УДК 621.365

**Математическое моделирование индукционной тигельной печи с кусковой загрузкой**

**Кувалдин А.Б., Федин М.А., Алферова Е.С.**

*Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»*

Разработана математическая модель для расчета электрического режима индукционной тигельной печи (ИТП) в начальный период плавки шихты. Получены математические зависимости удельной мощности загрузки, электрического КПД и коэффициента мощности от температуры, которые используются для реализации системы автоматического управления ИТП.

*Ключевые слова*: *индукционная тигельная печь, кусковая загрузка, метод индуктивно-связанных контуров, математическая модель.*

A mathematical model for calculating the electrical mode of induction crucible furnace (ICF) in the initial period of melting the charge is developed in this thesis. The mathematical dependence of the specific power loading, electrical efficiency and power factor of temperature is obtained. Mathematical formulas are used to implement the automatic control system of ICF.

*Keywords: Induction crucible furnace, lumpy charge, method of inductively-coupled circuits, mathematical model.*

Для расчета электрического режима индукционной тигельной печи и реализации системы управления технологическим процессом, необходимо иметь математические зависимости электрических параметров загрузки от температуры в ходе плавки. наиболее сложным оказывается получение математического описания процесса нагрева и сплавления кусков шихты, когда происходит значительное изменение активного сопротивления загрузки, так как сильно изменяются ее геометрия и электрофизические параметры.

описание кусковой загрузки в виде совокупности металлических цилиндров (рис. 1) использовано в работах [1, 2], введено допущение, что токи в цилиндрах не влияют друг на друга, т.е. во всех цилиндрах выделяется одинаковая мощность.

В данной работе расчет

электромагнитной системы индуктор – загрузка, представляющей собой совокупность цилиндров, выполняется с использованием метода индуктивно-связанных контуров, который обычно применяют для расчета системы с загрузкой в виде одного цилиндра или концентрических колец [3].

***Рис. 1. Моделирование индукционной***

***тигельной печи с кусковой загрузкой***

Основные уравнения метода записываются на основании второго закона Кирхгофа и имеют следующий вид для индуктора и каждого цилиндра загрузки:

  (1)  (2)

В ур. (1) и (2): индексом 1 обозначается индуктор, а индексами с 2 по k –загрузка. *R*1 и *R2, R*k – электрические сопротивления индуктора и загрузки; *L*1 и *L*2, *L*k – самоиндуктивности индуктора и загрузки; *U*1 – напряжение на индукторе; *k* – количество цилиндров; *М*12 – взаимная индуктивность между индуктором и каждым цилиндром и *М*2k – взаимная индуктивность между цилиндрами. Значения само- и взаимоиндуктивностей можно найти по формулам в [4].

При построении математической модели приняты следующие допущения:

1. Кусковая загрузка представлена в виде цилиндров, длина которых равна длине индуктора.
2. Индуктор и загрузка представлены в виде соленоидов с толщиной, равной глубине проникновения в соответствующий проводник.
3. Взаимная индуктивность между индуктором и цилиндрами (загрузкой) одинакова.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (1) и (2) дает значения токов в индукторе и в каждом цилиндре загрузки, которые позволяют найти зависимости мощности, электрического КПД (ηэл.) и коэффициента мощности (cosφ) от температуры загрузки и количества цилиндров.

Для проверки адекватности разработанной математической модели, при расчете электрических характеристик загрузки использовались параметры системы «индуктор-загрузка» реальной лабораторной установки.

Проведен расчет для системы со следующими параметрами:

***индуктор:*** внутренний диаметр – 100 мм, длина – 100 мм, число витков – 6, материал – медь;

***цилиндры*** (каждый)***:*** диаметр – 5 мм, длина – 100 мм, материал – немагнитная сталь (марка 12Х18Н9Т), общее число цилиндров – 17.

Приняты значения тока индуктора *I*1= 300 А и частоты *f* = 22,5 кГц.

Расчет выполнен для интервала температур 20-1400оС.

Результаты расчета представлены в виде зависимостей суммарной мощности системы *P*загр., электрического КПД ηэл. и коэффициента мощности cos φ от температуры цилиндров (принята одинаковая температура для всех цилиндров), см. рис. 2 *а, б.*

 ***а) б)***

***Рис. 2. Расчетные зависимости электрических величин от температуры: (а) мощность в загрузке; (б) электрический КПД и коэффициент мощности***

Следует отметить, что разработанный метод позволяет рассчитывать индуцированные токи и выделяющиеся мощности. Расчет показывает, что они не одинаковы, т.е. в цилиндре, расположенном ближе к индуктору ток и мощность наибольшие (рис. 3). Это обусловлено тем, что в данном методе учитывается воздействие индуцированных токов цилиндров друг на друга. В расчете нагреваемые металлические цилиндры расположены в три ряда, как это показано на рис. 1 (сечение А-А).

Адекватность предложенной математической модели была проверена путем сравнения полученных результатов с данными, рассчитанными по методу Г.И. Бабата. Отличие в результатах порядка 15%.

По результатам вычислений были получены зависимости активного и полного электрических сопротивлений загрузки от температуры:

***Рис. 3. Расчетные зависимости тока и мощности в одном цилиндре от расположения в индукторе***

Зависимости электрических параметров загрузки от температуры могут быть использованы при построении и анализе системы автоматического управления индукционной тигельной печи в среде *MATLAB/Simulink*.

Список литературы

1. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение [Текст] / Г.И.Бабат.- Энергия, 1965. – 550 с.
2. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева [Текст] / Н.И.Фомин, Л.М. Затуловский.- Металлургия, 1979. – 247 с.
3. Кувалдин, А.Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева [Текст] / А.Б.Кувалдин.- МЭИ, 1999. – 77 с.
4. Калантаров, П.Л., Расчет индуктивностей [Текст] / П.Л.Калантаров, Л.А. Цейтлин.- Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

**Кувалдин Александр Борисович**, д. т. н., профессор кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ». kuvaldinab@mpei.ru

**Федин Максим Андреевич**, к. т. н., доцент кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ».

fedinma@mpei.ru

**Алферова Елена Сергеевна**, студент кафедры Автоматизированные электротехнологические установки и системы (АЭТУС) национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»).

e.alferova24@yandex.ru