

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771

М.Д. Климовицкий

Московский государственный вечерний металлургический институт

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАГРЕВОМ ЗАГОТОВОК В КОМПЛЕКСЕ «ПЕЧЬ-СТАН»

Аннотация. Решается задача управления нагревом металла в печи, основанная на применении алгоритма динамической оптимизации текущих экономических потерь. При расчете оптимальных управлений учитывается как фактическое состояние заготовок, так и их прогнозируемое состояние через время Δt .

Ключевые слова: нагрев металла, управление, динамическая оптимизация.

M.D. Klimovitsky

Moscow state evening metallurgical Institute

OPTIMAL METAL HEATING MANAGEMENT IN COMPLEX “FURNANCE-ROLLING-MILL”

Abstract. Solving the problem of metal heating management established on use of scheme of dynamic optimization of current economic losses. Real heat condition of a raw part as well as projected state of it through period Δt are to be considered during calculation of optimal management.

Keywords: control, metal heating, dynamic optimization.

E-MAIL: md Klim@yandex.ru

Объектом управления является методическая печь листопрокатного стана, имеющая локальные системы автоматики для поддержания требуемых режимов работы печи. Участок стана печь – черновая клеть оснащен подсистемой слежения за заготовками, которая контролирует положение каждой заготовки при ее продвижении по печи и на линии печь – пирометр за черновой клетью.

В систему управления нагревом металла в печи передается необходимая технологическая информация о параметрах заготовки, требуемой температуре и времени нагрева, режиме прокатки в черновой клетке, температуре металла, а также информация о моменте начала и длительности простоя.

В каждой управляемой зоне печи имеются два датчика температуры греющей среды и два датчика температуры поверхности нагреваемого металла. Кроме того, для каждой заготовки измеряется время ее транспортировки от печи до входа в черновую клетку.

Выходными параметрами объекта управления являются среднemasсовая температура θ_i , температура поверхности θ_i'' и толщина слоя окалины w_i для каждой выдаваемой из печи заготовки (i – номер заготовки). Эти величины на выходе печи не измеряются и могут быть определены только расчетным путем. Доступны

измерению только промежуточные значения температур поверхности заготовок в конечном числе точек внутри печи. Управляющим параметром является температура греющей среды в зонах печи.

Для каждой партии заготовок задается требуемое по технологии прокатки качество нагрева, которое характеризуется величинами θ^* и $\Delta\theta^*$ (θ^* – требуемая среднemasсовая температура по толщине заготовки, $\Delta\theta^*$ – допустимый перепад температур по толщине заготовки).

Система автоматического управления нагревом должна поддерживать в управляемых зонах печи такой температурный режим, чтобы минимизировать суммарные затраты на топливо, потери металла, переходящего в окалину и затраты на стана, вызванные нарушением требуемых температур нагрева заготовок.

Для решения сформулированной выше задачи предлагается алгоритм динамической оптимизации управления, основанный на принципе минимизации текущих экономических потерь. Теоретическое обоснование и методология создания таких алгоритмов подробно изложены в работах [1, 2].

Экономические потери комплекса печь–стан, которые необходимо минимизировать, определим следующим образом:

$$F = \varphi_r \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^R G_{jr} + \varphi_{\omega} \sum_{i=1}^N \rho_{\text{ок}} S_i w_i + \sum_{i=1}^N \left[\varphi_n K_{\theta} (\theta_i - \theta^*)^2 + \varphi_{\Delta} K_{\Delta} \left(|\theta_i^n - \theta_i| - \Delta\theta^* \right)^2 \right], \quad (1)$$

где N – количество выданных из печи заготовок, для которых определяются потери; M – количество управляемых зон печи; R – количество последовательных управлений, действующих в зонах печи за время нагрева N заготовок; $\theta_i, \theta_i^n, w_i$ – выходные характеристики нагрева i -й заготовки; $\rho_{\text{ок}}$ – плотность окалины; S_i – площадь окисляющейся поверхности; G_{jr} – количество топлива, затраченное в j -й зоне печи при r -м управлении; $\varphi_r, \varphi_{\omega}, \varphi_n, \varphi_{\Delta}$ – удельные потери соответственно по расходу топлива, количеству окалины, неточности нагрева и отклонение перепада температур по толщине заготовки от допустимого.

Такие потери возникают при реализации в печи некоторой последовательности управлений U_{jr} ($j = \overline{1, M}, r = \overline{1, R}$), выбираемых с соблюдением технологических ограничений на амплитуду и приращение управляющих воздействий:

$$U_j^{\min} \leq U_{jr} \leq U_j^{\max}; |U_{jr} - U_{jr+1}| \leq \Delta U_j. \quad (2)$$

Первый член функции (1) определяет стоимость топлива, необходимого для нагрева N заготовок. Расход топлива в каждой зоне θ_{jr} связан с управлением U_{jr} уравнением теплового баланса. Второй член связан с потерями металла, перешедшего в окалину. Количество окалины, образовавшейся на поверхности каждой заготовки, определяется временем нагрева и законом изменения температуры его поверхности. Третий член – потери на стане, связанные с нарушением требуемых температур нагрева при выдаче заготовки из печи.

Повышение средней температуры заготовки ($\theta_i > \theta^*$) и малая неравномерность прогрева ($\Delta\theta_i < \Delta\theta^*$) в пределах технологических ограничений облегчают процесс прокатки, поэтому будем считать, что учитываемые в уравнении (1) экономические потери на стане возникают только при недогреве по среднemasсовой температуре и превышении допустимого перепада температур по толщине. Тогда коэффициенты K_{θ} и K_{Δ} в (1) имеют вид:

$$K_{\theta} = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta_i < \theta^* \\ 0, & \text{если } \theta_i \geq \theta^* \end{cases},$$

$$K_{\Delta} = \begin{cases} 1, & \text{если } |\theta_i^n - \theta_i| > \Delta\theta^* \\ 0, & \text{если } |\theta_i^n - \theta_i| \leq \Delta\theta^* \end{cases}.$$

Температура заготовки и количество окалины на ней при выходе ее из печи есть результат последовательных во времени воздействий нескольких управле-

ний в разных зонах печи, причем за это время объект подвергается действию ненаблюдаемых случайных возмущений. Выбираемая системой управления в текущий момент времени температура греющей среды в зонах печи скажется на конечных потерях, но определить их можно будет только тогда, когда нагреваемые в данный момент заготовки выйдут из печи. Поэтому физически можно реализовать только такой алгоритм выбора текущих управлений, который основан на минимизации не фактических будущих потерь, а их прогноза \tilde{F} в текущий момент времени. Такой прогноз должен быть основан на имеющейся информации о фактическом состоянии объекта и модели его поведения в будущем. Возмущающие воздействия учитываются в виде статистических прогнозов, основанных на полученной к текущему моменту априорной информации и на имеющихся априорных статистических характеристиках объекта.

Прогноз потерь определим следующим образом:

$$\tilde{F} = K_{\theta} \varphi_r \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^R \alpha_{jr} \tilde{G}_{jr} + K_w \varphi_w \sum_{i=1}^{N_n} \beta_i \rho_{\text{ок}} S_i w_i + K_n \sum_{i=1}^{N_n} \beta_i \left[\varphi_n K_{\theta} (\tilde{\theta}_i - \theta^*)^2 + \varphi_{\Delta} K_{\Delta} \left(|\tilde{\theta}_i^n - \tilde{\theta}_i| - \Delta\theta^* \right)^2 \right], \quad (3)$$

где K_{θ}, K_w, K_n – весовые коэффициенты, определяющие значимость разных статей расходов по переделу; N_n – количество нагреваемых в печи заготовок, для которых рассчитывается прогноз будущих потерь; $\tilde{\theta}_i, \tilde{\theta}_i^n, w_i$ – прогноз выходных характеристик нагрева i -й заготовки; \tilde{G}_{jr} – прогноз расхода топлива в j -й зоне печи при r -й команде; α_{jr}, β_i – весовые коэффициенты, учитывающие достоверность прогнозов.

Интервал времени L_n , за который подсчитываются потери \tilde{F} , равен прогнозу времени пребывания в печи (от текущего положения до выдачи) заготовки с номером N_n . За это время в каждой из управляемых зон будет реализовано R последовательных управлений.

Из уравнения (3) видно, что для получения прогноза \tilde{F} необходимо для каждой заготовки ($i = \overline{1, N_n}$) спрогнозировать изменение ее температуры и толщины слоя окалины от текущего состояния до выхода из печи. Чтобы сделать это, необходимо иметь прогноз времени пребывания каждой заготовки в зонах печи (τ_{ij}) и математические модели для прогноза процессов нагрева и окалинообразования. Для этих целей могут быть использованы модели, приведенные в работе [3]. По этим моделям для известной последовательности управлений U_{jr} ($r = \overline{1, R}$) в зонах печи можно вычислить прогнозы $\tilde{\theta}_i, \tilde{\theta}_i^n, w_i$ и определить второй и третий члены функции (3). Затраты топлива в каждой зоне G_{jr} ($j = \overline{1, M}; r = \overline{1, R}$) определим по уравнениям теплового баланса, которые составляются на время действия очередной команды по всем управляемым зонам печи, начиная с томильной.

Таким образом, в каждый момент времени можно вычислить прогноз будущих потерь как функцию заданной на время прогноза последовательности управлений U_{jr} .

Расчет оптимальных управлений производится через промежутки времени Δt по базе обновленной информации о состоянии объекта управления. В каждой зоне печи реализуется во времени следующая последовательность управлений:

$$U_j(t) = \begin{cases} U_{j1}^*(1) & \text{при } \Delta < t < \Delta t \\ \dots \\ U_{j1}^*(m) & \text{при } (m-1)\Delta t < t \leq m\Delta t \\ U_{j1}^*(m+1) & \text{при } m\Delta t < t \leq (m+1)\Delta t \\ \dots \end{cases}$$

где m – текущий номер такта управления; Δt – его длительность.

В каждом такте расчетов исходной точкой прогноза должно быть новое фактическое состояние всех заготовок, потери по которым учитываются при прогнозе. Однако измерение температуры металла производится только в конечном числе точек по длине печи, а рост окалины вообще не контролируется. Поэтому для получения оперативной информации о фактическом состоянии заготовок в процессе нагрева применяется

расчетный контроль, основанный на математических моделях [3], а имеющиеся замеры температуры поверхности металла в печи используются для коррекции температур, рассчитанных по модели. По этим несоответствиям можно также осуществить прогноз поправок, которые будут добавляться к расчетной температуре металла при прогнозе нагрева. Моменты внесения поправок определяются по прогнозам времени прохождения заготовок под каждым из датчиков.

Выводы. Определены управляющие воздействия, которые минимизируют принятый критерий управления.

Интервал времени, за который подсчитываются потери при управлении, равен времени пребывания заготовок в печи от текущего положения до выдачи.

Моменты внесения поправок в управляющие воздействия определяются по прогнозам времени прохождения заготовок под датчиками температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельман И.И. Оперативная информация объектов управления. – М.: Энергоиздат, 1992. – 260 с.
2. Перельман И.И. //Автоматика и телемеханика. 1978. № 9.
3. Автоматизация методических печей. /Под ред. М.Д. Климовичского. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

© 2014 г. М.Д. Климовичский
Поступила 7 февраля 2013 г.