

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКОЙ ПОЛОС****А. Л. Генкин, И. В. Никулина (Москва)**

В условиях резкого и часто непредсказуемого изменения цен на металл и энергоресурсы использование инновационных технологий управления в черной металлургии позволяет существенно повысить эффективность производства и, соответственно, конкурентоспособность выпускаемой металлопродукции. В Институте проблем управления РАН (ИПУ РАН) на протяжении многих лет ведутся исследования и разработки передовых наукоемких технологий в области автоматизации черной металлургии и, в частности, в области управления производством горячекатаных полос [1]. В основе исследований лежит тот общеизвестный факт, что одновременная разработка модели нового технологического процесса и системы управления им позволяет выявить дополнительные нюансы объекта и тем самым повысить качество управления. С учетом изложенного, основополагающий принцип этих разработок – исследование существующих технологий и способов управления ими, создание новых методов и систем управления, реализация идей в виде математического и программного обеспечения.

Современное производство горячекатаных полос (основного вида продукции металлургического завода) осуществляется в листопрокатном комплексе (ЛПК), включающем печи для нагрева металла, черновую и чистовую группы клетей для прокатки полос.

Анализ известных разработок показал, что применительно к ЛПК «печи – стан» имеются две проблемы дальнейшего повышения эффективности производства:

- недостаточное использование скоростных возможностей стана при обеспечении высокого качества проката;
- высокая энергоемкость листопрокатного комплекса, отсутствие теоретического обоснования принципов энергосбережения.

В условиях реального функционирования такого сложного технологического объекта, как современный ЛПК, математическое моделирование является эффективным методом определения характеристик объекта и его элементов, состояния и взаимосвязи между ними [2, 3]. В то же время использование известных математических моделей, алгоритмов и систем управления не позволяет осуществить дальнейшее совершенствование управления производством горячекатаных полос. В связи с этим и возникла необходимость разработки новых технологий и систем управления ими, обеспечивающих повышение эффективности производства и качества горячекатаной продукции.

По функциональному признаку технологическая линия «нагрев слябов – горячая прокатка полос» может быть разделена на отдельные участки обработки металла (нагревательные печи, черновая и чистовая группы клетей), а система управления ЛПК «печи – стан» – на отдельные подсистемы управления ими. Для согласованного функционирования отдельных подсистем необходимо установить возможные варианты реализации управления этими подсистемами, связь между ними и выбрать структуру системы управления, отвечающую требованиям максимальной эффективности.

Цель управления участком печей заключается в обеспечении заданных значений температуры металла на выходе из печи и ее производительности. Управляющими воздействиями являются распределение температуры по зонам печи и темп выдачи металла из печи.

Управление черновой группой должно обеспечить необходимые температуру и толщину подката в чистовую группу. Поскольку скорость прокатки в черновых клетях обычно неизменна, в качестве управляющего воздействия может быть принято пере-

распределение обжатий в клетях или проходах (при наличии в линии прокатки реверсивной клетки) при заданных значениях температуры и толщины сляба.

Процесс прокатки в чистовой группе является завершающим этапом обработки горячекатаной полосы, формирующим ее основные показатели качества: продольный и поперечный профиль, форму, физико-механические свойства металла. В связи с этим управление чистовой группой должно обеспечить заданные температуру, профиль и форму полосы, неизменные как по длине полосы, так и в пределах партии полос данного типоразмера. Управляющими воздействиями являются изменения скорости прокатки, положения нажимных устройств в чистовых клетях и температуры подката на входе в чистовую группу.

С учетом классификации издержек производства горячекатаной полосы на постоянные и переменные, возможны два основных подхода к их снижению:

1. Разработка и использование способов, алгоритмов и систем управления, предназначенных для повышения пропускной способности ЛПК «печи – стан» (снижение удельных постоянных издержек).

2. Разработка методов снижения удельных энерго- и ресурсозатрат в ЛПК «печи – стан» при производстве металлопродукции (сокращение удельных переменных издержек).

Использование первого подхода к снижению издержек основано прежде всего на увеличении средней скорости прокатки в чистовой группе клетей, поскольку производительность чистовой группы, как правило, ниже производительности черновой группы и печного участка. Однако возможное увеличение скорости прокатки в чистовой группе сопровождается нежелательным повышением температуры металла в конце прокатки, что сопряжено с ухудшением физико-механических свойств горячекатаной полосы. С учетом изложенного предложено в качестве дополнительного способа снижения температуры металла принудительно охлаждать полосу водой в межклетевых промежутках чистовой группы стана.

Реализация второго подхода к снижению издержек заключается в решении проблем, возникающих в процессе обработки металла в ЛПК «печи – стан» и связанных с возможностью снижения удельных энерго- и ресурсозатрат при производстве горячекатаной полосы. Для этого перераспределяются обжатия в черновых клетях таким образом, чтобы суммарные затраты на топливо (газ) при нагреве металла в печах и электроэнергию при прокатке полосы были минимальными.

В формализованном виде ЛПК «печи – стан» как объект управления может быть представлен в виде последовательного соединения  $k$  звеньев, каждое из которых характеризуется фазовым вектором  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$   $n$ -мерного фазового пространства [3]. Координаты вектора фазового состояния каждого  $i$ -го звена – геометрические, теплотехнические и энергосиловые параметры прокатки, которые должны подчиняться условию фазового ограничения  $x \in \Omega$ , где множество  $\Omega$  – совокупность допустимых фазовых состояний  $i$ -го звена.

Управление процессом состоит из совокупности управлений для каждого  $i$ -го звена (прокатной клетки):

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_k),$$

а управляющие воздействия должны принадлежать допустимой области управлений  $u \in U$ .

Ограничения, которые должны быть удовлетворены при управлении нагревом металла в печи: предельно возможный расход газа, нижнее и верхнее ограничения производительности печи, допустимая температура нагрева металла, допустимый перепад температуры по сечению сляба. Область допустимых управлений в клетях определена

ограничениями на энергосиловые параметры оборудования, а также условиями захвата металла валками и длиной межклетевых рольгангов.

С учетом специфики прокатного производства выбор критерия оптимальности сводится к нахождению функционала, определяющего экономическое состояние производства при соблюдении требований к качеству горячекатаной продукции (геометрические размеры и физико-механические свойства металла). В группу ограничений вводятся также требования, обусловленные предельными значениями параметров технологического процесса, конструктивными характеристиками агрегатов и их компоновкой. Учитывая многомерность решаемой задачи, основными способами ее решения являются эвристические подходы.

Критерию эффективности производства при управлении температурно-скоростным режимом прокатки в чистовой группе клетей с принудительным межклетевым охлаждением металла в качестве управляющего воздействия отвечает следующая целевая функция:

$$I = c_1 I_1 + c_2 I_2 - c_3 I_3 = c_1 \frac{1}{L_{\text{пол}}} \int_0^{L_{\text{пол}}} |T_{\text{кп}}^* - T_{\text{кп}}(l)| dl + c_2 \frac{1}{\tau_{\text{ц}}} \int_0^{\tau_{\text{ц}}} G_{\text{уд}}(\tau) F d\tau - c_3 \frac{q}{\tau_{\text{ц}}} \int_0^{\tau_{\text{ц}}} V(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $T_{\text{кп}}^*$  и  $T_{\text{кп}}(l)$  – заданное и текущее значения температуры конца прокатки по длине полосы  $l$ ;  $L_{\text{пол}}$  – длина полосы;  $\tau_{\text{ц}}$  – время цикла прокатки;  $G_{\text{уд}}(\tau)$  – текущее значение удельного расхода воды;  $F$  – суммарная площадь охлаждения металла в межклетевых промежутках;  $q$  – погонная масса полосы;  $V(\tau)$  – текущее значение скорости прокатки;  $c_1$ – $c_3$  – весовые коэффициенты.

Величина  $I_1$  определяет качество управления, т. е. характеризует среднее отклонение температуры от заданного значения на единицу длины полосы. Величины  $I_2$  и  $I_3$  определяют эффективность управления, при этом  $I_2$  – среднечасовой расход воды при принудительном охлаждении,  $I_3$  – среднечасовая производительность чистовой группы стана. Таким образом, оптимальным по указанному критерию будет управление процессом прокатки, позволяющее максимально улучшить качество произведенной продукции, определяющее ее цену, и уменьшить расходы цеха на производство.

Целью энергосберегающего управления в ЛПК «печи – стан» является расчет температуры нагрева сляба в печи путем выбора допустимых управляющих воздействий  $u$  в каждом  $i$ -м звене с учетом ограничений, накладываемых на координаты вектора фазового состояния звена. Для того чтобы управление было оптимальным, критерий оптимальности должен быть представлен в виде минимума суммарных удельных (на единицу массы металла) затрат на нагрев и прокатку металла:

$$Z_{\text{т}} + Z_{\text{э}} + Z_{\text{ок}} \rightarrow \min. \quad (2)$$

$Z_{\text{т}} = C_{\text{т}} R_{\text{т}}$ ,  $Z_{\text{э}} = C_{\text{э}} P_{\text{э}}$ ,  $Z_{\text{ок}} = C_{\text{ок}} R_{\text{ок}}$ , где  $Z_{\text{т}}$ ,  $C_{\text{т}}$  и  $R_{\text{т}}$  – затраты, цена и расход топлива в нагревательных печах;  $Z_{\text{э}}$ ,  $C_{\text{э}}$  и  $P_{\text{э}}$  – затраты, цена и расход электроэнергии в прокатных клетях;  $Z_{\text{ок}}$ ,  $C_{\text{ок}}$  и  $R_{\text{ок}}$  – затраты, цена и расход металла, ушедшего в окалину при его нагреве в печах. Цель управления – расчет температуры нагрева сляба в печи  $T_{\text{сл}}$  путем выбора допустимых управляющих воздействий  $u$  в каждом  $i$ -м звене с учетом ограничений, накладываемых на координаты вектора фазового состояния звена.

В ИПУ РАН при создании АСУТП листопрокатного производства разработана имитационная система, охватывающая участки нагрева металла и его прокатки на листовых станах (с различными технологическими схемами и составами оборудования). Для синтеза системы разработаны специальная методика имитационного моделирова-

ния и принципы формирования имитационных систем, ориентированные на решение задач анализа и синтеза вариантов автоматизированных технологических комплексов современного металлургического производства [4].

Принятая за основу для расчетов математическая модель элементарного звена (прокатной клетки) представляет собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих основные процессы формоизменения и теплопередачи при изменении температуры металла на входе звена, толщины и скорости раската на входе и выходе звена [3]. Выходным параметром является температура металла на выходе звена. Система дополнена специфическими формулами, определяющими энергетическое состояние звена при изменении параметров прокатки. Проведена проверка адекватности разработанной модели реальному процессу на основе экспериментальных исследований на действующих прокатных станах. По результатам проверки скорректированы численные значения отдельных коэффициентов модели для условий прокатки различных типоразмеров полос.

С использованием математической модели прокатной клетки синтезирована модель технологической линии «нагрев слябов – горячая прокатка полос». Затем осуществлялась имитация на компьютере различных режимов нагрева и прокатки металла на отдельных участках ЛПК «печи – стан» с использованием управляющих воздействий, описанных выше.

В результате имитационного моделирования управления процессом прокатки в чистовой группе с использованием принудительного межклетевого охлаждения в соответствии с критерием оптимальности (1) определена структура и численные значения параметров прогнозирующей математической модели, представленной в виде комплекса зависимостей, определяющих условия принудительного охлаждения различных участков полосы при различных скоростных режимах.

Имитационное моделирование энергосберегающих режимов в ЛПК «печи – стан» в соответствии с критерием оптимальности (2) позволило определить границы возможных управлений для различных режимов исходной настройки ЛПК. Для определения в интерактивном режиме оптимальных управляющих воздействий, обеспечивающих сокращение издержек производства, разработан программно-алгоритмический комплекс СУЭТ. Описанные разработки реализованы в виде математического и программного обеспечения систем управления реальными ЛПК, а также в учебном процессе.

Разработанные технологии являются, безусловно, инновационными, так как им присущи три обязательных свойства инноваций [5]: научно-техническая новизна, производственная применимость, коммерческая реализуемость. В процессе своего жизненного цикла разработки прошли фазу определения **концепции**, в ходе которой были выполнены научные и патентные исследования. Затем на фазе **разработки** наукоемкие исследования воплотились в математическое и программное обеспечение для АСУТП ЛПК «печи – стан». Далее, на фазе **реализации**, осуществлялась разработка эскизной, технической и рабочей документации на систему. И, наконец, на фазе **завершения** разработанная документация была сдана заказчику и проведены приемо-сдаточные испытания системы.

### Заключение

В 2001 г. комплекс разработок «Инновационные компьютерные технологии модернизации основных технологических комплексов черной металлургии с целью обеспечения энерго- и ресурсосбережения и повышения качества металлопродукции», выполненный на основе описанных выше подходов, был удостоен золотой медали и диплома на Первом Международном салоне инноваций и инвестиций (Москва).

**Литература**

1. **Генкин А. Л., Шаталов Р. Л.** Развитие и реализация идей автоматизации прокатного производства в Институте проблем управления // *Металлург.* 2011. № 6. С. 94–98.
2. **Прудковский Б. А.** Зачем металлургу математические модели? М.: URSS, 2008. 200 с.
3. **Шаталов Р. Л., Генкин А. Л.** Автоматизация процесса горячей прокатки плоского металла. М.: Издательство МГОУ, 2009. 256 с.
4. **Власов С. А., Генкин А. Л., Никулина И. В.** Интегрированное управление автоматизированными комплексами металлургического производства на основе имитационного предсказательного моделирования // *Имитационное моделирование. Теория и практика: Труды IV Всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2009.* СПб.: ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2009. Т. II. С. 48–52.
5. *Инновационный менеджмент. Учебник / Под ред. С.Д. Ильенковой, 3-е изд.* М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 335 с.