

УДК 621.365.51

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ДЛИТЕЛЬНО ПРОТЕКАЮЩИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ
КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДНОЙ КАТАНКИ**

А.А. Щерба^{1*}, чл.-корр. НАН Украины, **А.Д. Подольцев**¹, докт.техн.наук, **И.Н. Кучерявая**¹, докт.техн.наук, **В.М. Золотарев**², докт.техн.наук, **Р.В. Белянин**²

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: podol@ied.org.ua

² – ПАТ "Завод "Южкабель",
ул. Автогенная, 7, Харьков, 61099, Украина

Проведено мультифизическое моделирование длительно протекающих (десятки часов), разномасштабных по времени электромагнитных и тепловых переходных процессов в индукционной канальной печи, используемой в технологии получения медной катанки. В основу реализации моделирования положены связанные между собой нелинейные электрическая и тепловая эквивалентные цепи, учитывающие такие факторы, как зависимость электропроводности и теплоемкости нагреваемого медного шаблона от температуры, наличие фазового перехода при его нагреве до температуры выше температуры плавления, периодическая загрузка холодных медных катодов в зону расплава и непрерывное литье медных заготовок. Показано, что протекающие при этом динамические процессы тепло- и массопереноса могут моделироваться эквивалентной тепловой цепью с нелинейными и коммутруемыми емкостями. Компьютерная реализация метода выполняется в программе Matlab/Simulink/SPS. Для снижения затрат компьютерного времени предложен и реализован подход искусственного уменьшения частоты источника электропитания с одновременным пропорциональным увеличением всех индуктивностей в эквивалентной электрической цепи. Приведенные результаты тепловых расчетов позволяют выбирать рациональные технологические режимы и параметры установки. Библи. 12, рис. 7.

Ключевые слова: индукционная канальная печь, электромагнитные процессы, тепловые процессы, фазовый переход при плавлении заготовки, мультифизическая цепь, компьютерное моделирование.

При изготовлении медных жил силовых кабелей к показателям качества выплавляемого металла (однородность состава, химическая чистота и др.) предъявляются высокие требования, которым удовлетворяют в первую очередь индукционные канальные печи. Впервые процесс производства медной катанки с последующим изготовлением из нее токопроводящих жил на основе индукционной установки восходящего вертикального литья UPCAST был апробирован и впервые внедрен в финской фирме Outokumpu [12]. В настоящее время в мире установлено более 200 таких установок с производительностью от 1000 до 40000 тонн в год.

Особенностью процесса UPCAST является получение катанки требуемого диаметра исключительно операцией литья и, как следствие, возможность производства катанки из бескислородной меди. Принципиальная схема 10-ти ручьевой установки UPCAST производительностью 10000 тонн в год показана на рис. 1 [11]. Медные катоды (исходная шихта) при помощи загружаемого устройства 1 поступают в плавно-раздаточную печь 3, которая состоит из двух сообщающихся между собой камер: меньшей – для приема расплава и большей – для литья катанки. Расплав непрерывно подается в водоохлаждаемые кристаллизаторы литейной машины 2, где про-

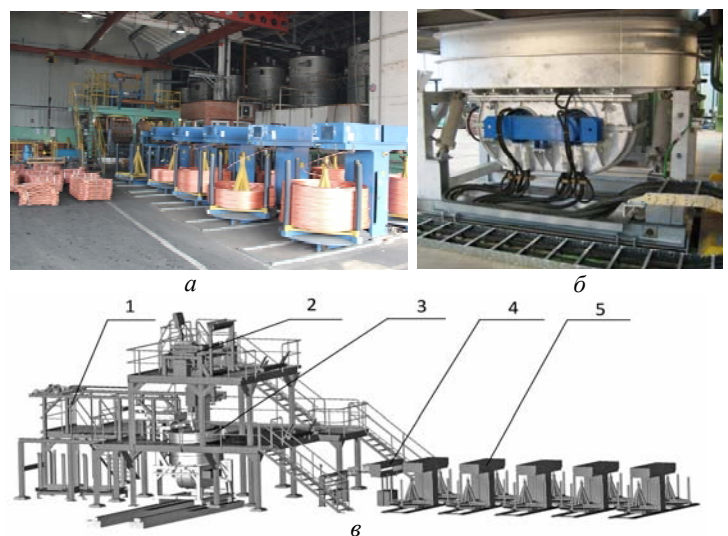


Рис. 1

© Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Белянин Р.В., 2017
ORCID ID: * <http://orcid.org/0000-0002-0200-369X>

исходит его затвердевание с образованием непрерывно-литой катанки и последующее интенсивное ее охлаждение. Индивидуальные приемные устройства 5 формируют бухты готовой катанки лака при помощи устройства для нанесения защитного покрытия 4.

Для решения вопросов модернизации технологического процесса с учетом конкретных производственных условий, выбора требуемых электрических и энергетических характеристик электро-технического оборудования и рациональных режимов его работы необходимо разработать электротепловую модель индукционной канальной печи для моделирования длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов (до 36 часов) и учета последовательной реализации основных технологических операций таких, как нагрев и плавление медного шаблона, загрузка и расплавление медных катодов, непрерывная разливка меди через кристаллизатор и др.

Цель настоящей работы состоит из: 1) разработки на основе метода мультифизического моделирования связанных электрических и тепловых цепей электротепловой модели индукционной установки восходящего вертикального литья UPCAST с учетом длительного характера протекания процессов (до 36 часов), наличия фазового перехода при плавлении медного шаблона и особенностей описанных выше основных технологических операций, 2) компьютерной реализации модели в программе Matlab/Simulink/SPS и 3) анализа полученных динамических характеристик процесса нагрева.

Далее последовательно рассматриваются вопросы построения электротепловой цепной модели и ее компьютерная реализация, включая учет отмеченных выше основных технологических операций. При этом в связи с длительно протекающим характером исследуемых физических процессов особое внимание уделяется сокращению затрат компьютерного времени, необходимого для расчета одного варианта технологического процесса. Отметим, что моделирование только электромагнитных процессов в исследуемой печи с учетом нелинейного характера эквивалентного сопротивления нагрузки выполнялось ранее авторами данной работы и описано в [2].

Принцип действия индукционной канальной печи и описание ее компьютерной электротепловой модели. Принцип действия электрического блока индукционной печи аналогичен принципу действия однофазного силового трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания [1, 8]. Вместе с тем электрические параметры канальной электропечи и обычного трансформатора заметно отличаются, что обусловлено различием их конструкций.

Конструктивно печь состоит из футерованной ванны, в которую помещается вся масса расплавленного металла, и индукционной единицы с каналом, находящейся под ванной [11, 12]. Ванна сообщается с плавильным каналом, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо. Система "индуктор – магнитопровод" называется печным трансформатором. Футеровка, обеспечивающая тепловую изоляцию расплавленного металла, представляет собой огнеупорный массив с цилиндрическим проемом, в который вставляется индуктор, витки которого навиты на два стержня замкнутого магнитопровода.

Индукционная единица объединяет печной трансформатор с каналом, в котором первоначально располагается медный шаблон, а после его расплавления этот канал заполняется расплавленной медью. Индуктор является первичной обмоткой трансформатора, а роль вторичного витка выполняет расплавленный металл, заполняющий канал и находящийся в нижней части ванны. Ток, протекающий во вторичной цепи, вызывает нагрев и плавление медного шаблона. При этом почти вся энергия выделяется в канале, имеющем малое сечение (в канале поглощается 90–95% подведенной к печи электрической энергии). Металл нагревается за счет выделенной в нем энергии джоулевого тепла, а равномерность распределения температуры во всем его объеме обеспечивается за счет тепло- и массопереноса между каналом и ванной. Движение расплавленного металла обусловлено, главным образом, действием электродинамических сил, возникающих в канале, и частично за счет конвективного переноса перегретого металла в канале во внешнюю ванну. Перегрев ограничивается некоторой допустимой величиной, лимитирующей максимальную электрическую мощность, выделяемую в канале.

К достоинствам индукционных канальных печей относятся выделение электрической энергии непосредственно в медной загрузке без использования промежуточных нагревательных элементов, интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в камере плавления, обеспечивающая выравнивание температуры по объему камеры, и высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности таких установок.

В разработанной компьютерной модели индукционной канальной печи учитываются следующие особенности технологии: 1) нагрев и плавление медного шаблона с рассмотрением фазового перехода материала; 2) загрузка медных катодов и их расплавление в плавильной печи (что связано с

дискретным увеличением массы расплавленного металла); 3) поддержание необходимой рабочей температуры в зоне расплава за счет регулирования электрической мощности, подаваемой на индуктор; 4) непрерывная разливка металла через кристаллизатор UPCAST, что вызывает непрерывное уменьшение массы расплава в канале печи.

Далее изложим подход к моделированию описанных технологических операций.

Описание электротепловой динамической модели индукционной канальной печи. В исследуемой индукционной печи непрерывно протекают связанные электромагнитные и тепловые процессы, для моделирования которых в данной работе используются эквивалентные цепи – электрическая и тепловая. Альтернативой такому подходу является использование не цепных, а полевых методов расчета, например, на основе коммерческой программы Comsol [10]. Такой подход применительно к этой канальной печи реализован в работе [3], а для случая цилиндрического индуктора – в [9]. Учитывая наличие ряда осложняющих расчет факторов (длительный режим нагрева, наличие фазовых переходов, изменение массы расплава и др.), которые сложно учесть в полевой модели индукционной печи, в данной работе отдается предпочтение численному решению мультифизической задачи на основе теории эквивалентных цепей как более простому в реализации способу моделирования сложных электротехнологических процессов [4].

Структурная связь между электрической и тепловой нелинейными задачами общей модели показана на рис. 2. При решении электромагнитной задачи рассчитываются токи и напряжения во всех элементах цепи и определяется выделяемая в медном шаблоне тепловая мощность P_{Cu} , значение которой передается в тепловую задачу. В тепловой задаче рассчитывается изменяющаяся во времени температура всех активных элементов печи, температура медного шаблона T передается в электромагнитную задачу для определения величины активного сопротивления нагрузки $R_H(T)$. Обе задачи являются существенно нелинейными. Нелинейность электромагнитной задачи обусловлена зависимостью электропроводности нагреваемого медного шаблона (или сопротивления нагрузки трансформатора) от температуры, а нелинейность тепловой задачи – зависимостью теплопроводности медного шаблона от температуры, включая учет фазового перехода при плавлении меди. В тепловой задаче учитывается периодическое увеличение массы расплава (на величину Δm – массу загружаемых в расплав медных катодов) и непрерывное уменьшение массы расплава с массовой скоростью m' вследствие непрерывной разливки металла.

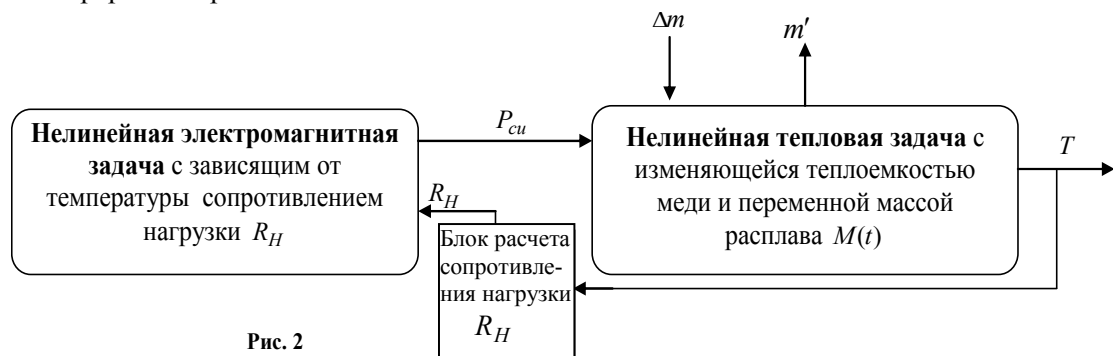


Рис. 2

Активная зона индукционной канальной печи и схемы замещения эквивалентной электрической и тепловой цепи показаны на рис. 3, где отмечены узловые точки 1, 2 и 3, которым соответствуют узлы в эквивалентной тепловой цепи. В электромагнитной задаче индуктор с расплавом моделируется однофазным линейным трансформатором, к первичной обмотке которого подключен синусоидальный источник однофазного напряжения с внутренними параметрами R_1, L_1 (включающими и параметры подводящей линии), а к вторичной – нелинейное активное сопротивление нагрузки, зависящее от температуры нагреваемого шаблона, а также от глубины проникновения магнитного поля в его объем. В действительности, при изменении в ходе индукционного воздействия температуры медного шаблона величина его активного сопротивления определяется на основании двух факторов – изменения электропроводности и изменения в связи с этим толщины скин-слоя в объеме шаблона. Это сопротивление в широком диапазоне изменения температуры вычисляется с помощью следующего выражения:

$$R_H(T) = \frac{1}{\sigma(T)} \frac{l}{\delta(\sigma)P}, \quad (1)$$

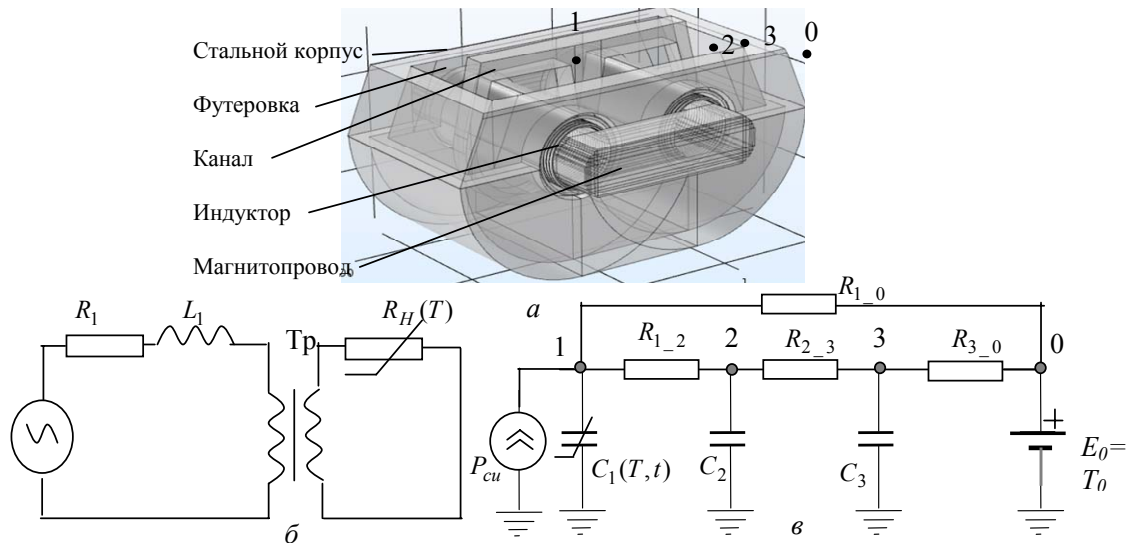


Рис. 3

где $\sigma(T)$ – электропроводность медного шаблона, зависящая от его температуры T ; P – периметр поперечного сечения медного шаблона; l – длина проводника в направлении протекания тока; $\delta(\sigma)$ – толщина скин-слоя в медном шаблоне, определяемая выражением

$$\delta = (\pi f \mu_0 \sigma(T))^{-1/2}. \quad (2)$$

Для расчета сопротивления (1) в силу относительно больших размеров шаблона используется приближение резкого скин-эффекта (2). Используемая температурная зависимость $\sigma(T)$ для меди в широком диапазоне изменения температуры аппроксимируется согласно данным работ [7] как

$$\sigma(T) = \begin{cases} 10^8 / (1,68(1 + T(0,00433 + 0,453 \cdot 10^{-6} T))), & T < T_m, \\ 10^8 / (9,1 + 0,009(T + 273,15)), & T \geq T_m, \end{cases} \quad (3)$$

где T_m – температура плавления меди. Графическая зависимость, соответствующая выражению (3), показана на рис. 4, а.

В рамках решения электромагнитной задачи в каждый момент времени рассчитываются джоулевы потери P_{Cu} , выделяемые в расплаве, значения которых передаются в эквивалентную тепловую цепь, показанную на рис. 3, в. Здесь в качестве источника тепла используется источник тока, значение которого численно равно P_{Cu} .

В силу нестационарного характера протекания теплового процесса в тепловой цепи наряду с тепловыми сопротивлениями основных активных элементов шаблона содержатся также и тепловые емкости этих элементов. Узлы в этой цепи, обозначенные как 0...3, соответствуют элементам конст-

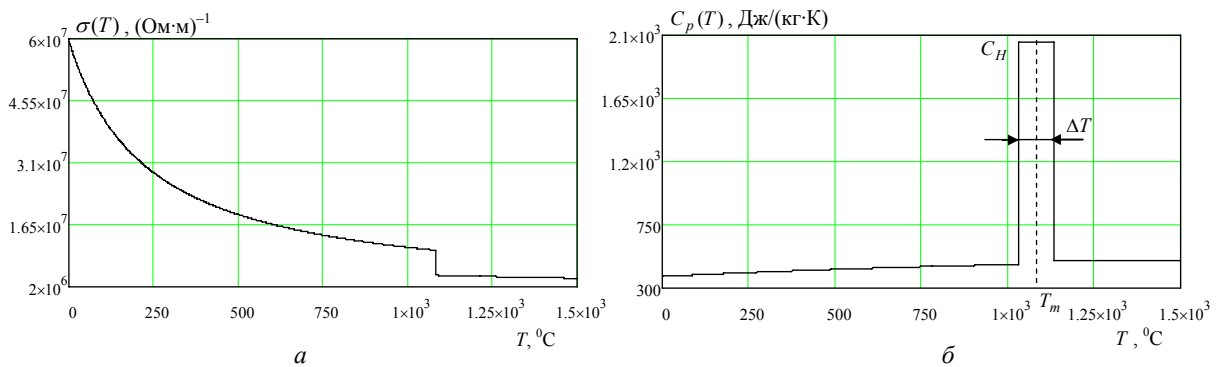


Рис. 4

рукции канала, которые показаны на рис. 3, а. Здесь 0 – узел, соответствующий окружающей среде с температурой $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (задается с помощью источника постоянного напряжения E_0); 1 – точка в области, которую занимает канал и характеризуется (согласно сделанному предположению) однородным распределением температуры; 2 – точка в области, занимаемой тепловой изоляцией канала (футеровки); 3 – средняя точка во внешнем стальном корпусе. Температура в точке 1 равна текущей температуре медного шаблона (или расплава после расплавления этого шаблона). В каждый момент времени значения температуры передаются в блок электромагнитной задачи для расчета сопротивления нагрузки $R_H(T)$ согласно выражению (1), уточнения значений тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также значения тепловой мощности, выделяемой в медном шаблоне P_{Cu} .

Расчет тепловых сопротивлений и тепловых емкостей выполняется по стандартным формулам, приведенным, например, в [6] $R=l/\lambda S$, $C=C_p m$, где l и S – соответственно толщина и площадь поперечного сечения тепловой изоляции; λ – теплопроводность материала изоляции; C_p и m – соответственно теплоемкость и масса активных элементов индукционной единицы (медного шаблона, футеровки, внешнего стального корпуса). Тепловая емкость медной заготовки рассчитывается с учетом таких факторов, как зависимость теплоемкости от температуры и зависимость массы материала от времени, т.е.

$$C_1(T, t) = C_p(T) m_{cu}(t). \quad (4)$$

Используемая зависимость $C_p(T)$ для медной заготовки в широком диапазоне изменения температуры и с учетом фазового перехода в окрестности температуры плавления T_m , построенная по данным [7], показана на рис. 4, б. Для учета фазового перехода в диапазоне температуры $T_m - \Delta T/2 < T < T_m + \Delta T/2$ использовано эквивалентное значение теплоемкости $C_H = \Delta H / \Delta T$ [5], показанное на рис. 4, б. Здесь удельная теплота плавления меди $\Delta H = 205$ кДж/кг, а ширина зоны перехода принимается равной $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$.

Уменьшение массы расплавленной меди в канале индукционной печи вследствие непрерывной разливки металла учитывалось в (4) путем изменения $m_{Cu}(t)$ по линейному закону вида

$$M(t) = m_{Cu}(t) = m_0 - m't, \quad (5)$$

где m_0 – масса расплавленного металла до начала непрерывной разливки; m' – массовый расход металла в единицу времени, измеряемый в кг/с и полагаемый известной величиной.

Таким образом, описанный выше подход учета фазового перехода в медной заготовке при ее плавлении и изменении массы расплава реализуется в эквивалентной тепловой цепи на рис. 3, в с помощью нелинейной и зависящей дополнительно от времени тепловой емкости $C_1(T, t)$, соответствующей расплавленному металлу. Разработанный подход с использованием эквивалентной нелинейной тепловой RC цепи не описывался ранее в литературе и в связи с этим может рассматриваться как элемент новизны данной работы.

Компьютерная модель рассмотренных выше связанных электротепловых процессов в индукционной канальной печи при питании от однофазного источника питания реализовывалась средствами пакета программ Matlab/Simulink/SPS и показана рис. 5. При построении модели использованы основные положения мультифизических цепей, приведенные в [4]. Электромагнитная Simulink–модель содержит источник в общем случае регулируемого по амплитуде напряжения промышленной частоты 50 Гц, модель трансформатора индукционной печи, во вторичной обмотке которого включена зависящая от температуры активная нагрузка, моделирующая электрические процессы в медном шаблоне, а после его расплавления и во всем канале печи. Для моделирования такой нагрузки разработан блок на основе управляемого источника тока, структура которого показана на верхней вставке рис. 5. Входным параметром для него является значение сопротивления, рассчитываемое по значению температуры медного шаблона в виде напряжения в узле 1 тепловой цепи.

Simulink–модель теплового процесса, содержащая RC элементы, показана в нижней части рис. 5. Здесь нумерация узлов соответствует узловым точкам в активных элементах индукционной единицы, показанных на рис. 3, а. Построения блока расчета нелинейной тепловой емкости медного шаблона выполнялось на основе управляемого источника напряжения. Структура этого блока показана на нижней вставке рис. 5. Его входными параметрами являются значения теплоемкости и массы медного шаблона (или расплава) после его расплавления, которые изменяются по линейному закону (5). В расчетах на

начальном этапе нагрева масса меди в канале (масса шаблона) принималась неизменной, а затем учитывалось увеличение этой массы за счет погружения в расплав трех медных катодов.

Учет периодичности загрузки холодных медных катодов в канал индукционной печи, их последующих нагрева и плавления осуществляется в эквивалентной тепловой цепи путем подключения дополнительных емкостей. В схеме на рис. 5 показано подключение трех таких емкостей, что соответствует погружению в расплав в определенные моменты времени трех медных катодов. Подключение емкостей осуществляется в такие определенные моменты времени, которые задаются во внутренних параметрах соответствующих коммутаторов. Используемые электрические сопротивления в цепи каждой из емкостей позволяют задать конкретное значение времени погружения медного катода в расплав и соответственно задать время протекания локального переходного теплового процесса, вызванного погружением отдельного катода - листа.

В модели на рис. 5 наряду с силовой электрической и тепловой цепями содержатся информационные блоки, с помощью которых осуществляется связь между двумя цепями. Это блоки вычисления активной мощности, блоки определения активного сопротивления нагрузки согласно выражениям (1)–(3) и блок расчета теплоемкости медного шаблона в функции температуры. Зависимость $C_p(T)$ задавалась в виде

табличных данных, соответствующих графику на рис. 4.

Особенности расчета длительно протекающих электротепловых процессов и анализ полученных результатов. Особенностью исследуемых электротепловых процессов в индукционной канальной печи является существенное различие временных характерных масштабов их протекания. Так, характерное время протекания электромагнитного процесса связано с частотой источника питания 50 Гц и составляет порядка 0,02 с. Как показывают проведенные оценки, характерное время тепловых процессов, определяемое произведением RC , составляет порядка 1 часа или 3600 с, т.е. отличается на 5 порядков от времени электромагнитного процесса. При этом необходимо учитывать, что реально протекающий на практике тепловой процесс, включающий реализацию указанных выше технологических операций, длится десятки часов. Интегрирование в пакете программ Matlab системы дифференциальных уравнений, соответствующей связанной цепи на рис. 5, должно выполняться с шагом, определяемым из электромагнитной задачи, и значит, сопряжено со значительными затратами компьютерного времени. Было установ-

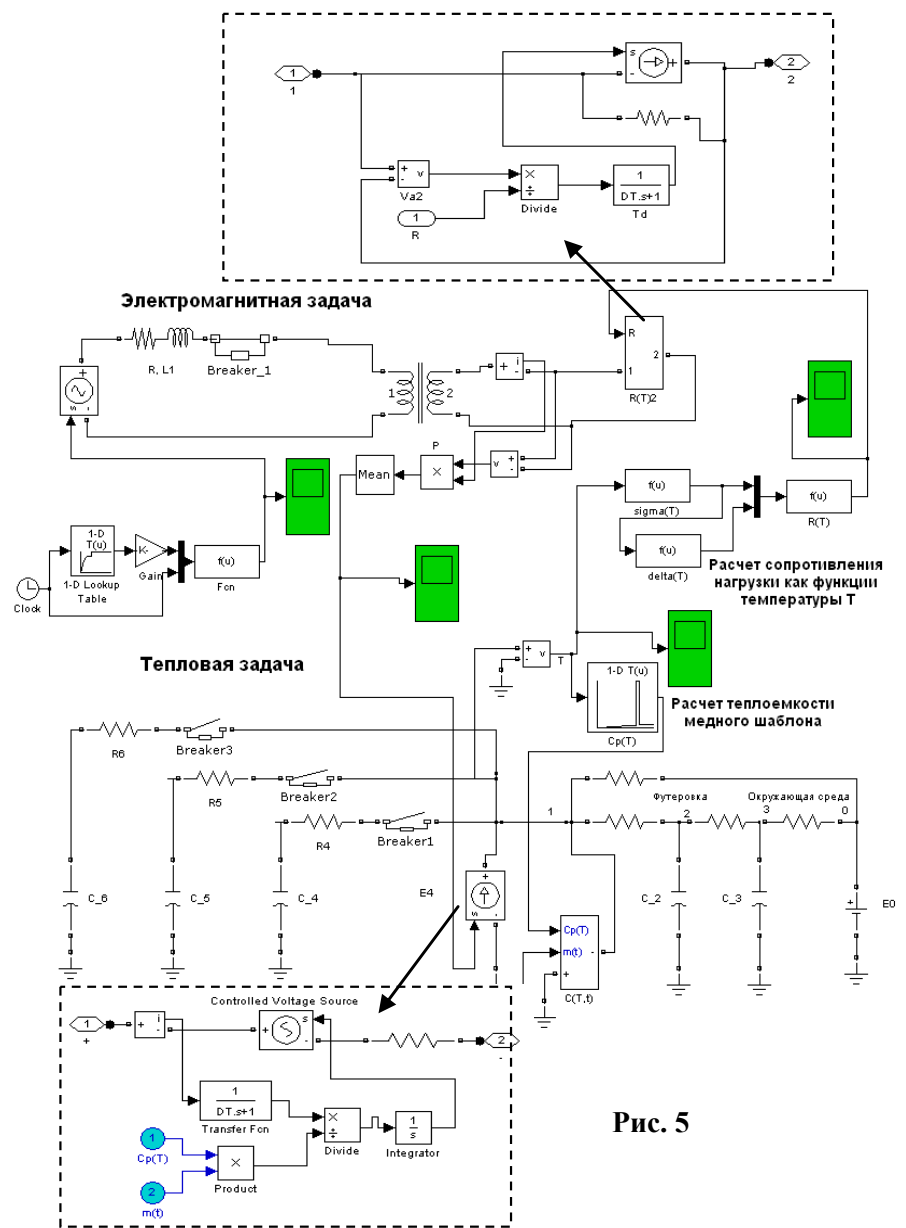


Рис. 5

лено, что для численного расчета физического процесса длительностью 10 сек с шагом, определяемым из электромагнитной задачи, необходимо приблизительно 5 мин компьютерного времени (с использованием компьютера средней мощности). Столь большие затраты времени обусловлены необходимостью выбора малого шага по времени (около 10^{-4}). Фактически такой прямой подход может использоваться только для расчета непродолжительного процесса длительностью десятки минут. Особенность рассматриваемого электромагнитного процесса состоит в том, что электрическое сопротивление нагрузки слабо изменяется в зависимости от температуры и на временном промежутке в несколько десятков электрических периодов может полагаться постоянной величиной, зависящей, в свою очередь, от температуры расплава в этом промежутке времени. В таком случае может рассматриваться два варианта связи между электромагнитной и тепловой задачами. Первый вариант – сильная связь, когда обе задачи решаются одновременно во временной области, что, как указывалось ранее, сопряжено с большими временными затратами при расчете длительно протекающих процессов. Второй вариант – слабая связь, когда тепловая задача решается во временной области, а электромагнитная задача – в частотной области (т.е. для установившегося режима) лишь в определенные моменты времени, определяемые в тепловой задаче при выполнении численного интегрирования. При этом в электромагнитной задаче сопротивление нагрузки принимает постоянные, но разные значения, зависящие от значения температуры в каждый текущий момент времени. Для реализации второго варианта расчета в комбинированной частотно-временной области необходимо установление более сложной связи между задачами, чем связь, реализованная в модели на рис. 5, с выполнением непосредственного программирования в программе Matlab. В настоящей работе рассматривается только случай сильно связанных электромагнитной и тепловой задач, решаемых во временной области, и применяется подход масштабирования времени в электромагнитной задаче, что тождественно подходу искусственного уменьшения частоты источника питания.

Подход искусственного уменьшения частоты источника электропитания. В работе для расчета длительно протекающих электротепловых процессов в канальной печи используется подход введения в электромагнитной задаче относительного времени, исходя из условия, что ее временной масштаб соизмерим с масштабом времени для тепловой задачи. Это достигается путем искусственного снижения в электромагнитной задаче частоты источника питания с одновременным пропорциональным увеличением значений всех индуктивностей в эквивалентной цепи при выполнении условия $\omega L = \text{const}$. При этом действующие значения напряжений и токов во всех элементах электрической цепи не изменяются, а значит и величина мощности джоулевых потерь в медном шаблоне остается без изменения. Вместе с тем численный расчет процессов в таком низкочастотном приближении позволяет увеличить временной шаг интегрирования связанной электротепловой задачи, а, значит, и снизить затраты компьютерного времени на расчет всего процесса. Условие применения такого способа ускорения расчета

следующее: задача является линейной или в данном случае рассматривается в линейном приближении, когда изменение величины температуры и связанное с ним изменение сопротивления нагрузки за время нескольких электрических периодов невелико (не превышает долей процента), что позволяет рассматривать электромагнитную задачу как линейную с медленно изменяющимся во времени параметром – сопротивлением нагрузки.

Результаты расчетов с использованием описанного подхода при уменьшении электрической частоты в $5 \cdot 10^4$ раз показаны на рис. 6 и 7. Время расчета всего электротеплового процесса длительностью около 28 часов (для результатов на рис. 7) при этом существенно снизилось и составило примерно 6 мин. Таким образом, с помощью разработанной модели возможно решать задачу оптимизации различных технологических процессов индукционного нагрева.

Результаты на рис. 6 получены при неизменном по амплитуде значении напряжения источника питания, а на рис. 7 реализован режим изменения этого напряжения, используемый на практике для получения оптимальных, с точки зрения реализуемой технологии, теп-

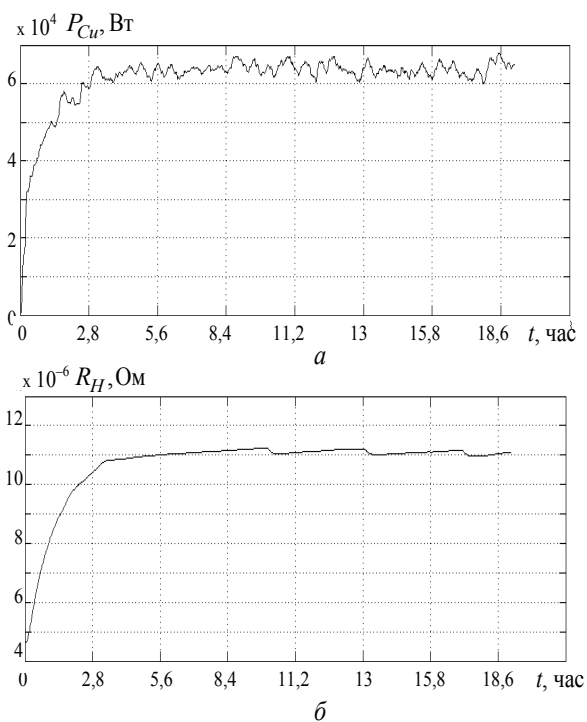


Рис. 6

ловых характеристик шаблона. На рис. 7, а показаны также результаты измерения температуры медного шаблона, нагреваемого с помощью индукционной установки, которая используется на ЗАО "Завод "Южкabelь" для производства медной катанки.

Из рис. 6 и 7 можно заключить следующее. 1) Тепловой переходный процесс при нагреве медного шаблона массой 300 кг при неизменном

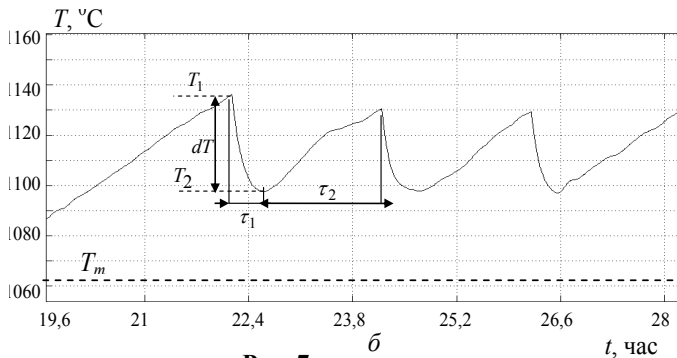
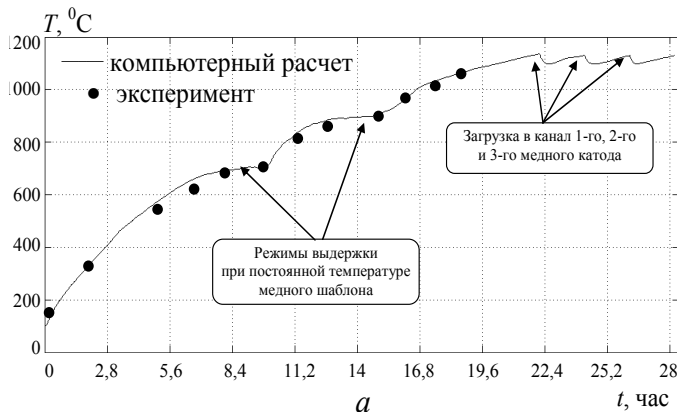


Рис. 7

по амплитуде значения напряжения источника питания (рис. 6) составляет около 3-х часов. При этом вследствие нагрева приблизительно в 3 раза возрастает эквивалентное сопротивление медного шаблона (нагрузки) и мощность джоулевых потерь в нем.

2) В кривой изменения температуры медного шаблона на рис. 7, а (линии) отображены используемые на практике режимы нагрева, включающие временные интервалы повышения температуры и выдержки печи при постоянной температуре. Полученные результаты хорошо согласуются с данными эксперимента (рис. 7, а; точки).

3) В процессе нагрева рассматривался случай погружения в расплавленный металл в определенные моменты времени трех медных катодов массой 50 кг каждый. Видно, что при этом происходит кратковременное снижение температуры расплава и его последующий нагрев (рис. 7, а). На рис. 7, б показан фрагмент графика в увеличенном масштабе, из которого видно, что снижение температуры расплава на 40°C происходит за время около $\tau_1 \approx 40$ мин.

Последующее увеличение температуры за счет индукционного нагрева происходит за время $\tau_2 \approx 1,6$ часа.

Диапазон изменения температуры при погружении медного катода, а также характерное время этого изменения зависят в выбранной тепловой модели от эквивалентных параметров RC катодов. Для получения аналитической оценки интенсивности такого колебания температуры, исходя из закона сохранения электрического "заряда" в эквивалентных тепловых емкостях, запишем равенство: $T_2(C_1 + C_4) = T_1 C_1$ или $T_2 = T_1 C_1 / (C_1 + C_4)$. Отсюда $dT = T_1 - T_2 = T_1 C_4 / (C_1 + C_4)$. Здесь T_1, T_2 – начальная и конечная температуры при погружении медного листа в расплав (рис. 7, б); C_4 – эквивалентная тепловая емкость медного листа; C_1 – эквивалентная емкость основного расплава. Время протекания переходного процесса при погружении листа или при подключении дополнительной емкости рассчитывается как $\tau_1 = 3C_4 R_4$, где R_4 – активное сопротивление в цепи C_4 . Его значение определяется по известному времени загрузки листа, которое получается равным τ_1 . В таком случае $R_4 = \tau_1 / (3C_4)$. С другой стороны время τ_1 может быть определено по экспериментальным данным изменения во времени температуры расплава. Характерное время нарастания температуры τ_2 на рис. 7, б зависит от тепловых характеристик печи и интенсивности индукционного нагрева. Отметим, что полученные расчетные данные на рис. 7, б позволяют определять предельные значения массы загружаемых медных листов, когда минимальная температура расплава будет превышать температуру плавления металла T_m , т.е. определять такие технологические режимы, при которых металл в канале всегда будет находиться в расплавленном состоянии.

Заключение. Применен и обоснован метод мультифизического моделирования длительно протекающих (десятки часов), разномасштабных по времени электромагнитных (характерное время $\sim 0,02$ с) и тепловых (характерное время ~ 1 час) переходных процессов в индукционной канальной печи для получения медной катанки. В основу метода положены связанные между собой нелинейные электрическая и тепловая схемы замещения канальной печи, учитывающие такие действующие фак-

торы как зависимость электропроводности и теплоемкости медного шаблона от температуры, наличие фазового перехода в медном шаблоне при его нагреве до температуры, превышающей температуру плавления, увеличение массы расплава вследствие периодической загрузки медных катодов в зону расплава и уменьшение массы расплава вследствие непрерывного литья медной катанки.

Показано, что протекающие при этом процессы тепло- и массопереноса могут моделироваться эквивалентной RC цепью с нелинейными и коммутлируемыми емкостями. Для компьютерной реализации данного метода использовали пакет программ Matlab/Simulink/SPS.

Показано, что непосредственное численное интегрирование во временной области двух связанных электромагнитной и тепловой задач приводит к большим затратам компьютерного времени из-за относительно малого временного шага для электромагнитной задачи. С целью снижения (на несколько порядков) затрат компьютерного времени для расчета технологического процесса индукционного нагрева предложен и реализован подход искусственного уменьшения частоты источника электропитания с одновременным пропорциональным увеличением всех индуктивностей в эквивалентной электрической цепи, исходя из условия $\omega L = \text{const}$. Показано, что справедливость такого подхода обусловлена относительно медленным изменением электрического сопротивления нагрузки с ростом температуры.

Приведены результаты расчета режима 28-часового индукционного нагрева медного шаблона, иллюстрирующие динамику изменения во времени мощности электрических потерь и температуры шаблона, включая изменение характера нагрева шаблона при плавлении и при загрузке холодных медных катодов в зону расплава, что позволяет прогнозировать технологические параметры установки в различных режимах ее работы.

1. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
2. *Золотарев В.М., Белянин Р.В., Подольцев А.Д.* Анализ электромагнитных процессов в индукционной канальной печи, используемой в кабельной промышленности // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2016. – Вип. 44. – С. 110-115.
3. *Золотарев В.М., Щерба М.А., Золотарев В.В., Белянин Р.В.* Трехмерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов индукционной плавки медного шаблона с учетом конструкции элементов установки. // Техн. електродинаміка. – 2017. – № 3. – С. 13–21.
4. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
5. *Самарский А.А., Моисеенко В.Д.* Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. выч. математики и мат. физики. – 1965. – Т. 5. – № 5. – С. 816–827.
6. *Сипайлов Г.А.* Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
7. *Столович Н.Н., Милицкая Н.С.* Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. – Минск: Наука и техника, 1975. – 160 с.
8. *Фомин Н.И., Затуловский Л.М.* Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.
9. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И.* Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 10–18.
10. *Comsol Multiphysics.* – www.comsol.com.
11. *Rantanen M.* The "UPCAST" method of producing copper wire // Wire industry. – 1976. – No 511. – Pp. 565–567.
12. UPCAST Products: официальный сайт компании UPCAST. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>

УДК 621.365.51

МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ТРИВАЛИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МІДНОЇ КАТАНКИ

А.А. Щерба¹, член-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев¹**, докт.техн.наук, **І.Н. Кучерява¹**, докт.техн.наук, **В.М. Золотарьов²**, докт.техн.наук, **Р.В. Білянін²**

¹ – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: podol@ied.org.ua

² – ПАТ "Завод "Південкабель", вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна.

Проведено мультифізичне моделювання тривалого перебігу (десятки годин) різномасштабних за часом електромагнітних та теплових перехідних процесів в індукційній канальній печі, яка використовується в технології виготовлен-

ня мідної катанки. В основу реалізації моделювання покладено пов'язані між собою нелінійні електричне та теплове еквівалентні кола, в яких враховуються такі фактори, як залежність від температури електропровідності і теплоємності мідного шаблона, наявність фазового переходу при його нагріванні до температури вище температури плавлення, періодичне завантаження холодних мідних катодів у зону розплаву та безперервне лиття мідних заготовок. Показано, що динамічні процеси тепло- і масопереносу можуть моделюватися еквівалентним тепловим колом з нелінійними та комутуючими ємностями. Комп'ютерна реалізація методу виконується в програмі Matlab/Simulink/SPS. Для зниження витрат комп'ютерного часу запропоновано метод штучного зменшення частоти джерела електроживлення з одночасним пропорційним збільшенням усіх індуктивностей в еквівалентному електричному колі. Наведені результати теплових розрахунків дозволяють вибирати раціональні технологічні режими та параметри установки. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: індукційна канална піч, електромагнітні процеси, теплові процеси, фазовий перехід при плавленні заготовки, мультифізичне коло, комп'ютерне моделювання.

MODELING AND CONTROL OF LONG-TERM ELECTROMAGNETIC AND THERMAL PROCESSES IN INDUCTION CHANNEL FURNACE FOR COPPER ROD PRODUCTION

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev¹, I.M. Kucheriava¹, V.M. Zolotarev², R.V. Bilianin²

¹ - Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: podol@ied.org.ua

² - PJSC Yuzhicable,
Avtozenna st., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine.

The paper presents multiphysics modeling of long-term (tens of hours) electromagnetic and thermal processes with different transient times that run in induction channel furnace used in the technology of copper wire rod production. The modeling is based on the coupled nonlinear equivalent electrical and thermal circuits, taking into account such factors as the dependence of the electrical conductivity and heat capacity of heated copper gauge on temperature, the phase transition at heating to a temperature above the melting point, the periodic injection of cold copper cathodes into the molten metal and the continuous casting of copper workpieces. As shown, the dynamic processes of heat- and mass- transfer in the furnace can be modeled by equivalent thermal circuit with nonlinear and commutated capacitances. The method is realized by Matlab/Simulink/SPS tools. The approach of artificial decrease of power supply frequency with simultaneous proportional increase of all inductances in the equivalent electrical circuit is proposed and implemented to reduce the computer time. The attained results of thermal computations give a possibility to define the rational technological conditions and parameters of the installation. References 12, figures 7.

Key words: induction channel furnace, electromagnetic processes, thermal processes, phase transition at melting of workpiece, multiphysics circuit, computer modeling.

1. Vainberg A.M. Induction melting furnaces. – Moskva: Energiia, 1967. – 416 p. (Rus)
2. Zolotarev V.M., Bilianin R.V., Podoltsev A.D. Analysis of electromagnetic processes in induction furnace // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2016. – No 44. – Pp. 110–115. (Rus)
3. Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Zolotarev V.V., Bilianin R.V. 3D Modeling of electromagnetic and thermal processes of copper template taking into account the design of the installation elements // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2017. – No 3. – Pp. 13–21. (Rus)
4. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2015. – 305 p. (Rus)
5. Samarskii A.A., Moiseenko V.D. Economic scheme of through calculation for multidimensional Stephan problems // Jurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki. – 1965. – Vol. 5. – No 5. – Pp. 816–827. (Rus)
6. Sipailov G.A. Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines. – Moskva: Vysshaia shkola, 1989. – 239 p. (Rus)
7. Stolovich N.N., Minitskaia N.S. Temperature dependences of thermophysical properties of some metals. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1975. – 160 p. (Rus)
8. Fomin N.I., Zatulovskii L.M. Electric furnaces and induction heating installations. – Moskva: Metallurgii, 1979. – 247 p. (Rus)
9. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M., Ushakov V.I. Computer modeling of electrothermal processes and thermomechanical stress at induction heating of moving copper ingots // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 2. – Pp. 10–18.
10. Comsol Multiphysics. – www.comsol.com.
11. Rantanen M. The 'UPCAST' method of producing copper wire // Wire industry. – 1976. – No 511. – Pp. 565–567.
12. UPCAST Products – Available at: <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html> (Accessed 20.02.2017)

Надійшла 14.03.2017
Остаточний варіант 04.05.2017