

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫМ КОМПЛЕКСОМ

А.Л. Генкин, С.А. Власов (ИПУ РАН),  
Я.С. Масальский (ОАО "Черметавтоматика")

Рассматриваются возможности использования компьютерных и информационных технологий для решения задач энергосбережения в листопрокатном комплексе, включающем печи для нагрева металла и клети для прокатки полос. Предложена структура автоматизированной системы для реализации энергосберегающего управления и показана возможность оптимизации режимов прокатки по выбранным критериям.

Снижение расходов на производство и, прежде всего, его энергоемкости — одно из приоритетных направлений развития черной металлургии в настоящее время. Существенный интерес представляет изучение возможности снижения энергозатрат при производстве горячекатаной полосы и разработка алгоритмического и ПО для АСУ, использующей энергосберегающую технологию при горячей прокатке полос.

В Институте проблем управления РАН совместно с ОАО "Черметавтоматика" разработана концепция создания системы, обеспечивающей снижение энергозатрат при нагреве и прокатке металла, которая реализована в виде алгоритмического и программного обеспечения СУЭТ (Система Управления Энергосберегающей Технологией). Собственно процесс энергосберегающего управления разделен на две стадии: исходную настройку листопрокатного комплекса "печи — стан" и ее коррекцию [1]. Исходная настройка должна обеспечить некоторый оптимальный в определенном смысле режим прокатки, а ее параметры определяются заранее. Коррекция исходной настройки, осуществляемая на основе получаемой в процессе прокатки информации, должна обеспечить поддержание оптимального режима прокатки при отклонении параметров процесса от расчетных значений.

Анализ энергетических потерь в линии широкополосных станков горячей прокатки показал, что при разработке энергосберегающей системы управления листопрокатным комплексом "печи — стан" следует отдать предпочтение исходной настройке системы в соот-

ветствии с критерием минимальных суммарных удельных (на единицу массы сляба) затрат на нагрев и прокатку металла. Основными составляющими затрат являются затраты на топливо (газ) при нагреве сляба, на электроэнергию при прокатке металла, а также потери металла из-за угара в печи. В то же время необходимо учитывать, что в зависимости от сложившейся производственной ситуации может возникнуть необходимость использования критериев равномерной загрузки клетей, прокатки с фиксированной температурой на входе/выходе из группы клетей, минимизации потерь тепла, электроэнергии и др. В группу ограничений при оптимизации энергосберегающего управления входят требования, обусловленные предельными значениями параметров ТП, конструктивными характеристиками агрегатов и их компоновкой. Целью управления является расчет температуры нагрева сляба в печи  $T_{cl}$  путем выбора режима обжаривания в прокатных клетях с учетом принятых критерия оптимальности и ограничений.

Система СУЭТ позволяет реализовать следующие режимы исходной настройки листопрокатного комплекса "печи — стан" [2]:

- прокатки с фиксированными обжариваниями. Предназначен для расчета  $T_{cl}$  при прокатке с заданными в соответствии с технологической инструкцией на обработку металла значениями толщины сляба  $H_{cl}$  и подката  $H_n$ , ширины сляба  $B$ , требуемой температуры подката  $T_n$  и режима обжаривания в прокатных клетях;

- энергосберегающий — предназначен для расчета  $T_{cl}$ , обжаривания и энергосиловых параметров в черновых клетях, обеспечи-

вающих минимальные суммарные затраты на нагрев и прокатку металла при заданных значениях  $H_{cl}$ ,  $H_n$ ,  $B$  и  $T_n$ ;

- топливосберегающий — обеспечивает минимальный расход топлива и угара металла в нагревательных печах при заданных значениях  $H_{cl}$ ,  $H_n$ ,  $B$  и  $T_n$ ;

- электросберегающий — обеспечивает минимальный расход электроэнергии в главных приводах прокатных клетей при заданных значениях  $H_{cl}$ ,  $H_n$ ,  $B$  и  $T_n$ ;

- полной загрузки — предназначен для обеспечения полной загрузки прокатных клетей по какому-либо параметру при заданных значениях  $H_{cl}$ ,  $H_n$  и  $B$ ;

- равномерной загрузки — предназначен для расчета  $T_{cl}$ , обжаривания и энергосиловых параметров в черновых клетях, обеспечивая равномерную загрузку всех клетей по какому-либо параметру при заданных значениях  $H_{cl}$ ,  $H_n$ ,  $B$  и  $T_n$ ;

- контролируемой прокатки — обеспечивает минимальный расход электроэнергии в главных приводах прокатных клетей при заданных значениях  $T_{cl}$ ,  $T_n$ ,  $H_{cl}$ ,  $H_n$ ,  $B$  и  $T_n$ .

Режим исходной настройки с полной загрузкой черновой группы обеспечивает наиболее низкий уровень температуры раската во всех черновых клетях и нагревательных печах. Такой режим соответствует минимальному расходу топлива и угара металла в печах, однако его особенностью является однозначное соответствие  $T_{cl}$  и  $T_n$ , обеспечение которых происходит без перегрузки оборудования стана. Эта особенность не всегда является преимуществом указанного режима, так как температура подката на входе в чистовую группу

клетей может оказаться слишком низкой для безаварийной прокатки металла в чистовой группе. Если же требуется более высокое значение  $T_n$ , минимальные потери тепла обеспечивает топливосберегающий режим, минимизируя тем самым при существующем соотношении цен на топливо и электроэнергию суммарные затраты на нагрев и прокатку металла.

Электросберегающий режим требует наиболее высокого уровня температуры раската, снижая тем самым загрузку электропривода и минимизируя расход электроэнергии. Очевидно, что в этом случае  $T_{cl}$  не должна превышать максимально возможную по условиям оплавления металла температуру нагрева слябов. В противном случае должен быть реализован режим контролируемой прокатки с максимально возможной температурой нагрева.

При выборе режима исходной настройки с равномерной загрузкой клетей уровень температуры раската в черновой группе несколько ниже по сравнению с режимом контролируемой прокатки. Этот режим, обеспечивая равномерный износ валков всех клетей, может быть также использован в случае невозможности применения электросберегающего режима, как это было описано выше.

Графическая интерпретация различных режимов исходной настройки клетей представлена на рис. 1 [3]. Пространство возможных состояний параметров прокатки ограничено многогранником  $abcdef$ .

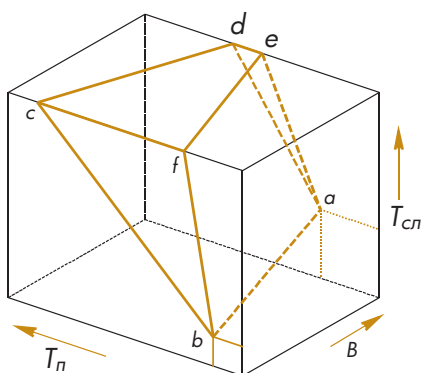


Рис. 1. Графическая интерпретация различных режимов исходной настройки клетей

Параметры прокатки, лежащие на грани  $abcd$ , соответствуют топливосберегающему режиму, а лежащие на грани  $abfe$  — электросберегающему. 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  $(B, T_n, T_{cl})$ , заключенного в многограннике  $abcdef$ , может быть рассчитана исходная настройка режима обжатий, обеспечивающая выбранные координаты параметров прокатки.

Реализация исходной настройки энергосберегающего управления обеспечивает оптимальный режим обжатий в прокатных клетях в соответствии с выбранным критерием оптимальности при условии нагрева слябов в печах до рекомендуемой температуры нагрева  $T_{cl}$ . Если же реальная температура нагрева сляба по тем или иным причинам отклоняется от уставки, 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 РМВ может быть осуществлена путем перераспределения обжатий в отдельных клетях на основе косвенного определения температуры металла по измеренным энергосиловым параметрам прокатки. Для черновой группы с последовательным расположением клетей регулирование температуры металла в РМВ осуществляется в соответствии с принципами, изложенными в [4]. 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  $i$ -ая клетка — это печь, для последней области  $(i+2)$ -ая клетка — последняя клетка черновой группы.

Температура металла в клетке определяется косвенным образом на основе измеренного значения мощности прокатки. Регулирование осуществляется при отклонении измеренной косвенным образом температуры в  $i$ -ой клетке от расчетного значения, определенного при исходной настройке. Затем производится расчет корректирующего воздействия для нажимного устройства  $(i+1)$ -ой клетки таким образом, чтобы на выходе  $(i+2)$ -ой 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 выше ограничений, используемых при исходной настройке, а также дополнительных ограничений на величину и скорость перемещения нажимных винтов.

Анализ показал, что эффективность регулирования температуры в каждой области управления повышается с уменьшением ширины раската, а наиболее эффективными являются последние по ходу прокатки клетки черновой группы. Следует отметить, что коррекция исходной настройки позволяет практически стабилизировать температуру подката при изменении температуры нагрева сляба в диапазоне  $\pm 30$  °С, а при отсутствии указанной коррекции отклонение температуры подката составило бы  $\pm 18...22$  °С. 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 чистовой группе клетей.

Для реализации энергосберегающего управления листопркатным комплексом "печи — стан" с использованием СУЭТ разработана структурная схема АСУ с оптимизацией режимов прокатки. В основу АСУ положена двуху-

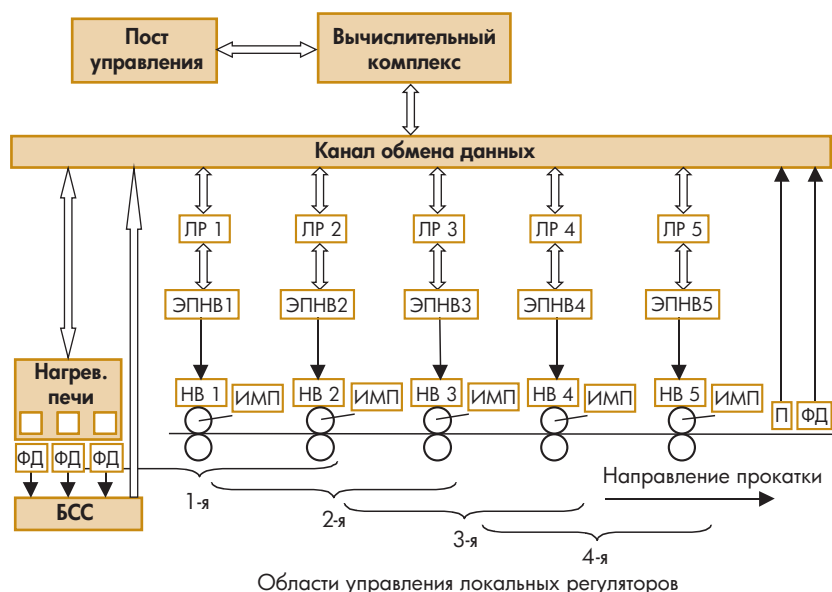


Рис. 2. Структурная схема АСУ с оптимизацией режимов прокатки, где ЭПНВ – электропривод нажимных винтов, ЛР – локальный регулятор, НВ – нажимные винты, БСС – блок слежения за продвижением сляба, ФД – фотодатчик наличия металла, П – пирометр, ИМП – измеритель мощности прокатки

ровневая структура, обеспечивающая управление температурой металла как в режиме прогноза, так и в РМВ (рис. 2).

К верхнему уровню относится подсистема оптимизации исходной настройки технологической линии, то есть определение оптимальных (в смысле минимума энергетических затрат) значений температуры и толщины металла во всех звеньях линии. Основными функциями подсистемы верхнего уровня являются:

- выбор стратегии управления (критерия оптимальности);
- расчет в соответствии с выбранным критерием оптимальности исходной настройки клеток черновой группы, обеспечивающей требуемые температуру и толщину раската на выходе из черновой группы и температуру слябов на выходе из нагревательных печей;
- адаптивная идентификация параметров прокатки;
- выбор программ настройки черновых клеток;
- расчет исходных данных для локальных систем регулирования в черновых клетях и печах;
- расчет ТЭП прокатки данного типоразмера;
- коррекция температуры подката.

На нижнем уровне осуществляется коррекция исходной настройки и обработка текущей информации. Основные функции подсистемы нижнего уровня:

- обработка входных сигналов с целью косвенного определения энергетических характеристик прокатки в черновых клетях;
- расчет и реализация коррекции обжатия металла в черновых клетях с целью обеспечения заданной температуры раската на выходе каждой клетки.

Выбор критерия оптимальности в зависимости от производственной ситуации в цехе осуществляется оператором черновой группы с поста управления (рис. 2). Затем с поста управления в вычислительный комплекс верхнего уровня вводятся исходные данные о типоразмере полос, подготовленных к прокатке. Вычислительный комплекс производит расчет оптимальных режимов прокатки и распределяет уставки на положение ИМ прокатных клеток через соответствующие локальные регуляторы, управляющие электроприводами нажимных винтов. После этого автоматически осуществляется установка нажимных винтов прокатных клеток в соответствии с расчетными значениями режимов

обжатий с помощью программы дистанционной перестройки, реализованной в вычислительном комплексе верхнего уровня.

Расчетные данные параметров прокатки (мощность прокатки, температура металла на выходе клеток черновой группы) для каждой клетки запоминаются и являются исходными для локальных регуляторов подсистемы нижнего уровня. Функционирование подсистемы нижнего уровня осуществляется в соответствии с изложенными выше принципами коррекции исходной настройки в РМВ с разбиением группы клеток на ряд областей управления. На основании измеренной в индикаторной клетке мощности прокатки производится косвенный расчет среднemasовой температуры металла в этой клетке. Затем рассчитывается коррекция обжатия раската в регулирующей клетке таким образом, чтобы стабилизировать температуру металла на выходе индикаторной клетки. По мере прохождения раскатом технологической линии черновой группы при наличии отклонения косвенно измеренной температуры металла от расчетных значений последовательно производится отработка управляющих воздействий регулируемыми клетями каждой области управления до выхода раската из последней клетки черновой группы. Тем самым минимизируется отклонение температуры подката от заданного значения.

Следует отметить, 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, в вычислительном комплексе верхнего уровня предусматривается коррекция расчетных значений параметров прокатки по измеренной температуре подката с исполь-

зованием датчика температуры (пирометра), установленного на выходе черновой группы клетей.

Система должна функционировать в следующих основных режимах:

- информационно-советующем, когда средства вычислительной техники осуществляют централизованный контроль объекта и выдают оперативному персоналу рекомендации по ведению процесса прокатки в зависимости от выбранного критерия оптимальности;

- комбинированного управления, при котором обеспечивается автоматическое управление параметрами настройки локальных систем регулирования;

- централизованного дистанционного управления нажимными устройствами прокатных клетей.

Иерархическая структура системы и режим ее работы позволяют, при необходимости, использовать ее технические и программные средства по уровням независимо друг от друга.

В зависимости от степени автоматизации объекта, система может поставляться:

- в полном объеме, включая все виды обеспечения (функциональную часть, а также информационное, математическое, программное, техническое и организационное обеспечение);

- как составная часть существующей общецеховой АСУ, включая математическое и программное обеспечение.

Структура системы должна быть синтезирована на базе теоретических исследований и моделирования на ЭВМ с использованием

**Масальский Ярослав Станиславович** – д-р техн. наук, генеральный директор ОАО "Черметавтоматика".

ПО СУЭТ, а также путем экспериментальной проверки диапазона управления температурным режимом прокатки на конкретном широкополосном стане. Класс решаемых задач математического обеспечения системы требует использования вычислительной техники, обладающей высоким быстродействием и большим объемом памяти. Подсистема верхнего уровня может быть реализована в виде вычислительного комплекса на базе современных операторских станций с использованием ПК, нижнего уровня – на базе промышленных микроконтроллеров.

Экономическая эффективность АСУ широкополосным станом с использованием энергосберегающей технологии при горячей прокатке определяется, в основном, следующими факторами:

- повышением производительности листопрокатного комплекса и уменьшением угара металла при нагреве слябов в печах благодаря сокращению времени нагрева;

- уменьшением затрат энергии на нагрев и прокатку металла;

- повышением качества готовой продукции благодаря стабилизации температуры подката на выходе из черновой группы клетей.

Эффект энергосбережения от повышения уровня управления с использованием СУЭТ может быть оценен в 5...10% от существующего уровня энергозатрат. Конкретное значение технико-экономических показателей зависит, в основном, от конструкции листопрокатного комплекса, объема производства проката, а также затрат на создание системы.

В 2001 г. комплекс разработок новых компьютерных и информационных технологий и средств их реализации в металлургическом производстве, включая разработку СУЭТ, был удостоен золотой медали на Первом международном салоне инноваций и инвестиций (Москва).

#### Список литературы

1. *Власов С.А., Генкин А.Л., Волочек Н.Г.* Как решить актуальные проблемы автоматизации металлургических предприятий России // Промышленность России. 2000. № 1. С. 47-54.
2. *Генкин А.Л.* Принципы построения энергосберегающих систем управления листовыми станами горячей прокатки // Тр. ИПУ РАН. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 1998. Т. 1. С. 40-47.
3. *Генкин А.Л., Куделин А.Р.* Система управления для реализации энергосберегающей технологии в прокатном производстве // Приборы и системы управления. 1997. № 10. С. 9-11.
4. *Божко Ю.П., Бычков Н.П., Добронравов Д.Н., Масальский Я.С., Генкин А.Л., Куделин А.Р.* Устройство регулирования температуры подката для широкополосного стана горячей прокатки // Авт. свид. СССР №1444003. Открытия. Изобретения. 1988. № 46. С. 44.

**Генкин Аркадий Львович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **Власов Станислав Александрович** – канд. техн. наук,

зав. сектором Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Контактные телефоны: (095) 334-87-59, 150-87-00.

E-mail: genfone@ipu.rssi.ru, vlasfot@ipu.rssi.ru, chermat@mcn.ru

#### КОЛОНКА РЕДАКТОРА

Обсуждаемая в номере тема "Автоматизированные системы в металлургической промышленности" вызвала широкий интерес со стороны специалистов, имеющих опыт создания АСУ и АСУТП на металлургических предприятиях. В обсуждении наметилась тенденция перехода от рассмотрения особенностей АСУТП, характерных

именно для металлургии, к вопросам интеграции АСУТП с системами верхнего уровня предприятия.

К сожалению не все материалы, поступившие в редакцию по рассматриваемой теме, удалось представить в этом номере. В ближайших выпусках журнала обсуждение будет продолжено.

А сегодняшняя дискуссия завершается подборкой статей об использовании программных и технических решений на предприятиях металлургической отрасли, опубликованных в разделе "Применение средств автоматизации".