

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫМ КОМПЛЕКСОМ.

Ч. 1

А. Л. Генкин, А. Р. Куделин

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

Рассмотрены теоретические основы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом «печи—стан», отличительная особенность которого заключается в перераспределении энергии между отдельными участками технологической линии.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая сверхдержава, которой хочет стать и отчасти уже является Россия, должна не только интенсифицировать производство энергоресурсов, но и стремиться к сокращению энергопотребления в различных отраслях промышленности. Metallургическая промышленность — одна из наиболее энергоемких отраслей, в связи с чем экономия энергоресурсов является приоритетной задачей при автоматизации металлургических заводов. Актуальность решения этой задачи особенно возросла после принятия в 1996 г. Федерального Закона «Об энергосбережении», направленного на создание экономических и организационных условий для эффективного использования энергоресурсов посредством разработки энергоэффективных технологий и систем автоматизированного управления энергопотреблением.

За рубежом экономия энергетических и материальных ресурсов также является одной из важнейших задач при автоматизации металлургических заводов и, в частности, при управлении листовыми станами горячей прокатки [1, 2].

В настоящей работе из множества энергоемких объектов черной металлургии рассматривается класс объектов, общим для которых является наличие агрегата для нагрева металла и клетей для прокатки нагретого металла. При производстве горячекатаного листа — основного вида продукции металлургического завода — такой объект называется листопрокатным комплексом (ЛПК) и включает в себя печи для нагрева металла, черновую и чистовую группы клетей для прокатки листа. Энергосберегающее управление ЛПК — совокупность мер, направленных на эффективное использование энергоресурсов при нагреве и прокатке металла. Проблемы энергосберегающего управления выбранным объектом заключаются в отсутствии до настоящего времени тео-

ретического обоснования принципов энергосбережения, а также систем, позволяющих реализовать энергосберегающие принципы и технологии.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫМ РЕЖИМОМ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС

Цель обработки металла в ЛПК состоит в получении горячекатаной полосы определенной толщины и ширины с заданными физико-механическими свойствами. Для этого заготовки (слябы) нагревают на участке нагревательных печей до температуры, обеспечивающей возможность дальнейшей деформации металла, а затем прокатывают слябы последовательно в черновой и чистой группам клетей. Типовой печью на широкополосных станах горячей прокатки является многозонная методическая печь толкательного типа. Участок нагревательных печей содержит обычно три—пять печей. Черновая прокатка слябов осуществляется в четырех—шести последовательно расположенных клетях или за соответствующее число проходов при наличии в линии прокатки реверсивной клетки. Чистовая прокатка полос осуществляется непрерывно в шести—семи последовательно расположенных клетях.

Рассматривая листопрокатный комплекс как объект управления организационно-технологическими системами, можно выделить основные участки обработки металла в технологической линии «нагрев слябов — горячая прокатка полос»: 1) нагревательные печи; 2) черновая группа клетей; 3) промежуточный рольганг; 4) чистовая группа клетей. Параметрами, координирующими функционирование этих участков, являются температура и толщина, соответственно: $T_{сл}$ и $H_{сл}$ — сляба на выходе из печного участка; $T_п$ и $H_п$ — подката на выходе черновой группы клетей; $T_ч$ и $H_ч$ — подката на выходе проме-



жуточного рольганга (на входе в чистовую группу клетей). Эти координирующие параметры являются выходными для соответствующего участка и входными для следующего по ходу прокатки участка. Температура $T_{\text{кп}}$ и толщина h на выходе из чистовой группы клетей являются выходными параметрами, определяющими качество горячекатаной полосы. На промежуточном рольганге толщина подката не изменяется, т. е. $H_{\text{п}} = H_{\text{ч}}$.

По мере продвижения металла в рассматриваемой линии на отдельных ее участках имеют место различные энергозатраты. При нагреве металла в печи перед прокаткой расход топлива (газа) зависит, в основном, от параметров сляба и темпа выдачи слябов из печи. Прокатка раската в клетях черновой и чистовой групп сопровождается существенным расходом электроэнергии на деформацию металла. Тепловые потери металла в межклетевых промежутках и на промежуточном рольганге обусловлены излучением и конвекцией и зависят от скорости прокатки и толщины раската.

Управление каждым из рассмотренных участков осуществляется с помощью соответствующей автоматизированной системы. Цель создания энергосберегающей системы управления температурно-деформационным режимом в широкополосном стане горячей прокатки состоит в исходной настройке отдельных подсистем в соответствии с выбранным критерием оптимальности и их координации в зависимости от сложившейся производственной ситуации.

Оптимальная исходная настройка стана на прокатку заданного типоразмера полос подразумевает управление температурно-деформационным режимом обработки металла с заданными значениями $H_{\text{сл}}$, $H_{\text{п}}$, h и ширины сляба B , практически неизменной в линии прокатки. Температура металла в ключевых точках технологической линии может изменяться в определенных пределах, обеспечивая требуемые показатели качества полосы на выходе из стана и являясь наиболее важным контролируемым параметром, обеспечивающим эффективную координацию подсистем управления отдельными участками технологической линии.

Снижение температуры нагрева слябов позволяет уменьшить время нагрева, благодаря чему сокращается угар металла в печи и представляется возможным уменьшить расход топлива. Изменение температуры раската вызывает изменение энергосиловых параметров прокатки в клетях и, следовательно, влияет на потребляемую электродвигателями главного привода мощность и расход электроэнергии на прокатку.

Таким образом, основным фактором, определяющим непроизводительные затраты в производстве горячекатаного листа, являются тепловые потери на всех стадиях нагрева и прокатки металла.

Известные методы снижения тепловых потерь при производстве горячекатаного листа можно классифицировать по двум направлениям [3]:

1) методы, обеспечивающие снижение тепловых потерь благодаря дополнительному оборудованию и совершенствованию технологического процесса «нагрев слябов — горячая прокатка полос»;

2) методы, позволяющие управлять температурой металла путем оптимизации температурно-деформационного режима прокатки.

К первому направлению относятся методы снижения тепловых потерь при транспортировке металла в

линии стана, а также использование тепла предыдущих переделов, в частности, установка теплозащитных экранов, перемоточных устройств на промежуточных рольгангах, дополнительной клетки перед чистовой группой, применение прямой прокатки без промежуточного нагрева и т. п.

Характерным для методов второго направления является перераспределение энергии между отдельными участками технологической линии «нагрев слябов — горячая прокатка полос», а их реализация осуществляется в системах оптимизации технологического процесса с учетом ограничений, обусловленных качеством готовой продукции и энергосиловыми характеристиками агрегатов. Одним из наиболее эффективных методов этого направления является изменение режима обжатий в прокатных клетях.

Как показал анализ, эффективность методов снижения энергозатрат первого и второго направлений примерно одинакова, однако капитальные затраты для реализации методов второго направления существенно ниже, в связи с чем они более предпочтительны [3].

Определение критерия оптимальности исходной настройки стана осложняется многообразием требований, предъявляемых к обработке металла на различных участках технологической линии. С учетом специфики прокатного производства выбор критерия оптимизации сводится к нахождению функции, определяющей 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. Основные критерии оптимальности при управлении процессом прокатки на различных участках технологической линии следующие.

- Максимальная производительность стана. Реализация этого критерия требует четкой координации пропускной способности различных звеньев технологической линии (нагревательных печей, черновой и чистовой групп клетей).
- Минимальный расход топлива в печах. Обеспечивает оптимальный режим нагрева металла при заданной температуре $T_{\text{сл}}$. Минимально допустимая температура нагрева металла в печах всегда соответствует минимальным затратам на нагрев металла.
- Минимальный расход электроэнергии в главных приводах прокатных клетей. Этот критерий может быть использован при невозможности изменения температуры нагрева металла или в иных специфических ситуациях. С повышением температуры $T_{\text{сл}}$ расход электроэнергии в клетях уменьшается.
- Минимальные суммарные затраты на нагрев и прокатку металла. В критерий включаются затраты на топливо в печах при нагреве слябов перед прокаткой и на электроэнергию в главных приводах прокатных клетей с учетом дополнительных потерь металла при его нагреве.

В определенных ситуациях может возникнуть необходимость использования критериев равномерной загрузки клетей, прокатки с фиксированной температурой

на входе и выходе из группы клетей, минимизации потерь тепла и др.

Отметим, что те или иные критерии могут быть реализованы в зависимости от возможностей оборудования на соответствующих участках технологической линии. Так, например, отсутствие в нагревательных печах возможности дифференциации нагрева (изменения $T_{сл}$ в зависимости от параметров сляба) не позволяет уменьшить $T_{сл}$ и, тем самым, сократить расход топлива и угар металла при его нагреве; эффективное снижение тепловых потерь на промежуточном прокатном рольганге может быть обеспечено лишь при его оборудовании теплоизолирующими экранами.

Анализ энергетических потерь в линии широкополосных станов горячей прокатки показал, что основными статьями расходов в ЛПК «печи—стан» являются расход топлива при нагреве металла в печах и электроэнергии в главных приводах прокатных клетей, а также потери металла на окалину при его нагреве [4]. Учитывая примерно равноценную эффективность обоих методов снижения энергозатрат и существенно более низкие капитальные затраты при реализации методов второго направления, следует отдать предпочтение разработке систем управления ЛПК по экономическому критерию.

2. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ «НАГРЕВ СЛЯБОВ — ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА ПОЛОС»

Разработка энергосберегающей системы управления должна предваряться созданием адекватной математической модели объекта управления (ЛПК «печи—стан»), состоящего из нагревательных печей и прокатных клетей.

В Институте проблем управления РАН еще в первой половине 1970-х гг. профессором А. Б. Челюсткиным была поставлена задача исследования широкополосного стана как объекта управления температурным режимом горячей прокатки полос [5—8]. В результате были построены математические модели, предназначенные как для исследования изменения параметров прокатки, так и для разработки алгоритмов управления соответствующими параметрами. Точность полученных моделей позволяет адекватно оценивать изменение параметров процесса в условиях их широкого варьирования.

В качестве элементарного звена принимается прокатная клеть с прилегающим к ее входу промежуточком. Для первой клетки черновой группы, ближайшей к нагревательным печам, этим промежуточком является печной рольганг, для первой клетки чистовой группы — промежуточный рольганг, для остальных клетей — межклетевые рольганги.

Математическая модель элементарного звена 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 [7]. Выходным параметром является температура металла на выходе звена. Система дополнена специфическими формулами, определяющими энергетическое состояние звена при изменении параметров прокатки.

Моделирование нагрева металла в печи и расчет технико-экономических показателей нагрева и прокатки металла выполнены с помощью методики, изложенной в работе [9].



Рис. 1. Схема нагрева и черновой прокатки

В качестве объекта моделирования рассмотрим часть технологической линии, включающую в себя нагревательные печи и черновую группу клетей (рис. 1). Слябы шириной B и толщиной $H_{сл}$ нагреваются в печи до температуры $T_{сл}$ и затем прокатываются в клетях черновой группы от толщины $H_{сл} = h_1'$ на входе в черновую группу до толщины подката $H_{п} = h_k$ на выходе последней k -й клетки черновой группы, причем температура раската меняется от T_1' на входе в черновую группу до температуры подката $T_{п} = T_k$ на выходе из нее. Отметим, что толщина раската на входе в i -ю клетку равна толщине на выходе предыдущей $(i - 1)$ -й клетки, т. е. $h_i' = h_{i-1}$, $1 < i \leq k$; скорость прокатки раската в i -й клетке V_i постоянна и зависит от номера клетки.

С учетом изложенного, в формализованном виде черновая группа клетей может быть представлена в виде последовательного соединения k звеньев, каждое из которых характеризуется фазовым вектором

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

n -мерного фазового пространства [10]. Координаты вектора фазового состояния i -го звена — геометрические, теплотехнические и энергосиловые параметры прокатки, которые должны подчиняться условию фазового ограничения $x \in \Omega$, где множество Ω — совокупность допустимых фазовых состояний i -го звена.

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

$$u = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_k), \quad (2)$$

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

Область допустимых управлений в клетях определена ограничениями на усилия и моменты прокатки, мощность главного привода клетей, а также условиями захвата металла валками и длиной межклетевых рольгангов.

К управляющему воздействию относится также изменение температуры нагрева сляба $T_{сл}$, ограниченной сверху условиями оплавления металла в печи, а снизу — возможностью безаварийной прокатки недостаточно нагретого металла.

Цель управления состоит в расчете температуры $T_{сл}$ 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, необходимо определить критерий оптимальности.

Из теории и технологии прокатки известно, что при заданной температуре подката $T_{п}$ минимальный расход топлива обеспечивается при наиболее низкой темпера-



туре нагрева сляба в печи $T_{сл}$. Наоборот, минимальный расход электроэнергии имеет место при максимально возможной температуре прокатываемого металла. В общем случае критерий оптимальности может быть представлен в виде суммарных удельных (на единицу массы металла) затрат на нагрев и прокатку металла:

$$Q = Z + \sum_{i=1}^k \varphi(x_i, u_i), \quad (3)$$

где $Z = f(T_{сл}, H_{сл}, B)$ — удельные затраты на нагрев металла и его потери вследствие угара в печи; $\varphi(x_i, u_i)$ — удельные затраты на электроэнергию в i -м звене, вектор x фазового состояния которого определен выражением (1), а управляющее воздействие u — выражением (2).

С учетом изложенного, оптимальными будут такие управления $T_{сл}$ и u , которые обеспечивают минимум функционала (3).

Можно видеть, что управляемый процесс естественным образом разбивается на k шагов, а критерий оптимальности Q зависит от совокупности шаговых управлений. Моделирование энергосберегающего управления осуществляется с помощью метода покоординатного спуска, представляющего собой итеративную процедуру, в которой переходят шаг за шагом от одного допустимого решения к другому так, что значение целевой функции улучшается.

Расчет состоит из k этапов, соответствующих k звеньям черновой группы, и производится против хода прокатки, т. е. от k -го звена к первому. Задается начальное состояние процесса: $H_{сл}, H_{п}, T_{п}$, начальные значения толщин на выходе каждой i -й клети h_i , другие параметры клетей и межклетевых рольгангов, а также область допустимых управлений. На k -м этапе рассчитываются параметры прокатки, соответствующие начальному состоянию процесса, и начальное состояние целевой функции Q_0 . На всех остальных этапах, вплоть до первого, изменяется толщина раската на выходе из клети, номер которой соответствует номеру этапа. Толщина раската на выходе остальных клетей остается неизменной. По окончании расчета параметров прокатки во всех клетях в рассмотренном i -м этапе определяется значение функции цели, которое сравнивается с ее предыдущим значением. Если новое значение функции цели больше предыдущего, толщина раската на выходе i -й клети изменяется в противоположную сторону, и i -й этап повторяется заново. Если новое значение функции цели меньше предыдущего, расчет этапа с изменением толщины раската в i -й клети в том же направлении повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто ограничение по какому-либо параметру в клети или минимум функции цели.

Окончание расчета всех k этапов соответствует одному циклу. Число циклов повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто равенство (с определенной точностью) значений функции цели в двух последовательных циклах. Полученная в результате моделирования последовательность решений, минимизирующая критерий оптимальности (3), является оптимальной стратегией управления для энергосберегающего режима и представляет собой распределение толщин на выходе каждой клети $h = (h_1, \dots, h_p, \dots, h_k)$ и оптимальную по критерию (3) температуру нагрева сляба в печи $T_{сл}$ (см. рис. 1).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ результатов моделирования показал, что для каждого типоразмера прокатываемого металла (по толщине сляба $H_{сл}$ и подката $H_{п}$, ширине сляба B) может быть определена область допустимых управлений, схематично представленная на рис. 2 [10, 11]. В координатах ($T_{п}, T_{сл}$) эта область ограничена треугольником, сторона ab которого соответствует прокатке с максимально возможной для данного типоразмера температурой нагрева сляба $T_{сл}$, сторона ac — прокатке с минимально возможной температурой $T_{сл}$, а сторона bc — максимально возможной $T_{сл}$ по условиям оплавления металла в печи $T_{сл}^{max}$. Иными словами, каждому типоразмеру соответствует некоторая область изменения координат $T_{п}$ и $T_{сл}$, внутри и на границах которой может быть осуществлена прокатка, а вне ее пределов прокатка данного типоразмера невозможна.

Так, например, для обеспечения $T_{п} = T_{п}^*$ температура сляба должна удовлетворять следующему неравенству:

$$T'_{сл} \leq T_{сл} \leq T''_{сл},$$

где $T'_{сл}$ и $T''_{сл}$ — соответственно, минимально и максимально возможные для данного типоразмера температуры нагрева слябов.

Если допустить $T_{сл} < T'_{сл}$, то для данного типоразмера невозможно обеспечить $T_{п} = T_{п}^*$. В этом случае будет иметь место $T_{п} < T_{п}^*$. И, наоборот, если $T_{сл} > T''_{сл}$, то также невозможно обеспечить $T_{п} = T_{п}^*$ ($T_{п} > T_{п}^*$).

Можно видеть (см. рис. 2), что для определенного типоразмера металла имеют место две экстремальные точки [11]. Первая из них определяется координатами ($T_{п}^{min}, T_{сл}^{min}$). При нагреве сляба до температуры $T_{сл} < T_{сл}^{min}$ прокатка в черновой группе невозможна из-за перегрузки клетей. Вторая точка с координатами ($T_{п}^{max}, T_{сл}^{max}$) определяет максимально возможную тем-

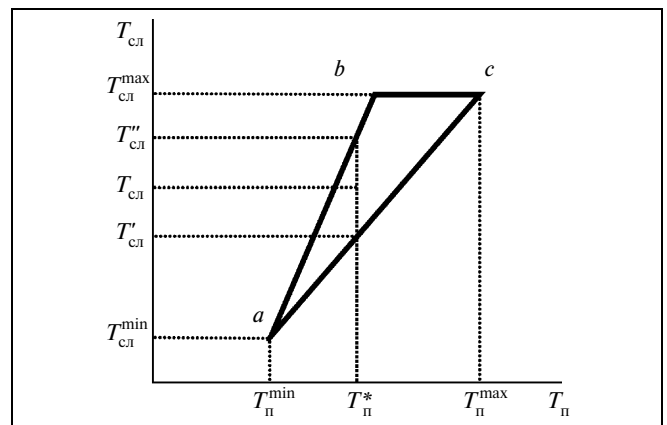


Рис. 2. Область допустимых управлений листопрокатным комплексом «печи—стан»

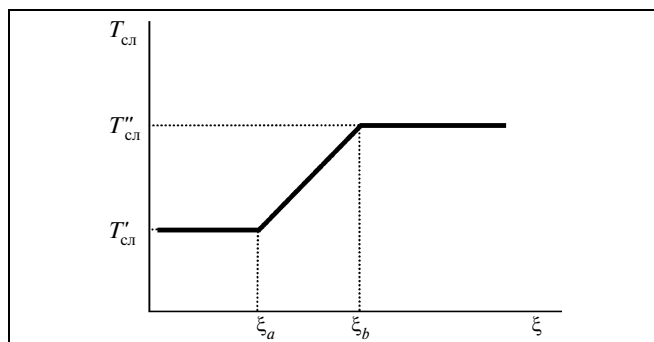


Рис. 3. Зависимость оптимальной температуры нагрева сляба $T_{сл}$ от соотношения цен на электроэнергию и топливо

пературу подката $T_{п}^{\max}$, которая может быть обеспечена при нагреве сляба до температуры $T_{сл}^{\max}$. Эта точка находится на рис. 2 пересечением зависимости $T_{сл} = f(T_{п})$, соответствующей прокатке с минимально возможной температурой $T_{сл}$ и максимально возможной по условиям оплавления металла температуры сляба $T_{сл}^{\max}$ (точка c на рис. 2).

Результаты моделирования энергосберегающего режима позволили выявить закономерность изменения энергетических расходов в зависимости от соотношения цен на электроэнергию $\Pi_{э}$ и топливо $\Pi_{т}$ [12]. В соответствии с этой закономерностью для каждого типоразмера прокатываемого металла на рис. 3 представлена зависимость температуры нагрева сляба $T_{сл}$, обеспечивающей минимальные суммарные энергозатраты на нагрев и прокатку металла при заданной температуре подката $T_{п}^*$, от соотношения цен $\xi = \Pi_{э}/\Pi_{т}$ [10].

При изменении ξ в диапазоне $\xi < \xi_a < \xi_b$ минимум энергозатрат обеспечивается минимизацией функционала (3). На участках $\xi < \xi_a$ и $\xi > \xi_b$ температура сляба достигает, соответственно, минимального $T'_{сл}$ и максимального $T''_{сл}$ значений (см. рис. 2). Режим управления на участке $\xi < \xi_a$ называется топливосберегающим и обеспечивает минимум удельных затрат на топливо при нагреве металла, а на участке $\xi > \xi_b$ — обеспечивает минимум удельных затрат на электроэнергию при прокатке металла и называется электросберегающим. В настоящее время соотношение цен ξ таково, что минимум суммарных удельных затрат на нагрев и прокатку металла обеспечивает топливосберегающий режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены методы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом «печи—стан», отличительная особенность которых состоит в перераспределении энергии между его отдельными участками. Разработана экономико-математическая модель технологической линии «нагрев слябов — горячая прокатка полос».

Сформулированы теоретические основы энергосберегающего управления ЛПК «печи—стан», в соответ-

ствии с которыми критерий оптимальности представлен в виде суммарных удельных (на единицу массы металла) затрат на нагрев и прокатку металла. Разработана методика расчета оптимальных управляющих воздействий. Выявлена закономерность изменения энергетических расходов в зависимости от соотношения цен на электроэнергию и топливо. Определены границы возможных управлений ЛПК.

Дальнейшее развитие теоретического обоснования и разработка принципов построения энергосберегающих систем управления ЛПК «печи—стан» будут рассмотрены во второй части статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кюттнер Г. Новые задачи автоматизации металлургических заводов // Steel Times International. — 1997. — Вып. 5. — С. 30—32.
2. Новая концепция контроля процесса нагрева слябов / А. Шутти, Э. Шиллер, А. Ортнер и др. // Черные металлы. — 2005. — № 3. — С. 31—36.
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. Программно-технический комплекс оптимального управления широкополосным станом горячей прокатки / А. А. Меленков, А. В. Зиле, Ю. П. Божко и др. // Сталь. — 1990. — № 8. — С. 47—51.
5. Челюсткин А. Б., Койнов Т. А., Генкин А. Л. Математическая модель и алгоритмы управления непрерывным широкополосным станом горячей прокатки // Динамическое моделирование и управление технологическими процессами с помощью ЭВМ: Тр. советско-финского симпозиума (Тбилиси, 12—19 декабря 1973 г.). — М.: ВЦ АН СССР, 1974. — Кн. 1. — С. 247—255.
6. Optimal control of hot strip mills according to economic criterion / A. V. Cheliustkin, G. G. Grigorian, A. A. Logovatosky, et al // Optimization methods (applied control): Preprints of the IFAC-IFORS symposium. — Varna, Bulgaria, 1974. — P. 427—432.
7. Челюсткин А. Б., Цифринович Б. А., Генкин А. Л. Изменение температуры горячекатаных полос в условиях принудительного межклетевого охлаждения // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1976. — № 1. — С. 100—105.
8. Койнов Т. А., Масальский Я. С., Челюсткин А. Б. Оптимальное управление производственным потоком технологического комплекса «непрерывная разливка стали — горячая прокатка полос» // Автоматика и телемеханика. — 1977. — № 1. — С. 168—178.
9. Интегрированное проектирование металлургических комплексов / С. А. Власов, С. А. Малый, В. С. Томашевская, А. И. Тропкина. — М.: Металлургия, 1983. — 144 с.
10. Генкин А. Л., Куделин А. Р., Масальский Я. С. Моделирование энергосберегающего управления листопрокатным комплексом // Тр. II Междунар. конф. SICPRO'03 / «Идентификация систем и задачи управления» / Ин-т пробл. упр. РАН. — М.: 2003. — С. 2399—2408.
11. Генкин А. Л. Принципы построения энергосберегающих систем управления листовыми станами горячей прокатки // Тр. Ин-та пробл. упр. РАН. — М., 1998. — Т. I. — С. 40—47.
12. Генкин А. Л., Куделин А. Р. Особенности моделирования энергосберегающих режимов управления горячей прокаткой полос // Тр. Ин-та пробл. упр. РАН. — М., 2000. — Т. VIII. — С. 71—76.

☎ (495) 334-87-59;

e-mail: genfone@ipu.rssi.ru

