УДК 621.365

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПОСТрОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**Кувалдин А.Б., Федин М.А., Кулешов А.О., Агадуллин И.Р.**

*Россия, г. Москва, НИУ «МЭИ»*

*Предложен принцип регулирования теплового режима работы индукционных тигельных печей с проводящим тиглем, питающихся от транзисторных преобразователей высокой частоты. С использованием полученных результатов создана лабораторная установка для плавки меди, магния и сплавов, позволяющая моделировать режимы работы промышленных печей.*

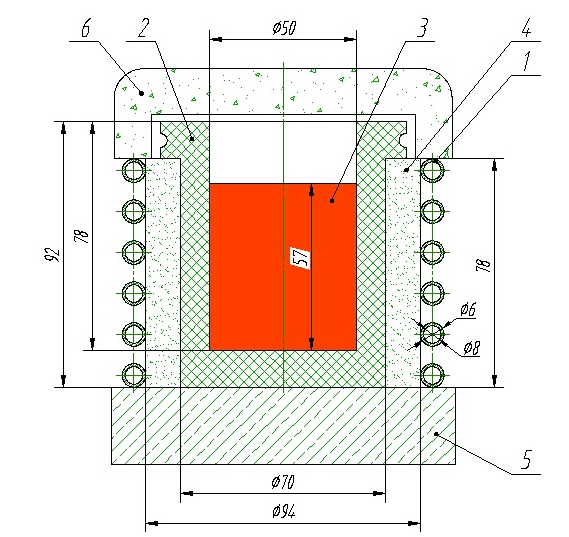
Ключевые слова: индукционная тигельная печь, проводящий тигель, двухпозиционное регулирование, температура металла, транзисторный преобразователь частоты, физическое моделирование.

A principle of regulation of thermal regime of coreless induction furnaces with conductive crucible, powered by a high-frequency transistor converters is proposed. With the use of the results of laboratory plant for melting copper, magnesium and alloys, can simulate modes of industrial furnaces.

Keywords: induction crucible furnace, conductive crucible melting of copper, two-position control, the temperature of the metal, frequency transistor inverter, physical modeling.

Индукционные тигельные печи (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов, в частности качественных медных и магниевых сплавов. В зависимости от электрических свойств материала тигля различают ИТП с непроводящим и проводящим тиглем.

|  |
| --- |
| **Рис. 1. Чертеж системы «индуктор – загрузка» печи с футеровкой:**  ***1* – индуктор; *2* – тигель; *3* – металл;**  ***4* – керамическая вставка;**  ***5* – подина; *6* – крышка** |

Современные установки ИТП требуют автоматизации проводимого в них технологического процесса, контроля и управления электрических (напряжение, ток, мощность, *cos*φ) и технологических (температура металла) параметров. Поскольку плавильные ИТП, в том числе ИТП с проводящим тиглем, являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами, целесообразно систему регулирования тепловым режимом строить по двухпозиционному принципу. Источниками питания таких печей, как правило, являются транзисторные преобразователи частоты, работающие как в продолжительном, так и в повторно-кратковременном режимах. Для выбора параметров системы регулирования печи необходима идентификация ИТП с проводящим тиглем как объекта системы управления с последующим встраиванием модели печи в структурную модель системы регулирования в *MATLAB/Simulink* [1 – 3].

В качестве объекта исследования выбрана ИТП с графитовым тиглем для плавки меди. Для экспериментальных исследований в НИУ «МЭИ» создан лабораторный стенд на базе ИТП с проводящим тиглем для плавки меди мощностью 2,5 кВт, питающейся от транзисторного преобразователя высокой частоты [3].

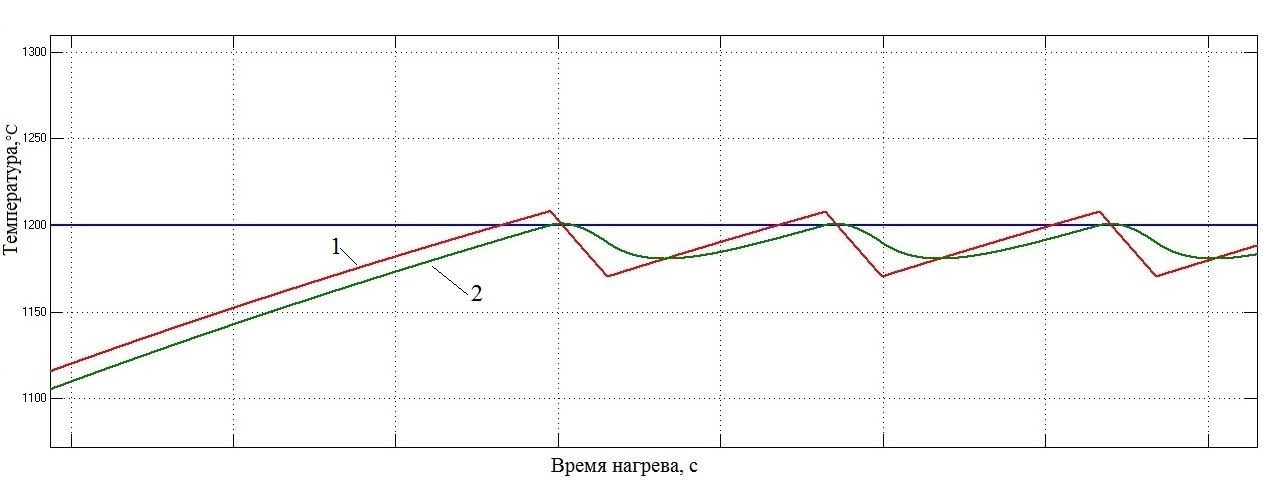
На рис. 1 показан чертеж печи с футеровкой с указанием геометрических размеров системы «индуктор – загрузка». На рисунке уровень металла в тигле (отметка 57 мм) соответствует 1 кг меди. Электрический расчет печи проведен в универсальном конечно-элементном пакете программ *ELCUT* 6.0.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр системы «индуктор – загрузка» | Расчет | Эксперимент |
| Частота *f*, кГц | 22 | 22,26 |
| Ток индуктора *I*1, А | 212 | 219 |
| Напряжение индуктора *U*1, В | 57 | 63 |
| Мощность в индукторе *P*1, Вт | 210 | 216 |
| Мощность в тигле *P*2, Вт | 1540 | 1495 |
| Мощность в меди *P*3, Вт | 70 | 63 |
| Электрический КПД | 0,87 | 0,86 |
| cosφ | 0,126 | 0,125 |

|  |
| --- |
| Табл. 1. Основные результаты расчета печи с графитовым тиглем и результаты эксперимента |

В табл. 1 представлены интегральные характеристики системы «индуктор-загрузка», полученные в *ELCUT*, а также результаты эксперимента.

Основываясь на результатах расчетов и экспериментов, проведена идентификация ИТП с проводящим тиглем как объекта управления. С помощью пакета *MATLAB/Simulink* составлена структурная модель двухпозиционной системы регулирования температуры ИТП в режиме нагрева, расплавления и выдержки расплава меди.



**Рис. 2. Переходные процессы изменения температуры садки (*1*) и сигнала с термопары (*2*)**

Для регулирования температуры используется цифровой регулятор *OMRON* *E*5*CC*. Настройки используемого регулятора температуры позволяют задавать температуру нагрева и ширину петли гистерезиса, определяющую размах колебаний температуры в процессе регулирования. В системе регулирования, основанной на прямом измерении температуры, используется погружная многоразовая хромель-алюмелевая термопара (типа *K*) с защитным чехлом, выдерживающим несколько погружений в жидкий металл.

На рис. 2 приведены переходные процессы изменения температуры садки печи и сигнала с термопары, рассчитанные теоретически в *MATLAB* и подтвержденные экспериментально. Задание по температуре печи – 1200°С, ширина размаха колебаний – 10°С (1190 – 1200°С). Как видно из графиков рис.2 печь работает в режиме, близком к предельному, поскольку интервалы, соответствующие работе печи, существенно превышают интервалы пауз в работе установки в режиме квазиустановившихся колебаний температуры. В данном случае инерционность датчика температуры незначительно влияет на характер переходных процессов, поскольку постоянная времени используемой термопары невелика. Для проверки точности измерения температуры с помощью термопары применялся тепловизор *Flir T425* .

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| *а* | *б* |
| **Рис. 3. Тигель с жидким расплавом меди: фотография (*а*), термограмма (*б*)** | |

Рис. 3 соответствует времени нагрева около 19 мин. Первоначальная загрузка медной шихты производилась в холодный тигель, затем через некоторое время по мере расплавления и осаживания шихты были произведены две дозагрузки. Суммарная масса расплавленной меди составила около 1 кг, общее время расплавления – около 19 мин, температура перегрева – 1200 °С. С использованием модели в пакете *MATLAB* проведена настройка регулятора для выплавки меди: температура задания – 1200 °С, размах колебаний температуры в процессе регулирования – 10 °С (от 1190 до 1200 °С). Переходные процессы совпадают с теоретическими, полученными в *MATLAB MATLAB/Simulink*, с точностью не менее 5% [3].

Результаты экспериментальных исследований могут быть применены для определения характеристик промышленной печи для плавки меди ёмкостью 0,4 т, работающей на частоте 500 Гц.

Список литературы

1. Гитгарц, Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро –ЭВМ [Текст] / Д. А. Гитгарц – М.: Энергоатомиздат, 1984.

2. Кувалдин, А.Б., Идентификация индукционных тигельных миксеров как объектов параметрической системы управления [Текст] / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин // Индукционный нагрев. – №1 (23), 2013. С. 19 – 24.

3. Федин, М.А. Выбор принципа регулирования и разработка систем управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем [Текст] / М.А.Федин // Индукционный нагрев.- №1 (27), 2014. С. 24 – 28.

**Кувалдин Александр Борисович**, д.т.н. профессор кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ», a.kuvaldin2013@yandex.ru

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

fedinma@mail.ru

**Кулешов Алексей Олегович**, студент-магистрант кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ»,

Fansatr7@yandex.ru

**Агадуллин Ильдар Рафисович**, студент кафедры АЭТУС НИУ «МЭИ».

AgadullinIR@mpei.ru