) печи широко применяются для получения металлов или сплавов путем восстановления их оксидов из руд (например, для получения ферросилиция, ферромарганца, ферровольфрама, ферромолибдена и др.) [1]. Рудно-термические печи используют для получения фосфора, карбида кальция, а также для расплавления базальта, диабазы и других минералов. Печи этого типа, как правило, работают на переменном токе и являются крупными потребителями электроэнергии. Установленная мощность трансформаторов для питания РТП достигает $250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и более. Их питание осуществляется от трехфазной сети, как правило, от самостоятельных подстанций с первичным напряжением 110 или 220 кВ. Обычно РТП имеют три электрода, расположенных по треугольнику (круглые печи) или вытянутых в линию (прямо-

угольные печи). Печи работают непрерывно, капитальный ремонт с заменой футеровки осуществляют 1 раз в полтора-два года, что предъявляет высокие требования к надежности конструкции печи и к ее электрооборудованию. Обеспечение энергетической эффективности работы РТП является важной задачей, которая решается путем совершенствования как их конструкций и электрооборудования, так и систем автоматического управления процессом плавки.

Основной особенностью РТП с закрытой дугой, затрудняющей выбор режима работы печи и осложняющей процесс управления режимом плавки, является горение дуги под слоем шихты (так называемого колошника). Это приводит к образованию дополнительного контура протекания тока через шихту, шунтирующего дугу. В результате энергия, обеспечивающая нагрев шихты и расплава, поступает от двух источников: электрической дуги, горящей между электродом и расплавом, и тока, протекающего по шихте, которая является активным сопротивлением.

* RubtsovVP@mpei.ru.

Эффективность работы РТП достигается при определенном соотношении мощностей, выделяемых в дуге и шихте, обеспечивающих равномерный нагрев без перегрева и охлаждения отдельных участков печи [2]. Однако объективные методы контроля распределения мощностей и температур в ванне РТП в настоящее время отсутствуют, что обусловлено невозможностью измерения токов, протекающих в ней. Таким образом, выбор режима работы печи в значительной степени определяется интуицией плавильщика или опытом эксплуатации подобных агрегатов.

В данной статье анализируется возможность контроля распределения мощности и теплового режима РТП с закрытой дугой по гармоническому составу формы кривой фазного тока, искажения которого обусловлены нелинейностью вольт-амперной характеристики дуги.

Разработка модели РТП с закрытой дугой

Пути растекания токов в ванне РТП с закрытой дугой иллюстрирует схема, приведенная на рис. 1 [3]. Трехфазное напряжение (фазы *A*, *B* и *C*) от вторичной обмотки трансформатора (на схеме не показан) подается на три электрода. Для питания РТП используется схема с изолированной нейтралью, что обуславливает замыкание фазных токов I_A , I_B , I_C через расплав, находящийся в нижней части ванны печи. Пути растекания токов в ванне печи обозначены на рис. 1 стрелками. Согласно схеме рис. 1 можно выделить следующие составляющие токов, протекающих в ванне печи: I — общий ток фазы; I_d — ток дуги; $I_{ш}$ — ток шихты, протекающий по тиглю, в котором горит дуга; $I_{м.э}$ — ток, протекающий по шихте между электродами. Измерению поддаются только полные фазные токи I . Составляющие токов I_d и $I_{ш}$ могут быть определены только расчетным путем.

Для электрического расчета токов в РТП используют схему замещения [2], приведенную на рис. 2,

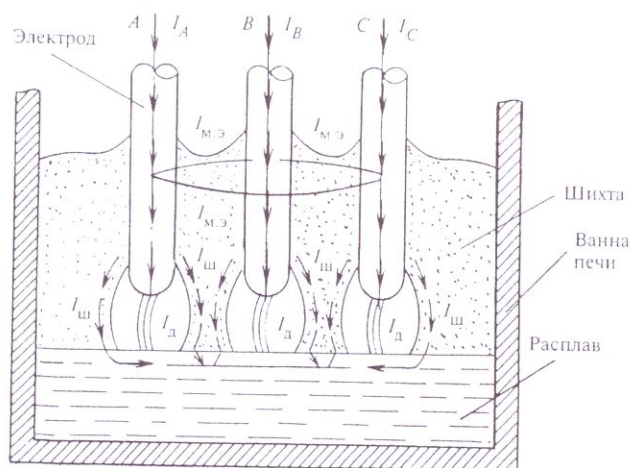


Рис. 1. Разрез РТП с закрытыми дугами

в которой учитывают: напряжение дуги (U_{da} , U_{db} , U_{dc}); активное сопротивление короткой сети R_k , включающее в себя активное сопротивление трансформатора, электрода и ванны печи; индуктивное сопротивление короткой сети X_k , включающее в себя индуктивное сопротивление трансформатора и токоподвода, а также взаимное индуктивное сопротивление между фазами токоподвода M_{ba} , M_{ca} , M_{bc} ; активное сопротивление материалов в ванне печи между электродами $R_{м.э}$ и активное сопротивление шихты $R_{ш}$, образующей тигель вокруг дуги.

Использование схемы рис. 2 для определения токов приводит к громоздким уравнениям, усложняет задачу и вряд ли целесообразно на этапе поиска взаимосвязей гармонического состава формы кривой тока с распределением мощностей в ванне печи, поэтому трехфазная схема замещения рис. 2 была упрощена и сведена к однофазной схеме (рис. 3). Допустимость такого упрощения схемы замещения рис. 2 подтверждается опытом эксплуатации [3], который показывает, что токи $I_{м.э}$, протекающие между электродами, малы и ими можно пренебречь. В схеме замещения рис. 3 введены следующие обозначения элементов: L_k — индуктивность короткой сети, включающая в себя индуктивность обмотки трансформатора и токоподвода; R_k — активное сопротивление короткой сети,

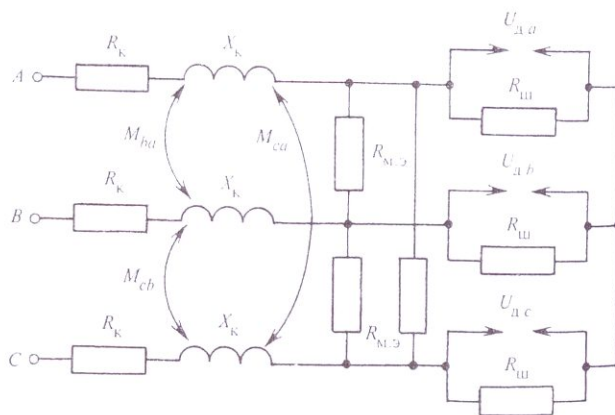


Рис. 2. Схема замещения РТП

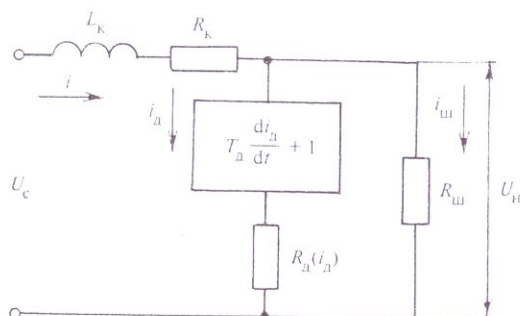


Рис. 3. Схема замещения РТП для одной фазы

включающее в себя активное сопротивление обмотки трансформатора, токоподвода и электрода; $R_{ш}$ — сопротивление материала шихты (тигля), шунтирующего дугу. Можно предположить, что на значения высших гармонических составляющих тока может оказать влияние постоянная времени дуги T_d , значение которой для дуги, шунтированной шихтой, составляет $1,1 \cdot 10^{-4}$ с (значение получено при анализе экспериментальных данных [4]). Динамическая характеристика дуги учитывается в схеме замещения рис. 3 путем введения инерционного звена первого порядка $T_d \frac{di_d}{dt} + 1$.

На основании законов Кирхгофа для схемы рис. 3 может быть записана следующая система уравнений электрического равновесия для мгновенных значений:

$$\begin{cases} u_c - u_n = L_k \frac{di}{dt} + R_k i; \\ u_n = i_d R_d (i_d) \left(T_d \frac{di_d}{dt} + 1 \right); \\ u_n = R_{ш} i_{ш}; \\ i = i_d + i_{ш}. \end{cases} \quad (1)$$

Представим уравнения системы (1) в операторной форме и упростим:

$$\begin{cases} U_c(p) - U_n(p) = I(p)(T_k p + 1); \\ U_n(p) = I_d(p) R_d [I_d(p)] (T_d p + 1); \\ I_d(p) = I(p) - \frac{U_n(p)}{R_{ш}}. \end{cases} \quad (2)$$

где $T_k = L_k / R_k$ — постоянная времени короткой сети; $R_d [I_d(p)]$ — нелинейное сопротивление, определяемое вольт-амперной характеристикой дуги.

По уравнениям системы (2) была построена структурная схема, приведенная на рис. 4. С целью упростить систему (2) и сократить число варьируемых параметров вольт-амперная характеристика дуги в структурной схеме рис. 4 была представлена в виде знаковой функции $u_d = U_d \text{sign}(i_d)$ [5], т.е. было при-

нято, что напряжение на дуге u_d не зависит от тока. Это допущение не должно внести больших погрешностей в результаты исследований, поскольку реальная вольт-амперная характеристика закрытой дуги в РТП мало зависит от тока. Зависимость напряжения на дуге от длины дуги $u_d(I_d)$ учитывается при экспериментах путем сдвига вольт-амперной характеристики вдоль оси ординат. Схема рис. 4 использовалась в дальнейших исследованиях.

Система уравнений (2) и ее графическое представление в форме структурной схемы рис. 4 являются нелинейными и не поддаются аналитическому решению, поэтому исследование этой системы проводилось на основе численных методов решения дифференциальных уравнений. При исследовании использовался метод структурного моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink. Выбор этого метода численного решения дифференциальных уравнений, разработанного для анализа и синтеза систем автоматического управления, обусловлен представлением результатов решения в удобной для анализа графической форме во временной плоскости, а также наличием в его библиотеке блоков выделения действующих значений периодических функций (напряжений, токов, мощностей). Схема модели, составленная в пакете Matlab Simulink по структурной схеме рис. 4, приведена на рис. 5.

В модели рис. 5 источник питания представлен блоком формирования синусоидального периодического сигнала Sine Wave, короткая сеть печи — инерционным звеном первого порядка Transfer Fcn, электрическая дуга — последовательно включенными инерционным звеном Transfer Fcn 1 и нелинейным элементом Lookup Table, определяющим знаковую функцию, а сопротивление шихты — блоком Transfer Fcn 2. В модель рис. 5 введены: блок выделения гармонических составляющих кривой тока печи Fourier2, выход которого подключен к виртуальному осциллографу Scope (фиксирующему осциллограммы первой и высших гармонических составляющих кривой тока); блоки выделения действующего значения мощности в дуге RMS 1 и мощности в шихте RMS 2, а также блоки выделения действующих значений токов, протекающих в дуге RMS 3 и в шихте RMS 4. Кроме осциллограмм анализируемых переменных, модель обеспечивает выделение их действующего значения на виртуальных дисплеях Display 1—5.

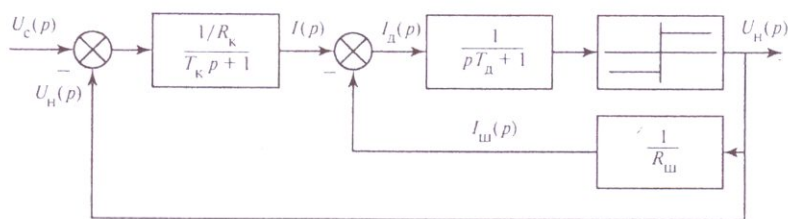


Рис. 4. Структурная схема фазы печи

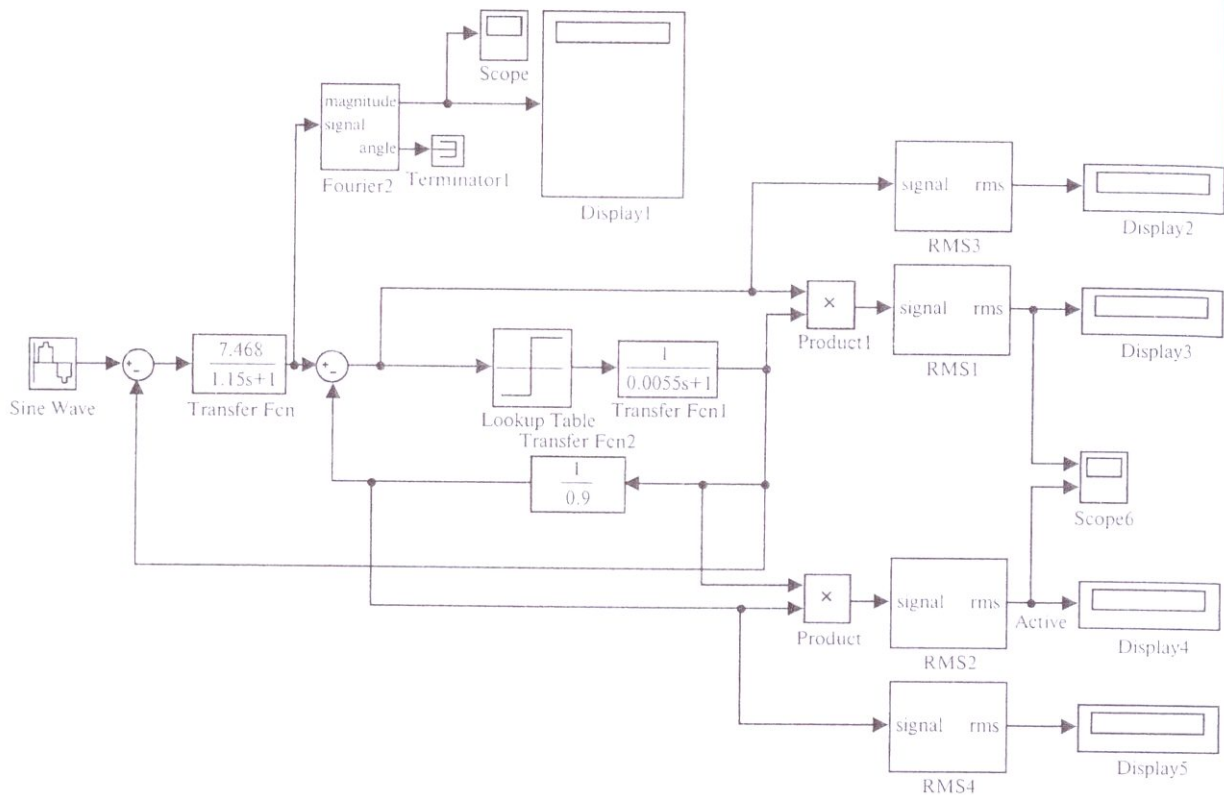


Рис. 5. Схема модели фазы печи в пакете Matlab Simulink

Определение мощности осуществляется путем умножения напряжения и тока с помощью блоков Product и Product1. Обозначения блоков в модели рис. 5 сохранены в транскрипции, принятой в пакете Simulink. Модель рис. 5 позволяет рассчитывать и выводить на виртуальные осциллографы и дисплеи временные зависимости амплитудных или действующих значений основной (50 Гц) и высших гармонических составляющих тока и мощностей.

На рис. 6 для иллюстрации способа представления результатов расчета приведены временные зависимости амплитудных значений токов первой и высших гармонических составляющих формы кривой тока I печи при относительных сопротивлении шихты 0,5 и напряжении на дуге 0,5. По оси абсцисс рис. 6 отложено относительное время. Кривые на рис. 6, с одной стороны, показывают соотношения амплитуд основной и высших гармонических составляющих тока, а с другой — возможности метода выделения и представления значений гармонических составляющих тока как амплитудных, так и действующих в удобной для анализа форме. Как следует из анализа приведенных зависимостей, искажения кривой тока уменьшаются, когда мощность, выделяемая в дуге, снижается в сравнении с мощностью, выделяемой в шихте. Этот вывод можно считать закономерным, так как мощность, выделяемая в шихте, зависит от тока в квадрате, а мощность, выделяемая в дуге, определяется

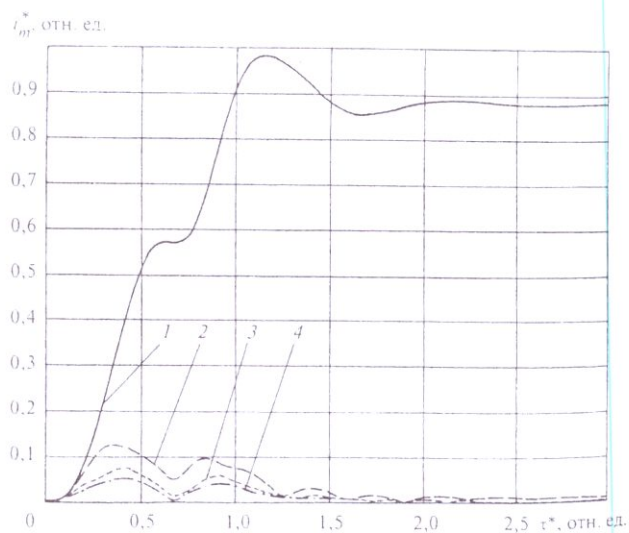


Рис. 6. Временные зависимости амплитудных значений гармонических составляющих фазного тока:

1 — первой гармоники; 2 — третьей гармоники; 3 — пятой гармоники; 4 — седьмой гармоники

током в первой степени. Как показали дальнейшие исследования, при изменении соотношения между мощностями, выделяемыми в дуге и шихте, изменяется и гармонический состав формы кривой общего тока печи.

Система относительных величин

На первом этапе исследования было принято решение из всего многообразия РТП выделить установки для получения ферросилиция, поскольку печи данного типа в настоящее время наиболее распространены в промышленности (около 60 % всех применяемых РТП). Как показал анализ [6], параметры короткой сети изменяются в ограниченных пределах, что позволяет распространить результаты исследований на весь класс печей. В качестве объекта исследования в данной статье была принята ферросплавная печь типа РКО-16,5, параметры которой приведены в таблице. Сопротивление ванны печи $R_{в}$, включающее в себя сопротивления твердой шихты стенок тигля и плазмы электрической дуги, примем равным 1,038 МОм [7].

Моделирование системы проводилось в относительных величинах для получения универсальных зависимостей, инвариантных типу печи. При этом за базовые принимались следующие величины:

базовое время $t_{б}$ — время, равное периоду частоты питающего напряжения, $t_{б} = 0,02$ с;

базовое напряжение $U_{б}$ — рабочее напряжение печи, $U_{б} = 175,0$ В;

базовый ток $I_{б}$ — рабочий ток в электроде печи, $I_{б} = 63$ кА;

базовое сопротивление $R_{б}$ — сопротивление ванны печи, $R_{б} = 1,038$ МОм.

Параметры ферросплавной печи РКО-16,5

Параметр	Значение параметра
Реактивное сопротивление, МОм:	
трансформатора	0,121
короткой сети	0,453
электродов и ванны	0,416
печной установки на фазу X_k	0,990
Активное сопротивление, МОм:	
трансформатора	0,027
короткой сети	0,043
переходных контактов, контактной плиты-электрода	0,027
электрода	0,042
печной установки на фазу R_k	0,139
Электрические параметры:	
установленная мощность трансформатора, МВ · А	16,5
рабочий ток в электроде $I_{раб}$, кА	63,0
рабочее напряжение $U_{раб}$, В	175,0
частота питающего напряжения f , Гц	50,0

Тогда относительные величины могут быть определены так:

$$\text{относительное время } \tau^* = t/t_{б};$$

относительная постоянная времени короткой сети и трансформатора $T_k^* = T_k/t_{б};$

$$\text{относительная постоянная времени дуги } T_d^* = T_d/t_{б};$$

$$\text{относительная круговая частота } \omega^* = 2\pi f t_{б};$$

$$\text{относительное напряжение } u^* = u/U_{б};$$

$$\text{относительный ток } i^* = i/I_{б};$$

относительное активное сопротивление короткой сети и трансформатора $r_k^* = R/R_{б};$

$$\text{относительное сопротивление дуги } r_d^* = R_d/r_{б};$$

$$\text{относительное сопротивление шихты } r_{ш}^* = R_{ш}/R_{б}.$$

Проведение эксперимента и анализ полученных результатов

Особенностью системы управления РТП является работа в режиме поддержания фазных токов путем регулирования длины дуги и напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В процессе исследования для выполнения этого условия при варьировании напряжения на дуге (длины дуги) и сопротивления шихты сохранялось практически неизменным значение полного фазного тока I .

При проведении эксперимента на модели выделялись первая, третья, пятая, седьмая, девятая и одиннадцатая гармонические составляющие фазного тока, поскольку значения четных гармонических составляющих исследуемого тока незначительны и близки к нулю.

В процессе моделирования исследовалось влияние сопротивления дуги r_d^* (длины дуги) и сопротивления шихты $r_{ш}^*$ (тигля) на гармонический состав формы кривой суммарного фазного тока печи i^* , на значения токов, протекающих по дуге i_d^* и шихте $i_{ш}^*$. Одновременно рассчитывались: полная мощность печи p^* , определяемая как $p^* = p_d^* + p_{ш}^*$, мощность, выделяемая в дуге, $p_d^* = i_d^* u_d^*$; мощность, выделяемая в шихте, $p_{ш}^* = i_{ш}^{*2} r_{ш}^*$. На рис. 7 приведены рассчитанные на модели зависимости амплитуды третьей гармоники полного тока i^* (рис. 7, а), полной мощности p^* , мощности в шихте $p_{ш}^*$ и мощности в дуге p_d^* (рис. 7, б) от отношения токов $i_{ш}^*/i_d^*$ при относительном сопротивлении шихты $r_{ш}^* = 0,5$ и

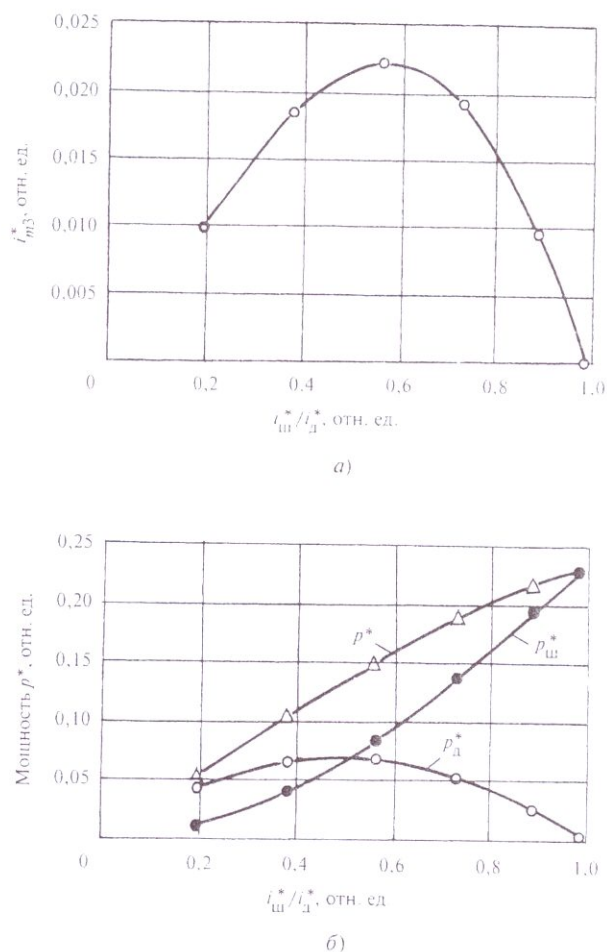


Рис. 7. Зависимости амплитуды третьей гармоники (а), полной мощности, мощности в дуге и мощности в шихте (б) от отношения токов

изменении относительного напряжения на дуге $u_{д}^*$ от 0,2 до 0,9.

Для доказательства адекватности разработанной модели измеренные значения сравнивались с экспериментальными данными, полученными на действующих печах ДСП-100НЗА [4], ДСП-10 и ДСП-25 [8]. В частности, для оценки адекватности разработанной модели физическим процессам, протекающим в печи, рассчитывались значения мощностей \tilde{p}^* и $\tilde{p}_{д}^*$ для открытой дуги, что соответствует $r_{ш}^* = \infty$. Совпадение результатов расчета на модели с литературными данными свидетельствует об адекватности разработанной модели упомянутым процессам. Наличие незначительных расхождений в значениях обусловлено погрешностями вычислительного эксперимента, а также принятыми в процессе моделирования допущениями.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что изменение сопротивления шихты оказывает малое влияние на гармонический состав формы кри-

вой тока. Это обстоятельство объясняется тем, что искажение тока вызвано в основном нелинейностью сопротивления дуги, а не сопротивлением шихты (которое в рассматриваемом случае было принято чисто активным).

В то же время соотношение токов, протекающих по шихте $i_{ш}^*$ и дуге $i_{д}^*$, оказывает значительное влияние на изменение высших гармонических составляющих тока, в частности третьей гармонической составляющей, зависимость которой от соотношения токов приведена на рис. 7, а. Как следует из сопоставления зависимостей, приведенных на рис. 7, амплитуда третьей гармоники тока i_{m3}^* изменяется от 0,01 до 0,022, т.е. практически в 2 раза при изменении тока дуги в диапазоне $0,1 \leq i_{д}^* \leq 0,4$. При этом изменяются полная мощность p^* , выделяемая в печи, и соотношения составляющих полной мощности $p_{д}^*$ и $p_{ш}^*$. Проведенный анализ показывает, что между гармоническим составом формы кривой фазного тока РТП с закрытой дугой и распределением мощностей в ванне печи имеется явно выраженная зависимость, которая может быть использована для идентификации теплового режима в печи.

Определение желаемого соотношения мощностей, выделяемых в дуге и в шихте РТП, и, следовательно, амплитудного значения измеряемой высшей гармоники, которое можно поддерживать в процессе плавки, выходит за рамки данной статьи, поскольку требует решения более сложной тепловой задачи. Тем не менее проведенные исследования показывают, что анализ гармонического состава кривой фазного тока РТП с закрытой дугой позволяет оценивать распределение мощностей в зоне плавления.

Выводы

1. Показана возможность идентификации составляющих мощностей, выделяемых в дуге и шихте в РТП путем контроля гармонического состава формы кривой фазного тока.

2. Разработанная модель позволяет рассчитать зависимости высших гармонических составляющих тока, мощностей, выделяемых в шихте и дуге, а также полные мощности, выделяемые в печи, от времени, полного тока или отношения токов, протекающих в дуге и шихте. Эти зависимости могут быть использованы как для анализа распределения мощностей в печи, так и для изменения режима работы печи.

3. Полученные зависимости могут быть применены в дальнейшем для обоснования критерия желаемого распределения мощностей и построения системы управления тепловым режимом.

Литература

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия: учебник для вузов. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.
2. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / под ред. А.Д. Свенчанского. — М.: Энергоиздат, 1981.
3. Свенчанский А.Д., Гуттерман К.Д. Автоматическое регулирование электрических печей. — М.: Энергия, 1965.
4. Расчет и измерение напряжения дуги в ДСП / В.А. Гордиенко, В.И. Дрогин, А.Н. Попов, Н.А. Пирогов // Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей: сб. научн. трудов ВНИИЭТО. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Хаинсон А.В. О точности расчета электрической цепи ДСП // Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей: сб. научн. трудов ВНИИЭТО. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Короткие сети и электрические параметры дуговых печей. — М.: Металлургия, 1987.
7. Параметры, определяющие производительность электропечных установок / В.И. Кулинич, Н.П. Головачев, В.Ф. Клименко и др. // Сталь. 2002. № 5. С. 30—34.
8. Минеев Р.В., Михеев А.П. Электродинамика дуговых сталеплавильных печей в задачах оптимизации электроснабжения // Современное состояние электропечестроения (по матер. VII Междунар. конгресса по электротермии). Дуговой нагрев и новые виды нагрева. — М.: ВНИИЭТО, 1975.

Статья поступила в редакцию 30.05.10.