

УДК 62-533.65:66.046.4.094.2

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-80-96

Модели для упреждающего управления тепловыми процессами термической обработки стали на агрегатах непрерывного горячего оцинкования*

М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Models for predictive thermal control in steel heat treatment using the continuous HD galvanizing units

M.Y. Ryabchikov, E.S. Ryabchikova

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Рассмотрены проблемы разработки моделей для упреждающего управления тепловыми процессами в многозонных нагревательных печах при термической обработке стальной полосы на агрегатах непрерывного горячего оцинкования. Сложность разработки таких моделей обусловлена тремя причинами. Первой является значительная инерция объекта, что затрудняет анализ тепловых балансов зон в условиях неизвестных возмущений, вызванных непостоянством параметров тепловых потерь и межзонного теплообмена. Вторая причина заключается в отсутствии объективной информации о теплообмене между металлом и рабочим пространством печи в отдельных зонах, так как контроль температуры металла обычно происходит только на входе в секции термической обработки и на выходе из них. Третьей причиной является то, что результаты измерений температуры рабочего пространства зоны лишь приблизительно характеризуют ее фактическое температурное состояние. С учетом указанных причин для упреждающего управления тепловыми процессами предложены два вида моделей. Модели первого вида используют для оценки температур рабочего пространства зон по данным перед технологическим возмущением, а также для прогноза температуры полосы. Модели второго вида предназначены для прогнозирования оценок температур рабочего пространства зон при изменении сортамента, скорости линии, расходов топлива и воздуха. Модели второго вида оперируют сигналами, представленными в виде приращений относительно начального момента для рассматриваемого периода времени. Модели предназначены для решения таких задач, как робастное управление; своевременный учет технологических ограничений, связанных с мощностью систем нагрева и охлаждения; планирование и упреждающее управление переходными процессами для энергосбережения путем уменьшения перегрева металла; оптимизация тепловых нагрузок по зонам секций термической обработки на основе наблюдателя тепловых потерь. Предложена система робастного управления температурой рабочего пространства зон, основанная на структуре системы со многими степенями свободы, где прямое разомкнутое управление с применением модели скомбинировано с регулированием по отклонению. Рассмотрены способы применения модели при оптимизации распределения тепловых нагрузок по зонам печи. В качестве примера приведены результаты настройки модели для секции термической выдержки агрегата непрерывного горячего оцинкования № 1 ПАО

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10058, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

«ММК». По результатам настройки показаны пределы вариации динамических параметров объекта управления.

Ключевые слова: горячее оцинкование, стальная полоса, упреждающее управление, управление отжигом, тепловые процессы, оптимизационная задача

The paper considers problems in developing models for the predictive thermal processes control in the multi-zone heating furnaces at a steel strip heat treatment using the continuous hot-dip (HD) galvanizing units. Complexity in developing such models is due to three reasons. First is the object significant inertia making it difficult to analyze the zone thermal balances under unknown disturbances caused by variability of the heat loss and interzone heat transfer parameters. The second reason is the lack of objective information on heat exchange between the metal and the furnace working space in separate zones, since metal temperature is usually controlled only at the inlet and outlet of the heat treatment sections. The third reason is that results of measuring the working space zone temperature only approximately characterize its actual temperature state. Taking into account these reasons, the paper proposes two types of models for the thermal processes predictive control. Models of the first type are introduced to estimate the working space zone temperature based on data obtained before the technological disturbance, as well as to predict the strip temperature. Models of the second type are designed to predict estimates of the working space zone temperature when changing assortment, line speed, fuel and air consumption. Models of the second type are operating with signals presented in the form of increments relative to the initial moment of the time period under consideration. The models are designed to solve problems such as robust control; timely account of technological limitations associated with the heating and cooling systems; transient processes planning and predictive control to save energy by reducing the metal overheating; heat loads optimization by the heat treatment section zones based on the heat loss observer. A system of robust temperature control in the working space zones is proposed. It is based on the system structure with multiple degrees of freedom, where the direct open-loop control using the model is combined with the deviation control. Methods for using the model to optimize the heat loads distribution across the furnace zones were considered. As an example, results are provided of setting up the model for the thermal holding section of the continuous hot-dip galvanizing unit No. 1 at the PJSC MMC. Based on the set-up results, variation limits in the control object dynamic parameters are demonstrated.

Keywords: hot-dip galvanizing, steel strip, predictive control, annealing control, thermal processes, optimization problem

Одним из основных видов продукции металлургических предприятий с высокой добавленной стоимостью является оцинкованный листовой прокат. Число агрегатов непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ) и объем их продукции за последние десятилетия выросли. Основными потребителями являются автомобильная и строительная промышленность [1]. С учетом значительного объема продукции представляется целесообразным дальнейшее совершенствование технологического процесса АНГЦ для снижения затрат и повышения производительности.

Согласно работе [2], затраты (68 %) на природный газ являются самыми значительными финансовыми затратами на энергоресурсы для термообработки стали в печи для отжига. Удельный расход природного газа при задан-

ной производительности можно снизить путем уменьшения тепловых потерь и выбора режимов отжига, при которых требования к продукции будут обеспечены с минимальными затратами топлива.

По данным работы [3], менее 50 % теплоты, подаваемой в печь, используется на нагрев металла, остальная часть утрачивается как тепловые потери. Потери теплоты, не связанные с отходящими продуктами горения топлива, можно снизить перераспределением тепловых нагрузок по зонам нагревательных печей, что обсуждается многими авторами [4–7].

Однако применение предложений на практике затруднено из-за отсутствия информации о влиянии режимов отдельных зон на тепловые потери. Разработка адекватных оптимизационным задачам моделей тепловых процессов тер-

мической обработки стали позволяет использовать предложения по совершенствованию управления.

Оборудование технологической части АНГЦ рассчитано на определенную максимальную скорость линии. Причины снижения скорости линии относительно максимальной подразделяют на обусловленные требованиями технологии и человеческим фактором. Одним из основных технологических ограничений является выход на предельную мощность систем нагрева и охлаждения при обеспечении заданного режима отжига. С ростом толщины и ширины стальной полосы (СП) приходится снижать скорость линии.

Согласно работе [8], параметры технологического процесса, при которых происходит достижение предельной мощности, являются нестабильными из-за варьирования тепловых потерь через стенки на 20...30 % вследствие сезонного фактора. Работа систем нагрева и охлаждения на пределе мощности может затруднить регулирование при стабилизации заданных режимов термообработки.

В статье [9] показано, что динамические свойства секции закрытого охлаждения как объекта управления могут существенно изменяться в зависимости от сортамента и скорости движения СП. Разработка моделей тепловых процессов АНГЦ позволяет выбрать рациональную скорость линии и снизить влияние человеческого фактора путем эффективного упреждающего управления термической обработкой стали.

Цель статьи — разработка моделей тепловых процессов термической обработки стали при непрерывном горячем оцинковании для выбора энергосберегающих режимов и упреждающего управления.

Тепловые процессы термической обработки стали. Технологическая часть АНГЦ включает в себя нагрев и выдержку СП для проведения рекристаллизационного отжига с целью увеличения пластичности и снятия внутренних напряжений, вызванных холодной прокаткой. Для этого используют печи прямого и косвенного нагрева.

Рабочее пространство (РП) печи косвенного нагрева заполнено защитной восстановительной атмосферой. Рекомендуемая температура в таких печах находится в пределах 720...860 °С. В печах косвенного нагрева могут быть преду-

смотрены отдельные секции для непосредственно нагрева и последующей выдержки металла с контролем его температуры между секциями.

В печи прямого нагрева для последующей выдержки и восстановления металла используют секцию печи с косвенным нагревом. Отклонение от заданной температуры металла может привести к непостоянству и несоответствию механических свойств СП требованиям.

Энергия от сжигания топлива может затрачиваться на нагрев металла, увеличение температуры РП печи, компенсацию тепловых потерь через ее стенки и нагрев продуктов горения топлива. При этом теплоту отходящих продуктов сжигания топлива частично используют для подогрева воздуха горения.

Перед погружением СП в расплав цинковой ванны металл охлаждают защитным газом (закрытое охлаждение). Если температура СП после закрытого охлаждения превышает 470...480 °С, то вероятность появления дефектов покрытия существенно возрастает [9].

Проблемы разработки моделей тепловых процессов. В нагревательных печах, как правило, РП разделено на отдельные зоны. Для управления температурой РП в зоне обычно предусмотрена отдельная система управления. Управление предполагает контроль температуры РП в зоне и выбор расходов топлива и воздуха на горелки зоны для стабилизации температуры РП на заданном уровне. Подобная организация позволяет:

- управлять динамикой нагрева металла, варьируя заданные температуры РП в зонах печи;
- повысить быстродействие регулирования температуры РП за счет того, что температура контролируется близко от места расположения используемых горелок.

В зависимости от вида продукции заданная температура отжига может периодически изменяться. При этом продолжительность работы в отдельном температурном режиме может варьироваться в широких пределах — от десятков минут до нескольких часов.

В работе [10] проведена оценка тепловой инерции протяжной печи башенного типа. Сделана попытка настройки модели, учитывающей тепловые балансы отдельных зон печи. Установлено, что данные разных периодов работы печи плохо согласуются между собой. Повидимому, вследствие отсутствия стационарно-

сти и квазистационарности температурных режимов в печи возникают протяженные по времени переходные процессы.

Это приводит к тому, что наблюдаемую динамику изменения температуры РП в зоне объясняют особенностями изменения параметров металла, расходов топлива и воздуха за продолжительный интервал времени. В то же время сложно разработать адекватную в статистическом плане модель, которая учитывала бы динамику изменения статей тепловых балансов за продолжительное время.

Одной из основных статей теплового баланса зоны печи является теплообмен с металлом, для определения которой можно использовать настроенную модель теплообмена между СП и РП.

Однако температуру СП контролируют только между технологическими секциями. Нет гарантий, что модель теплообмена, настроенная по таким данным, позволит точно оценить динамику изменения температуры СП по мере ее продвижения через зоны отдельной секции. Поэтому сложно определить параметры теплообмена с металлом в отдельно взятой зоне. Можно наблюдать только общий итог совокупности теплообменных процессов.

Определение параметров теплообмена с металлом и теплообменных процессов, связанных с изменением температуры РП, требует информации о температуре РП. Однако измеряемая в зоне температура является оценкой, полученной в отдельной точке РП, и не может полностью описать текущее температурное состояние зоны. Подобные результаты измерения в значительной степени зависят от того, включены или выключены расположенные рядом с точкой контроля горелки.

Указанные проблемы приводят к тому, что экспериментальные данные разных временных периодов сложно согласовать между собой для получения представительной выборки, которую можно использовать при настройке моделей тепловых процессов.

Применение наблюдателя температуры РП.

При управлении технологическим процессом АНГЦ потребность в моделях для упреждающего управления возникает, как правило, при изменении режима работы [9, 11, 12]. Технологическими возмущениями, которые могут потребовать упреждающего управления для обеспечения требований к отжигу без перерасхода

ресурсов, является изменение сортамента СП, скорости линии и требуемой температуры металла на выходе из печи секций термической обработки металла.

В то же время при работе в стабильном режиме можно использовать модели для оценки свойств неизвестных возмущений. В статье [9] предложено применять наблюдателя температуры РП в секции закрытого охлаждения АНГЦ. На АНГЦ № 1 ПАО «ММК» не предусмотрен контроль этой температуры. Показано, что наблюдатель температуры РП позволяет использовать модели теплообмена разного типа для прогноза изменения температуры СП при смене режима.

Перед изменением режима выполняют обобщенную оценку температуры РП в секции, которую затем применяют для прогноза состояния процесса после технологического возмущения. Для получения оценки температуры РП используют модель теплообмена

$$\frac{dT_M(\tau)}{d\tau} = a [T_{\text{п}} - T_M(\tau)], \quad a = \frac{\alpha}{h}, \quad (1)$$

где T_M и $T_{\text{п}}$ — температура СП и РП; τ — время пребывания металла в секции; α — настраиваемый параметр; h — толщина СП.

Решение (1) относительно температуры $T_{\text{п}}$ при допущении ее постоянства за время пребывания металла в секции τ_c имеет вид

$$T_{\text{п}} = \frac{T_M(\tau_c) - T_M(0) + a\tau_c T_M(\tau_c)}{a\tau_c}, \quad \tau_c = \frac{L}{v}, \quad (2)$$

где $T_M(\tau_c)$ и $T_M(0)$ — температура СП на выходе из секции и на входе в нее; L — длина СП в секции; v — скорость движения СП.

В работе [13] рассмотрена задача прогноза температуры СП на выходе протяжной печи косвенного нагрева АНГЦ при технологических возмущениях. Для повышения точности прогноза применен наблюдатель неизвестных возмущений. Показана целесообразность представления неизвестных возмущений в виде отклонения между измеренной температурой РП и оценкой температуры. Причиной является наличие трендовых и низкочастотных составляющих, что позволяет использовать простые модели временного ряда при прогнозе.

Несмотря на то, что теплообмен с металлом осуществляется преимущественно излучением, предложено применять описание конвективно-го теплообмена. Отмечено, что вид зависимо-

сти в упрощенной модели необязательно должен полностью соответствовать объекту.

В публикациях [9, 13] оценка температуры РП выполнена обобщенно для печи в целом. В то же время разработка моделей тепловых процессов в отдельных зонах секций термической обработки СП требует получения индивидуальных для зон оценок температуры РП.

Наблюдатель для случая многозонной нагревательной печи. Допускаем, что в многозонной нагревательной печи металл последовательно поступает из одной зоны в другую (следующую). В этом случае конечная температура металла после нагрева в зоне является начальной температурой для расчета нагрева в следующей зоне.

Уравнение (1) для условий первой зоны запишем как

$$\int a_1 [T_{п1} - T_{м1}(\tau)] d\tau = T_{м1}(\tau) - T_{м1}(0), \quad (3)$$

$$a_1 = \alpha_1/h,$$

где $T_{п1}$ и $T_{м1}$ — температура РП и металла в первой зоне; α_1 — настраиваемый параметр в первой зоне.

Решение выражения (3) относительно температуры металла на выходе из первой зоны имеет вид

$$T_{м1}(\tau_1) = \frac{T_{м1}(0) + a_1 \tau_1 T_{п1}}{a_1 \tau_1 + 1}, \quad (4)$$

где τ_1 — время пребывания металла в первой зоне; $T_{м1}(0)$ — температура металла на входе в первую зону.

Допускаем, что известна разница $\Delta T_{п21}$ между температурой РП второй и первой зон: $\Delta T_{п21} = T_{п2} - T_{п1}$. Тогда уравнение (1) для условий второй зоны приобретает вид

$$\int a_2 [(T_{п1} + \Delta T_{п21}) - T_{м2}(\tau)] d\tau =$$

$$= T_{м2}(\tau) - \frac{T_{м1}(0) + a_1 \tau_1 T_{п1}}{a_1 \tau_1 + 1}, \quad a_2 = \frac{\alpha_2}{h}; \quad (5)$$

где $T_{м2}$ и α_2 — температура металла и настраиваемый параметр во второй зоне.

Решения выражения (5) относительно температур РП $T_{п1}$ и $T_{м2}$ имеют следующий вид:

$$T_{п1} = \frac{\frac{T_{м1}(0)}{a_1 \tau_1 + 1} - T_{м2}(\tau_2) + a_2 \tau_2 [\Delta T_{п21} - T_{м2}(\tau_2)]}{a_2 \tau_2 + \frac{a_1 \tau_1}{a_1 \tau_1 + 1}}; \quad (6)$$

$$T_{м2}(\tau_2) = \frac{\frac{T_{м1}(0) + a_1 \tau_1 T_{п1}}{a_1 \tau_1 + 1} + a_2 \tau_2 (\Delta T_{п21} + T_{п1})}{a_2 \tau_2 + 1}, \quad (7)$$

где τ_2 — время пребывания металла во второй зоне.

Формулы (6) и (7) можно записать обобщенно для произвольного числа зон, через которые металл проходит последовательно на основе рекурсивных функций. Пусть известна разница оценок температур РП $\Delta T_{пn} = T_{пn} - T_{п1}$, где $T_{пn}$ — температура РП в n -й зоне.

Тогда выражение для оценки температуры РП в первой зоне запишем следующим образом:

$$T_{п1} = \frac{B(n) - T_{мn}(\tau_n) + a_n \tau_n [\Delta T_{пn} - T_{мn}(\tau_n)]}{A(n)}, \quad (8)$$

$$a_n = \frac{\alpha_n}{h};$$

где $T_{мn}$ — температура металла на выходе из n -й зоны; τ_n — время пребывания металла в n -й зоне; $B(n)$, $A(n)$ — рекурсивные функции, α_n — настраиваемый параметр в n -й зоне.

В выражении (8):

$$B(n) = \begin{cases} \frac{B(n-1) + a_{n-1} \tau_{n-1} \Delta T_{п(n-1)}}{a_{n-1} \tau_{n-1} + 1} & \text{при } n > 2; \\ \frac{T_{м1}(0)}{a_1 \tau_1 + 1} & \text{при } n = 2; \end{cases}$$

$$A(n) = \begin{cases} \frac{A(n-1)}{a_{n-1} \tau_{n-1} + 1} + a_n \tau_n & \text{при } n > 1; \\ a_1 \tau_1 & \text{при } n = 1. \end{cases}$$

Определяя оценку температуры РП в первой зоне $T_{п1}$ по выражению (8) и зная разницу температур в прочих зонах по отношению к первой, находим оценки температуры РП во всех зонах. Зная оценки температуры РП, по формуле (4) последовательно определяем температуры СП на выходе из зон. Температуру СП на выходе из зоны принимаем в качестве начальной $T_{м}(0)$ для следующей зоны.

Чтобы оценить температуры РП с помощью выражения (8), необходимо задать величины $\Delta T_{пn}$, характеризующие изменение температуры зон относительно таковой в первой зоне секции. Для нахождения параметров $\Delta T_{пn}$ можно использовать фактически измеренные температуры в зонах. При этом следует ожидать существенных ошибок в определении $\Delta T_{пn}$, так как измерения характеризуют температуру в отдельных точках РП зон.

Одной из альтернатив является разработка эмпирических моделей прогноза перепада температур между зонами. Например, в работе [8] показано наличие связи между температурой отходящих дымовых газов, расходом воздуха на сжигание топлива и температурой РП в зонах печи косвенного нагрева.

Температура отходящих дымовых газов зоны обобщенно характеризует теплообменные процессы во всех радиантных трубах зоны. При этом настройка моделей по большим данным, полученным за продолжительный период времени, может позволить найти усредненные несмещенные оценки температуры РП.

Также параметры $\Delta T_{\text{п}}$ можно интерпретировать как неизвестные величины. Однако их нельзя определять совместно с температурой РП в первой зоне $T_{\text{п1}}$, применения одного принятого наблюдателя температуры РП, из-за неоднозначности решения.

Критерии настройки наблюдателя. Настройку наблюдателя температуры РП выполняют путем выбора общего или индивидуального для зон параметра настройки α , используемого при расчете параметра a в выражении (8).

Предложенный наблюдатель температуры РП в зонах печи описывает теплообменные процессы упрощенно, что означает неполное соответствие функциональной формы модели объекту. Тем самым нарушается основная предпосылка регрессионного анализа. Это приводит к тому, что модель нельзя настроить для одновременного точного воспроизведения всех закономерностей моделируемого объекта. Точность описания можно гарантировать только для тех особенностей процесса, которые учтены в принятом критерии настройки.

При этом особое внимание следует уделять обеспечению постоянства точности модели, так как вероятна ситуация, что модель будет более точна для режимов, по которым собрано много ретроспективных данных.

В работах [9, 13] наблюдатели температуры РП применены для прогноза температуры металла после возмущений по сортаменту СП. Прогноз выполняли для температуры СП на выходе из секций нагрева и закрытого охлаждения. Для этого по данным до возмущения с помощью модели (2) определяли оценку температуры РП, а для прогноза температуры металла после изменения сортамента использовали модель (4).

С этой целью модели (2) и (4) имеют одинаковое значение параметра α , которое определяют с позиции точности прогноза температуры металла после возмущения. Но такой критерий выбора значения α при использовании упрощенной модели теплообмена не гарантирует, что модель (4) будет верно описывать динамику изменения температуры СП по мере ее продвижения через секцию. Так как целью использования выражения (8) является определение особенностей теплообмена в каждой отдельной зоне секции, для выбора параметра α , необходим иной критерий.

Критерий, соответствующий назначению (8), предложен в работе [10]. Настройку модели теплообмена между металлом и РП предложено проводить взаимосвязано с настройкой модели тепловых потерь и модели изменения температуры РП. Для связанной настройки моделей период работы АНГЦ продолжительностью около года разбивали на множество коротких интервалов времени. По данным этих интервалов времени составляли тепловые балансы семи зон протяжной печи башенного типа. Критерием настройки являлась минимизация суммы невязок тепловых балансов зон.

Однако результаты показали, что данные разных периодов работы печи сложно согласовать. Невязки тепловых балансов не удалось снизить до уровня, позволяющего использовать модели на практике. Искомое значение коэффициента теплообмена α оказалось неоднозначным. Причиной этого, по-видимому, является то, что наблюдаемую динамику изменения температуры РП объясняли особенностями изменения режимов за продолжительный интервал времени и изменением уровня тепловых потерь с течением времени.

Решение данной проблемы предложено в работе [9], где сигналы модели тепловых процессов в секции закрытого охлаждения АНГЦ представлены в виде приращений. Это решение можно адаптировать к условиям многозонных теплообменных агрегатов.

Модель тепловых процессов на основе приращений значений сигналов. Модель тепловых процессов основана на тепловых балансах зон термической обработки СП. Составим тепловой баланс за малый период времени Δt для отдельной зоны нагревательной печи при допущении постоянства расходов топлива и воздуха в течение периода

$$\Delta\tau[V_T - T_{\text{п}}x_2 - zc_{\text{м}}(T_{\text{м}} - T_{\text{м}0}) - x_4V_{\text{п.г}}(t_{\text{п.г}} - t_{\text{т}0})] = \Delta T_{\text{п}}x_3, \quad (9)$$

где V_T — расход топлива; x_1, x_2, x_4, x_3 — параметры настройки; $z = hvb$ (b — ширина СП); $c_{\text{м}}$ — удельная тепловая емкость стали; $T_{\text{м}}$ и $T_{\text{м}0}$ — температура СП на выходе из зоны и на входе в нее; $V_{\text{п.г}}$ и $t_{\text{п.г}}$ — расход и температура продуктов горения топлива; $t_{\text{т}0}$ — средняя начальная температура топлива и воздуха до подогрева воздуха горения, $\Delta T_{\text{п}}$ — величина изменения температуры РП зоны за время $\Delta\tau$.

Согласно выражению (9), теплота $\Delta\tau V_T x_1$ выделяется при сжигании топлива и затрачивается на тепловые потери зоны $x_2 \Delta\tau T_{\text{п}}$ (принятые пропорциональными температуре РП), нагрев металла и продуктов сжигания топлива. Разница между притоком и оттоком теплоты приводит к изменению температурного состояния зоны $x_3 \Delta T_{\text{п}}$.

После рекуперации теплоты отходящих газов их температура $t_{\text{п.г}}$ обычно составляет около 300 °С. С учетом этого будем пренебрегать температурой $t_{\text{т}0}$, которая может составлять 5...30 °С, приняв $t_{\text{п.г}} = 0$. На основании результатов работы [8] считаем, что температура $t_{\text{п.г}}$ пропорциональна температуре РП $T_{\text{п}}$, т.е. $t_{\text{п.г}} = k_{\text{п.г}} T_{\text{п}}$, где $k_{\text{п.г}}$ — коэффициент, характеризующий объем продуктов горения 1 м³ топлива.

Выражая температуру $T_{\text{м}}$ в формуле (9) через $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{м}0}$ на основе соотношения (4), получаем тепловой баланс зоны

$$\Delta\tau \left[V_T x_1 - T_{\text{п}} x_2 - zc_{\text{м}} \left(\frac{T_{\text{м}0} + a\tau_3 T_{\text{п}} - a\tau_3 T_{\text{м}0} - T_{\text{м}0}}{a\tau_3 + 1} \right) - x_4 k_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}} T_{\text{п}} \right] = \Delta T_{\text{п}} x_3$$

или

$$\Delta\tau [V_T x_1^* - T_{\text{п}} x_2^* - C(T_{\text{п}} - t_{\text{м}0}) - x_4^* V_{\text{п.г}} T_{\text{п}}] = \Delta T_{\text{п}} x_3^*, \quad (10)$$

где τ_3 — время пребывания металла в зоне;

$$x_1^* = \frac{x_1}{\alpha c_{\text{м}}}; \quad x_2^* = \frac{x_2}{\alpha c_{\text{м}}};$$

$$x_4^* = \frac{x_4 k_{\text{п.г}}}{\alpha c_{\text{м}}}; \quad x_3^* = \frac{x_3}{\alpha c_{\text{м}}};$$

$$C = \frac{bLhv}{\alpha L + hv}.$$

Поделив обе части уравнения (10) на $\Delta\tau$ и переходя к пределу, получаем

$$V_T(\tau)x_1^* - T_{\text{п}}(\tau)x_2^* - C[T_{\text{п}}(\tau) - t_{\text{м}0}(\tau)] - x_4^* V_{\text{п.г}}(\tau) T_{\text{п}}(\tau) = x_3^* \frac{dT_{\text{п}}(\tau)}{d\tau}. \quad (11)$$

Выражение (8) можно использовать в качестве модели тепловых процессов, но ее настройка затруднена. Так, зависимость тепловых потерь от температуры может быть нелинейной и смещаться [9, 14]. При этом влияние изменения температуры РП на изменение уровня тепловых потерь может быть достаточно стабильным для используемых режимов.

Для представления сигналов модели (11) в виде приращений допустим, что выборка исходных настроечных данных включает в себя данные для отдельных периодов работы АНГЦ. При рассмотрении отдельного периода работы допустим, что в начальный момент периода температура РП в зоне установилась.

Тогда для начального момента ($\tau = 0$) отдельного периода времени запишем

$$V_T(0)x_1^* - T_{\text{п}}(0)x_2^* - C[T_{\text{п}}(0) - t_{\text{м}0}(0)] - x_4^* V_{\text{п.г}}(0) T_{\text{п}}(0) = 0. \quad (12)$$

Вычитая из формулы (11) выражение (12), получаем

$$\Delta V_T(\tau)x_1^* - \Delta T_{\text{п}}(\tau)x_2^* - C[\Delta T_{\text{п}}(\tau) - \Delta t_{\text{м}0}(\tau)] - x_4^* \Delta V_{\text{п.г}}(\tau) \Delta T_{\text{п}}(\tau) = x_3^* \frac{dT_{\text{п}}(\tau)}{d\tau}. \quad (13)$$

Здесь

$$\Delta V_T(\tau) = V_T(\tau) - V_T(0); \quad \Delta T_{\text{п}}(\tau) = T_{\text{п}}(\tau) - T_{\text{п}}(0);$$

$$\Delta t_{\text{м}0}(\tau) = t_{\text{м}0}(\tau) - t_{\text{м}0}(0); \quad \Delta V_{\text{п.г}}(\tau) = V_{\text{п.г}}(\tau) - V_{\text{п.г}}(0),$$

где $V_T(0)$, $T_{\text{п}}(0)$, $t_{\text{м}0}(0)$ и $V_{\text{п.г}}(0)$ — расход топлива, температура РП, температура металла на входе в зону и расход отходящих продуктов горения топлива в начальный для периода момент времени соответственно.

Исходя из выражения (13), для скорости изменения температуры РП запишем

$$\frac{dT_{\text{п}}(\tau)}{d\tau} = \frac{x_2^* + C + \Delta V_{\text{п.г}}(\tau)x_4^*}{x_3^*} \times$$

$$\times \left[\frac{x_1^*}{x_2^* + C + \Delta V_{\text{п.г}}(\tau)x_4^*} \Delta V_T(\tau) - \Delta T_{\text{п}}(\tau) \right] +$$

$$+ \frac{C}{x_3^*} \Delta t_{\text{м}0}(\tau) + x_5^*, \quad (14)$$

где x_5^* — настраиваемый коэффициент, учитывающий ошибочность допущения об установившейся температуре в зоне секции при $\tau = 0$.

Зона нагревательной печи как объект управления обладает свойством самовыравнивания. Это означает, что при отсутствии возмущений объект будет стремиться к состоянию равновесия, т. е. температура РП будет постепенно изменяться, пока приток теплоты от сжигания топлива не будет уравновешен оттоком теплоты.

Переход к состоянию равновесия может занять значительное время, превышающее продолжительность каждого отдельного отобранного для создания модели периода работы АНГЦ. Коэффициент x_5^* позволяет учесть долгосрочные тенденции, связанные с переходом к состоянию теплового равновесия. Это дает возможность исключить из модели факторы, влияние которых на температуру РП характеризуется значительной инерцией.

Например, модель (14) не учитывает передачу теплоты между зонами печи косвенного нагрева. Долгосрочные последствия межзонного теплообмена учитывает коэффициент x_5^* . В отличие от настроек модели $\{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*\}$, которые имеют постоянное значение для всех периодов работы, параметр x_5^* обладает индивидуальным значением для каждого отдельного периода.

Особенности настройки моделей. Способ настройки моделей тепловых процессов, предложенный в работе [9], предполагает два этапа. На первом настраивают наблюдателя температуры РП исходя из точности прогноза температуры СП после возмущения по сортаменту.

Далее модель тепловых процессов, схожая с моделью (14), в которой нет данных о температуре металла на выходе из секции, настраивают на прогноз оценки температуры РП, полученной от наблюдателя. При управлении модели используют совместно для выбора скорости движения СП с учетом ограничения на мощность системы охлаждения.

Дополнительная сложность настройки моделей (8) и (14) по сравнению со способом настройки, предложенным в работе [9], заключается в том, что оптимальное значение α нельзя определить до настройки моделей тепловых процессов в зонах вида (14). То есть поиск значения параметра α в модели (8) следует выполнять совместно с поиском значений параметров $\{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*\}$ модели (14).

Причем для каждой из зон параметры $\{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*\}$ следует определять индивидуально (а x_5^* — для каждого отобранного пе-

риода работы АНГЦ). При существенном различии условий теплообмена в зонах секции параметр α можно выбирать индивидуально для каждой зоны. Это затрудняет поиск методом полного перебора вследствие чрезмерно высокой размерности задачи.

Однако можно принять ряд допущений. Так, для отдельной зоны параметры $\{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*\}$ можно настраивать без учета их значений для прочих зон. Это возможно, если во всех предыдущих по ходу движения металла зонах выбранные значения $\{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*\}$ позволяют добиться высокой степени соответствия между температурой РП, определяемой по формуле (8) и с применением модели (14).

Это позволяет найти начальную для зоны температуру металла $T_{м0}$ с применением выражений (8) и (14), что требует выбора только одного значения параметра α . Если условия теп-

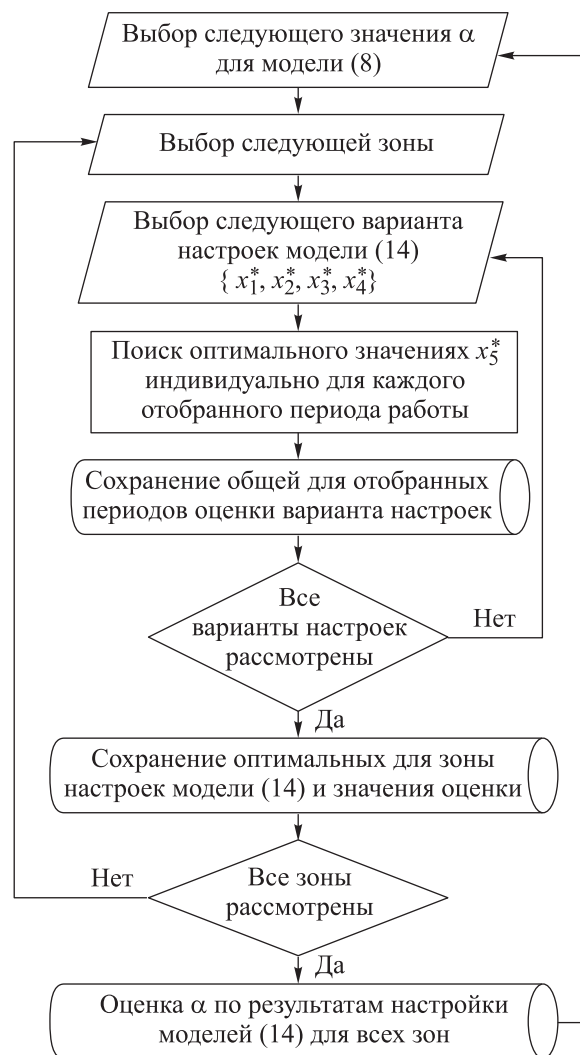


Рис. 1. Блок-схема настройки моделей

лообмена в зонах секции схожи, то параметр α можно принять одинаковым для всех зон. Этапы настройки с учетом указанных допущений показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, при каждом значении α происходит подбор параметров $\{x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*\}$ для каждой зоны. При этом для каждой комбинации указанных параметров и индивидуально для каждого отобранного интервала времени работы АНГЦ подбирается параметр x_5^* с целью минимизации отклонения между оценками температуры РП по моделям (8) и (14).

По результатам перебора для каждой зоны осуществляется выбор варианта настроек, где максимальное среди отобранных интервалов отклонение является минимальным. Далее происходит сопоставление результатов при разных значениях α и выбор значения α , при котором среднее по всем зонам отклонение будет минимальным.

Применение модели для робастного управления. Предложенные модели можно использовать для планирования траектории переходного процесса по температуре РП при технологических возмущениях. Это позволяет скорректировать температуру РП строго к моменту поступления в печь СП нового сортамента и уменьшить избыточный нагрев металла, для чего необходимо оценить время переходных процессов.

Также следует определить требуемый расход топлива для той или иной скорости линии при изменении сортамента и выбрать рациональную скорость, при которой управление температурой не будет затруднено вследствие выхода на предельную мощность горелок.

Задачу упреждающего управления с применением модели можно представить в виде си-

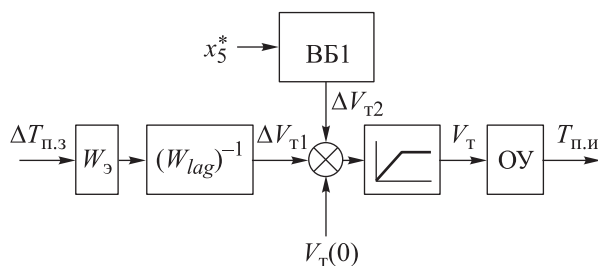


Рис. 2. Система для оценки требуемого расхода топлива при выбранной траектории переходного процесса по температуре РП и при определенной скорости движения СП:

ОУ — объект управления;

$T_{п.и}$ — измеренная температура РП

стемы, основанной на принципе прямого разомкнутого регулирования (рис. 2). В системе желаемая траектория переходного процесса определяется эталонной моделью W_3 , на вход которой поступает заданное изменение температуры РП $\Delta T_{п.з}$.

В структуре модели (14) можно выделить инерционный компонент

$$\frac{dT_{п}(\tau)}{d\tau} = \frac{x_2^* + C + \Delta V_{п.г}(\tau)x_4^*}{x_3^*} \times \left[\frac{x_1^*}{x_2^* + C + \Delta V_{п.г}(\tau)x_4^*} \Delta V_{т}(\tau) - \Delta T_{п}(\tau) \right], \quad (15)$$

для которого запишем передаточную функцию

$$W_{lag}(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1},$$

где s — оператор Лапласа; k_1 — коэффициент усиления; T_1 — постоянная времени.

Коэффициент усиления и постоянная времени определяются выражениями

$$k_1 = \frac{x_1^*}{x_2^* + C + \Delta V_{п.г}(\tau)x_4^*}; \quad (16)$$

$$T_1 = \frac{x_3^*}{x_2^* + C + \Delta V_{п.г}(\tau)x_4^*}. \quad (17)$$

Согласно выражениям (16) и (17), постоянная времени T_1 и коэффициент усиления k_1 инерционного звена W_{lag} зависят от входного параметра — величины изменения расхода топлива $\Delta V_{т}$, так как $\Delta V_{п.г} = k_{п.г} \Delta V_{т}$.

Для компенсации инерционных свойств объекта использовано форсирующее звено

$$[W_{lag}(s)]^{-1} = \frac{T_1 s + 1}{k_1}.$$

Траекторию требуемого изменения расхода топлива $\Delta V_{т1}$ можно получить на основе численного решения или при пренебрежении величиной $\Delta V_{п.г} x_4^*$.

Вычислительный блок ВБ1 предназначен для расчета дополнительной коррекции топлива с целью компенсации наблюдаемого возмущения x_5^* . С учетом модели (14) условие компенсации запишем как

$$\frac{x_1^*}{x_3^*} \Delta V_{т}(\tau) + x_5^* = 0.$$

Отсюда требуемая коррекция топлива

$$\Delta V_{т2}(\tau) = \frac{-x_5^*(\tau)x_3^*}{x_1^*}.$$



Рис. 3. Формирование упреждающего воздействия по расходу топлива и прогноза оценки температуры РП от эталонной модели

После определения динамики изменения величин ΔV_{T1} и ΔV_{T2} оценивают динамику изменения расхода топлива с учетом ограничений на мощность горелок при выбранной эталонной модели W_3 и скорости движения СП:

$$V_{T,3}(\tau) = V_T(0) + \Delta V_{T1}(\tau) + \Delta V_{T2}(\tau).$$

Этапы подготовки упреждающего воздействия при технологических возмущениях показаны на рис. 3. При наличии приращений сигналов в модели (14) определяют текущую оценку возмущений x_5^* . Непрерывное получение оценки x_5^* затруднено возможностью возникновения установившихся режимов работы агрегата, при которых приращения сигналов равны нулю. Далее выполняют прогноз динамики изменения x_5^* и рассчитывают предлагаемую динамику изменения заданного расхода топлива, после чего величину $V_{T,3}$ сравнивают с ограничением на максимально допустимый уровень.

При заданной максимальной продолжительности переходного процесса выполняют подбор предельной скорости движения СП, при которой $V_{T,3}(\tau)$ удовлетворяет ограничению. Если скорость линии ограничена прочими технологическими факторами (например, возможным возникновением дефектов), то эталонную модель W_3 корректируют для быстрых переходных процессов.

Чтобы избежать ошибок регулирования, связанных с неточностью моделей, целесообразно применять типовую систему автоматического регулирования (САР) с несколькими степенями свободы.

В САР, показанной на рис. 4, расход топлива $V_{T,3}(\tau)$ изменяется в соответствии с найденной динамикой. Если при этом возникает отклонение фактической оценки температуры РП от предварительно найденной по модели желаемой динамики $T_{п,3}(t)$, то это рассогласование компенсируется типовым пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором.

Для компенсации изменения температуры металла T_{M0} на входе в секцию установлен вычислительный блок ВБ2. С учетом выражения (14) условие компенсации можно записать как

$$\frac{x_1^*}{x_3^*} \Delta V_T(\tau) + \frac{C}{x_3^*} \Delta T_{M0}(\tau) = 0.$$

Отсюда требуемая коррекция топлива

$$\Delta V_{T,М}(\tau) = \frac{-\Delta T_{M0}(\tau)C}{x_1^*}.$$

Если допустить абсолютную точность модели (14), то задачей ПИД-регулятора является компенсация ошибок, связанных с неточным определением возмущения x_5^* . В этом случае объект управления обладает астатизмом первого порядка, и для настройки ПИД-регулятора можно использовать например, метод симметричного оптимума.

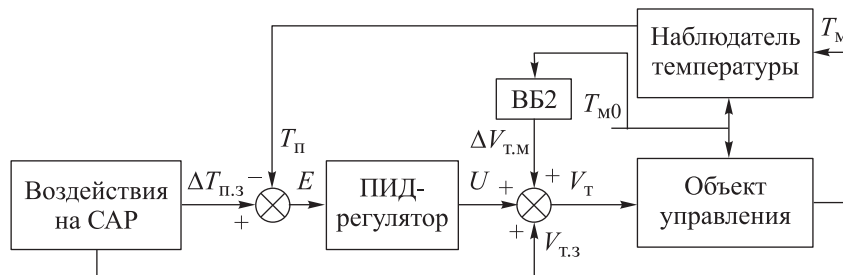


Рис. 4. Структурная схема САР температуры РП зоны с несколькими степенями свободы

Таким образом, прямое разомкнутое управление использовано для компенсации влияния всех основных технологических возмущений на температуру РП зоны секции. При высокой точности моделей тепловых процессов это позволяет минимизировать влияние непостоянства динамических характеристик объекта управления на качество регулирования. То есть система управления температурой РП становится робастна относительно изменения сортамента и скорости движения СП.

Это позволяет варьировать скорость линии с целью обеспечения производственной гибкости без опасений снижения качества автоматического регулирования. Альтернативой является перенастройка ПИД-регулятора под разные режимы или использование сложных нелинейных систем регулирования [15].

Применение модели при распределении тепловых нагрузок по зонам печи. Управление распределением тепловых нагрузок по зонам печи позволяет снизить расход топлива путем уменьшения тепловых потерь. Это требует определения связи между режимами работы зон печи и тепловыми потерями.

В то же время нахождение подобной связи затруднено по двум основным причинам. Первая связана с тем, что модель (14) оперирует не уровнем тепловых потерь, а его изменением. Второй причиной является возможное непостоянство уровня тепловых потерь, которое можно определить как постепенное изменение коэффициента x_2^* . Если при использовании модели коэффициент x_2^* не подстраивается под текущие условия, то возникнет дополнительное отклонение между фактической и прогнозируемой динамикой изменения температуры РП. Отклонение можно объяснить непостоянством неизвестных возмущений x_5^* .

В зависимости от того, определяет ли наблюдатель неизвестных возмущений только x_5^* или x_5^* и x_2^* , можно указать два разных направления решения оптимизационной задачи по распределению тепловых нагрузок в зонах.

Если значение x_2^* принято на постоянном уровне, и наблюдается только x_5^* , то цель оптимизации можно сформулировать на основе сигналов в виде приращений в модели (14). Оптимальным является такой новый режим работы зон, переход к которому из текущего режима потребует минимального увеличения расхода топлива исходя из текущих значений x_5^* .

Это предполагает, что оптимизационная задача решается при существенном изменении значений x_5^* зон. Однако модель (14) учитывает не все теплообменные процессы, в частности межзонный теплообмен. Его последствия учитывают на основе x_5^* .

Следовательно, изменение режимов работы зон в ходе оптимизации может привести к изменению значений x_5^* . Если наблюдаются только x_5^* зон, то необходима непрерывная автоматическая оптимизация режимов. При этом, учитывая возможное значительное число зон в современных нагревательных печах, необходим анализ устойчивости и допустимости для печного оборудования переходных процессов при подобной оптимизации.

Совместное наблюдение x_5^* и коэффициента x_2^* , характеризующего зависимость тепловых потерь от температуры, требует допущений для получения однозначного решения. При допущении, что параметр x_2^* меняется медленно, сигналом к коррекции x_2^* может стать смещение среднего за некоторый интервал времени значения x_5^* относительно нуля.

Текущее значение x_2^* характеризует связь между величинами изменения уровня тепловых потерь $\Delta Q_{\text{пот}}$ и температуры РП $\Delta T_{\text{п}}$:

$$\Delta Q_{\text{пот}}(\Delta T_{\text{п}}) = \Delta T_{\text{п}} x_2^* \quad \text{или} \quad \frac{\Delta Q_{\text{пот}}(\Delta T_{\text{п}})}{\Delta T_{\text{п}}} = x_2^*.$$

В то же время в работах [8, 14] показано, что связь между уровнем тепловых потерь и температурой РП хорошо описывается квадратичной зависимостью. В связи с этим изучены данные о работе многозонных нагревательных печей без металла, когда они выводятся из эксплуатации в ремонт или вводятся в нее. Исходя из этого, для тепловых потерь зоны получаем зависимость

$$Q_{\text{пот}}(T_{\text{п}}) = a T_{\text{п}}^2 \Rightarrow \frac{dQ_{\text{пот}}(T_{\text{п}})}{dT_{\text{п}}} = 2a T_{\text{п}}. \quad (18)$$

Тогда параметр a из формулы (18) можно оценить по выражению

$$a = \frac{x_2^*}{2T_{\text{п.ср}}},$$

где $T_{\text{п.ср}}$ — средняя температура РП в зоне печи.

Найденные значения a для зон печи можно использовать при решении оптимизационных задач с целью выбора энергосберегающих режимов.

Пример настройки модели тепловых процессов. В качестве примера рассмотрим результаты настройки модели тепловых процессов в секции термической выдержки АНГЦ № 1 ПАО «ММК». Секция представляет собой часть печи косвенного нагрева, которая предназначена для поддержания температуры металла на постоянном уровне для завершения процессов отжига.

РП секции разделено на две зоны (рис. 5). Температуру металла на входе в секцию и на выходе из нее контролирует пирометр. Температура металла, поступающего во вторую зону секции, неизвестна. В каждой зоне установлено по двенадцать радиантных труб для сжигания топлива (природного газа). Для контроля температуры РП в каждой зоне предусмотрены по два датчика, расположенных с двух сторон одной из горелок.

Исходные данные. По полученным результатам отобраны данные за четырнадцать периодов работы агрегата продолжительностью 13...35 мин, в течение которых происходили существенные возмущения по расходам топлива и воздуха на зоны, температуре СП после секции нагрева и скорости линии. Данные соответствуют периодам обработки СП разной толщины и ширины.

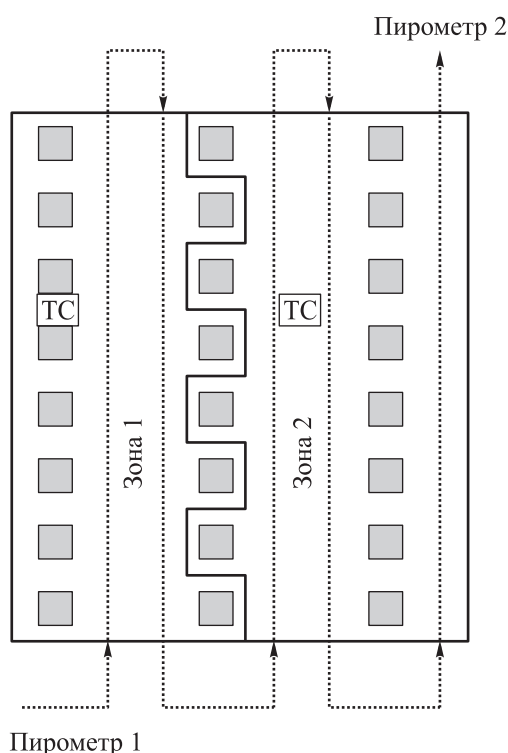


Рис. 5. Схема распределения горелок по зонам: ТС — места контроля температуры РП

Назначение моделей. Наблюдатель температуры РП и модель тепловых процессов в зонах секции выдержки позволяют решить следующие четыре задачи управления отжигом.

Первая задача — выбор вариантов температурных режимов в зонах, обеспечивающих на выходе из секции требуемую температуру металла после технологических возмущений. Структура подобной системы управления, основанная на наблюдателе температуры РП, предложена в работе [9].

Для оценки температуры РП в двух зонах до технологического возмущения применяли выражение (6), для прогнозирования температуры металла после возмущения — (7). В работе [9] применение наблюдателя обусловлено отсутствием контроля температуры РП в секции закрытого охлаждения, но в секции выдержки такой контроль предусмотрен. В статье [13] предложено использовать измеренную температуру РП при прогнозе температуры металла. Этот способ основан на корректировании результатов прогноза по упрощенной модели (7) и переходе к гибридной модели.

Вторая задача — сравнение вариантов температурных режимов в зонах для выбора среди них самого экономичного (с минимальными тепловыми потерями). С применением настроенной модели (14) проводили периодический мониторинг x_5^* и x_2^* . Перед технологическим возмущением с помощью модели (14) выбирали новый режим, при переходе к которому прогноз суммы изменения расходов топлива на зоны ΔV_T был минимальным.

Третья задача — планирование переходных процессов по температуре РП с учетом ограничений на мощность горелок при выбранной скорости движения СП. Так как секция предназначена для выдержки, а не для нагрева, максимальный расход воздуха на зону не должен превышать $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$, в то время как в зоне секции нагрева это ограничение составляет $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На практике же возможно снижение температуры СП после нагрева ниже требуемого уровня, и секцию выдержки используют для дополнительного нагрева металла. К выходу на ограничение по мощности горелок также может привести оптимизация в рамках второй задачи из-за стремления перераспределить тепловые нагрузки с целью экономии топлива.

Четвертая задача — применение моделей (6) и (14) при робастном управлении тем-

пературой РП зон на основе предложенной системы с несколькими степенями свободы.

Результаты настройки. Для каждой зоны настройку моделей (6) и (14) проводили взаимосвязано путем полного перебора значений параметров $\{\alpha, x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*\}$. Коэффициенты теплообмена для первой α_1 и второй α_2 зон приняты равными: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. При настройке оценивали комбинацию значений $\{\alpha, x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*\}$ при выборе для каждого отдельного периода индивидуального значения x_5^* .

Для каждого периода по модели (6) получали динамику изменения оценки температуры РП и среднюю ошибку ее прогноза по модели (14). Критерием являлась минимизация максимальной среди периодов ошибки. Выбор параметра α по результатам настройки для первой зоны оказался затруднительным. В широком диапазоне значений α получены схожие ошибки.

В то же время результаты настройки для второй зоны позволили выбрать оптимальное значение α , что, вероятно, связано с относительно незначительным изменением температуры металла в секции выдержки. Но ошибка моделирования теплообмена в первой зоне приводит к неверному прогнозу температуры металла на входе во вторую зону, что дополнительно увеличивает ошибку для второй зоны.

При оптимальном параметре $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-4}$ для первой зоны получены настройки $\{x_1^* = 14,19; x_2^* = 11,59; x_3^* = 17601; x_4^* = 0,00125\}$, для второй зоны — $\{x_1^* = 13,90; x_2^* = 14,84; x_3^* = 8645; x_4^* = 0,00093\}$. Для обеих зон найдены схожие значения x_1^* , характеризующие тепловой эффект от сжигания топлива. Более низкие значения x_1^* для второй зоны могут быть

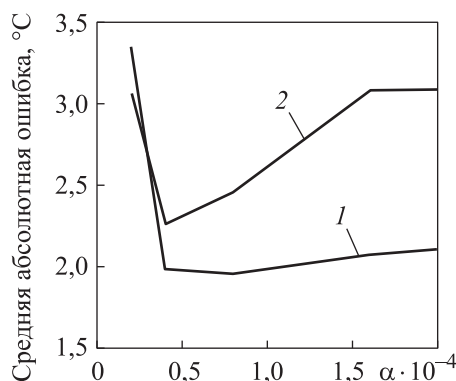


Рис. 6. Зависимости средней абсолютной ошибки от параметра α в первой (1) и второй (2) зонах

обусловлены значимо большим объемом воздуха, подаваемым на единицу топлива.

Рост тепловых потерь от стен при увеличении температуры РП (x_2^*) несколько выше для второй зоны. По-видимому, тепловые потери на единицу объема дымовых газов ниже во второй зоне (x_4^*), что может быть связано с особенностями рекуперации тепла отходящих газов зон.

Средняя по всем данным температура дыма после рекуператора для первой зоны составила $300,7^\circ\text{C}$, для второй — $254,1^\circ\text{C}$. Существенное отклонение получено для значений параметра x_3^* моделей зон. Для одинакового увеличения температуры РП в первой зоне требуется вдвое больше теплоты, чем в первой. Пример прогноза по данным одного из отобранных периодов времени при $x_5^* = -0,002$ для первой зоны и $x_5^* = -0,004$ для второй зоны показан на рис. 7.

Из рис. 7, а следует, что температура СП после секции выдержки выросла. Однако, согласно рис. 7, з, этого не должно было произойти, так как измеренная температура РП ниже температуры металла. Это объясняется тем, что измерения не характеризуют температуру РП зон в целом.

На рис. 7, в показаны температуры, полученные по выражению (6) для первой $T_{п1}^{(6)}$ и второй $T_{п2}^{(6)}$ зон, а температуры $T_{п1}^{(14)}$ и $T_{п2}^{(14)}$ соответствуют прогнозу с применением модели (14), где не использованы данные о температуре металла на выходе из секции. Видна высокая степень соответствия прогнозов по моделям (6) и (14).

Оценка вариации динамических параметров объекта. С учетом найденных значений настроечных параметров модели (14) для первой и второй зон секции выдержки получены значения динамических параметров инерционного компонента (15). Допуская, что при изменении расхода топлива не происходит изменения расхода воздуха, с учетом значительного объема воздуха для сжигания 1 м^3 природного газа, величиной $\Delta V_{п.г}$ можно пренебречь.

Тогда выражения для определения коэффициента усиления и постоянной времени приобретают вид

$$k_1 = \frac{x_1^*}{x_2^* + C}; \quad T_1 = \frac{x_3^*}{x_2^* + C}.$$

Найденные пределы вариации динамических параметров СП для зафиксированных

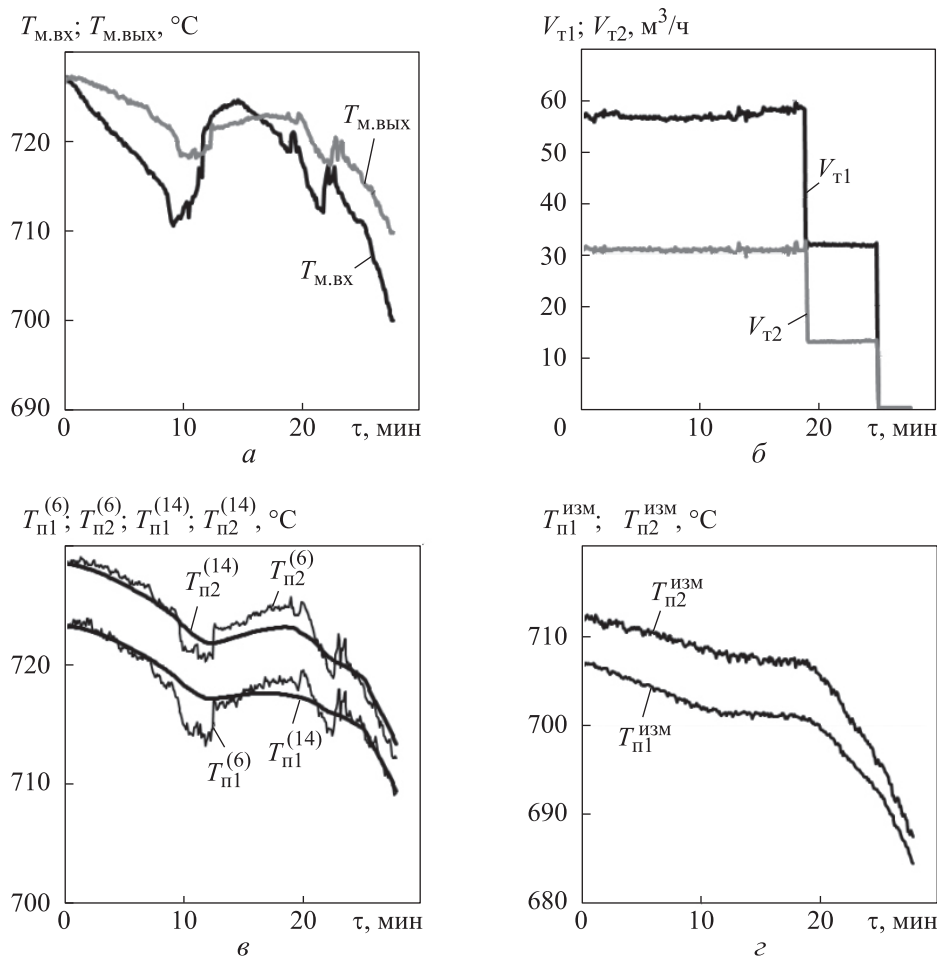


Рис. 7. Пример прогноза параметров по данным одного из отобранных периодов времени:
 а — температуры металла на входе в секцию выдержки $T_{м.вх}$ и на выходе из нее $T_{м.вых}$;
 б — расходы топлива в первой V_{T1} и второй V_{T2} зонах; в — температуры РП, полученные по выражениям (6) и (14) для первой $T_{п1}^{(6)}, T_{п1}^{(14)}$ и второй $T_{п2}^{(6)}, T_{п2}^{(14)}$ зон соответственно;
 г — измеренные температуры РП в первой $T_{п1}^{изм}$ и второй $T_{п2}^{изм}$ зонах

Пределы вариации динамических параметров СП

Скорость движения СП, м/мин	Ширина СП, м	Толщина СП, м	Коэффициент усиления k_1	Постоянная времени T_1
130	1,414	0,00147	0,3350/0,3045	415,1/189,4
30	1,274	0,00036	0,8560/0,7011	1061,8/436,1

Примечание. В числителе дроби указаны значения для первой зоны, в знаменателе — для второй.

в базе данных режимов приведены в таблице. Установлено, что для секции выдержки возможно изменение значений динамических параметров объекта в 2–2,5 раза.

Выводы

1. Представление сигналов в виде приращений относительно начального для периода момента времени позволило получить модели для

точного прогноза хода многостадийных процессов термической обработки на основе тепловых балансов отдельных стадий. Составление таких балансов обычно затруднено высокой инерцией подобных объектов и неизвестными возмущениями. Модели позволяют решить такие задачи управления термической обработкой стали, как робастное управление; своевременный учет технологических ограничений, связанных с мощностью систем нагрева и

охлаждения; планирование и упреждающее управление переходными процессами для энергосбережения путем уменьшения перегрева металла; оптимизация тепловых нагрузок по зонам секций термической обработки на основе наблюдателя тепловых потерь.

2. Дальнейшее совершенствование моделей требует тестирования систем прогноза тепловых потерь на производственных данных, в ходе которого могут быть пересмотрены принятые статьи теплового баланса и сделанные допущения.

3. Первым недостатком наблюдателя температуры РП многозонных печей является оценка перепада температур между зонами на основе измеренных значений температур. Последние не дают полного представления о фактическом температурном состоянии зон, что демонстри-

рует рассмотренный пример. Одним из путей решения проблемы является применение эмпирических моделей для оценки текущего температурного состояния зон с учетом температуры отходящих дымовых газов как комплексной характеристики процессов теплообмена в зоне.

4. Вторым недостатком наблюдателя температуры РП многозонных печей является игнорирование уровня измеренных температур РП при прогнозе температуры металла на выходе из печи после технологических возмущений. Прогноз выполняют на основе оценки температуры РП. Однако, как показано в работе [13], эту проблему можно решить переходом к гибридной модели, эмпирический компонент которой позволяет учесть фактически измеренные температуры РП.

Литература

- [1] Никифоров Б.А., Салганик В.М., Денисов С.В. и др. Освоение производства высокопрочного проката для автомобилестроения в ОАО «ММК». *Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2006, № 4, с. 41–45.
- [2] Chavan R.R. *Analysis of energy consumption in continuous galvanizing lines*. Master of science thesis. West Virginia University, 2006. 83 p.
- [3] Sundaramoorthy S., Phuong Q., Gopalakrishnan B. et al. Heat balance analysis of annealing furnaces and zinc pot in continuous hot dip galvanizing lines. *Energy Eng.*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 12–47, doi: <https://doi.org/10.1080/01998595.2016.11668651>
- [4] Niederer M., Strommer S., Steinboeck A. et al. Nonlinear model predictive control of the strip temperature in an annealing furnace. *J. Process Control*, 2016, vol. 48, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.09.012>
- [5] Guo C., Zhang Y., You X. et al. Optimal control of continuous annealing process using PSO. *Proc. IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, 2009, pp. 602–606, doi: <http://doi.org/10.1109/ICAL.2009.5262851>
- [6] Wang Z., Wang X. Multiobjective multifactorial operation optimization for continuous annealing production process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, vol. 58, no. 41, pp. 19166–19178, doi: <http://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03399>
- [7] Shi H., Guo L., Wang Y. et al. Optimization of temperature setting in heating section by multi-objective particle swarm. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2018, vol. 34, pp. 733–740.
- [8] Ryabchikov Yu.M. Selection of steel strip annealing energy-saving conditions in view of the substandard products share. *J. Chem. Technol. Metall.*, 2020, vol. 55, no. 1, pp. 182–191.
- [9] Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E. et al. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel. *Steel Transl.*, 2021, vol. 7, no. 51, pp. 446–455, doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091221070081>
- [10] Рябчиков М.Ю. Выбор структуры и критерия адаптации модели нагрева стальной полосы в протяжных печах. *Вестник МГТУ Станкин*, 2018, № 1, с. 66–75.
- [11] Kazuhiro Yahiro, Hiroyasu Shigemori, Kazuhiro Hirohata. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proc. IECON '93 — 19th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics*, 2002, pp. 481–486, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.1993.339029>
- [12] «Северсталь» применяет цифровые технологии собственной разработки для производства оцинкованного проката. *cntd.ru: веб-сайт*. URL: <https://cntd.ru/news/>

- read/severstal-primenyaet-cifrovye-tehnologii-sobstvennoy-razrabotki-dlya-proizvodstva-ocinkovannogo-prokata (дата обращения: 15.10.2023).
- [13] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С. Гибридная модель для упреждающего управления температурой металла при горячем оцинковании стальной полосы. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2023, т. 24, № 8, с. 421–432, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.24.421-432>
- [14] Рябчиков М.Ю., Барков Д.С.Х., Рябчикова Е.С. Управление нагревом металла в методических печах с учетом распределения внешних тепловых потерь по длине печи. *Металлообработка*, 2016, № 6, с. 38–47.
- [15] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Кокорин И.Д. Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2020, т. 21, № 3, с. 143–157, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.21.143-157>

References

- [1] Nikiforov B.A., Salganik V.M., Denisov S.V. et al. Mastering the production of high-strength rolled products for the automotive industry at MMK. *Vestnik magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 4, pp. 41–45. (In Russ.).
- [2] Chavan R.R. *Analysis of energy consumption in continuous galvanizing lines*. Master of science thesis. West Virginia University, 2006. 83 p.
- [3] Sundaramoorthy S., Phuong Q., Gopalakrishnan B. et al. Heat balance analysis of annealing furnaces and zinc pot in continuous hot dip galvanizing lines. *Energy Eng.*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 12–47, doi: <https://doi.org/10.1080/01998595.2016.11668651>
- [4] Niederer M., Strommer S., Steinboeck A. et al. Nonlinear model predictive control of the strip temperature in an annealing furnace. *J. Process Control*, 2016, vol. 48, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.09.012>
- [5] Guo C., Zhang Y., You X. et al. Optimal control of continuous annealing process using PSO. *Proc. IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, 2009, pp. 602–606, doi: <http://doi.org/10.1109/ICAL.2009.5262851>
- [6] Wang Z., Wang X. Multiobjective multifactorial operation optimization for continuous annealing production process. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2019, vol. 58, no. 41, pp. 19166–19178, doi: <http://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03399>
- [7] Shi H., Guo L., Wang Y. et al. Optimization of temperature setting in heating section by multi-objective particle swarm. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2018, vol. 34, pp. 733–740.
- [8] Ryabchikov Yu.M. Selection of steel strip annealing energy-saving conditions in view of the substandard products share. *J. Chem. Technol. Metall.*, 2020, vol. 55, no. 1, pp. 182–191.
- [9] Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E. et al. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel. *Steel Transl.*, 2021, vol. 7, no. 51, pp. 446–455, doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091221070081>
- [10] Ryabchikov M.Yu. The choice of structure and criteria of adaptation models heat the steel strip in broaching furnaces. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik MSUT Stankin], 2018, no. 1, pp. 66–75. (In Russ.).
- [11] Kazuhiro Yahiro, Hiroyasu Shigemori, Kazuhiro Hirohata. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proc. IECON '93 — 19th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics*, 2002, pp. 481–486, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.1993.339029>
- [12] “Severstal” applies proprietary digital technologies to produce galvanised rolled products. *cntd.ru: website*. URL: <https://cntd.ru/news/read/severstal-primenyaet-cifrovye-tehnologii-sobstvennoy-razrabotki-dlya-proizvodstva-ocinkovannogo-prokata> (accessed: 15.10.2023). (In Russ.).
- [13] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Novak V.S. Hybrid model for metal temperature control during hot dip galvanizing of steel strip. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 8, pp. 421–432, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.24.421-432> (in Russ.).

- [14] Ryabchikov M.Yu., Barkov D.S.Kh., Ryabchikova E.S. Metal heating management in continuous furnaces with allowance for distribution of external heat losses lengthways. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2016, no. 6, pp. 38–47. (In Russ.).
- [15] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Kokorin I.D. System of temperature stabilization in a heating furnace based on sliding mode control and fuzzy logic. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 143–157, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.21.143-157> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 31.10.2023

Информация об авторах

РЯБЧИКОВ Михаил Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления». МГТУ им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: mr_mgn@mail.ru).

РЯБЧИКОВА Елена Сергеевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления». МГТУ им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: mika.elena@mail.ru).

Information about the authors

RYABCHIKOV Mikhail Yurievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Automated Control Systems. Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: mr_mgn@mail.ru).

RYABCHIKOVA Elena Sergeevna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Automated Control Systems. Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: mika.elena@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. Модели для упреждающего управления тепловыми процессами термической обработки стали на агрегатах непрерывного горячего оцинкования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 80–96, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-80-96

Please cite this article in English as:

Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S. Models for predictive thermal control in steel heat treatment using the continuous HD galvanizing units. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 80–96, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-80-96



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник под редакцией К.С. Колесникова, В.В. Дубинина «Курс теоретической механики»

Изложены кинематика, статика, динамика точки, твердого тела и механической системы; аналитическая механика; теория колебаний; теория удара; введение в динамику тел переменной массы; основы небесной механики. Приведены примеры решения задач.

Содержание учебника соответствует программе и курсу лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для студентов машиностроительных вузов и технических университетов. Может быть полезен аспирантам и преподавателям, а также специалистам в области статики и динамики механических систем.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>