



ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫМ КОМПЛЕКСОМ.

Ч. II

А. Л. Генкин, А. Р. Куделин

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Разработаны принципы исходной настройки и ее коррекции системы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом «печи—стан». Определена эффективность системы в различных энергосберегающих режимах.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические особенности энергосберегающего управления листопрокатным комплексом (ЛПК) «печи—стан», состоящим из нагревательных печей и широкополосного стана горячей прокатки, рассмотрены в работе [1]. В соответствии с ними укрупненно технологическую линию «нагрев слябов — горячая прокатка полос» можно разбить на 3 основных участка: нагревательные печи, черновую группу клетей, чистовую группу клетей с прилегающим к ее входу промежуточным рольгангом. Толщина и температура прокатываемого металла меняются, соответственно, от $H_{сл}$ и $T_{сл}$ для сляба на выходе из участка нагревательных печей до $H_{п}$ и $T_{п}$ для подката на выходе черновой группы клетей, затем в чистовой группе клетей от толщины $H_{ч} = H_{п}$ и $T_{ч}$ на ее входе до конечных значений толщины h и температуры конца прокатки $T_{к.п}$ на ее выходе. Ширина сляба B практически не меняется в линии прокатки. Принято, что в соответствующих точках технологической линии толщина металла задана и остается неизменной, а энергосберегающее управление осуществляется посредством изменения толщин (обжатий) в прокатных клетях и температуры нагрева сляба $T_{сл}$. Естественно, при этом для обеспечения координации подсистем управления отдельными участками технологической линии температура металла в соответствующих ключевых точках может изменяться в определенных пределах.

Собственно процесс энергосберегающего управления может быть разделен на две стадии: исходную настройку ЛПК «печи—стан» и ее коррекцию.

Исходная настройка должна обеспечить некоторый оптимальный в определенном смысле режим прокатки, а ее параметры определяются заранее. Коррекция исходной настройки, осуществляемая на основе получае-

мой в процессе прокатки информации, должна обеспечить поддержание оптимального режима прокатки при отклонении параметров процесса от расчетных значений.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ИСХОДНОЙ НАСТРОЙКИ ЛПК «ПЕЧИ—СТАН»

Для оптимизации исходного состояния технологической линии «нагрев металла — горячая прокатка полос» проведено ее исследование на ЭВМ с помощью математической модели, имитирующей как процесс нагрева и прокатки металла в соответствии с методикой [1] расчета оптимальных управляющих воздействий, так и функционирование системы управления. Критерий оптимальности энергосберегающего управления исходной настройкой представлен в виде минимума суммарных удельных (на единицу массы металла) затрат на нагрев и прокатку металла:

$$Z_T + Z_3 + Z_{ок} \rightarrow \min.$$

Здесь $Z_T = C_T P_T$, $Z_3 = C_3 P_3$, $Z_{ок} = C_{ок} P_{ок}$, где Z_T , C_T и P_T — затраты, цена и расход топлива в нагревательных печах; Z_3 , C_3 и P_3 — затраты, цена и расход электроэнергии в прокатных клетях; $Z_{ок}$, $C_{ок}$ и $P_{ок}$ — затраты, цена и расход металла, ушедшего в окалину при его нагреве в печах.

Область допустимых управлений определена ограничениями X_{ji} на энергосиловые и геометрические параметры прокатных клетей x_{ji} :

$$x_{ji} \leq X_{ji},$$

где i — номер клетки ($i = 1, 2, \dots, k$); j — номер контролируемого параметра ($j = 1, 2, \dots, n$); k — число клетей; n — число контролируемых параметров i -й клетки.

В целом в процессе обработки металла в ЛПК «печи—стан» могут быть реализованы следующие варианты энергосберегающего режима исходной настройки клетей [2]:

Топливосберегающий режим. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для минимизации тепловых потерь. Обеспечивает минимальный расход топлива и угара металла в нагревательных печах.

Электросберегающий режим. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для обеспечения минимального расхода электроэнергии в главных приводах прокатных клетей.

Режим полной загрузки. Может быть реализован для обеспечения полной загрузки клетей группы по какому-либо параметру ($x_{ji} = X_{ji}$). Предназначен, в основном, для черновой группы клетей, так как чистовая группа не может быть полностью загружена по технологическим соображениям.

Режим равномерной загрузки. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для обеспечения равномерной загрузки всех клетей группы по какому-либо из наиболее значимых параметров, например, усилию прокатки P_i в каждой i -й клетке.

Режим контролируемой прокатки. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для обеспечения заданного значения температуры металла на входе и выходе соответствующей группы клетей.

Все перечисленные режимы целесообразно оценивать, сравнивая с режимом прокатки с фиксированными обжатиями. Этот режим не является энергосберегающим и в настоящее время реализуется в черновых и чистовых клетях в соответствии с технологической инструкцией на нагрев и прокатку металла.

С учетом вышеизложенного, а также исходя из того, что суммарные затраты на нагрев и прокатку металла в большей степени определяются изменением режима обжатий в черновой группе, чем в чистовой, очевидно, что черновая группа является более представительной с точки зрения выбора режимов исходной настройки прокатных клетей [3]. В связи с этим графическая интерпретация описанных выше режимов исходной настройки далее представлена для черновой группы клетей. Качественный характер иллюстраций для условий прокатки в чистовой группе клетей имеет аналогичный вид.

При исходной настройке технологической линии «нагрев металла — черновая прокатка полос» температура металла в ключевых точках может изменяться в определенных пределах [1]:

$$T_{\text{сл}}^{\min} \leq T_{\text{сл}} \leq T_{\text{сл}}^{\max}, \quad T_{\text{п}}^{\min} \leq T_{\text{п}} \leq T_{\text{п}}^{\max}, \quad (1)$$

где $T_{\text{сл}}^{\min}$, $T_{\text{п}}^{\min}$ — минимальные значения температур $T_{\text{сл}}$ и $T_{\text{п}}$, обеспечение которых происходит без перегрузки оборудования стана; $T_{\text{сл}}^{\max}$, $T_{\text{п}}^{\max}$ — максимально возможная по условиям оплавления металла температура $T_{\text{сл}}$ и соответствующая ей температура $T_{\text{п}}$.

Основные показатели энергосберегающих режимов прокатки представлены в таблице, где $T_{\text{сл}}^*$ и $T_{\text{п}}^*$ — заданные значения температур $T_{\text{сл}}$ и $T_{\text{п}}$.

Из теории и практики прокатного производства известно, что минимальные потери тепла при обработке металла в черновой группе имеют место при максимальной загрузке ее последних по ходу прокатки клетей с соответствующим уменьшением загрузки первых клетей. Уменьшение обжатий в последних клетях и перераспределение их в сторону первых клетей приводит к увеличению потерь тепла в черновой группе. С учетом этой особенности разработана эвристическая процедура изменения обжатий в прокатных клетях, обеспечивающая перераспределение загрузки клетей в соответствии с выбранным критерием оптимальности (см. таблицу).

В работе [1] показано, что при заданном значении $T_{\text{п}}^*$ топливосберегающий режим обеспечивает минимальные потери тепла в технологической линии «нагрев металла — черновая прокатка полос», минимизируя тем самым температуру $T_{\text{сл}}$ и суммарные затраты на топливо и ушедший в окалину металл при его нагреве в печах. С учетом изложенного реализация топливосберегающего режима обеспечивается перераспределением загрузки в сторону последних клетей.

Электросберегающий режим требует наиболее высокого уровня температуры раската, снижая тем самым грузку электропривода и минимизируя затраты на электроэнергию в прокатных клетях. Очевидно, что в этом случае температура $T_{\text{сл}}$ не должна превышать максимально возможную по условиям оплавления металла температуру нагрева слябов $T_{\text{сл}}^{\max}$. Реализация электросберегающего режима обеспечивается перераспределением загрузки в сторону первых клетей.

Реализация более низких значений $T_{\text{п}}^*$ обеспечивается для топливосберегающего режима максимальной загрузкой все большего числа последних клетей, а для электросберегающего режима — первых клетей. Очевидно, что при полной загрузке клетей будут иметь место минимальные значения $T_{\text{п}}^{\min}$ и $T_{\text{сл}}^{\min}$ (точка a на рис. 2 в первой части настоящей работы [1]). Таким образом, режим исходной настройки с полной загрузкой клетей черновой группы обеспечивает наиболее низкий уровень температуры металла во всех черновых клетях и нагревательных печах. Этот режим соответствует минимальному расходу топлива и угару металла в печах, однако его особенность состоит в однозначном соответ-

Оптимальные (в соответствии с определенными критериями) режимы прокатки и соответствующие им функции цели и дополнительные условия

Режим	Функция цели	Дополнительные условия
Топливосберегающий	$Z_1 \rightarrow \min$	$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^*$
Электросберегающий	$Z_2 \rightarrow \min$	$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^*$
Полная загрузка клетей	$x_{ji} = X_{ji}$	$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^{\min}, T_{\text{сл}} = T_{\text{сл}}^{\min}$
Равномерная загрузка клетей	$P_i = \text{const}$	$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^*$
Контролируемая прокатка	$Z_3 \rightarrow \min$	$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^*, T_{\text{сл}} = T_{\text{сл}}^*$

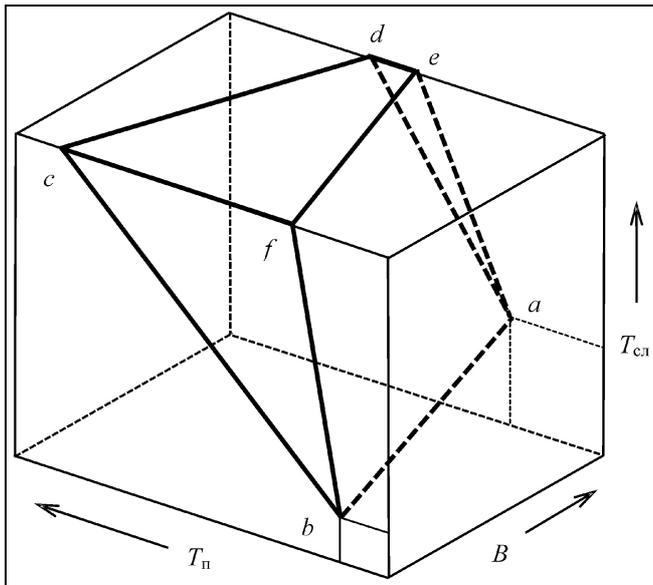


Рис. 1. Графическая интерпретация различных режимов исходной настройки клетей

вии температур $T_{сл}$ и $T_{п}$, обеспечение которых происходит без перегрузки оборудования стана [2]. При существующем в настоящее время соотношении цен $C_{э}/C_{т}$ рассмотренный режим (с учетом приведенной выше особенности) обеспечивает минимальные суммарные затраты на нагрев и прокатку металла [1].

Реализация режима прокатки с равномерной нагрузкой клетей обеспечивает, как следует из его названия, равномерность распределения усилий прокатки во всех клетях черновой группы.

Режим контролируемой прокатки подразумевает нагрев слэба в печи до определенной заданной температуры $T_{сл}^*$. В этом случае снижать затраты на топливо и угар металла не представляется возможным из-за невозможности изменения температуры $T_{сл}$. Энергосбережение для указанного режима заключается в перераспределении обжатий по клетям таким образом, чтобы обеспечить заданную температуру $T_{п}^*$ подката на выходе черновой группы клетей при минимальном расходе электроэнергии в прокатных клетях.

Графическая интерпретация различных режимов исходной настройки клетей представлена на рис. 1 [4].

Пространство возможных состояний параметров прокатки ограничено многогранником $abcdef$. Параметры прокатки, лежащие на грани $abcd$, соответствуют топливосберегающему режиму, а лежащие на грани $abfe$ — электросберегающему режиму. Грань $cdef$ характеризует ограничение температуры нагрева металла в печи. Ребро ab отображает режим полной загрузки всех клетей черновой группы. Таким образом, для каждой точки множества $(B, T_{п}, T_{сл})$, заключенного в многограннике $abcdef$, может быть рассчитана исходная настройка режима обжатий, обеспечивающая выбранные координаты параметров прокатки.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ИСХОДНОЙ НАСТРОЙКИ

Реализация энергосберегающего режима исходной настройки обеспечивает оптимальный режим обжатий в прокатных клетях в соответствии с выбранным критерием оптимальности при условии нагрева слэбов в печах до рекомендуемой температуры нагрева $T_{сл}$. Если же реальная температура нагрева слэба по тем или иным причинам отклоняется от уставки температуры $T_{сл}$, температура раската в клетях не будет соответствовать рассчитанным значениям, что может привести к отклонению температуры подката на выходе группы клетей и даже к перегрузке клетей.

Коррекция исходной настройки в реальном масштабе времени может быть осуществлена путем перераспределения обжатий в отдельных клетях на основе косвенного определения температуры металла по измеренным энергосиловым параметрам прокатки. Предлагаются два способа стабилизации температуры подката на выходе из черновой группы клетей.

1. Для черновой группы с последовательным расположением клетей регулирование температуры металла в реальном масштабе времени осуществляется в соответствии с принципами, изложенными в работе [5]. Черновая группа условно разбивается на ряд областей управления, в каждую из которых входят три клетки: i — измерительная, $(i + 1)$ — регулирующая, $(i + 2)$ — контролирующая. Для первой области i -я клеть — это печь, для последней области $(i + 2)$ -я клеть — последняя клеть черновой группы. Так, например, для пятиклетевой черновой группы можно выделить 4 области управления:

- выход печи (i) — 1-я клеть ($i + 1$) — выход 2-й клетки ($i + 2$);
- выход 1-ой клетки (i) — 2-я клеть ($i + 1$) — выход 3-й клетки ($i + 2$);
- выход 2-ой клетки (i) — 3-я клеть ($i + 1$) — выход 4-й клетки ($i + 2$);
- выход 3-ей клетки (i) — 4-я клеть ($i + 1$) — выход 5-й клетки ($i + 2$).

Температура металла в клетки определяется косвенным образом на основе измеренного значения мощности (либо усилия) прокатки. Регулирование осуществляется при отклонении измеренной косвенным образом температуры в i -й клетки от расчетного значения, определенного при исходной настройке. Корректирующее воздействие для нажимного устройства $(i + 1)$ -ой клетки с целью изменения толщины раската на ее выходе рассчитывается таким образом, чтобы на выходе $(i + 2)$ -й клетки получить минимально возможное отклонение температуры металла от расчетного значения при неизменной (в пределах допуска) толщине раската на выходе этой клетки. Регулирование осуществляется с учетом приведенных ограничений, используемых при исходной настройке, а также дополнительных ограничений на значение и скорость перемещения нажимных винтов.

2. Для черновой группы, состоящей из двух реверсивных клетей («дуо» и «кварто»), предложена концепция двухканального («грубого» и «тонкого») регулирования [6]. Функционирование канала «грубого» регулирования основано на косвенном измерении температуры

прокатываемого металла в функции тока якоря главного привода клетки «дуо» с использованием адаптивной настройки коэффициентов в функции отклонения измеренной температуры подката от заданной. Перераспределение обжатий в клетки «кварто» с использованием канала «тонкого» регулирования основано на непосредственном измерении температуры металла до и после клетки «кварто» с помощью адаптивной модели, учитывающей основные параметры прокатки.

Отметим, что точность косвенного метода определения температуры металла зависит от точности температурных моделей и полного учета всех возмущающих факторов, влияющих на температуру металла в процессе прокатки. Указанные факторы трудно учесть с помощью коэффициентов температурных моделей, что, безусловно, сказывается на точности регулирования. С учетом изложенного, предусматривается коррекция расчетных значений параметров прокатки по измеренной температуре подката с помощью датчика температуры (пирометра), установленного на выходе черновой группы клетей.

Если имеет место отклонение измеренной температуры подката на выходе из черновой группы от ее заданного значения, формируется сигнал коррекции, изменяющий расчетные значения температуры металла на выходе из печи и в каждой i -й клетки черновой группы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛПК «ПЕЧИ—СТАН»

По функциональному признаку система управления ЛПК «печи—стан» с точки зрения энергосбережения может быть разделена на отдельные подсистемы управления черновой и чистовой группами клетей. Для согласованного функционирования отдельных подсистем необходимо воспользоваться методологией системного анализа, в соответствии с которой устанавливаются возможные варианты реализации управления этими подсистемами, связь между ними и выбирается структура системы управления, отвечающая требованиям максимальной эффективности.

Как было отмечено, максимальной эффективности системы соответствуют минимальные суммарные удельные затраты на нагрев и прокатку металла. Выбирая оптимальную стратегию управления чистовой группой, следует учесть ее отличия от черновой группы. Прежде всего, скорость прокатки в каждой клетке непрерывной чистовой группы не постоянна, а зависит от толщины раската в этой клетке, что затрудняет моделирование энергосберегающего режима. Далее, на изменение параметров прокатки в чистовой группе клетей накладываются дополнительные ограничения, не позволяющие варьировать толщину раската в широких пределах. Наконец, пропускная способность чистовой группы может существенно отличаться от пропускной способности черновой группы и участка нагревательных клетей.

Исходя из изложенной общей стратегии оптимизации технологической линии «нагрев слэбов — горячая прокатка полос», в работах [2, 7] предлагается структура системы исходной настройки отдельных звеньев технологической линии и их координации для обеспечения минимальных суммарных затрат на нагрев и прокатку металла (рис. 2). Принято, что стан оборудован установ-

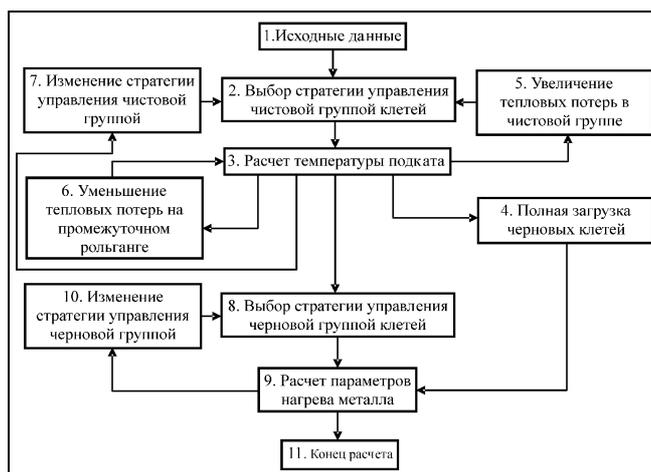


Рис. 2. Структура энергосберегающей системы управления ЛПК «печи—стан»

ками принудительного охлаждения металла в межклетевых промежутках чистовой группы, а промежуточный рольганг — управляемыми теплоизолирующими экранами для сокращения потерь тепла. Нагревательные печи позволяют осуществлять дифференцированный нагрев слэбов.

Система должна удовлетворять условиям (1), а также следующим: $T_{к.п} = T_{к.п}^*$, $V \leq V_{\max}$, $P_{п} \leq P_{с}$, где $T_{к.п}^*$ — заданное значение температуры полосы на выходе чистовой группы (температуры конца прокатки); V и V_{\max} — соответственно, реализованная и максимально возможная скорости прокатки в чистовой группе клетей; $P_{п}$ — производительность печей; $P_{с}$ — производительность стана (определяется производительностью чистовой группы клетей). Обозначения остальных параметров приведены выше.

Первоначально в систему (блок 1, см. рис. 2) вводятся следующие исходные данные прокатываемого типа-размера: $H_{сл}$, $H_{п}$, $T_{к.п}^*$, $T_{п}^{\min}$, $T_{п}^{\max}$, $T_{сл}^{\min}$, $T_{сл}^{\max}$, B , V_{\max} , а также максимально возможная производительность печей $P_{п}^{\max}$, соответствующая температуре нагрева $T_{сл}^{\min}$ при полной загрузке черновых клетей.

Для обеспечения максимальной производительности стана скорость прокатки в чистовой группе V выбирается максимальной. Затем по усмотрению оператора чистовой группы стана выбирается один из перечисленных режимов исходной настройки чистовых клетей (блок 2) и рассчитывается температура подката на выходе из черновой группы $T_{п}$ (блок 3). Если $T_{п} = T_{п}^{\min}$, то в черновой группе клетей может быть реализован наиболее экономичный режим исходной настройки с полной загрузкой клетей (блок 4).

Пониженное значение температуры подката $T_{п} < T_{п}^{\min}$ не позволяет осуществить прокатку металла в черновой группе без перегрузки клетей. Для повышения температуры $T_{п}$ до уровня $T_{п}^{\min}$ необходимо увеличить потери



тепла в чистовой группе клеток (блок 5). Это может быть достигнуто уменьшением скорости прокатки в чистовой группе $V < V_{\max}$, реализацией принудительного межклетевого охлаждения в чистовой группе или выбором нового режима исходной настройки чистовых клеток, обеспечивающего более высокое значение $T_{\text{п}}$. Отметим, что уменьшать скорость прокатки в чистовой группе целесообразно только в том случае, когда производительность стана больше производительности печей $\Pi_{\text{п}}^{\max}$.

При повышенном значении температуры подката $T_{\text{п}} > T_{\text{п}}^{\min}$ желательно понизить $T_{\text{п}}$ до уровня $T_{\text{п}}^{\min}$. Уменьшение потерь тепла может быть осуществлено регулированием положения теплоизолирующих экранов на промежуточном рольганге (блок 6). При полной реализации возможностей теплоизолирующих экранов тепловые потери на промежуточном рольганге будут минимальными. Если в результате окажется, что температура подката превышает максимально допустимое значение ($T_{\text{п}} > T_{\text{п}}^{\max}$), необходимо выбрать новый режим исходной настройки в чистовой группе клеток, обеспечивающий более низкое значение $T_{\text{п}}$ (блок 7).

При условии $T_{\text{п}} \leq T_{\text{п}}^{\max}$ в соответствии со сложившейся ситуацией оператором черновой группы выбирается один из режимов исходной настройки черновых клеток (блок 8) и рассчитывается требуемая температура нагрева сляба $T_{\text{сл}}$ (блок 9). Если температура $T_{\text{сл}}$ превышает максимально возможную по условиям оплавления металла величину $T_{\text{сл}}^{\max}$, осуществляется выбор нового режима исходной настройки черновых клеток, обеспечивающего более низкую температуру нагрева.

При выполнении условия $T_{\text{сл}} \leq T_{\text{сл}}^{\max}$ проверяется соответствие пропускной способности печей и стана. Если производительность печей превышает производительность стана, в блоке 10 необходимо выбрать новый режим исходной настройки черновых клеток, обеспечивающий более низкую производительность печей. Выполнение требования $\Pi_{\text{п}} \leq \Pi_{\text{с}}$ означает удовлетворение системы всем вышеперечисленным условиям и, таким образом, возможность нагрева и прокатки металла в соответствии с критерием минимальных суммарных затрат и обеспечения четкой координации всех звеньев технологической линии (блок 11).

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЛПК «ПЕЧИ—СТАН»

Эффективность создания энергосберегающей системы управления технологическим процессом можно рассматривать как с точки зрения энергетической и экологической безопасности производства, так и, собственно, оценки возможности изменения экономических показателей при реализации энергосберегающей технологии. Использование энергосберегающего управления улучшает энергоэкологическое качество производства, которое заключается, в уменьшении потребности в энергоносителях, в возможности замены, при необходимости,

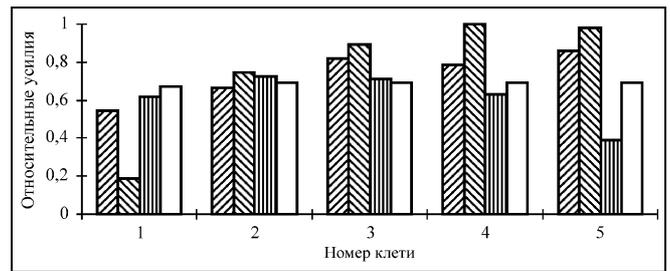


Рис. 3. Изменение относительных усилий по клетям черновой группы при различных режимах прокатки:

▨ — фиксированные обжатия; ▩ — топливосберегающий режим; □ — электросберегающий режим; □ — равномерная загрузка клеток

одного вида энергоресурсов другим (например, газа на электроэнергию) и, уменьшением влияния производства на окружающую среду [8, 9]. В рамках данной работы ограничимся подробным исследованием влияния энергосберегающего управления на технико-экономические показатели производства горячекатаных полос.

Стремительный рост цен на энергоресурсы во всем мире и возрастание энергетической составляющей в себестоимости металла позволяет рассматривать энергосбережение как мощный резерв повышения конкурентоспособности металлургических заводов и производимой ими металлопродукции. Опыт Института проблем управления РАН и ОАО «Черметавтоматика» по разработке инновационных мероприятий для металлургической промышленности показал возможность и эффективность применения компьютерных и информационных технологий и средств их реализации при решении задач энергосбережения для ЛПК «печи—стан». Такой опыт был приобретен на базе представленных результатов в виде алгоритмического и программного обеспечения СУЭТ (Система управления энергосберегающей технологией) для листовых станов горячей прокатки, использующих слябы, поступающие из нагревательных печей [4, 10].

Структурно программное обеспечение СУЭТ построено в соответствии с модульным принципом: каждый модуль реализует один из режимов исходной настройки или ее коррекции. Такое построение облегчает сравнительный анализ того или иного режима прокатки и выбор наиболее приемлемого в различных производственных ситуациях.

Обработка результатов моделирования, проведенного с помощью СУЭТ, позволила установить количественную и качественную зависимости энергетических расходов от режимов прокатки. На рис. 3 представлено распределение относительных (по сравнению с максимально возможным значением) усилий прокатки по клетям черновой группы при использовании различных режимов исходной настройки.

Внедрение энергосберегающей технологии неизбежно ведет к нарушению равномерности распределения энергосиловых параметров по прокатным клетям. Можно видеть, что загрузка клеток при топливо- и электросберегающих режимах сильно смещена: в первом случае — в сторону последних клеток, во втором случае —

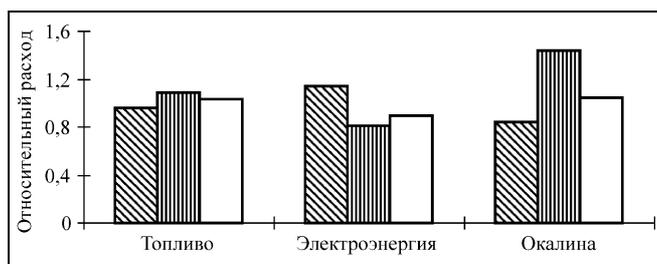


Рис. 4. Изменение относительных расходов при различных режимах прокатки:

▨ — топливосберегающий режим; ▤ — электросберегающий режим; □ — равномерная загрузка клетей

в сторону первых клетей черновой группы. Отсюда можно сделать вывод, что внедрение указанных режимов с полным использованием диапазона по перераспределению обжатий возможно лишь при работе автоматизированных систем управления, обеспечивающих надежное управление процессом и выполнение всех условий ограничения по энерготехнологическим параметрам. Однако на практике и в этом случае необходимо иметь запас регулирования по толщине и температуре раската для подсистем, работающих в реальном масштабе времени, или для предоставления оперативному персоналу черновой группы возможности ручного вмешательства в технологический процесс. Из сказанного следует, что в энергосберегающих системах управления необходимо предусматривать возможность равномерной загрузки клетей черновой группы стана.

Программное обеспечение СУЭТ позволяет реализовать режим прокатки с равномерной загрузкой клетей по какому-либо из энергосиловых параметров, в данном случае по усилию прокатки. Эффективность этого режима заключается в том, что относительные усилия прокатки практически постоянны во всех клетях черновой группы (см. рис. 3).

Эффективность энергосберегающего управления может быть наглядно представлена в сравнении с режимом прокатки с фиксированными обжатиями (в соответствии с технологическими инструкциями). Относительный (по сравнению с режимом прокатки с фиксированными обжатиями) расход топлива (газа), электроэнергии и металла, ушедшего в окалину, может быть меньше или больше единицы. В первом случае имеет место экономия соответствующего ресурса, а во втором — перерасход. Из представленных на рис. 4 данных видно, что относительный (по сравнению с режимом прокатки с фиксированными обжатиями) расход топлива может быть снижен на 4 % в топливосберегающем режиме, а относительный расход электроэнергии — на 19 % в электросберегающем режиме. С уменьшением ширины сляба B увеличивается диапазон регулируемости перераспределения обжатий в клетях черновой группы (см. рис. 1), поскольку ширина сляба B является одним из ограничений области допустимых управлений при исходной настройке клетей [2]. В связи с этим при прокатке слябов минимальной ширины топливосберегающий режим позволяет снизить относительный расход топлива на 8 %, а электроэнергии — в электросберегающем режиме — на 20 %.

Реализация режима исходной настройки с равномерной загрузкой клетей, обеспечивающего более стабильное управление в реальном масштабе времени, несколько снижает эффективность энергосберегающего управления по сравнению как с топливосберегающим, так и с электросберегающим режимами (см. рис. 4). Относительный расход металла, ушедшего в окалину, существенно зависит от температуры $T_{сл}$, уменьшаясь в топливосберегающем режиме и увеличиваясь в режимах с равномерной загрузкой и электросберегающем.

При существующем соотношении цен на электроэнергию и топливо суммарные затраты на нагрев и прокатку металла существенно выше по сравнению с режимом прокатки с фиксированными обжатиями при реализации электросберегающего режима (11–12 % в зависимости от ширины сляба) и ниже при реализации топливосберегающего режима (соответственно, 4–9 %). Это объясняется существенным преобладанием затрат на топливо в структуре суммарных затрат. Таким образом, реализация топливосберегающего режима исходной настройки черновых клетей, обеспечивая минимальную температуру нагрева слябов, обеспечивает тем самым минимальные затраты на топливо и потери от утара металла при его нагреве. В то же время первоочередное использование одного из энергосберегающих режимов может быть обусловлено дефицитом какого-либо энергоресурса (топлива или электроэнергии).

Анализ эффективности коррекции исходной настройки в реальном масштабе времени при разбивке черновой группы клетей на ряд областей управления показал, что эффективность регулирования температуры в каждой области управления повышается с уменьшением ширины раската, а наиболее эффективны последние по ходу прокатки клетки черновой группы. Отметим, что коррекция исходной настройки позволяет практически стабилизировать температуру подката при изменении температуры нагрева сляба в диапазоне ± 30 °C, а при отсутствии указанной коррекции отклонение температуры подката составило бы ± 18 – 22 °C [10]. Таким образом, регулирование температуры подката в темпе с процессом прокатки может являться дополнительной целью оптимального управления, так как стабильность температуры подката создает возможность воспроизводства условий прокатки в чистой группе клетей.

Для реализации оптимального управления черновой группой широкополосного стана горячей прокатки с применением энергосберегающей технологии разработана структурная схема АСУ с оптимизацией режимов прокатки [10]. В основу АСУ положена двухуровневая структура, обеспечивающая управление температурой металла как в режиме прогноза, так и в реальном масштабе времени. К верхнему уровню относится подсистема оптимизации исходной настройки технологической линии, т. е. определение оптимальных (в смысле минимума энергетических затрат) значений температуры и толщины металла во всех звеньях линии. На нижнем уровне осуществляется коррекция исходной настройки и обработка текущей информации. Иерархическая структура системы и режим ее работы позволяют, при необходимости, использовать ее технические и программные средства по уровням независимо друг от друга.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во второй части рассмотрены различные варианты энергосберегающих режимов исходной настройки клетей, сформулированы соответствующие функции цели и дополнительные условия.

Предложены методы коррекции исходной настройки ЛПК «печи—стан» в реальном масштабе времени, основанные на косвенном измерении параметров прокатки.

Сформулированы принципы построения энергосберегающих систем управления ЛПК «печи—стан», основанные на регулировании температуры металла в ключевых точках технологической линии в соответствии с локальными критериями оптимальности отдельных звеньев ЛПК и четкой их координацией.

Определена эффективность энергосберегающего управления с точки зрения сокращения энергоресурсов и суммарных удельных затрат на нагрев и прокатку металла, а также возможности стабилизации температуры подката.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Генкин А. Л., Куделин А. Р.* Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч. I // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 50—54.
2. *Генкин А. Л.* Принципы построения энергосберегающих систем управления листовыми станами горячей прокатки // Тр. Ин-та пробл. упр. РАН. — М.; 1998. — Т. 1. — С. 40—47.
3. *Системы и средства автоматизации энергосберегающей технологии в прокатном производстве / Ю. П. Божко, А. Л. Генкин, Я. С. Масальский, Л. Ф. Ромашкевич //*

Черная металлургия: Бюлл. ин-та «Черметинформация». — 1987. — Вып. 23. — С. 21—36.

4. *Генкин А. Л., Куделин А. Р.* Система управления для реализации энергосберегающей технологии в прокатном производстве // Приборы и системы управления. — 1997. — № 10. — С. 9—11.
5. *А. с. 1444003 СССР.* Устройство регулирования температуры подката для широкополосного стана горячей прокатки / Ю. П. Божко, Н. П. Бычков, Д. Н. Добронравов и др. // Открытия. Изобретения. — 1988. — № 46. — С. 44.
6. *Stabilization system for the bar temperature in the roughing train of the strip mill / A. L. Genkin, A. R. Kudelin, Yu. P. Bozhko, et al. // Preprints of the 8-th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processin — Sun City, South Africa. — 1995. — P. 115—117.*
7. *Власов С. А., Генкин А. Л., Волочек Н. Г.* Как решить актуальные проблемы автоматизации металлургических предприятий России // Промышленность России. — 2000. — № 1. — С. 47—54.
8. *Компьютерные технологии для инновационных мероприятий по экологичности и энергосбережению в металлургическом производстве / Т. И. Овчинникова, С. О. Ефимов, С. А. Власов, А. Л. Генкин // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 1. — С. 10—12.*
9. *Колесников Е. В., Тригорлый С. В.* Энергорасточительство — угроза энергетической безопасности // Промышленная энергетика. — 2005. — № 4. — С. 2—6.
10. *Генкин А. Л., Власов С. А., Масальский Я. С.* Возможности энергосберегающего управления листопрокатным комплексом // Автоматизация в промышленности. — 2003. — № 3. — С. 44—47.

☎ (495) 334-87-59;

e-mail: genfone@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Г. Бутковским. □

Новые книги

Дилигенский Н. В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. — Самара: Офорт, 2005. — 126 с.

Динамические системы и проблемы управления. — Екатеринбург: ИМЭХ, 2005. — 240 с.

Доррер Г. А. Методы моделирования дискретных систем. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. — 171 с.

Искаков М. Б. Модели и методы управления привлечением вкладов в банковскую сберегательную систему. — М.: ИПУ, 2006. — 156 с.

История и синергетика: методология исследования. — М.: URSS, 2005. — 180 с.

Карабутов Н. Н. Адаптивная идентификация систем. — М.: URSS, 2006. — 383 с.

Мелехин В. Ф. Вычислительные машины, системы и сети. — М.: Academia, 2006. — 555 с.

Синергетические методы управления сложными системами. — М.: URSS, 2006. — 300 с.

Сороко Э. М. Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем. — М.: URSS, 2006. — 264 с.

Спектральные последовательности в топологии. — М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2005. — 631 с.

Труханов В. М. Надежность сложных технических систем типа подвижных установок на этапах производства и эксплуатации. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 443 с.

Управление качеством электроэнергии. — М.: Изд. дом МЭИ, 2006. — 319 с.

Финн В. К. Интеллектуальные системы и общество. — М.: URSS, 2006. — 356 с.

Фридман Л. М. Величины и числа. — М.: URSS, 2006. — 223 с.

Шамис А. Л. Пути моделирования мышления. — М.: URSS, 2006. — 333 с.

Щенникова Е. В. Устойчивоподобные свойства решений нелинейных управляемых систем. — М.: РУДН, 2006. — 112 с.