

УДК 621.365

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ С ПРОВОДЯЩИМ ТИГЛЕМ

CALCULATION OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF CORELESS INDUCTION FURNACES WITH CONDUCTIVE CRUCIBLE

Федин Максим Андреевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных
электротехнологических установок и систем,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
Тел.: +7(495) 36-27-075, +7(916) 76-20-691
FedinMA@mpei.ru

Кулешов Алексей Олегович

магистр техники и технологии,
аспирант кафедры автоматизированных
электротехнологических установок и систем,
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
Тел.: +7(495) 36-27-075, +7(916) 68-01-315
Fanstar7@yandex.ru

Аннотация. Проведен обзор установок индукционных тигельных печей с проводящим тиглем, выпускаемых в России и за рубежом. Разработана методика численного электрического расчета индукционных тигельных печей с проводящим тиглем в пакете ELCUT. С использованием разработанной методики выполнен расчет малогабаритной печи для плавки меди с целью определения требований к источнику питания и разработки регулятора температуры металла в печи.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, проводящий тигель, плавка меди, электрический расчет.

Fedin Maxim Andreyevich

Ph. D., Associate Professor of automated
electro-technological installations and
systems,
National Research University «MEI»
Ph.: +7(495) 36-27-075,
+7(916) 76-20-691
FedinMA@mpei.ru

Kuleshov Aleksey Olegovich

Master of engineering,
graduate student of automated
electro-technological installations and
systems,
National Research University «MEI»
Ph.: +7(495) 36-27-075,
+7(916) 68-01-315
Fanstar7@yandex.ru

Annotation. Overview of the induction crucible furnaces with conductive crucible produced in Russia and abroad, was held. The method of numerical calculation of the electrical characteristics of coreless induction furnaces with conductive crucible was developed. Calculations were performed in the package ELCUT. Calculation of the small-sized furnace for melting copper to develop of the metal temperature controller and requirements for power supply was held.

Keywords: coreless induction furnace, conductive crucible, melting of copper, electric calculation.

Введение

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.

К первой группе относятся печи с диэлектрическим керамическим тиглем. В таких печах загрузка (садка) нагревается индуцированным в ней током, тигель же эквивалентен воздушному зазору.

Ко второй группе относятся печи со стальным, графитовым или графито-шамотным тиглем, обладающим большей или меньшей электропроводностью. Если толщина стенки тигля более чем вдвое превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуцированный ток сосредоточен в стенке тигля, загрузка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку, и энергия выделяется как в стенке тигля, так и в самой загрузке, если она электропроводна. Печи с проводящим тиглем имеют теплоизоляцию [1].

В настоящее время в России и за рубежом выпускаются ИТП с проводящим стальным тиглем для плавки магния емкостью от 300 кг до 8 т (мощностью от 120 кВт до 1200 кВт соответственно) и печи с графитовым тиглем для плавки меди емкостью от 1 кг до 6 т (мощностью от 2 кВт до 1500 кВт).

Следует разделять плавку в ИТП и плавку непроводящих материалов, требующих химической чистоты, в установках косвенного индукционного нагрева. Примером такой плавки является плавка сверхчистого оптического стекла в печи с платиновым тиглем.

Современные установки ИТП требуют автоматизации проводимого в них технологического процесса, контроля и управления электрических (напряжение, ток, мощность, cosφ) и технологических параметров (температура металла). Для правильного выбора источника питания и параметров системы регулирования печи необходимы результаты расчета ее электрического режима.

В качестве объекта исследования выберем ИТП с графитовым тиглем для плавки металлов. Печь питается от высокочастотного транзисторного преобразователя мощностью 2,5 кВт с рабочей частотой 22 кГц. Транзисторный преобразователь состоит из неуправляемого двухполупериодного мостового выпрямителя, фильтра, управляемого транзисторного инвертора на транзисторах *MOSFET* и с частотным регулированием выходной мощности, а также согласующего трансформатора. Охлаждение преобразователя — воздушное, индуктора — водяное.

На рисунке 1 показан чертеж системы «индуктор — загрузка» печи с геометрическими размерами. На рисунке уровень металла в тигле (отметка 57 мм) соответствует 1 кг меди.

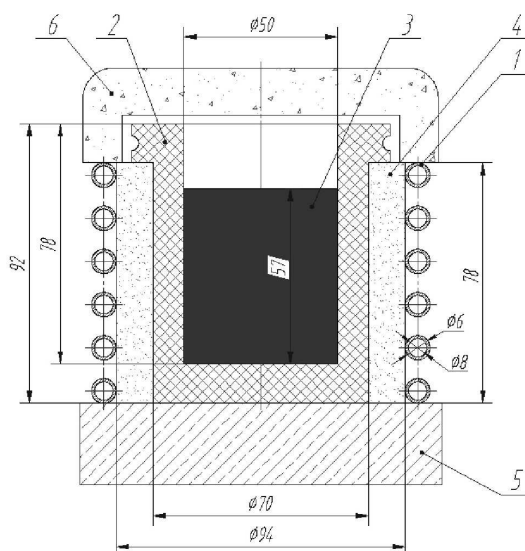


Рисунок 1 — Чертеж системы «индуктор — загрузка» печи с футеровкой:

1 — индуктор; 2 — тигель; 3 — металл; 4 — керамическая вставка; 5 — подина; 6 — крышка

Электрический расчет печи проведен в профессиональной версии универсального конечно-элементного пакета программ ELCUT 6.0 [2]. На рисунке 2 показана расчетная область, поделенная на конечные элементы. Число узлов сетки — около 93000. Модель позволяет, изменяя свойства и размеры блоков, проводить расчеты для случаев тигля без металла и тигля с различным уровнем металла. На оси симметрии (граница 1 на рис. 2) задается граничное условие Неймана $\frac{dH}{dr} = 0$ (отсутствие тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля), на внешних границах (граница 2) — нулевое граничное условие Дирихле (полагается равным нулю значение магнитного потенциала, т.е. поле локализовано в пределах расчетной области). Практика показывает, что радиус расчетной области (расстояние по оси *r* на рис. 2) надо задавать несколько большим, чем это сделано на рис. 2, а именно в 2–2,5 раза большим, чем внутренний радиус индуктора печи, а степень дискретизации — меньшей. В этом случае и число узлов сетки получается большим — около 420 000.

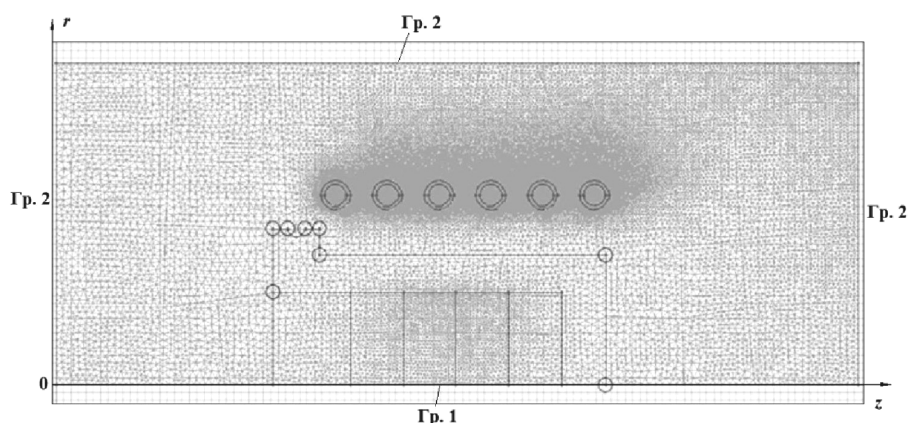


Рисунок 2 — Расчетная область в пакете ELCUT

В результате решения задачи магнитного поля переменных токов получены интегральные результаты, представленные в таблице 1, для случая графитового тигля без металла и тигля с медью (масса меди около 1000 г). На рисунке 3 представлены рассчитанные распределения удельной объемной мощности тепловыделения для обоих этих случаев.

Таблица — 1. Основные результаты расчета печи с тиглем без металла и тиглем с медью

| Параметр системы «индуктор — загрузка» | Тигель без металла | Тигель с медью |
|--|--------------------|----------------|
| Ток индуктора I_1 , А | 215 | |
| Напряжение индуктора U_1 , В | 55 | 57 |
| Частота f , кГц | 23,3 | |
| Мощность в индукторе P_1 , Вт | 210 | 210 |
| Мощность в тигле P_2 , Вт | 1840 | 1540 |
| Мощность в меди P_3 , Вт | 0 | 70 |
| Полное сопротивление системы z , Ом | 0,258 | 0,265 |
| Активное сопротивление системы R , Ом | 0,045 | 0,040 |
| Индуктивное сопротивление системы x_L , Ом | 0,254 | 0,262 |
| Электрический КПД | 0,90 | 0,88 |
| $\cos\varphi$ | 0,17 | 0,15 |

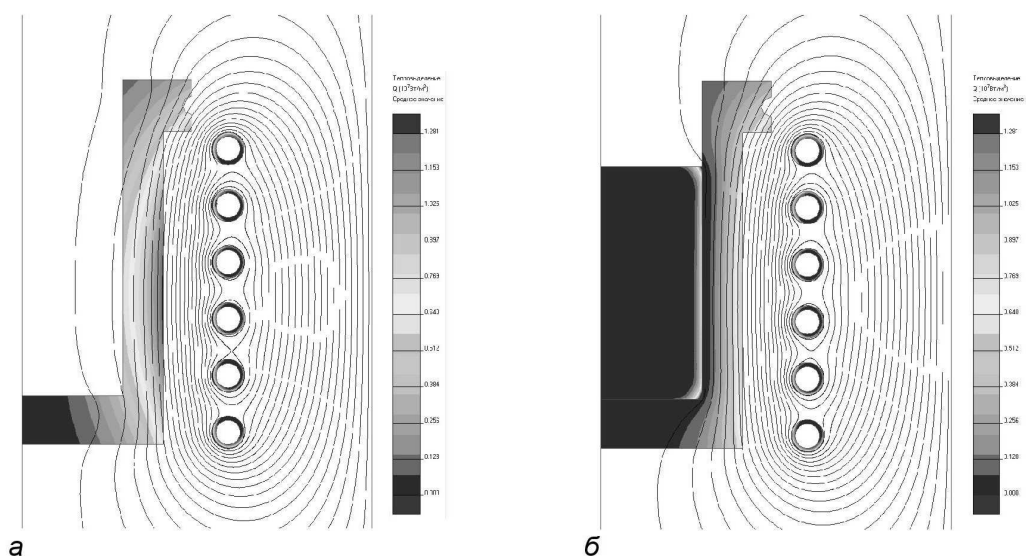


Рисунок 3 — Распределение удельной объемной мощности тепловыделения в индукторе и загрузке печи:
а — графитовый тигель без металла; б — графитовый тигель с медью

Из таблицы и рисунков видно, что наличие в графитовом тигле жидкой меди (в расчетах удельное сопротивление меди принималось равным $2,15 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) оказывает существенное влияние на параметры системы «индуктор — загрузка». Так, мощность тепловыделения в графитовом тигле при наличии в нем меди снижается почти на 20 %, при этом мощность тепловыделения в самой меди представляет малозначительную величину — около 70 Вт. Это объясняется тем, что глубина проникновения электромагнитной волны в стенку графитового тигля толщиной 10 мм на частоте тока индуктора 23 кГц составляет около 13 мм, а поэтому интегральное значение индуцированного тока в меди сопоставимо с суммарным током в тигле (460 А и 940 А соответственно). Это приводит к тому, что ток в меди существенно ослабляет напряженность магнитного поля на поверхности тигля. В результате расчетов также установлено, что при этом значение удельного сопротивления меди, находящейся в графитовом тигле, слабо влияет на параметры системы «индуктор — загрузка» (значение удельного сопротивления изменялось от значения, соответствующего жидкой меди при температуре 1100 °С, приведенного выше, до значения $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м при 20 °С), поскольку оно все равно остается существенно меньшим по сравнению со значением удельного электрического сопротивления графита, слабо изменяющимся при нагреве. Всё это предъявляет особые специфические требования к работе источника питания — транзисторного инвертора напряжения [3].

Поскольку на этапе технологического процесса, предшествующем расплавлению металла в тигле, загрузка тигля представляет собой кусковую шихту, отдельные куски которой в электрическом отношении практически не связаны между собой, а индуцированные токи замыкаются в основном в пределах каждого куска, эквивалентное сопротивление такой кусковой загрузки в несколько раз превосходит аналогичное значение у жидкой меди, поэтому на этом этапе наличием в тигле металлической (в частности медной) шихты можно пренебречь и использовать результаты, полученные для тигля без металла. Это было подтверждено экспериментально.

Заключение

Разработана методика электрического расчета ИТП с проводящим тиглем.

Установлено, что в случае, когда проводящий тигель является частично прозрачным для электромагнитной волны, суммарная мощность тепловыделения в тигле с расплавленным металлом становится существенно меньше, чем мощность тепловыделения в проводящем тигле без жидкого металла при одинаковых токе индуктора и частоте. Это предъявляет особые специфические требования к работе источника питания — транзисторного инвертора напряжения.

Полученные результаты используются при проектировании источников питания, а также при разработке регуляторов температуры металла в ИТП с проводящим тиглем.

Литература:

1. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1968.
2. А.Б. Кувалдин, М.А. Федин. Идентификация индукционных тигельных миксеров как объектов параметрической системы управления // Индукционный нагрев. — 2013. — №1 (23). — С. 19–24.
3. Федин М.А. Выбор принципа регулирования и разработка системы управления индукционных тигельных печей с проводящим тиглем // Индукционный нагрев. — 2014. — №1 (27). — С. 24–28.

References:

1. Farbman S.A., Kolobnev I.F. Induction furnaces for melting of metals and alloys. — M.: Metallurgy, 1968.
2. A.B. Kuvaldin, M.A. Fedin. Identification of induction crucible mixers as objects of parametric control system // Induction heating. — 2013. — №1 (23). — С. 19–24
3. Fedin M.A. The choice of the principle of regulation and the development of control system of coreless induction furnaces with conductive crucible // Induction heating. — 2014. — №1 (27). — С. 24–28.