

А. Б. Кувалдин, М. А. Федин

Идентификация индукционных тигельных печей и миксеров как объектов управления и разработка параметрической системы регулирования температуры расплава

Индукционный нагрев широко используется для плавки различных металлов и сплавов. По назначению установки индукционной плавки разделяются на тигельные и каналные плавильные печи и миксеры, хотя это деление, зачастую, носит весьма условный характер. Индукционные миксеры в классическом понимании должны обеспечить только поддержание температуры заливаемого в них жидкого металла (обычно чугун, алюминий и сплавы, медь и сплавы) и его гомогенизацию (равномерность температурного поля и химического состава). Индукционные миксеры, в свою очередь, можно разделить на так называемые печи-миксеры, копильники и раздаточные печи. Первые, помимо собственно миксерных функций, могут обеспечивать небольшой перегрев металла и расплавление легирующих добавок. Вторые являются собственно миксерами в классическом понимании, а последние представляют собой печь-миксер или копильник, встроенный в технологическую литейную линию.

Основной особенностью индукционных миксеров является работа с переменным уровнем расплава, изменяющимся в широких пределах (10 – 100 % от номинального), что оказывает существенное влияние на электрические, энергетические и тепловые параметры установки, особенно в случае тигельных миксеров [1, 2].

Источником питания для всех индукционных каналных миксеров является электропечной трансформатор, для тигельных миксеров – электропечной трансформатор или статический тиристорный преобразователь частоты. Последние используются в качестве источников питания для тигельных миксеров, хотя переход для них на средние частоты обычно не требуется по причине и без того высоких значений относительного размера загрузки, обычно в случае, когда две печи (одна используется в качестве плавильного агрегата, а вторая – в качестве

миксера) питаются от одного преобразователя частоты. Такие схемы в последнее время находят широкое применение.

Индукционные тигельные печи можно разделить на печи с непроводящим тиглем (работающие на кусковой завалке и с «болотом») и с проводящим тиглем. Источниками питания для тигельных печей являются электропечные трансформаторы, статические тиристорные и транзисторные (высокочастотные транзисторные генераторы на IGBT или MOSFET транзисторах) преобразователи частоты.

Основной особенностью тигельных печей, работающих на кусковой завалке, является существенная нестабильность электрического режима в ходе проведения технологического процесса плавки. Это связано с изменением электрофизических свойств материала загрузки в ходе нагрева и плавки (удельное электрическое сопротивление и относительная магнитная проницаемость), а также геометрии загрузки вследствие сплавления отдельных, изначально плохо электрически контактирующих, кусков шихты и образования ванны расплава. Электрический режим печей, работающих с «болотом», печей с проводящим тиглем, а также канальных печей гораздо более стабильный. Источниками питания всех канальных печей являются электропечные трансформаторы.

Таким образом, наиболее сложными с точки зрения управления электрическим и тепловым режимом являются индукционные тигельные плавильные печи, работающие на кусковой завалке (далее ИТП), и миксеры (ИТМ). Задача разработки современной системы управления для этих установок осложняется также сложностями непосредственного измерения температуры металла и его массы, находящейся в печи или миксере, в условиях высоких температур и сильных электромагнитных полей. В связи с этим ещё в начале 80-х гг. прошлого века были предложены системы параметрического управления температурой расплава в ИТП [3].

В настоящее время вопросами параметрического управления (управления по косвенным электрическим параметрам) ИТП и ИТМ активно занимаются на кафедре АЭТУС НИУ «МЭИ». Предложено несколько схем регуляторов

температуры ИТМ, проведено исследование регуляторов в среде «MATLAB/Simulink», даны рекомендации по их настройке, аппаратной реализации, выполнены оценки точности косвенного определения температуры [4, 5].

Для создания параметрической системы управления ИТП или ИТМ требуется идентификация печи или миксера для создания их уточнённой модели, не принимая ряд серьезных допущений, как, например, при разработке и исследовании регуляторов режима (мощности), коэффициента мощности и симметрирования для ИТП в [6].

Для идентификации ИТП и ИТМ как объектов управления необходимы методы расчёта их тепловых и электрических характеристик.

Для расчёта тепловых и электрических характеристик ИТМ и ИТП (в горячем режиме, после расплавления) авторами разработан специализированный пакет программ «Overheat». Пакет позволяет проводить расчёты с учётом переменного уровня расплава в тигле. Тепловой расчёт производится методом взаимных поверхностей облучения, электрический – методом индуктивно связанных контуров [2].

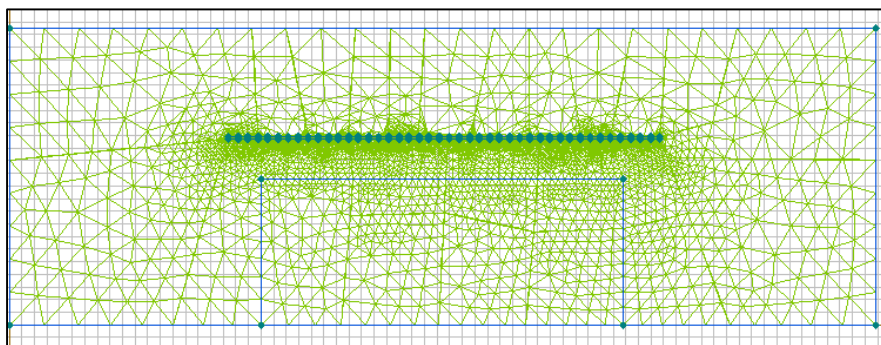


Рис. 1. Расчётная область с сеткой конечных элементов в пакете «ELCUT»

Расчёт ИТМ и ИТП в горячем режиме можно проводить и с использованием универсального конечно элементного пакета программ «ELCUT». На

рис. 1 приведена расчётная область с сеткой конечных элементов в пакете «ELCUT», а на рис. 2 распределение удельной объёмной мощности тепловыделения в индукторе и нагрузке для ИТМ для чугуна ёмкостью 10 т (*a* – заполнение миксера на 100 %, *б* – на 50 %).

При расчёте используются следующие граничные условия: заданное значение магнитного потенциала $A = 0$ (условие Дирихле для внешних границ). Нулевое

граничное условие Дирихле на оси вращения для осесимметричной задачи задаётся в пакете по умолчанию.

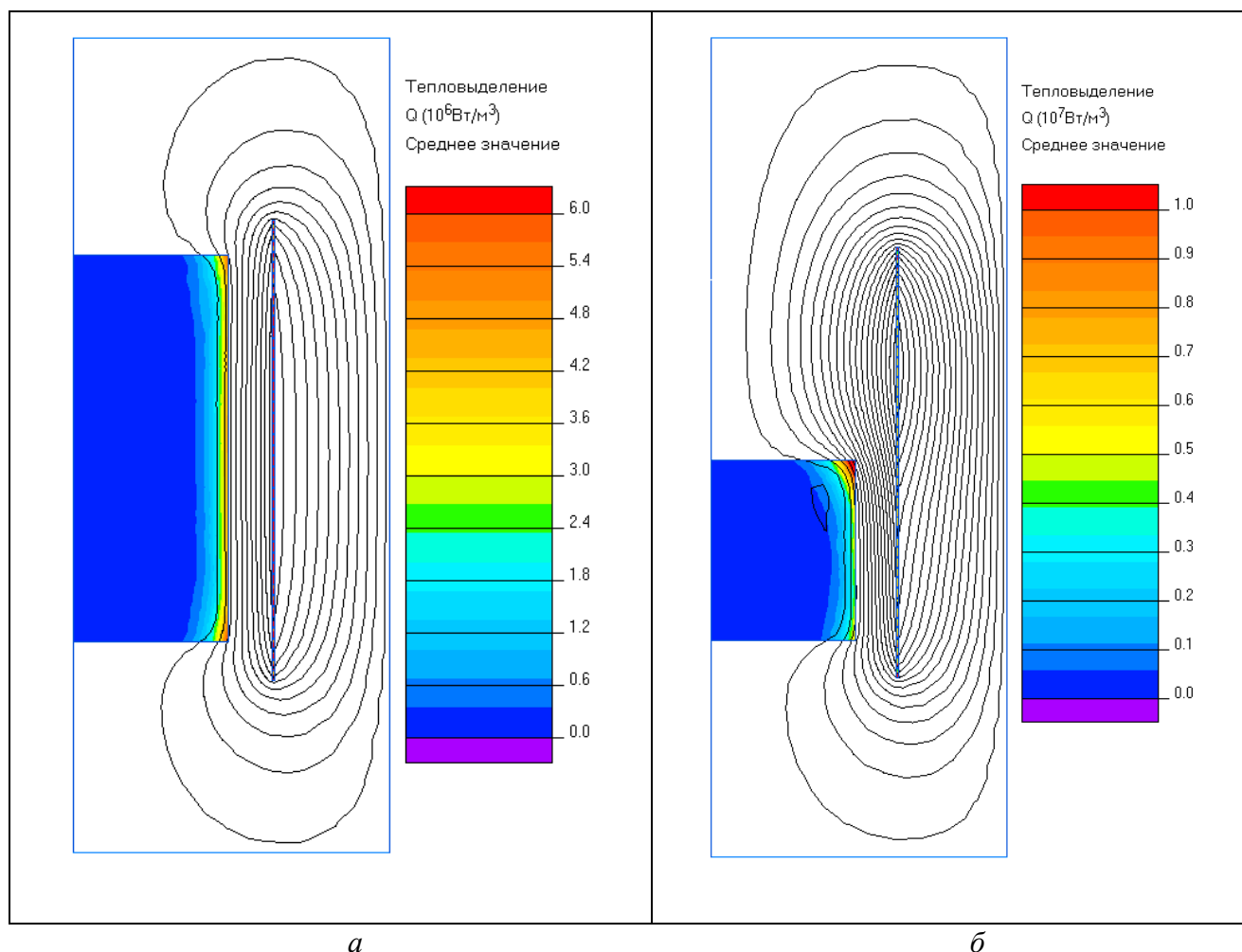


Рис. 2. Распределение удельной объёмной мощности тепловыделения в индукторе и загрузке для ИТМ для чугуна ёмкостью 10 т: а – заполнение миксера на 100 %, б – заполнение миксера на 50 %

Большую сложность при идентификации ИТП как объектов управления представляет расчёт электрических и энергетических параметров установки в режиме, предшествующем сплавлению отдельных кусков шихты в монолит, когда загрузка печи представляет собой совокупность отделённых друг от друга (в электрическом отношении) кусков металла. В [7, 8] приводится методика расчёта режима работы ИТП с кусковой загрузкой, однако данная методика имеет существенный недостаток, связанный с тем, что кусковая загрузка представляется набором эквивалентных кусков шихты с осреднённым эквивалентным размером. Разработка методики, позволяющей рассчитывать электрический режим работы ИТП, работающей с кусковой шихтой, является делом дальнейших исследований в области идентификации ИТП как объектов управления.

Для построения структурной модели ИТМ и ИТП воспользуемся уравнением энергетического баланса установки:

$$(P(\tau) - P_1(\tau) - P_h(\tau)) \cdot d\tau = c \cdot m(\tau) \cdot dt, \quad (1)$$

где $P(\tau)$ – активная мощность, потребляемая установкой; $P_1(\tau)$ – активная мощность в индукторе (потери в индукторе); $P_h(\tau)$ – суммарные тепловые потери; c – удельная теплоёмкость расплава; $m(\tau)$ – масса расплава в тигле; τ – время; t – температура.

Приведённый энергетический баланс пренебрегает потерями в токоподводящих элементах, конденсаторной батарее, а также в магнитопроводе, что незначительно сказывается на точности структурной модели миксера или печи, однако, позволяет существенно её упростить. В каждом конкретном случае энергетический баланс установки может быть уточнён путём учёта этих составляющих, определённых расчётным путем или экспериментально.

Исходными данными для расчёта температуры являются: начальная температура, теплоёмкость и масса загрузки. Применив алгоритм, можно вычислить температуру загрузки в любой момент времени по формуле:

$$t(\tau) = \frac{1}{c} \cdot \int_{\tau} \frac{P(\tau) - P_1(\tau) - P_h(\tau)}{m(\tau)} \cdot d\tau \quad (2)$$

где t_0 – начальная температура загрузки (измеряется непосредственно).

Данная модель не учитывает влияние формы расплава в тигле на электрические и энергетические характеристики установки с ИТМ, поскольку последние работают с гораздо меньшими, по сравнению с плавильными печами, удельными поверхностными мощностями. При значениях удельных поверхностных мощностей, характерных для ИТМ, влияние мениска на электрический КПД и коэффициент мощности ИТМ оказывается незначительным. В ИТП влияние отжатия учитывать необходимо [9].

Для определения массы расплава в тигле используются тензодатчики или косвенный метод – определение уровня металла по значению полного сопротивления системы «индуктор – загрузка», то есть по отношению действующих значений напряжения и тока. При этом соответствующая

функциональная зависимость имеет вид полинома. На рис. 3 приведена зависимость для определения уровня расплава в тигле по значению полного сопротивления системы «индуктор – нагрузка» ИТМ для чугуна с номинальной ёмкостью 10т, полученные в «ELCUT» и «Overheat».

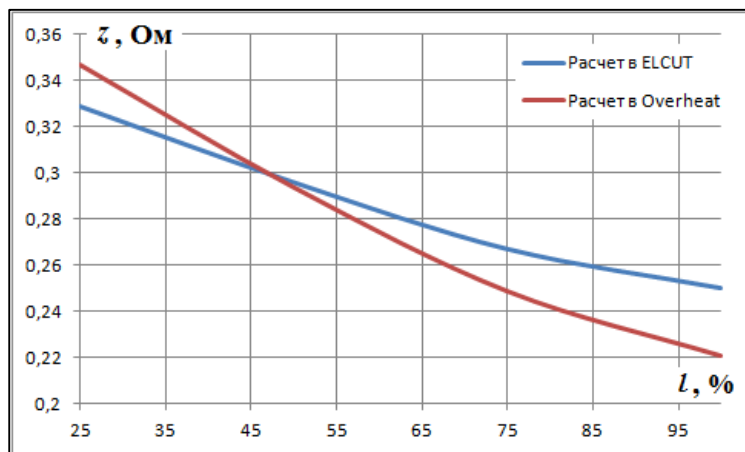


Рис. 3. Зависимость для определения уровня расплава по полному сопротивлению системы «индуктор – нагрузка»

В соответствии с (2) мощность тепловых потерь рассчитывается микропроцессорным контроллером, входящим в систему управления ИТМ или ИТП, в зависимости от температуры и уровня расплава, мощность электрических потерь – в зависимости от тока индуктора.

При расчёте удельной

теплоёмкости и тепловых потерь значение температуры принимается равным величине, рассчитанной на предыдущем шаге, что допустимо вследствие значительной инерционности процесса изменения температуры расплава.

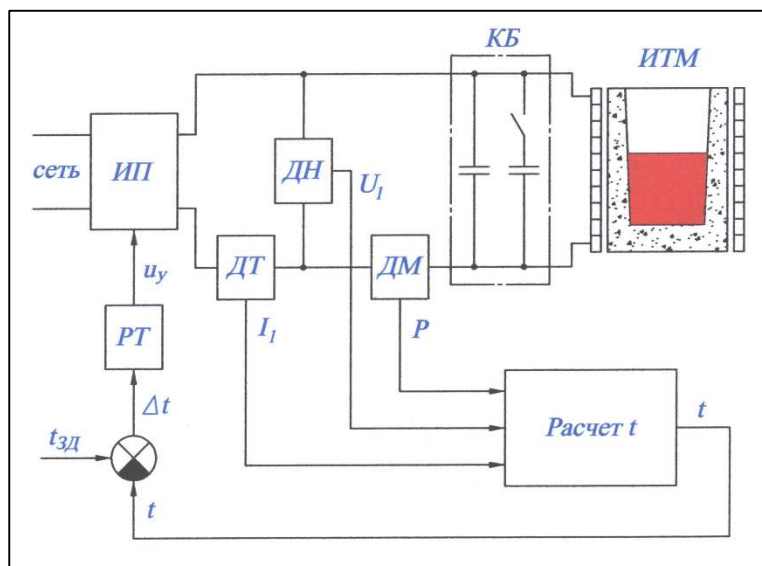


Рис. 4. Функциональная схема системы управления ИТМ с косвенной оценкой температуры

На рис. 4 представлена функциональная схема системы управления ИТМ по косвенным параметрам.

Система управления работает следующим образом. Питание ИТМ осуществляется от источника питания ИП (трансформатор с

переключением ступеней напряжения или статический

преобразователь частоты) с входом задания напряжения u_y . Для компенсации реактивной мощности в системе используется конденсаторная батарея КБ, часть

которой оперативно коммутируется для компенсации изменений коэффициента мощности, вызванных работой миксера с переменным уровнем расплава. По сигналам с датчиков активной мощности ДМ, напряжения ДН и тока индуктора ДТ, пропорциональным активной мощности P , потребляемой установкой, напряжению U_l и току I_l индуктора соответственно, осуществляется расчёт температуры расплава t . Рассчитанное значение температуры сравнивается с заданным $t_{зд}$ и по значению рассогласования системы регулятор температуры РТ вырабатывает управляющий сигнал, поступающий на вход задания напряжения ИП [10].

Идентификация ИТМ (или ИТП) конкретного типа как объекта управления производится путем вычислительного эксперимента с использованием специального программного пакета «Overheat», разработанного на кафедре АЭТУС НИУ «МЭИ», и универсального пакета программ «ELCUT». Зависимости электрического КПД и мощности тепловых потерь от уровня (массы) расплава в тигле, представленные в виде полиномов регрессии, используются микропроцессорным устройством управления для расчёта температуры расплава на основании энергетического баланса (1).

Предложенная система управления позволяет сочетать оценку температуры по косвенным параметрам с её периодическим измерением погружными термопарами с целью корректировки. Недостатками такой системы являются накопление ошибки со временем при численном интегрировании согласно (2), а также невозможность полного отказа от использования погружного датчика температуры, пусть он погружается в расплав значительно реже, чем при традиционном способе регулирования – однократно для определения начальной температуры или время от времени для коррекции оценки температуры при длительной выдержке металла.

Указанные недостатки устранены в системе, в которой используются датчики напряжения, тока индуктора и уровня расплава (рис. 5). В этом случае температура расплава рассчитывается микропроцессорным контроллером без применения численного интегрирования, на основании зависимости температуры от полного

электрического сопротивления печи (миксера) и уровня расплава. Такая зависимость для конкретной установки получается путем вычислительного эксперимента с использованием пакета «Overheat». Полное сопротивление печи (миксера) определяется как соотношение измеренных значений напряжения и тока индуктора, уровень (масса) расплава измеряется тензодатчиком [11].

Дальнейшим развитием системы управления, представленной на рис. 5, является учёт уменьшения толщины стенки тигля в процессе его эксплуатации.

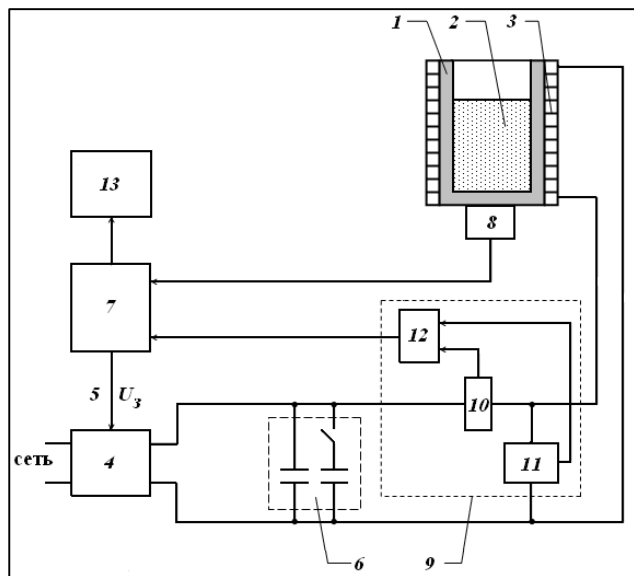


Рис. 5. Функциональная схема системы управления ИТМ с косвенным определением температуры: 1 – тигель, 2 – расплав, 3 – индуктор, 4 – источник питания, 5 – вход задания напряжения, 6 – конденсаторная батарея, 7 – микропроцессорный контроллер, 8 – тензодатчик

Непрерывное автоматическое регулирование температуры расплава с использованием предложенных авторами регуляторов улучшает энергетические показатели установки, в частности, снижает удельный расход электроэнергии на проведение технологического процесса.

Необходимо сказать, что в последнее время появились работы, затрагивающие вопросы применения нечеткой логики (фаззи-логики) при построении систем автоматического управления электротехнологическими установками.

Поскольку ИТП и ИТМ как объекты управления являются достаточно сложными, возможно, удастся управлять ими более точно, если вместо попыток отыскания детерминированного математического описания объекта и включения модели в контур управления воспользоваться методами нечёткой логики.

В настоящее время на кафедре АЭТУС НИУ «МЭИ» создаётся лабораторная установка индукционного нагрева и плавки на основе ИТП с проводящим графитовым тиглем ёмкостью 1 кг по серебру (рис. 6). В качестве источника питания используется транзисторный преобразователь частоты с установленной

мощностью $2,5 \text{ кВт}$ и выходной частотой около 22 кГц . КПД преобразователя составляет не менее $0,9$.



Рис. 6. Экспериментальная установка с ИТП для плавки драгоценных металлов

Экспериментальные исследования установки проводились с использованием следующих измерительных приборов: цифровой запоминающий осциллограф Tektronix серии TDS1000B/2000B, пирометр излучения Optris LaserSight, тепловизор Agema 550 Thermal Imaging System (предоставлен кафедре АЭТУС ОАО «Электросетьсервис» ЕНЭС).

Экспериментально установлено, что при нагреве графитового тигля составляющие энергетического баланса таковы: активная мощность в индукторе – 310 Вт , тепловые потери через теплоизоляцию – 80 Вт , полезная мощность – 1900 Вт ; при нагреве заготовки из ферромагнитной стали около $340, 600$ (потери через теплоизоляцию – 110 Вт , потери излучением при открытой крышке – 490 Вт) и 660 Вт соответственно; при нагреве заготовки из немагнитной (нержавеющей) стали – $310, 105$ и 1200 Вт соответственно; при нагреве заготовки из алюминия – $390, 20$ и 330 Вт соответственно. Для всех экспериментов, кроме нагрева алюминиевой заготовки, температура нагрева – $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, при нагреве алюминия – $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определение составляющих энергетического баланса при различном материале загрузки осуществлялось калориметрическим способом. Вначале осуществлялся нагрев загрузки до температуры нагрева, а по температуре охлаждающей воды определялась сумма осреднённых тепловых потерь и потерь в индукторе. Затем питание установки отключалось, и по температуре охлаждающей воды определялись осреднённые тепловые потери. Наконец, на третьем шаге производился повторный нагрев заготовки до температуры нагрева с последующим

её охлаждением в воде. Из последнего опыта определялась полезная мощность, идущая на нагрев загрузки.

Полученные результаты подтверждаются расчётами в пакете «ELCUT» (решались задачи расчёта магнитного поля переменных токов и тепловая, а также связанная задача).

На рис. 7 представлено распределение удельной объёмной мощности тепловыделения для случая нагрева меди в графитовом тигле, полученное в пакете «ELCUT».

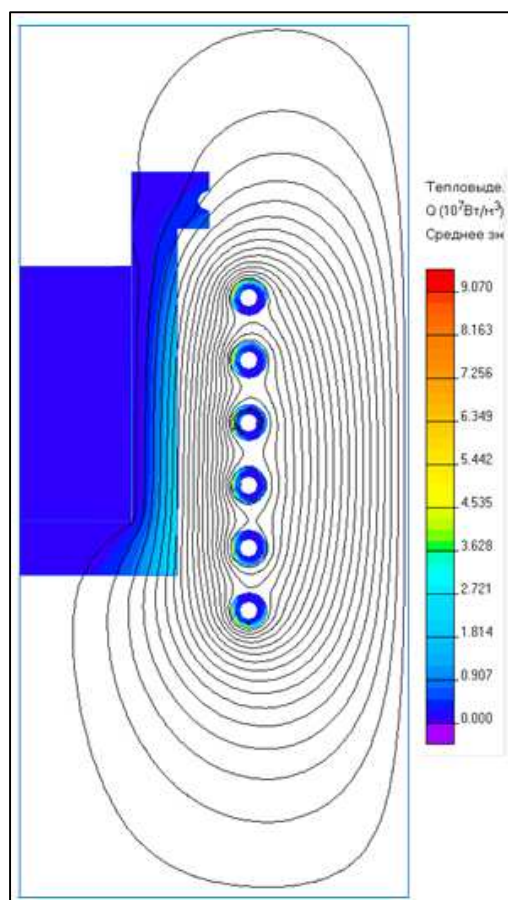


Рис. 7. Распределение удельной объёмной мощности тепловыделения при нагреве графитового тигля

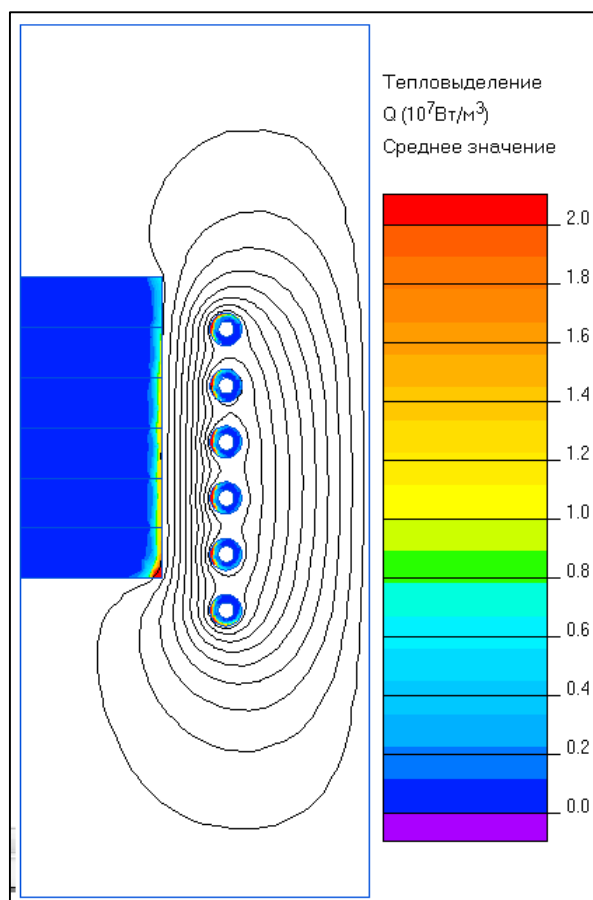


Рис. 8. Распределение удельной объёмной мощности тепловыделения при нагреве заготовки из нержавеющей стали

Интегральные результаты расчёта таковы: мощность тепловыделения в индукторе $P_1=416 \text{ Вт}$, мощность тепловыделения в графитовом тигле $P_{21}=1590 \text{ Вт}$, мощность тепловыделения в загрузке $P_{22}=160 \text{ Вт}$, суммарная мощность тепловыделения $P=2170 \text{ Вт}$, что хорошо сходится с результатами эксперимента.

На рис. 8 показано распределение удельной объёмной мощности тепловыделения для нагрева в установке заготовки из немагнитной (нержавеющей)

стали. По результатам расчёта мощность тепловыделения в индукторе $P_1=295 \text{ Вт}$, мощность тепловыделения в загрузке $P_2=1100 \text{ Вт}$, что также хорошо сходится с результатами эксперимента.

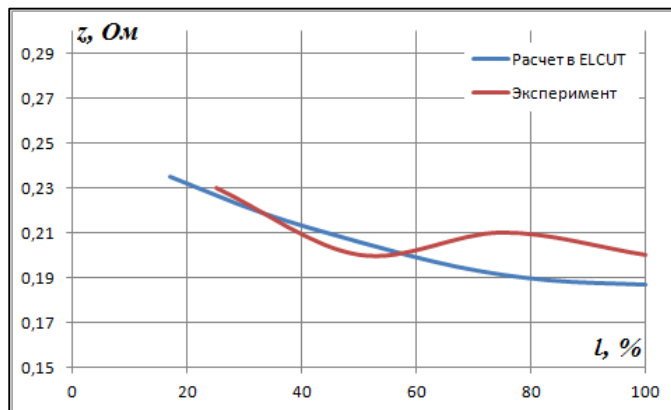


Рис. 9. Зависимости полного сопротивления системы «индуктор – загрузка» от высоты загрузки (по отношению к номинальной), полученные экспериментально и в пакете «ELCUT»

На рис. 9 представлены зависимости полного сопротивления системы «индуктор – загрузка» от высоты загрузки (по отношению к номинальной), полученные экспериментально и в пакете «ELCUT».

Таким образом, пакет «ELCUT» может быть использован при идентификации индукционных тигельных печей различной ёмкости

для плавки различных металлов и сплавов (в том числе и ИТП с проводящим тиглем). Полученное с помощью «ELCUT» или специализированных пакетов (Overheat) математическое описание используется при разработке параметрических систем управления установок с ИТП.

На базе описанной установки планируется создание лабораторного стенда, позволяющего исследовать различные режимы работы установки индукционного нагрева и плавки при использовании различных принципов регулирования: двухпозиционного, непрерывного (ПИД-закон), по косвенным параметрам, с использованием нечёткой логики.

Литература

1. Простяков А. А. Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна. М., «Энергия», 1977.
2. Кувалдин А. Б., Погребисский М. Я., Федин М.А. Расчёт тепловых и электрических характеристик индукционных тигельных миксеров. – Электрометаллургия, 2007, № 12. С. 18 – 26.
3. Гитгарц Д. А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

4. Кувалдин А. Б., Погребисский М. Я., Федин М. А. Разработка системы управления температурой расплава в индукционных тигельных миксерах и её исследование с использованием компьютерной модели. – Электromеталлургия, 2008, № 2. С. 25 – 31.
5. Федин М. А. Разработка системы управления температурой расплава в индукционных тигельных миксерах по косвенным параметрам. Вестник МЭИ, 2009. №5. С. 54 – 59.
6. Минеев А. Р., Коробов А. И., Погребисский М. Я. Моделирование электротехнологических процессов и установок. – М.: «Компания Спутник+», 2004.
7. Плавильные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование / В. И. Лузгин, С. Ф. Сарапулов, Ф. Н. Сарапулов и др. Екатеринбург, 2005.
8. Электротехнология на рубеже XX-XXI веков // Сб. докл. науч.-техн. семинара, посвященного 100-летию профессора А. Д. Свенчанского. – М.: Издательство МЭИ, 2005.
9. Кувалдин А. Б., Федин М. А. Расчёт формы поверхности расплава и её влияние на энергетические и электрические характеристики индукционной тигельной печи. – Электричество, 2009, № 4. С. 61 – 67.
10. Кувалдин А. Б., Погребисский М. Я., Федин М. А. Устройство для управления индукционным тигельным миксером. Патент на полезную модель №75129 Б.И. №20, 2008.
11. Кувалдин А. Б., Погребисский М. Я., Федин М. А. Устройство для управления индукционным тигельным миксером. Патент на полезную модель № 95213 РФ, Б.И. № 16, 2010.