

# ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА, ЗБАГАЧЕННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 681.5:519.24

Д.А. Дёмин, канд. техн. наук, доц.

Национальный технический университет „Харьковский  
политехнический институт“, г. Харьков, Украина,  
e-mail: nauka@jet.com.ua

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ ВАННЫ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ-МИКСЕРЕ

D.A. Demin, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,  
Kharkiv, Ukraine, e-mail: nauka@jet.com.ua

## SYNTHESIS OF OPTIMAL TEMPERATURE REGULATOR OF ELECTROARC HOLDING FURNACE BATH

**Цель.** Выбор процедуры синтеза оптимального регулятора температуры расплава в электродуговой печи-миксере, получение математического описания, позволяющего решить задачу синтеза регулятора, и разработка способов оценивания температуры расплава по ходу процесса до выдачи расплава на литейный конвейер.

**Методика.** Методом решения поставленной задачи оптимального управления был выбран принцип максимума Понтрягина, а для оценивания параметров, описывающих объект управления, использовалась процедура получения уравнения регрессии.

**Результаты.** Сформулированы проблемы, без решения которых не представляется возможным решение задачи синтеза оптимального регулятора температуры ванны электродуговой печи, работающей совместно с литейным конвейером. Показано, что среди них может быть выделено отсутствие математического описания объекта управления и сложность непосредственного оценивания параметров, описывающих процесс. Предложена процедура оценивания температуры ванны по ходу процесса термовременной обработки расплава, находящегося в электропечи-миксере, основанная на построении уравнения регрессии, описывающей температурный профиль ванны, и позволяющая преодолеть основную сложность синтеза оптимального регулятора, связанную с невозможностью измерения параметров, описывающих объект управления.

**Научная новизна.** Предложенный вариант математического описания объекта управления позволяет решить задачу синтеза оптимального регулятора температуры в условиях, когда параметры, описывающие процесс, не подлежат непосредственному измерению. Применение полученного при этом оптимального регулятора позволяет получать оптимальные, в смысле быстрогодействия, переходные процессы в объекте регулирования.

**Практическая значимость.** Состоит в том, что применение предложенного регулятора на промышленных электродуговых печах, выполняющих роль миксера на плавильно-заливочном участке цеха, обеспечивает возможность доведения химического состава расплава до заданного за кратчайших срок при минимальных энергетических затратах. Следствием этого является снижение возможных простоев литейного конвейера по причине отсутствия качественного расплава и снижение затрат технологической электроэнергии на этапе термовременной обработки расплава.

**Ключевые слова:** регулятор, синтез, уравнение регрессии, температурный профиль, ванна электропечи, технологическая схема, объект управления

**Введение.** Одной из основных задач управления электродуговыми печами, работающими совместно с литейным конвейером и выполняющими роль миксера, является задача построения оптимальной технологической схемы процесса термовременной обработки [1]. Такая технологическая схема позволяет установить моменты включения-отключения печи для выдачи расплава на конвейер и количество расплава, которое необходимо выдавать в данный момент вре-

мени. В периоды времени, соответствующие выдержке расплава в печи в количестве, заданном технологической схемой, происходят физико-химические процессы в системе „расплав-шлак-футеровка“. Данные процессы представляют собой окислительно-восстановительные реакции, протекающие в объеме расплава и на границе раздела фаз, и вызывающие изменение содержания каждого элемента химического состава. Особенно развитие этих процессов зависит от температуры ванны. В результате этого химический состав сплава в момент выдачи очередной пор-

ции расплава на конвейер может отличаться от необходимого состава. Так как содержание химического элемента в сплаве невозможно измерить непосредственно, для решения задачи оптимального управления описанными процессами могут быть использованы уравнения регрессии, полученные методом искусственной ортогонализации по малой выборке нечётких данных – суть содержания каждого элемента химического состава в расплаве [2–8].

Если располагать математической моделью, описывающей изменение во времени содержания каждого элемента химического состава, можно построить оптимальное управление, переводящее систему за минимальное время из произвольного начального состояния в заданное конечное состояние. При этом начальное состояние определяется химическим составом расплава после выдачи определённой его порции из печи, а конечное – требуемым химическим составом сплава, получаемым на основе адекватных уравнений регрессии после анализа поверхности отклика [9]. В качестве такой модели целесообразно взять кинетические уравнения, описывающие изменение во времени содержания каждого элемента в расплаве при различной массе расплава в печи (соответственно, при разной глубине ванны и площади поверхности раздела фаз металл-шлак) и разной температуре ванны. Процедура оценивания параметров таких уравнений предложена в работе [10].

Не решенным вопросом в контексте сформулированной задачи является регулирование температурного режима ванны как фактора, имеющего большое значение не только для управления химическим составом сплава, но и для энергосбережения в процессе плавки – ведь КПД электродуговой печи в период перегрева и доводки не превышает 25%.

Решение вопроса о регулировании температуры ванны предполагает наличие процедуры синтеза оптимального регулятора, при этом оптимальность понимается в смысле возможности восстановления регулятором температуры ванны до заданных значений после выдачи очередной порции расплава на конвейер за минимальное время.

**Постановка задачи.** Сложность синтеза оптимального регулятора температуры ванны связана с рядом причин, среди которых могут быть выделены: отсутствие математического описания объекта и невозможность непосредственного измерения температуры ванны по ходу технологического процесса. Преодоление этих сложностей – главная задача, решение которой позволило бы предложить процедуру синтеза оптимального регулятора.

**Цель работы.** Получение математического описания объекта управления, способов оценивания температуры по ходу технологического процесса термовременной обработки расплава в печи-миксере до выдачи его на конвейер, и выбор процедуры синтеза оптимального регулятора.

**Изложение основного материала.** Учитывая невозможность непрерывного контроля температуры по ходу технологического процесса и неодинако-

вость температуры расплава по глубине ванны и по горизонтам, необходим такой метод расчета температурного поля расплава, который обеспечивает по данным, доступным для контроля, адекватные результаты и не требует непрерывного контроля температуры. Фактически такими данными являются измерения температуры расплава при выпуске его из печи в заданный момент времени. Максимальная температура расплава достигается непосредственно в зоне действия дуг, т.е. в зоне, ограниченной максимальным диаметром расплава электродов. Теплоемкость чугуна невысока, большая часть тепла начинает рассеиваться по внутреннему пространству печи, поэтому температура ванны начинает падать вглубь и по радиусу горизонта. Для определения фактической температуры расплава в моменты времени, заданные технологической схемой процесса, необходимо контролировать величину температуры на каждом горизонте зеркала расплава, зависящего от массы расплава в данный момент времени. Внутренний профиль дуговой печи соответствует наружному профилю поверхности расплава (рис. 1).

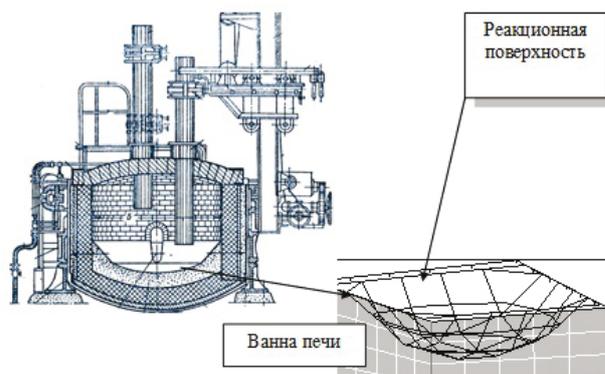


Рис. 1. Внутренний профиль ванны электродуговой печи-миксера

Зависимость массы расплава в печи от глубины ванны на примере электродуговой печи-миксера ёмкостью 10т. показаны на рис. 2.

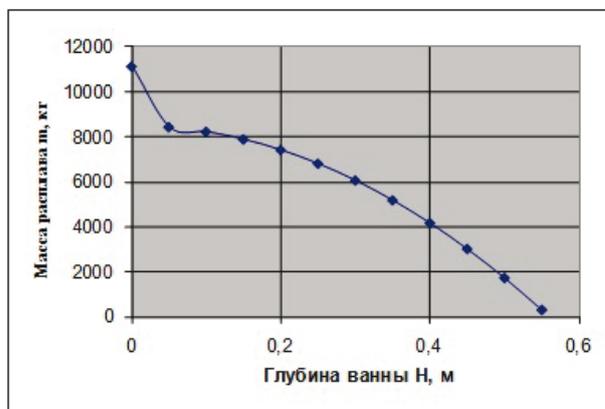


Рис. 2. Зависимость массы расплава в печи от глубины ванны для дуговой печи ёмкостью 10т.

Как было отмечено выше, температура расплава после выпуска определенной его порции в ковш начинает быстро снижаться, что связано с уменьшением объема ванны – скорость охлаждения тем больше, чем меньше объем ванны и, следовательно, её глубина. Для восстановления заданного температурного режима печь включается на подогрев, и расплав опять нагревается до заданной температуры. При следующем выпуске расплава его температура соответствует заданной, однако температура, фиксируемая пирометром, соответствует температуре зеркала металла, горизонт которого стал ниже. Между двумя соседними измерениями существует временная сдвигка, в течение которой изменился уровень зеркала расплава. Результат измерения, полученный при этом, может быть использован для определения фактической температуры расплава на глубине

$$H_i = H_{i-1} - \Delta H,$$

где  $H_i$  – координата высоты зеркала металла в момент выпуска расплава  $t_i$ ;  $H_{i-1}$  – координата высоты зеркала металла в предыдущий момент времени выпуска  $t_{i-1}$ ;  $\Delta H$  – перепад высоты зеркала расплава за время между соседними выпусками расплава.

Если удастся получить уравнение регрессии, связывающее время и температуру, в виде полинома степени  $n$ , то будет справедливо следующее выражение

$$\frac{dT}{dt} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i t^i = \frac{dT}{dt} \frac{dh}{dh} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i t^i = \frac{dT}{dh} \frac{dh}{dt} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i t^i, \quad (1)$$

где  $a_i$  – оценки коэффициентов уравнения регрессии;  $i=0, \dots, n$

Преобразование уравнения (1) приводит его к виду

$$\frac{dT}{dh} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i t^i,$$

где  $b_i$  – оценки коэффициентов уравнения регрессии после преобразования;  $i=0, \dots, n$

Такая процедура оценивания температуры позволяет построить температурный профиль ванны, показанный на примере электродуговой печи-миксера ёмкостью 10т. на рис. 3.

Теперь, когда появляется возможность оценивания температуры, можно приступить к математическому описанию объекта управления – температурного режима ванны. Оно может быть выполнено из следующих соображений. Отбор из печи некоторого количества расплава приводит к увеличению количества тепла  $Q_2$ , отдаваемого ванной. Задачей управления является поддержание заданного значения температуры  $T_0$  при возможных изменениях потерь тепла ванной  $Q_2$ . Приход тепла в ванну  $Q_1$  осуществляется от электрических дуг при включенном на выбранной ступени напряжения трансформаторе. Регулирование осуществляется изменением величины  $Q_1$ , определяемой напряжением  $U$  выбранной ступени

напряжения трансформатора, переключение ступени напряжения осуществляется приводом  $D$ .

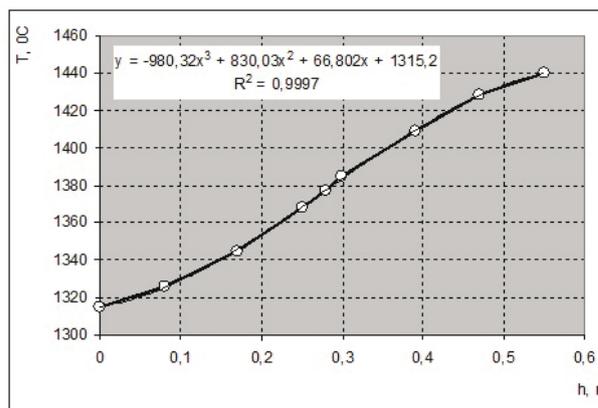


Рис. 3. Температурный профиль ванны электродуговой печи:  $h$  – высота зеркала расплава (соответствует  $x$  в уравнении регрессии);  $T$  – температура расплава (соответствует  $y$  в уравнении регрессии)

Результатом решения задачи поиска оптимального управления является определение закона изменения  $U(t)$ , при котором любое отклонение температуры ванны, вызываемые изменением её объема, устраняется за минимальное время. Дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры ванны, вызванное изменением её объема, с учетом описанной постановки задачи, может быть представлено в виде

$$C_m \frac{dT}{dt} = Q_1 - Q_2, \quad (2)$$

где  $C_m$  – теплоёмкость ванны;  $Q_1$  – тепло, подводимое к ванне от электрических дуг;  $Q_2$  – тепло, отдаваемое ванной вследствие уменьшения её объема.

Так как тепло, подводимое к ванне от электрических дуг, пропорционально напряжению трансформатора, уравнение, описывающее закон изменения величины  $Q_1$  в зависимости от напряжения трансформатора, имеет вид

$$\frac{dQ_1}{dt} = kU,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий совокупное влияние характеристик трансформатора и привода переключения ступеней напряжения трансформатора.

Величина напряжения  $U$  ограничена

$$-U_0 \leq U \leq U_0.$$

Переменные объекта управления в стационарном режиме связаны следующим образом

$$T = T_0, \quad \Delta Q_1 = \Delta Q_2.$$

В качестве характеристики температурного режима ванны можно принять величину отклонения температуры ванны от заданного значения:

$\Delta T = T - T_0$ . Тогда для стационарного состояния, т.е. интервала времени выдержки расплава в печи массой  $m$  до выдачи очередной его порции на конвейер в соответствии с технологической схемой термовременной обработки, справедливо соотношение

$$\Delta T = 0.$$

С учетом описанных выше рассуждений, целесообразно ввести новые переменные

$$x_1 = \Delta Q_1, \quad x_2 = C_m \Delta T, \quad q = \Delta Q_2, \quad u = kU. \quad (3)$$

Тогда система уравнений (2) может быть переписана в виде

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1 - q \end{cases}. \quad (4)$$

Ограничения на управление, при этом, могут быть записаны в виде

$$-u_0 \leq u \leq u_0. \quad (5)$$

Для поиска оптимального управления при таком описании объекта можно воспользоваться принципом максимума Понтрягина и задача может быть сформулирована следующим образом: для процесса, описываемого системой уравнений (4) при наличии ограничений на управление (5), найти закон изменения  $u(t)$ , при использовании которого процесс из произвольного начального состояния

$$x_1(0) = x_1^{(0)}, \quad x_2(0) = x_2^{(0)} \quad (6)$$

перейдет в конечное состояние

$$x_1(\tau_k) = q, \quad x_2(\tau_k) = 0 \quad (7)$$

за минимальное время  $\tau_k$ .

Гамильтониан имеет вид

$$H = \lambda_1 u + \lambda_2 (x_1 - q). \quad (8)$$

Так как управление  $u$  входит линейно в уравнение (4), описывающее процесс, оптимальное управление будет кусочно-постоянной функцией  $u(t)$ , принимающей в интервалах постоянства предельные значения из ограничений (5). При этом максимальное значение функции (8) достигается в том случае, если при выборе знака управляющего воздействия соблюдается следующее условие

$$u_{opt} = \begin{cases} u_0 & \text{если } \lambda_1 > 0 \\ -u_0 & \text{если } \lambda_1 < 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Или  $u_{opt}(t) = u_0 \operatorname{sgn} \lambda_1$ ,

где  $\operatorname{sgn} x = \begin{cases} +1 & \text{если } x > 0 \\ 0 & \text{если } x = 0 \\ -1 & \text{если } x < 0 \end{cases}$ .

Система дифференциальных уравнений для функций  $\lambda_1(t)$  и  $\lambda_2(t)$  имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = -\lambda_2, \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Непосредственным интегрированием (10) получаются функции

$$\lambda_1(t) = -C_2 t + C_1, \quad \lambda_2(t) = C_2.$$

Так как функция  $\lambda_1(t)$  – линейная функция  $t$  и поэтому может менять свой знак не более одного раза при изменении  $t$ , оптимальное управление, описываемое уравнением (9), имеет не более одной точки переключения с одного предельного значения в другое. В интервалах постоянства управления система (3) может быть проинтегрирована

$$\begin{cases} x_1(t) = ut + C_3 \\ x_2(t) = \frac{1}{2}ut^2 + C_3 t + C_4 \end{cases}. \quad (11)$$

Уравнение траектории процесса в координатах „ $x_1 - x_2$ “ имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2 + C - \frac{q^2}{2u}, \quad (12)$$

где постоянная интегрирования  $C$  может быть найдена из условия, что траектория, описываемая уравнением (12), проходит через заданную точку  $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$  фазовой плоскости

$$C = x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2 + \frac{q^2}{2u}.$$

Подстановка (12) в (11) даёт

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2 + x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2,$$

где второе и третье слагаемые определяют постоянную  $C_0$ , имеющую важное значения для определения траектории, по которой можно попасть в конечное состояние

$$C_0 = x_2^{(0)} - \frac{1}{2u}(x_1^{(0)} - q)^2. \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает на фазовой плоскости траекторию, проходящую через произвольную точку с координатами  $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ , в том числе и траекторию, проходящую через конечную точку, координаты которой заданы условиями (7). Следовательно, уравнение траектории, по которой можно попасть в конечное состояние, имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u}(x_1 - q)^2. \quad (14)$$

Таким образом, уравнение (14) описывает совокупность точек фазовой плоскости, из которых переход в конечное состояние (7) возможен при использовании постоянного управления.

Если  $u = u_0$ , то уравнение (14) имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2.$$

Если  $u = -u_0$ , то уравнение (14) имеет вид

$$x_2 = -\frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2.$$

Вид траектории при положительном и отрицательном управлении показан на рис. 4.

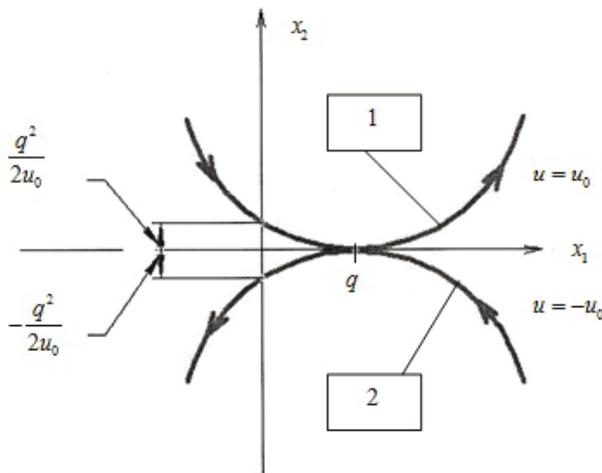


Рис. 4. Вид траектории при положительном (1) и отрицательном (2) управлении

Левые и правые части парабол 1 и 2 соответственно описывают совокупность точек фазовой плоскости, из которых можно перейти в конечное состояние, не меняя знака управления. Из любых других точек фазовой плоскости перевод системы в конечное состояние возможен только при использовании управляющего воздействия, имеющего точку переключения с одного предельного значения (5) в другое. Общее уравнение этой кривой имеет вид

$$x_2 = \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1). \quad (15)$$

Уравнение (15) описывает кривую, являющуюся геометрическим местом точек переключения оптимального управления. Следовательно, любая траектория процесса, для которой линией переключения является левая ветвь параболы 1, в начальный момент должна иметь отрицательное значение управляющего воздействия

$$x_2^{(0)} + \frac{1}{2u_0}(x_1^{(0)} - q)^2 > 0.$$

Как следует из уравнения (15), условием расположения точки  $(x_1, x_2)$  выше линии переключения является условие

$$x_2 - \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) > 0, \quad (16)$$

а ниже линии переключения – условие

$$x_2 - \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) < 0. \quad (17)$$

Полученные таким образом траектории совместно с линией переключения являются искомыми оптимальными траекториями, по которым процесс из произвольного начального состояния (6) переводится в заданное конечное состояние (7) за минимальное время  $\tau_k$ .

Оптимальное управление задается условиями (16) и (17) для любой точки фазовой плоскости. Таким образом, оптимальное управление в аналитической форме имеет вид

$$u_{opt} = u_0 \operatorname{sgn} \left[ \frac{1}{2u_0}(x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) - x_2 \right].$$

Момент переключения  $\tau_s$  и общее время переходного процесса  $\tau_k$  могут быть определены совместным решением уравнений (11) и (15).

На рис. 5 показан график изменения параметров процесса регулирования температуры во времени.

Уравнения для определения момента переключения  $\tau_s$  и общего времени переходного процесса  $\tau_k$  имеют вид

$$\tau_s = \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] + \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2}(x_1^{(0)} - q) \left[ \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|};$$

$$\tau_k = \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] +$$

$$+ 2 \sqrt{\frac{1}{u_0} \left| x_2^{(0)} + \frac{1}{2}(x_1^{(0)} - q) \left[ \frac{x_1^{(0)} - q}{u_0} \operatorname{sgn} \left[ x_2^{(0)} - \frac{(x_1^{(0)} - q)^2}{2u_0} \operatorname{sgn}(q - x_1^{(0)}) \right] \right] \right|}$$

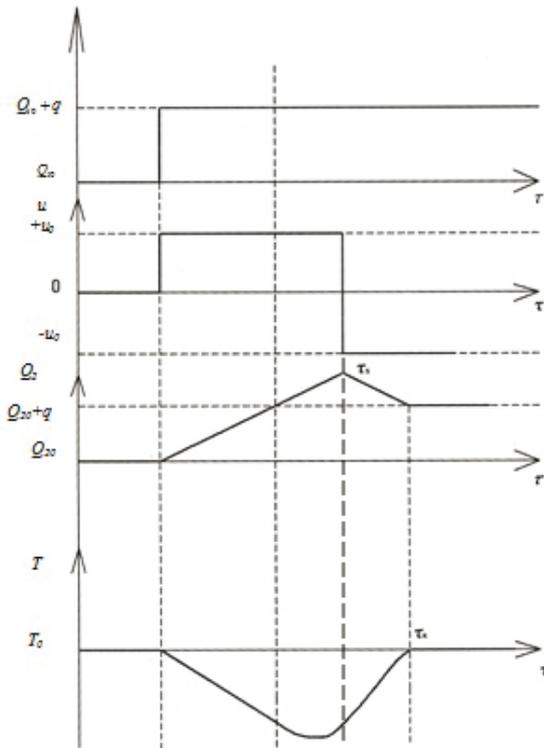


Рис. 5. График изменения параметров процесса регулирования температуры во времени:  $\tau$  – время;  $T$  – текущая температура расплава;  $T_0$  – заданная температура расплава;  $Q_{10}$  – количество тепла, подводимого к ванне;  $Q_{20}$  – количество тепла, отдаваемого ванной вследствие уменьшения её объёма;  $(Q_{20} + q)$  – количество тепла, введение которого компенсирует потери тепла вследствие охлаждения ванны;  $\tau_s$  – момент переключения;  $\tau_k$  – общее время переходного процесса

Применение описанного регулятора позволяет получать оптимальные, в смысле быстродействия, переходные процессы в объекте регулирования.

**Выводы:**

1. Для оценивания температуры ванны по ходу процесса термовременной обработки расплава, находящегося в электропечи-миксере, может быть применено уравнение регрессии, описывающее температурный профиль ванны, что позволяет преодолеть основную сложность синтеза оптимального регулятора, связанную с невозможностью измерения параметров, описывающих объект управления.

2. Предложенный вариант математического описания объекта управления позволяют решить задачу синтеза оптимального регулятора температуры в условиях, когда параметры, описывающие процесс, не подлежат непосредственному измерению. Применение полученного при этом оптимального регулятора позволяет получать оптимальные, в смысле быстродействия, переходные процессы в объекте регулирования.

**Список литературы / References**

1. Демин Д.А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой / Демин Д.А. // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – №1. – С.15–24.
2. Demin, D.A. (2011), “Methodology of functional formation for the problem of electrosmelting optimal control”, *Technologicheskii audit i rezervy proizvodstva*, no.1, pp. 15–24.
3. Серая О.В. Оценивание параметров уравнения регрессии в условиях малой выборки / Серая О.В., Демин Д.А. // Східно-Європейський журнал передових технологій – 2009. – №6/4(42). – С. 14–19.
4. Seraya, O.V. and Demin, D.A. “Estimation of parameters of the regression equation in the conditions of small sample”, *Eastern European journal of enterprise technologies*, 2009. – № 6/4 (42). – P. 14–19.
5. Daviers, R. and Hutton, B. (1975), “The effect of errors in the independent variables in linear regression”, *Biometrika*, Vol.62, pp. 383–396.
6. Durbin, I. (1954), “Errors in variables”, *Rev. Int. Stst. Inst*, Vol.22, pp. 23–41.
7. Fuller, W. (1980), “Properties of some estimators for the errors in variables model”, *Ann. Stat.*, Vol.8, pp. 407–418.
8. Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике: пер. с франц. В.Б. Тарасова / Д. Дюбуа, А. Прад; под ред. С.А. Орловского. – М.: Радио и связь, 1990. – 286с.
9. Dubois, D. and Prad, A. (1990), *Teoriya vozmozhnoyey. Prilozheniye k predstavleniy znaniy v informatike* [Possibility Theory. Application to Knowledge Representation in Computer Science], transl. from French. By V.B. Tarasova, edited by S.A. Orlovsky, Radio and communication, Moscow, Russia.
10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков – СПб.: БХВ–Петербург, 2003. – 736 с.
11. Leonenkov, A.V. (2003), *Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy Modeling in

MATLAB and fuzzyTECH Environment], BHV–Petersburg, St. Petersburg, Russia.

8. Раскин Л.Г. Нечеткая математика: моногр. / Л.Г. Раскин, О.В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.

Raskin, L.G. and Seraya, O.V. (2008), *Nechetkaya matematika* [Fuzzy Math], monograph, Parus, Kharkiv, Ukraine.

9. Демин Д.А. Синтез систем управления технологическими процессами электродуговой плавки чугуна / Демин Д.А. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2012. – №2/10(56). – С. 4–9.

Demin, D.A. (2012), “Synthesis of the control systems of technological processes of electroarc cast iron melting”, *Eastern European journal of enterprise technologies*, no.2/10 (56), pp. 4–9.

**Мета.** Вибір процедури синтезу оптимального регулятора температури розплаву в електродуговій печі-міксері, отримання математичного опису, що дозволяє вирішити задачу синтезу регулятора, і розробка способів оцінювання температури розплаву за ходом процесу до видачі розплаву на ливарний конвеєр.

**Методика.** Методом вирішення поставленої задачі оптимального керування був обраний принцип максимуму Понтрягіна, а для оцінювання параметрів, що описують об'єкт управління, використовувалася процедура отримання рівняння регресії.

**Результати.** Сформульовано проблеми, без вирішення яких не представляється можливим рішення задачі синтезу оптимального регулятора температури ванни електродугової печі, що працює сумісно з ливарним конвеєром. Показано, що серед них може бути виділено відсутність математичного опису об'єкта управління та складність безпосереднього оцінювання параметрів, що описують процес. Запропоновано процедуру оцінювання температури ванни за ходом процесу термогодинної обробки розплаву, що знаходиться в електродуговій печі-міксері, засновану на побудові рівняння регресії, що описує температурний профіль ванни, та дозволяє подолати основну складність синтезу оптимального регулятора, пов'язану з неможливістю вимірювання параметрів, що описують об'єкт управління.

**Наукова новизна.** Запропонований варіант математичного опису об'єкта управління дозволяє вирішити задачу синтезу оптимального регулятора температури в умовах, коли параметри, що описують процес, не підлягають безпосередньому виміру. Застосування отриманого при цьому оптимального регулятора дозволяє отримувати оптимальні, у розумінні швидкодії, перехідні процеси в об'єкті регулювання.

**Практична значимість.** Полягає в тому, що застосування запропонованого регулятора на промислових електродугових печах, що виконують роль міксера на плавильно-заливальній дільниці цеху, забезпечує можливість доведення хімічного складу розплаву до заданого за найкоротший термін при мінімальних енергетичних витратах. Наслідком цього є

зниження можливих простоїв ливарного конвеєра з причини відсутності якісного розплаву та зниження витрат технологічної електроенергії на етапі термогодинної обробки розплаву.

**Ключові слова:** регулятор, синтез, рівняння регресії, температурний профіль, ванна електродугової, технологічна схема, об'єкт управління

**Purpose.** To choose a procedure of synthesis of optimal regulator of melting temperature in electroarc holding furnace, obtain mathematical description that will provide the solution of regulator synthesis problem, and design the melting temperature evaluation methods to use during the process before the melt handling over on the casting conveyor.

**Methodology.** To solve the problem of optimal control we have chosen the principle of Pontryagin's maximum. To evaluate the parameters describing the control object, the procedure of regression equation obtaining was used.

**Findings.** The article defines the problems to solve for synthesis of optimal temperature regulator of the electroarc furnace bath, working along with casting conveyor. The problems include the lack of mathematical description of the control object and the complexity of immediate estimation of the parameters describing the process. The procedure of estimation of the bath temperature based on the plotting of the regression equation has been suggested. It takes place during the temporary thermic process of melt treatment in a holding furnace. It describes the temperature profile of the bath and allows to surmount the main complexity of the synthesis of optimal regulator associated with the inability to measure the parameters describing the control object.

**Originality.** The suggested pattern of mathematical description of the control object allows solving the problem of synthesis of optimal temperature regulator when the parameters describing the process are not subject to direct measurement. The use of the obtained optimal regulator allows getting optimal transients in the control object.

**Practical value.** The application of the suggested regulator in industrial electroarc furnaces, operating as an electric shaker on the melting-priming area of a workshop, provides the possibility of bringing the melt chemical composition to the designated in the shortest time with minimal power expenses. This results in the reduction of possible downtime of casting conveyor caused by the absence of the melt of the proper quality, and the reduction of power expenses at the stage of thermo-temporal processing of the melt.

**Keywords:** regulator, synthesis, regression equation, temperature profile, bath of the furnace, flowsheet, control object

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Л.Г. Раскінім. Дата надходження рукопису 03.08.12.